

# KLÄRSCHLAMMENTSORGUNG

in der Bundesrepublik Deutschland



UMWELTBUNDESAMT | AUSGABE 2012 | KLÄRSCHLAMMENTSORGUNG IN DER BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND

Umwelt   
Bundesamt

**Autoren:**

*Dipl.-Ing. Benjamin Wiechmann*

*Dipl.-Ing. Claudia Dienemann*

*Dr. Christian Kabbe*

*M. Sc. Simone Brandt*

*Dr. Ines Vogel*

*Dr. Andrea Roskosch*

**Broschürenbestellung Anschrift:**

*Umweltbundesamt c/o GVP*

*Postfach 30 03 61 | 53183 Bonn*

*Die Broschüre ist kostenlos zu beziehen*

*Service-Telefon: 0340 2103-6688*

*Service-Fax: 0340 2104-6688*

*E-Mail: [uba@broschuerenversand.de](mailto:uba@broschuerenversand.de)*

**Internet:** [www.umweltbundesamt.de](http://www.umweltbundesamt.de)

**Impressum****Herausgeber:**

*Umweltbundesamt (UBA)*

*Postfach 1406*

*06844 Dessau-Roßlau*

*Telefax: (0340) 2103 2285*

*E-Mail: [info@umweltbundesamt.de](mailto:info@umweltbundesamt.de)*

*Internet: [www.umweltbundesamt.de](http://www.umweltbundesamt.de)*

**Stand:**

*01.09.2013*

**Gestaltung:**

*[www.publicgarden.de](http://www.publicgarden.de)*

*Gedruckt auf 100 % Altpapier*

# INHALT

Einführung	5
<b>01 Grundlagen</b>	<b>6</b>
↳ Was ist Klärschlamm?	6
↳ Wo fällt Klärschlamm an?	7
<b>02 Zusammensetzung von Klärschlamm</b>	<b>9</b>
↳ Schwermetalle im Klärschlamm	11
↳ Organische Verbindungen im Klärschlamm	13
↳ Krankheitserreger und Hygieneanforderungen am Beispiel EHEC	14
↳ Arzneimittelrückstände im Klärschlamm	16
<b>03 Schlammbehandlung</b>	<b>18</b>
<b>04 Thermische Klärschlammbehandlung</b>	<b>26</b>
↳ Monoklärschlammverbrennung	26
↳ Mitverbrennung von Klärschlamm	29
<b>05 Landwirtschaftliche Verwertung von Klärschlamm</b>	<b>33</b>
↳ Nährstoffe im Klärschlamm	34
↳ Schadstoffe im Klärschlamm	35
↳ Vor- und Nachteile der landwirtschaftlichen Klärschlammverwertung	38
<b>06 Phosphorrückgewinnung</b>	<b>39</b>
↳ Phosphorrückgewinnungspotentiale und -verfahren	40
↳ Deutschland auf dem Weg zum wirtschaftlichen Phosphorrecycling	43

---

---

<b>07 Klärschlammanfall, Entsorgung und Verwertung</b>	<b>47</b>
<b>08 Kosten der Klärschlammentsorgung</b>	<b>56</b>
<b>09 Zusammenfassung und Empfehlungen</b>	<b>59</b>
<b>10 Abbildungsverzeichnis</b>	<b>65</b>
<b>11 Tabellenverzeichnis</b>	<b>66</b>
<b>12 Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>68</b>
<b>13 Danksagung</b>	<b>71</b>
<b>14 Literaturverzeichnis</b>	<b>72</b>
<b>15 Anhang I</b>	<b>82</b>
<b>16 Anhang II</b>	<b>96</b>
↳ Relevante Rechtsvorschriften für die Klärschlammentsorgung	96
<b>17 Anhang III</b>	<b>102</b>
↳ Schwermetalle im Klärschlamm	102
<b>18 Anhang IV</b>	<b>104</b>

---

---

# EINFÜHRUNG

---

In Deutschland fallen jährlich etwa zwei Millionen Tonnen Klärschlammrockensubstanz aus kommunalen Kläranlagen an. Der Anteil von thermisch entsorgten Klärschlämmen stieg von 31,5% im Jahr 2004 auf über 54% im Jahr 2011 an.

Der Schlamm wird in der Regel verbrannt oder auf landwirtschaftliche Flächen ausgebracht. Klärschlamm enthält eine ganze Reihe von Schadstoffen, die eine Entsorgung mitunter erschweren. Daneben enthält er aber auch eine ganze Reihe von Nährstoffen wie Phosphor, Stickstoff oder Kalium. Die Herausforderung der Entsorgungswirtschaft ist es, die Schadstoffe aus dem Kreislauf zu entfernen und gleichzeitig die Nährstoffe zu erhalten. Thermisch entsorgt wird Klärschlamm zum Beispiel in Monoklärschlammverbrennungsanlagen, Zement- und Kohlekraftwerken.

Die Klärschlammverwertung in der Landwirtschaft stagniert in den letzten Jahren (2006 bis 2011) mit einem Anteil von rd. 29%, was an den steigenden Qualitätsanforderungen an die Klärschlämme liegt.

Die Bedeutung von Klärschlamm als Rohstoffquelle wird dennoch zunehmen. Nicht zuletzt weil darin größere Vorkommen an Phosphor stecken.

Ziel dieser Broschüre ist es, diese Potentiale von Klärschlamm aufzuzeigen und Möglichkeiten einer nachhaltigen Verwertung für die Zukunft darzulegen. Außerdem stellt sie den Stand der Entsorgung kommunaler Klärschlämme in der Bundesrepublik Deutschland dar. Ein Schwerpunkt liegt dabei auf der Fragestellung, inwieweit sich die landwirtschaftliche Klärschlammverwertung reduzieren lässt, ohne auf die im Klärschlamm enthaltenen Nährstoffe (insbesondere Phosphor) verzichten zu müssen. Die Herausforderung für Deutschland besteht in den nächsten 10-20 Jahren darin, aus der landwirtschaftlichen Klärschlammentsorgung auszusteigen und gleichzeitig das Potential des Klärschlammes zur kostengünstigen Düngung effizient zu nutzen.

# GRUNDLAGEN

## 01

### Was ist Klärschlamm?

In Deutschland verbraucht jeder Bundesbürger pro Tag etwa 120 Liter Wasser, welches anschließend als Abwasser in die Kanalisation gelangt und von dort in die angeschlossenen Kläranlagen. Durch das Durchlaufen von Rechen und Sieben sowie mechanischer und biologischer Reinigungsstufen wird das Abwasser hier von Schmutzstoffen befreit und anschließend als sauberes Wasser in die Gewässer geleitet. Übrig bleibt nur der sogenannte Klärschlamm.

Klärschlamm kann entwässert, getrocknet oder in anderweitig behandelter Form vorliegen. Rohschlamm ist Klärschlamm, der Abwasserbehandlungsanlagen unbehandelt entnommen wird.

Klärschlamm entsteht sowohl in kommunalen als auch in Industriekläranlagen. Für eine stoffliche Verwertung im Sinne der Klärschlammverordnung (AbfKlärV) sind in der Regel nur Klärschlämme aus kommunalen Kläranlagen geeignet. Als Klärschlamm im Sinne der Klärschlammverordnung gelten auch Klärschlammkomposte und Klärschlammgemische. Klärschlammgemische sind Mischungen aus Klärschlamm mit anderen geeigneten Stoffen nach Anlage 2 Tabellen 11 und 12 der Düngemittelverordnung. Klärschlammkom-

poste sind kompostierte Klärschlammgemische [ABFKLÄRV].

Klärschlämme können durch verschiedene physikalische, chemische und mikrobiologische Parameter beschrieben werden. Zur Charakterisierung bedient man sich daher so genannter Schlammkennwerte, die in Tabelle 1 dargestellt und erklärt sind. An dieser Stelle sei jedoch schon erwähnt, dass es neben den in der Tabelle genannten Parameter noch Weitere gibt (z. B. Schlammindex oder Faulzeit), die zur Beschreibung von Klärschlämmen in der Praxis benutzt werden.

Zum Beispiel deutet ein hoher Glühverlust auf einen hohen organischen Anteil im Klärschlamm hin. Die Verbrennung von Klärschlamm hat unter anderem die Aufgabe, die organische Substanz im Klärschlamm zu zerstören. Aus diesem Grund ist der Glühverlust ein wichtiger Parameter zur Beschreibung der Brennbarkeit des Klärschlammes. Weiterhin ist aber auch 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.

TABELLE 1: SCHLAMMKENNWERTE UND IHRE BEDEUTUNG [KOPP; RÄBIGER]

Kennwert	Einheit	Erklärung
Trockensubstanz (TS)	z. B.: kg, g, mg	Die nach einem festgelegten Trocknungsverfahren verbliebene Masse (Trockenmasse/-substanz) an Trockenschlamm. Bestimmung durch Abzug des Wassergehalts.
Trockensubstanzgehalt ( $TS_g$ )	z. B.: kg/m <sup>3</sup> , g/l	Die in einem bestimmten Volumen enthaltene Trockenmasse.
Trockenrückstand (TR)	%	Maß für den Gehalt an Feststoff der nicht abfiltrierten Schlammprobe bzw. der Anteil der Trockenmasse an der gesamten Schlammmasse. Bestimmung durch Verdampfung des Wassers.
Wasseranteil (WG)	%	Maß für den Gehalt an Wasser an der gesamten Schlammmasse. Bestimmung durch Verdampfung des Wassers
Glührückstand (GR)	%	Maß für den anorganischen bzw. mineralischen Anteil in der Trockensubstanz des Klärschlammes. Bestimmung durch Verglühen der TS.
Glühverlust (GV)	%	Anteil der organischen Substanz in der gesamten Trockensubstanz des Klärschlammes. Bestimmung durch Verglühen der TS
pH-Wert	-	Negativer dekadischer Logarithmus der Wasserstoffionenaktivität
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

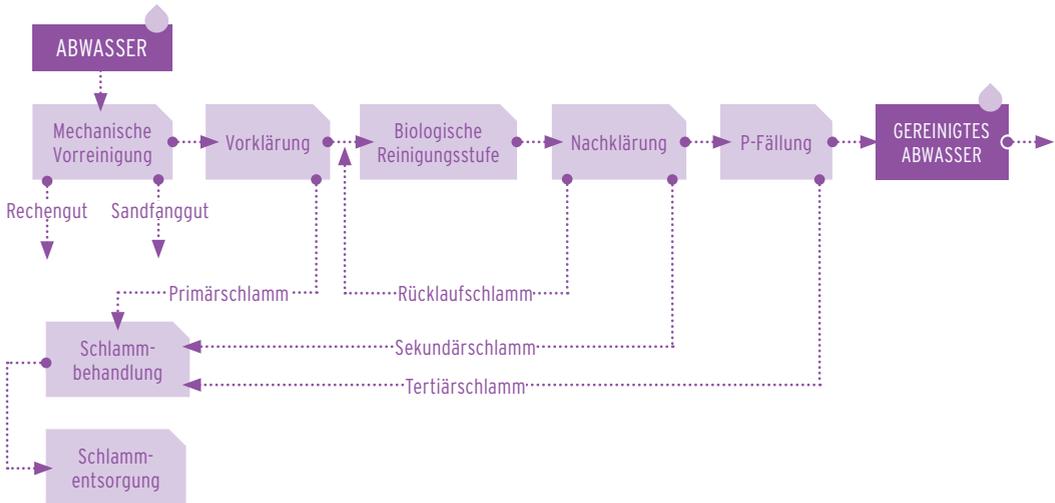
### Wo fällt Klärschlamm an?

Der Begriff „Klärschlamm“ ist ein Überbegriff, bei dessen Verwendung nicht nach Herkunft und Art des Schlammes unterschieden wird. Selbst getrockneter oder entwässerter Schlamm wird gemäß der AbfKlärV als Klärschlamm bezeichnet. Die nach Art und Zusammensetzung verschiedenen Rohschlämme, haben spezielle Bezeichnungen, je nachdem,

an welcher Stelle der Abwasserreinigungsanlage sie anfallen.

Die folgende Abbildung (Bild 1) zeigt die in einer Abwasserreinigungsanlage anfallenden Schlämme in Abhängigkeit von der Reinigungsstufe.

BILD 1: SCHLAMMANFALL IN ABHÄNGIGKEIT VON DER REINIGUNGSSTUFE [EIGENE DARSTELLUNG]



Als Rohschlämme bezeichnet man Primär-, Sekundär- und Tertiärschlämme in jeder beliebigen Mischung, die in einer Kläranlage anfallen. Rohschlämme sind unbehandelte Schlämme vor einer Stabilisierung.

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, Obstreste, Papier, Korke, Toilettenpapier etc. und geht nach der Entnahme aus dem System ohne weitere Behandlung schnell in Fäulnis mit entsprechender Geruchsbelästigung über.

In der biologischen Stufe anfallender Schlamm, der Sekundärschlamm oder auch Überschusschlamm genannt, ist durch mikrobiellen Zuwachs entstanden. Seine Farbe ist meist bräunlich und ist 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 kommunaler Abwasserreinigung anfallende Schlamm aus der Phosphatfällung (Ausscheidung von Phosphor aus einer Lösung durch Einsatz von Eisen- oder Aluminiumsalzen, oder auch Kalk) wird als Tertiärschlamm bezeichnet. Die Fällungsprozesse werden meist nicht in einer baulich getrennten Behandlungsanlage durchgeführt, sondern gemeinsam mit der Vorklärung oder biologischen Abwasser-

reinigung. Aus diesem Grund fallen Tertiärschlämme oftmals nicht getrennt, sondern als Gemisch mit Primär- oder Sekundärschlamm an. Seine Farbe hängt von der entsprechenden stofflichen Reaktion ab und er unterscheidet sich in seinen rein chemischen Eigenschaften deutlich von Primär- und Sekundärschlämmen. Für gewöhnlich ist dieser Schlamm stabil und bewirkt keine geruchsmäßige Belästigung. Weitere Schlammbezeichnungen sind Faul-

schlämme (Schlämme, die eine anaerobe Schlammstabilisierung durchlaufen oder durchlaufen haben) oder stabilisierte Schlämme (alle Schlämme, die ein Stabilisierungsverfahren, sei es biologisch oder chemisch, durchlaufen haben) [BISCHOFBERGER ET.AL.].

Eine Zusammenstellung aller mit der Entsorgung relevanten Rechtsvorschriften sind im Anhang II aufgelistet und werden dort auch kurz erläutert.

## ZUSAMMENSETZUNG VON KLÄRSCHLAMM

### 02

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 finden oder zu definieren.

Klärschlamm besteht zum größten Teil aus organischen Substanzen. Der Klärschlamm (also stabilisierter Primär-, Sekundär- und Tertiärschlamm, der als Gemisch am Ende der Klärkette entsteht) enthält neben Pflanzennährstoffen, wie Stickstoff und Phosphor auch organische Schadstoffe, z. B. hormonell

wirksame Substanzen, Schwermetalle und pathogene Organismen.

Die folgende Tabelle 2 enthält Merkmale zur Charakterisierung von kommunalem Klärschlamm. Die Daten stützen sich dabei auf eine Veröffentlichung der Deutschen Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (DWA) [vgl. DWA]. Weitere Werte lagen zur Zeit der Erstellung der Broschüre nur von einer Studie des Österreichischen Umweltbundesamtes vor. Diese wurden in der Tabelle zur Vervollständigung ergänzt.

TABELLE 2: ZUSAMMENSETZUNG DES KLÄRSCHLAMMES NACH [DWA] UND [OLIVIA ET.AL.]

Stoff	Einheit	Wertebereich nach DWA
pH-Wert	-	7,7*
Trockensubstanz	Gew-%	30,5*
Glühverlust (GV)	%	45-80**
Wasser	Gew-%	65-75
Flüchtige Bestandteile	Gew-%	30
Unterer Heizwert (Hu)	MJ/kg TM	10-12
Kohlenstoff (C)	%	33-50
Sauerstoff (O <sub>2</sub> )	%	10-20
Wasserstoff (H <sub>2</sub> )	%	3-4
Stickstoff (N <sub>2</sub> )	%	2-6
Schwefel (S)	%	0,5-1,5
Fluor (F <sub>2</sub> )	Gew-%	<0,01
Chlor (Cl <sub>2</sub> )	%	0,05-0,5
Phosphor (P)	g/kg	2-55
Antimon (Sb)	mg/kg TS	5-30
Arsen (As)	mg/kg TS	4-30
Blei (Pb)	mg/kg TS	70-100
Cadmium (Cd)	mg/kg TS	1,5-4,5
Chrom (Cr)	mg/kg TS	50-80
Kupfer (Cu)	mg/kg TS	300-350
Mangan (Mn)	mg/kg TS	600-1.500
Nickel (Ni)	mg/kg TS	30-35
Selen (Se)	mg/kg TS	1-5
Thallium (Th)	mg/kg TS	0,2-0,5
Vanadium (V)	mg/kg TS	10-100
Quecksilber (Hg)	mg/kg TS	0,3-2,5
Zink (Zn)	mg/kg TS	100-300
Zinn (Sn)	mg/kg TS	30-80
AOX	mg/kg TS	350
PCDD/F	mg/kg TS	0,000035
Molybdän (Mo)	g/kg TS	3,9*
Kobalt (Co)	g/kg TS	6,53*
Kalzium (Ca)	g/kg TS	71*
Kalium (K)	g/kg TS	2,63*
Magnesium (Mg)	g/kg TS	9,17*

\* Werte stammen aus [Oliva et. al.]; Median

\*\* Werte stammen aus [Oliva et. al.]

## Schwermetalle im Klärschlamm

Hauptquelle für Schwermetalle im kommunalen Klärschlamm sind der Austrag von Stoffen von künstlichen Oberflächen in Städten. So werden Blei, Cadmium Kupfer und Zink beispielsweise über Gebäudeflächen, Rohre, Bremsbeläge oder Stromleitungen ins Abwasser und damit in den Klärschlamm eingetragen [OLIVA ET.AL.]. Tabelle 3 enthält die Konzent-

rationen an Schwermetallen im Klärschlamm und deren Entwicklung über die letzten Jahre. Neuere Daten, die über das Jahr 2006 hinausgehen, liegen bisher noch nicht vor. Aufgelistet sind die durch die Klärschlammverordnung geregelten Schwermetalle in mg pro kg Trockensubstanz.

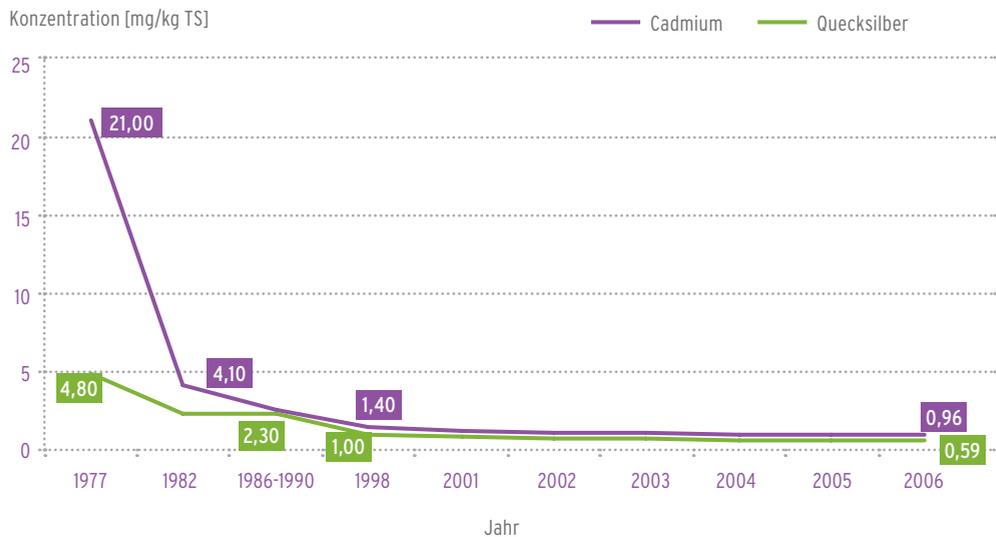
**TABELLE 3: KONZENTRATIONEN VON SIEBEN SCHWERMETALLEN, SOWIE VON STICKSTOFF UND PHOSPHOR IM KLÄRSCHLAMM ZWISCHEN 1977 UND 2006. [BMU]**

mg/kg Trockensub- stanz	1977	1982	1986- 1990	1998	2001	2002	2003	2004	2005	2006	Änderung von 1977 (=100%) auf 2006	Änderung von 2001 (=100%) auf 2006
<b>Blei</b>	220	190	113	63	53	50	48	44,3	40,4	37,2	-83,09	-29,81
<b>Cadmium</b>	21	4,1	2,5	1,4	1,2	1,1	1,1	1,02	0,97	0,96	-95,43	-20,00
<b>Chrom</b>	630	80	62	49	45	45	42	40,7	37,1	36,7	-94,17	-18,44
<b>Kupfer</b>	378	370	322	289	304	306	305	306,3	306,4	300,4	-20,53	-1,18
<b>Nickel</b>	131	48	34	27	27	27	27	25,8	25,2	24,9	-80,99	-7,78
<b>Quecksilber</b>	4,8	2,3	2,3	1	0,8	0,7	0,7	0,62	0,59	0,59	-87,71	-26,25
<b>Zink</b>	2.140	1.480	1.045	835	794	750	746	756,7	738,2	713,5	-66,66	-10,14
<b>N-gesamt</b>	k. A	k. A	k. A	k. A	39.357	38.846	40.328	42.025	42.457	43.943	k. A.	+11,65
<b>P-gesamt</b>	k. A	k. A	k. A	k. A	27.337	22.019	22.559	23.581	24.312	24.531	k. A.	-10,26

Tabelle 3 zeigt, dass die Konzentrationen der Schwermetalle Blei, Cadmium, Chrom, Quecksilber und Zink seit 1977 stetig abnehmen. Kupfer und Nickel schwanken nur leicht um einen konstanten Wert von 305 mg/kg TS bzw. 24 mg/kg TS. Auffällig ist, dass die Konzentration an Stickstoff in den letzten Jahren zugenommen hat. Die Konzentration an Phosphor

ist nach 2001 um etwa 10% zurückgegangen. In den nachfolgenden Abbildungen werden die Entwicklungen der oben dargestellten Klärschlammsschwermetallkonzentrationen von 1977 bis 2006 dargestellt. Bild 2 zeigt die Entwicklung der Gehalte von Cadmium und Quecksilber im Klärschlamm.

**BILD 2: KONZENTRATION VON CADMIUM UND QUECKSILBER IM KLÄRSCHLAMM [BMU]**



Die Abnahme von Quecksilber und Cadmium 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. Weitere Darstellungen für den Verlauf der Konzentration von Kupfer, Zink, Nickel, Chrom und Blei im Klärschlamm finden sich im Anhang III.

## 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 (vgl. Tabelle 2). Im Klärschlamm enthalten sind auch Verunreinigungen durch eine Vielzahl organischer Schadstoffe. Zu den besonders kritischen organischen Schadstoffen gehören neben den polychlorierten Dibenzodioxinen und -furanen (PCDD/F) auch Halogenverbindungen und Organozinnverbindungen. Aber auch Tenside und polyzyklische aromatische Kohlen-

wasserstoffe (PAK) sind im Klärschlamm zu finden. Diese organischen Stoffe entstammen oft einer Vielzahl von Quellen in den Haushalten, darunter Putz- und Reinigungsmittel oder Körperpflegeprodukte. Weitere anthropogene (vom Menschen verursachte) Quellen können Heimwerkerchemikalien wie Holzschutzmittel und Arzneimittel sein [OLIVA ET AL].

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

**TABELLE 4: KONZENTRATIONEN AN ORGANISCHEN VERBINDUNGEN IM KLÄRSCHLAMM AUS NORDRHEIN-WESTFALEN NACH [FRAGEMANN]**

Stoffgruppe	organische Schadstoffe	Mittelwert in [mg/kg TM] nach [FRAGEMANN]	90. Perzentil In [mg/kg TM] nach [FRAGEMANN]
<b>Chlorphenole</b>	Triclosan	3,4	5,5
<b>Moschusverbindungen</b>	Moschus-Xylol	0,0053	0,0084
	Galaxolid	5,92	11,8
	Tonalid	2,65	4,9
<b>Organozinnverbindungen</b>	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
<b>Polychlorierte Dibenzodioxine und -furane</b>	PCDD/F I-TEQ	14 ng TE kg TR	22 ng TE kg TR

<b>Polybrom. Diphenylether</b>	Tetrabromdiphenylether	0,026	0,037
	Pentabromdiphenylether	0,048	0,063
	Hexabromdiphenylether	0,011	0,011
	Heptabromdiphenylether	0,013	0,0058
<b>PAK</b>	Decabromdiphenylether	0,57	1,06
	Benzo(a)pyren	0,47	0,73
	Chrysen	0,64	1,11
	PAK <sub>EPA</sub> (ohne Acenaphtylen)	6,64	9,52
<b>Polychlorierte Biphenyle</b>	PCB <sub>6</sub> Summe	0,091	0,17
<b>Phthalate</b>	DEHP	27,5	57,5
	Dibutylphthalat	0,55	1
<b>Tenside</b>	LAS	1,723	4,000
	Nonylphenol	21,5	44,2

Die genannten Schadstoffe und deren Konzentrationen werden hauptsächlich durch die

Einzugsgebiete bzw. die angeschlossenen Einwohner und Betriebe bestimmt. [OLIVA ET.AL.]

### Krankheitserreger und Hygieneanforderungen am Beispiel EHEC

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 besteht grundsätzlich die Gefahr, dass Krankheitserreger über Nahrung und Futtermittel zu Mensch und Tier gelangen und diese damit gefährden [GUJER].

Diese potentielle Gefährdung ist Gegenstand der Diskussion um eine mögliche Übertragung von EHEC auf den Menschen als Folge der Verwertung von Klärschlamm und anderen orga-

nischen 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 Nutztiere 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 bisher nur sehr 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 monatelang überleben kann.

Da der Erreger eine hohe Überlebensfähigkeit aufweist, muss für die Risikominimierung gewährleistet werden, dass Menschen und Tiere möglichst nicht mit ihm in Berührung kommen. So wurde bei der Formulierung der Anforderungen der Klärschlammverordnung den Hygieneaspekten eine hohe Bedeutung beigemessen, um mögliche Risiken für Men-

schen und Nutztiere zu minimieren. Eine zusätzliche Möglichkeit zur Verhinderung der Kontamination wäre die „Hygienisierung“ von Klärschlamm, bei der die Krankheitserreger vor der Ausbringung reduziert werden. Die Klärschlammverordnung wählt einen anderen Weg und formuliert stattdessen restriktive Regelungen für die Ausbringung von Klärschlamm. So sind in § 4 der Klärschlammverordnung Anwendungsbeschränkungen festgeschrieben, beispielsweise darf kein Klärschlamm auf Gemüse- und Obstanbauflächen oder Dauergrünland aufgebracht werden. Darüber hinaus bestehen Anwendungsbeschränkungen für Ackerflächen, die zum Anbau von Feldfutter oder zum Anbau von Zuckerrüben – sofern das Zuckerrübenblatt verfüttert wird – genutzt werden. Besonders Lebensmittel und Futtermittel zum Rohverzehr dürfen somit nicht mit Klärschlämmen gedüngt werden.

Sofern eine ordnungsgemäße Klärschlammverwertung erfolgt, schließt der Gesetzgeber also aus, dass es bei Gemüse, Obst und Feldfutter zu einer Kontamination kommen kann.

Darüber hinaus ist die Klärschlammverwertung in Trinkwasserschutzgebieten der Zonen I und II (Fassungsanlage und engeres Schutzgebiet) sowie an Uferstrandstreifen bis zu einer Breite von zehn Metern verboten. Regional bestehen sogar Verbote der Klärschlammaufbringung in der Zone III von Wasserschutzgebieten, also dem gesamten Einzugsgebiet einer geschützten Fassungsanlage.

Experten gehen davon aus, dass die bestehenden Regelungen ausreichen, um einen Eintrag von EHEC durch die landwirtschaftliche Klärschlammverwertung in die Nahrungskette, das Grundwasser und Oberflächengewässer

zu verhindern – sofern der Klärschlamm bestimmungsgemäß nach den Vorgaben der Klärschlammverordnung ausgebracht wird. Dies setzt allerdings eine lückenlose Überwachung der Entsorgung voraus.

### Arzneimittelrückstände im Klärschlamm

In Deutschland werden jährlich weit über 30.000 Tonnen Arzneimittel verbraucht [RÖNNEFAHRT]. Ein Teil davon gelangt nach therapeutischer Anwendung sowie nach unsachgemäßer Entsorgung über die Toiletten in kommunale Abwässer.

Abhängig von den angewendeten Abwasserreinigungstechniken in Klärwerken reichert sich ein mehr oder weniger großer Teil der aus dem Abwasser eliminierten Arzneimittelrückstände in den Klärschlämmen an. Die Kehrseite der effizienteren Eliminierung solcher Rückstände aus dem Abwasser infolge neuer Klärtechniken ist eine zunehmende Anreicherung der Stoffe in den Klärschlämmen. Werden diese in der Landwirtschaft eingesetzt, gelangen mit der in den Klärschlämmen enthaltenen Nährstofffracht auch Arzneimittelrückstände auf die Felder. Dort können sie sich im Boden anreichern, mit dem Sickerwasserfluss in das Grundwasser gelangen oder durch Oberflächenabfluss direkt in Gewässer eingetragen werden.

Existieren zu Arzneimittelrückständen im Klärwerksabfluss und in Oberflächengewässern

zahlreiche Untersuchungen, so liegen zu den Arzneimittelgehalten in Klärschlämmen und deren Verhalten im Boden nur wenige 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 Bodenmatrix (Bezeichnung für die verschiedenen festen Bestandteile des Bodens) 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. erklärten die Eliminierung aus dem Abwasser im Klärwerk 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 je Kilogramm Boden der entsprechenden Substanzen nachgewiesen, die sich zudem durch hohe Persistenz auszeichnen, also lange in der Umwelt verbleiben.

In einem Gutachten des IWW im Auftrag des Umweltbundesamtes [BERGMANN ET AL.], das Literatur zu Monitoringdaten von Arzneimitteln in der Umwelt zusammenstellte, wird neben den 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 in Gehalten über 100 µg/kg im Klärschlamm berichtet. 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 grund-

wasserbeeinflusste Oberflächengewässer finden sollten.

Im Zusammenhang mit der Ausbringung von Klärschlämmen diskutiert die Fachwelt auch die Problematik der Verbreitung von resistenten Krankheitserregern. Es gibt Hinweise darauf, dass es in Kläranlagen – begünstigt durch die hohen Bakterienkonzentrationen – zum Austausch von Antibiotikaresistenzen zwischen verschiedenen Bakterien kommen kann, die mit dem Abwasser beispielsweise aus Krankenhäusern eingetragen werden [UBA]. Dadurch ist es möglich, dass neue Kombinationen von Antibiotikaresistenzen entstehen oder dass Antibiotikaresistenzen auf Bakterien übertragen werden, die bisher keine Resistenz aufwiesen. Darüber hinaus beschreibt EIBISCH, dass der kontinuierliche Eintrag von Antibiotika in Böden über längere Zeit zu erhöhten Konzentrationen führen kann, wodurch antibiotikaresistente Bakterien Wachstumsvorteile erhalten, sodass die Möglichkeit des Gentransfers ihrer Resistenzgene gegeben ist. Im Gutachten des Sachverständigenrates für Umweltfragen (SRU) zum Thema Arzneimitteln 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].

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 Arz-

neimitteln 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 weist in seiner Stellungnahme zu Arzneimitteln in der Umwelt darauf hin, dass nur wenige Arzneimittel sich 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].

## SCHLAMMBEHANDLUNG

### 03

Als Schlammbehandlung bezeichnet man alle Verfahren, mit denen die Verwertbarkeit oder die Transport- und Lagerfähigkeit des Klärschlammes verbessert werden. Zu den Schlammbehandlungsverfahren gehören Eindickung, Hygienisierung, biologische Stabilisierung, Entwässerung, Trocknung und Verbrennung [GUJER; BRANDT]. Auf das letzte Verfahren wird in einem gesonderten Kapitel 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 (eine Rührwerk) die Flockung von Partikeln beschleunigen, wodurch diese sich schneller absetzen können. Am Boden der Eindicker wird der Schlamm abgezogen und an der Oberfläche das überschüssige Wasser abgelassen [GUJER].

#### **Hygienisierung**

Die Hygienisierung hat zum Ziel pathogene Organismen (wie Viren oder Wurmeier) im Klärschlamm zu reduzieren, um bei einer land-

wirtschaftlichen Verwertung die Gefahr der Kontamination von Mensch und Tier zu minimieren. In einem Arbeitsentwurf der novellierten Klärschlammverordnung heißt es, dass Klärschlamm nur abgegeben oder aufgebracht werden darf, wenn dieser einer hygienisierenden Behandlung unterzogen wurde. Dazu

findet sich in der Anlage 2 des Entwurfes eine Liste mit möglichen Behandlungsverfahren, die bei Einhaltung der angegebenen chemischen und physikalischen Parameter zur Hygienisierung von Klärschlamm geeignet sind [BRANDT]. Tabelle 5 gibt einen Überblick über die zulässigen Verfahren.

**TABELLE 5: CHEMISCHE / PHYSIKALISCHE / THERMISCHE STABILISIERUNGSVERFAHREN FÜR KLÄRSCHLAMM**

Art des Verfahrens	Verfahren	Beschreibung
<b>Erreichen der Behandlungstemperatur durch Fremderhitzung</b>	Schlammpasteurisierung	Der Schlamm wird während einer Einwirkzeit von 60 Minuten und unter Zufuhr von Wärme auf über 70°C erhitzt [BMU].
	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 [BMU].
<b>Erreichen der Behandlungstemperatur durch Selbsterhitzung/ chemische Reaktionswärme</b>	Aerob-thermophile Schlammstabilisierung (ATS)	Durch aktive Luft/Sauerstoff-Zufuhr werden exotherme mikrobielle Abbau- und Stoffwechselvorgänge ausgelöst, die eine Erwärmung und eine pH-Wert-Erhöhung auf Werte um etwa acht 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 [BMU].
	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 Voraussetzung für einen einwandfreien Kompostierungsablauf [BMU].
	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 betragen und die Verweilzeit drei Stunden. Während dieser Zeit müssen mindestens 55°C eingehalten werden [BMU].

<b>Verschiebung des pH-Wertes</b>	Zugabe von Kalkhydrat bei der Schlammkonditionierung	Die Zugabe von $\text{Ca(OH)}_2$ (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 $\text{Ca(OH)}_2/\text{kg TM}$ 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. [BMU]
<b>Langfristige Aufbewahrensverfahren, die eine Reduktion der Schadorganismen gewährleisten</b>	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-twässerung begünstigt. Das Verfahren sollte in modularartig angelegten Behandlungsbeeten stattfinden, die zeitlich gestaffelt beschickt werden. So können Mindestverweilzeiten und beschickungslose Zeiten gewährleistet werden [BMU].
<b>Trocknungsverfahren</b>	Hochtemperatur-trocknung	Das Trocknungsmedium (Luft, Wasser etc.) wird auf eine Temperatur von über 100 °C gebracht und der Klärschlamm so getrocknet [BMU].

### Biologische Schlammstabilisierung

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

Klärschlamm, also die Verringerung der biologischen Aktivität und der Geruchsentwicklung. Wichtig ist auch, dass durch die Faulung unter anderem eine bessere Entwässerbarkeit des Klärschlamm erreicht werden kann. Ein weiterer Vorteil der anaeroben Behandlung besteht darin, dass dabei ein Gas produziert wird, das ebenfalls als Energieträger genutzt werden kann. Daneben gibt es noch die Kompostierung und die Vererdung von Klärschlamm.

In größeren Anlagen in Deutschland findet in der Regel eine anaerobe Behandlung in sogenannten Faultürmen statt. Das Ziel der Klärschlammfaulung ist die Stabilisierung des

Günstig für eine spätere thermische Behandlung ist der Umstand, dass sich durch eine mit der Faulung verbundene nachgeschaltete Entwässerung der Heizwert des Schlamm steigern

lässt. Ein Nachteil der Faulung ist, dass durch den anaeroben Abbauprozess die organische Substanz und damit der Heizwert des Schlammes reduziert werden.

### 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 Verbrennung 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 Maschinen, der Art und Beschaffenheit des Schlammes sowie einer eventuellen Konditionierung ab.

In einer vorgeschalteten Schlammkonditionierung wird mit Hilfe von Additiven (Flockungs- und Flockungshilfsmitteln) die Entwässerbarkeit des Schlammes verbessert. Hierbei wird

zwischen anorganischen Flockungsmitteln (zum Beispiel Eisen- und Aluminiumsalze, Kalk, Kohle) und organischen Flockungshilfsmitteln (organische Polymere) unterschieden. Eisen- und Aluminiumsalze werden häufig bereits im Abwasserreinigungsprozess als Fällungsmittel zur Entfernung von Phosphat eingesetzt. Diese Salze erhöhen den nicht verbrennbaren Anteil im entwässerten Schlamm (=Ascheanteil) erheblich. Deshalb werden vor einer thermischen Behandlung von Klärschlämmen meist organische Konditionierungsmittel eingesetzt.

### 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
- Mikrobiologische Stabilisierung und hygienische Unbedenklichkeit
- Erhöhung des Heizwertes

Gegen eine Trocknung sprechen vor allem der zusätzliche Energieaufwand durch die Trocknung und die Entwässerung.

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 deshalb verschiedene Trocknungsverfahren zur Anwendung. Bei der Trocknung wird zwischen einer Teiltrocknung, bei der der getrocknete Schlamm bis ca. 85% Trockenrückstand enthält und einer Volltrocknung mit bis ca. 95% Trockenrückstand unterschieden. Als teilgetrocknet wird ein Klärschlamm bezeichnet, der die Leimphase durchlaufen hat, das heißt einen Feststoffgehalt von mehr als 50 bis 55% Trockenrückstand 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 autarke Verbrennung nicht aus oder es ist aus technischen Gründen eine weitere Trocknung vor der Verbrennung nötig. Dabei gilt die Trocknung am Standort der Verbrennungsanlage, zum Beispiel mittels Abwärmenutzung als energetisch günstig [Beckmann]. Prinzipiell ist die Trocknung von Klärschlamm ein sehr energieaufwändiger Verfahrensschritt. Mit Hilfe von thermischer Energie muss das im Klärschlamm verbleibende Wasser verdampft werden. Der gewählte Grad der Trocknung hängt dabei von der späteren Verwendung des Klärschlammes ab.

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

nem Trockensubstanzgehalt 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. In Abfallverbrennungsanlagen wird sowohl entwässertes als auch teilgetrockneter oder vollgetrockneter Klärschlamm mitverbrannt. Bei der Mitverbrennung in Kraftwerken 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 vollgetrocknete Schlämme einzusetzen. Der Einsatz von Klärschlämmen in Zementwerken erfordert über die Entwässerung hinaus eine Volltrocknung.

Klärschlamm verbrennt erst ab einem Heizwert ( $H_v$ ) von etwa 4.500 bis 5.000 kJ/kg selbstgängig. Nutzen Verbrennungsanlagen die heiße Abluft aus dem Kessel zur Vorerwärmung der Verbrennungsluft, so kann die selbstgängige Verbrennung schon ab 4.000 kJ/kg stattfinden. Durch die Trocknung kann der Heizwert des Klärschlammes auf 13.000 kJ/kg erhöht werden. Der Heizwert von getrocknetem Klärschlamm liegt somit auf dem gleichen Niveau wie der von trockenem Holz oder Braunkohle. Als Wärmedium für Trockner eignet sich eine Reihe von Medien. Die Tabelle 6 gibt einen Überblick über die genutzten Wärmedien und die dazu eingesetzten Trocknungssysteme.

**TABELLE 6: EINGESETZTE WÄRMEDIEN UND DIE DAZUGEHÖRIGEN TROCKNUNGSAGGREGATE [HEPKE]**

Wärmedmedium	Beispiele für Trocknungssystem
Rauchgas	Trommeltrockner
Abgas aus einem Blockheizkraftwerk	Wirbelschichttrockner
Luft	Trommeltrockner, Bandtrockner
Dampf	Dünnschichttrockner, Scheibentrockner, Wirbelschichttrockner
Druckwasser	Dünnschichttrockner, Scheibentrockner, Wirbelschichttrockner
Thermalöl	Dünnschichttrockner, Scheibentrockner, Wirbelschichttrockner
Solare Energie	Solartrockner

Die Auswahl des „richtigen“ Trocknungsverfahrens hängt aber 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.

Trocknungsverfahren können grundsätzlich in direkte und indirekte Verfahren unterschieden werden. Bei den Direkttrocknern, auch Konvektionstrockner genannt, kommt der zu trocknende Klärschlamm unmittelbar mit dem Wärmeträger (in der Regel Luft oder Rauchgas) in Berührung. Bei der Trocknung entstehen sogenannte Brüden, die ein Gemisch aus Wasserdampf, Luft und den aus dem Schlamm ausgetriebenen Gasen 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 über Biofilter an die Atmosphäre abgegeben werden.

Bei indirekten Trocknersystemen, auch Kontakttrockner genannt, wird die benötigte Wärme durch einen Dampferzeuger oder eine Thermalölanlage, bei der Öl als Wärmeträger fungiert, zur Verfügung gestellt. Der Wärmeübergang erfolgt bei Kontakttrocknern 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. Kontakttrockner 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

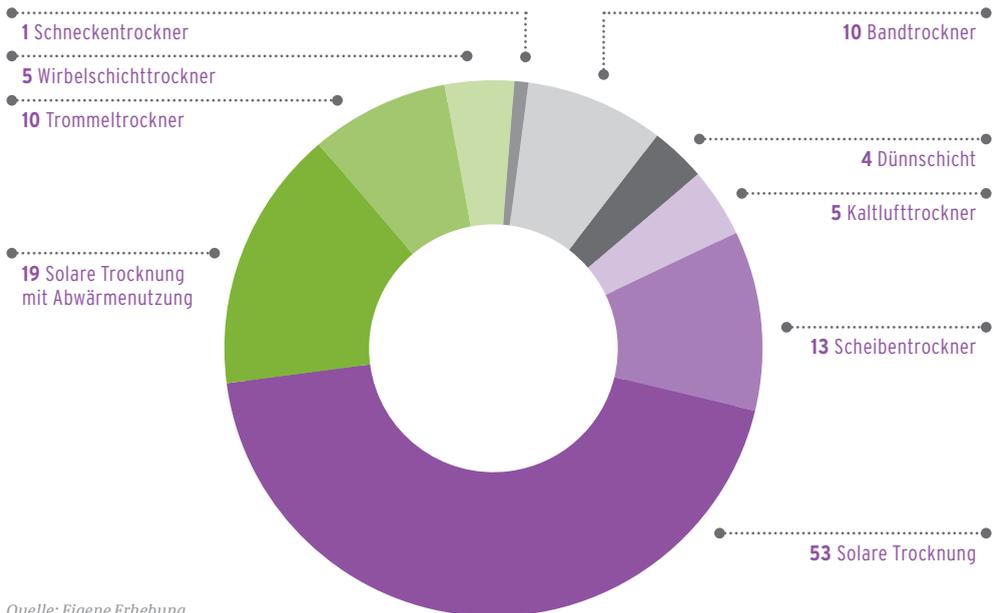
aus den Brüden nahezu vollständig kondensiert werden. Die verbleibenden Gase können in der Kesselfeuerung desodoriert werden.

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 Klärschlammes 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 Müllverbrennungsanlagen genutzt werden. [Lehrmann 2010].

In Deutschland waren 2011 an etwa 114 Standorten Trocknungsanlagen in Betrieb. Bild 3 gibt einen Überblick über die eingesetzten Klärschlamm-trockner. Zwar existieren noch eine ganze Reihe weiterer Anlagen zur Trocknung in Deutschland. Diese sind oder waren 2011 teilweise außer Betrieb genommen.

**BILD 3: ANZAHL DER KLÄRSCHLAMMTROCKNER AUFGETEILT NACH TROCKNERART**



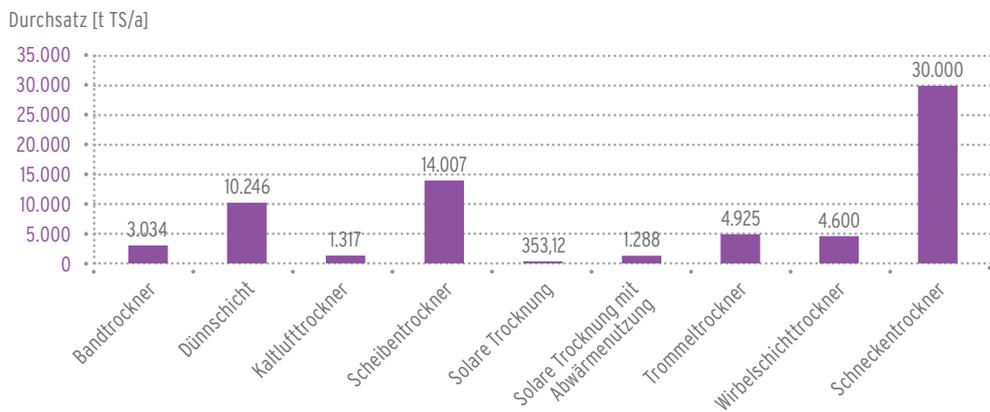
Quelle: Eigene Erhebung

Zwischen 2004 und 2010 stieg die Anzahl der solaren Trocknungsanlagen. In dieser Zeit gab es eine Zunahme von über 60 Anlagen. Neben dem genutzten Trocknungsverfahren unterscheiden sich die Trocknungsanlagen auch

in ihrem mittleren Durchsatz, der im Bild 4 dargestellt ist. Eine detaillierte Übersicht mit technischen Details aller Trocknungsanlagen in Deutschland ist der Tabelle 23 im Anhang IV zu entnehmen.

**BILD 4: MITTLERER KLÄRSCHLAMMDURCHSATZ PRO TROCKNERART**

Quelle: Eigene Erhebung



Trotz der prozentualen Zunahme von Klärschlamm-trocknungsanlagen hat die Kapazität nicht in gleicher Weise zugenommen. Solare Klärschlamm-trocknungsanlagen haben einen wesentlich geringen Durchsatz als Scheibentrockner oder Dünnschichttrockner. Generell sind die solaren Anlagen, ob mit oder ohne thermische Nutzung, im Durchsatz geringer als die thermischen Verfahren. Dennoch ist hier

eindeutig ein Trend hin zu den solaren Klärschlamm-trocknungsanlagen zu erkennen. Die solare Klärschlamm-trocknung ist in den meisten Fällen genau dort sinnvoll, wo keine Abwärme zur Verfügung steht und die Entfernung zur nächsten Verbrennungsanlagen (z. B. Mono-verbrennungsanlage) zu groß ist. Wie schon erwähnt hängt aber die Auswahl des Trockners von vielen verschiedenen Faktoren ab.

# THERMISCHE KLÄRSCHLAMMBEHANDLUNG

## 04

Der Begriff der „thermischen Entsorgung“ von Klärschlamm umfasst allgemein die Entsorgung in Monoverbrennungsanlagen (einschließlich Vergasungsanlagen), die Mitverbrennung in Kohlekraftwerken und die Mit-

verbrennung in Zementwerken sowie einigen Abfallverbrennungsanlagen. Darüber hinaus wird seit einigen Jahren intensiver an alternativen thermischen Entsorgungsmöglichkeiten gearbeitet.

### Monoklärschlammverbrennung

Monoklärschlammverbrennungsanlagen werden bei Temperaturen zwischen 850 und 950°C betrieben. Temperaturen unter 850°C können zu Geruchsemissionen führen, bei Temperaturen über 950°C muss mit einer Versinterung der Asche gerechnet werden. Das Temperaturniveau, das sich bei der Verbrennung einstellt, ist abhängig vom Energieinhalt und der Menge des eingebrachten Klärschlammes sowie von der Verbrennungsluftmenge. Nach der 17. Bundes-Immissionsschutzverordnung werden ein Sauerstoffgehalt von mindestens 6 Vol.-%, eine Nachverbrennung bei mindestens 850°C sowie eine ausreichende Verweilzeit der Abgase in der Nachbrennkammer von mindestens 2 Sekunden gefordert, um eine effektive Verbrennung zu erreichen. Derzeit gibt es in Deutschland etwa 20 Monoklärschlammverbrennungsanlagen mit einer Gesamtkapazität von rund 580.000 Tonnen TS pro Jahr und 7 betriebliche Monoklär-

schlammverbrennungsanlagen, die zusammen 830.000 Tonnen Klärschlammoriginalsubstanz (OS) im Jahr verbrennen können. 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 Monoklärschlammverbrennung werden hauptsächlich die folgenden Feuerungssysteme eingesetzt:

- Wirbelschichtofen
- Etagenofen
- Etagenwirbelofen
- Zykloidfeuerung

Tabelle 7 fasst die Besonderheiten der einzelnen Verbrennungsöfen zusammen:

TABELLE 7: VERGLEICH DER FEUERUNGSSYSTEME

	Wirbelschichtofen	Etagenofen	Etagenwirbler	Zykloidfuerung
Besonderheiten	Keine mechanisch-beweglichen Teile und geringer Verschleiß	Keine separate Vortrocknung erforderlich, aufwendiger Ofenaufbau mit beweglichen Teilen, gekühlte Hohlwelle	Keine separate Vortrocknung erforderlich, bewegliche Hohlwelle, geringes Wirbelschichtvolumen	Keine mechanischen, beweglichen Teile und geringer Verschleiß, ohne Wirbelbettmaterial
Betriebsverhalten	Schnelles An- u. Abfahren durch kurze Aufheiz- u. Abkühlzeiten, intermittierender Betrieb möglich	Lange Aufheizzeiten; kontinuierlicher Betrieb notwendig	Mittlere Aufheiz- u. Abkühlzeiten	Vergleichbar der Wirbelschicht, für ein breites Brennstoffband einsetzbar
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, unempfindlicher gegen Qualitätsschwankungen des Schlammes als Wirbelschichtöfen	Feststoffanteile, lange und gasförmige Anteile, kurze Verweilzeiten, variable Primär- und Sekundärluftzuführung auf mehreren Ebenen
Aschegehalt im Abgas	Hoch	Gering	Hoch	Hoch
Ascheaustrag	Über Abgasstrom und Sandabzug	Direkt aus der untersten Etage	Über Abgasstrom und Sandabzug	Über Abgasstrom, Grobasche am Boden
Reststoffe	Asche, Wirbelbettmaterial	Asche	Asche, Wirbelbettmaterial	Asche, ggf. Grobasche

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 entstehenden Emissionen. In den letzten Jahren hat sich die stationäre Wirbelschicht als für die Klärschlammverbrennung geeignetste Feuerungsart durchgesetzt.

### **Emissionen aus Klärschlammverbrennungsanlagen**

Die Verbrennung von Klärschlamm in Monoklärschlammverbrennungsanlagen und Mitverbrennungsanlagen unterliegt der 17. BImSchV. Darin ist eine Reihe von Grenzwerten enthalten, die die Emissionen in die Luft limitieren sollen. Zur Minderung der Emissionen und damit auch zur Einhaltung der Grenzwerte haben alle Monoklärschlammverbrennungsanlagen entsprechende 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 filternden Staubabscheider ausgerüstet, der die Staubemissionen effektiv mindert. Der durchschnittliche Staubgehalt im gereinigten Abgas beträgt nur zwischen 0,2 und 2,5 mg/m<sup>3</sup>. Der

Grenzwert nach der derzeit gültigen Verordnung liegt bei 10 mg/m<sup>3</sup>.

Die Bildung von Stickoxiden (NO<sub>x</sub>) in Monoklärschlammverbrennungsanlagen ist im Wesentlichen auf zwei Quellen zurückzuführen. Zum einen enthält der Klärschlamm zum Beispiel Ammonium, das durch die Oxidation NO<sub>x</sub> bilden kann, das auch durch den Eintrag über die Verbrennungsluft in Form von Sauerstoff und Stickstoff, welche bei hohen Temperaturen miteinander zu NO<sub>x</sub> reagieren. Der Mittelwert der Emissionen liegt bei etwa 80 mg/m<sup>3</sup>, wobei aber auch Werte bis 180 mg/m<sup>3</sup> gemessen werden. Diese Werte sind seltene Ausnahme. Der Grenzwert für Stickoxide liegt bei 200 mg/m<sup>3</sup>.

Neben den beiden genannten Schadstoffemissionen spielt Quecksilber in der Umweltpolitik eine wichtige Rolle. Das Umweltbundesamt ermittelte für das Jahr 2010 eine Gesamtquecksilberfracht von etwa 39 kg aus allen Klärschlammmonoverbrennungsanlagen. Im Vergleich zu deutschen Kohlekraftwerken (mit etwa 5,5 t Quecksilbergesamtfracht) ist dieser Wert nahezu vernachlässigbar.

### **Sonstige Verfahren**

Neben den bisher genannten Verbrennungsarten gibt es seit dem Jahr 2004 am Standort der Kläranlage in Balingen noch eine im Dauerbetrieb befindliche Anlage zur Vergasung von Klärschlamm. In der Anlage mit einer Jahreskapazität von 1.250 t Trockenmasse wird getrockneter Klärschlamm zu Synthesegas

umgesetzt. Das Synthesegas wird in einem Blockheizkraftwerk verbrannt und dient damit der gekoppelten Erzeugung von Strom und Wärme. Zudem gibt es eine Vergasungsanlage

in Dinkelsbühl, die allerdings gegenwärtig den Betrieb eingestellt hat, und die bald in Dauerbetrieb gehende Vergasungsanlage in Mannheim.

### Mitverbrennung von Klärschlamm

Neben der Entsorgung in Monoklärschlammverbrennungsanlagen kann Klärschlamm auch in bestehenden Kraftwerken mit verbrannt werden. Diese Mitverbrennung von Klärschlamm findet vor allem in Kohlekraftwerken, Abfallverbrennungsanlagen und Zementwerken statt. Ein Vorteil gegenüber der Monoklärschlammverbrennung liegt darin, dass dadurch Brennstoffe und Zuschlagstoffe für die Zementindustrie eingespart werden können.

#### Mitverbrennung in Kohlekraftwerken

In den letzten Jahren hat die Mitverbrennung von Klärschlamm in Kraftwerken einen immer größeren Anteil an der Klärschlamm Entsorgung eingenommen. Derzeit stehen ca. 716.000 t TM/a an genehmigten Kapazitäten zur Verfügung. Dies entspricht etwa 26 Kraftwerken in Deutschland. Sowohl in Braunkohle- als auch in Steinkohlekraftwerken kann Klärschlamm mitverbrannt werden. Als Feuerungsart sind hauptsächlich Staub- oder Wirbelschichtfeuerungen in Betrieb.

Verbrannt wird im Allgemeinen nur stabiler (das heißt ausgefallter) Klärschlamm. Der Einsatz von Rohschlamm bringt zu große

Schwierigkeiten bei der Handhabung und bei der Lagerung mit sich, vor allem durch seine schlechte Entwässerbarkeit sowie durch Gasbildung und Geruchsentwicklung. Technisch möglich ist sowohl die Verbrennung von getrocknetem Klärschlamm als auch die von nur entwässertem Klärschlamm. In den meisten mitverbrennenden Kraftwerken wird derzeit entwässertes Klärschlamm mit einem Trockensubstanzgehalt von etwa 25 bis 35% TR verbrannt. In einigen Kraftwerken wird ausschließlich vollgetrockneter Klärschlamm eingesetzt, in anderen wird dieser beigemischt.

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. Nur in einem Fall wird derzeit am Kraftwerksstandort ein separater Scheibentrockner betrieben. Häufig bildet die Trockenkapazität 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 Trocknerleistungen zur Verfügung

stehen. Tabelle 8 gibt einen Überblick über die Mitverbrennung in Kohlekraftwerken.

**TABELLE 8: MITVERBRENNUNG IN KOHLEKRAFTWERKEN**

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

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 entsorgt 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 Anlieferzustand, 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 Anlieferzustand – mit einem Wassergehalt von 65 bis 75% – hat entwässertes Klärschlamm

keinen Heizwert. Wird der Klärschlamm mit Abwärme aus dem Kraftwerk 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.

Im Allgemeinen werden in Kraftwerken Klärschlämme eingesetzt, die den Anforderungen

der Klärschlammverordnung (AbfKlärV) genügen. Trotzdem macht sich der zusätzliche Eintrag von Schwermetallen – insbesondere Quecksilber – mit dem Klärschlamm 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 Klärschlamm-mengen müssen zusätzliche Abgasreinigungseinrichtungen nachgerüstet werden. Daneben müssen Kraftwerksbetreiber darauf achten, dass die Flugasche, die meist als Baustoff verwendet wird, die entsprechenden Baustoffnormen einhält. Auch dies ist ein Hauptgrund für die Begrenzung der mitverbrannten Klärschlammmenge.

In den meisten Kraftwerken hat sich ein Klärschlammanteil von bis zu fünf Prozent der Brennstoffmasse bewährt. Die Erfahrungen haben gezeigt, dass die Mitverbrennung dieser Menge ohne nennenswerte Probleme zu bewältigen ist. Eine Mitverbrennung von fünf Prozent Klärschlamm in allen deutschen Kraftwerken würde ausreichen, um das Doppelte der in Deutschland insgesamt anfallenden Klärschlammmenge zu verbrennen.

### **Mitverbrennung in Abfallverbrennungsanlagen**

Kommunale Klärschlämme werden in einer Reihe von Abfallverbrennungsanlagen (AVA) mit entsorgt. Die in AVAs entsorgte Klärschlammmenge hat in den letzten Jahren an

Bedeutung verloren. Einige Abfallverbrennungsanlagen haben die Klärschlammverbrennung wieder eingestellt. Bei anderen AVA ist die angelieferte Klärschlammmenge rückläufig oder es kommen gar keine Klärschlämme mehr zur Verbrennung.

Drei unterschiedliche Verfahren werden für die gemeinsame Schlamm- und Abfallverbrennung angewendet:

- Getrockneter Klärschlamm wird als Staub in den Feuerraum eingeblasen.
- Entwässerter Klärschlamm wird separat durch Aufstreumaschinen in den Brennraum eingegeben und auf dem Rost verteilt. Durch das Umwälzen des Abfalls auf den Rosten wird der Schlamm in das Bettmaterial eingebunden. Es liegen Betriebserfahrungen mit bis zu 20 Massenprozenten Schlamm (25% TR) vor.
- Entwässerter oder getrockneter Klärschlamm wird mit dem Restabfall vermischt und mit diesem gemeinsam der Verbrennung zugeführt. Dies kann in Form einer Homogenisierung in einem extra Aggregat, im Müllbunker durch gezielte Dosierung durch den Kranführer oder geregelt im Aufgabetrichter erfolgen.

### **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 ersetzen.

Die Mitverbrennung von Klärschlamm in Zementwerken trägt damit in doppelter Hinsicht zum Klima- und Ressourcenschutz bei. Zum einen werden wertvolle Brennstoffe eingespart und zum anderen trägt die Mitver-

brennung des als klimaneutral angesehenen Klärschlammes auch zur CO<sub>2</sub>-Reduzierung bei. Mit Novellierung der 17. Bundes-Immissionsschutzverordnung vom 14.8.2003 gelten die Schwermetallgrenzwerte der Müllverbrennung in vollem Umfang auch für die Mitverbrennung von Klärschlamm in Zementwerken.

Tabelle 9 zeigt die Menge an in Zementwerken verbrannten Klärschlamm, wie sie den Umweltberichten des Bundesverbandes der Deutschen Zementindustrie e.V. zu entnehmen sind.

**TABELLE 9: VERBRANNTER KLÄRSCHLAMMENGE IN ZEMENTWERKEN VON 2003 BIS 2010 [VDZ A-H]**

Jahr	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	
<b>Verbrauch</b>	4	48	157	238	254	267	263	276	kt/a
<b>Heizwert</b>	11	4	3	4	4	4	4	4	MJ/kg

Die Mitverbrennung in Zementwerken stieg innerhalb von zwei Jahren (von 2003 bis 2005) auf das 40-fache und ist seitdem kontinuierlich gestiegen. Ein wesentlicher Grund für diesen sprunghaften Anstieg ist in dem Deponierungsverbot für alle unbehandelten Abfälle durch die damalige Technische Anleitung Siedlungsabfall (TASi) zu sehen.

Insgesamt spielen bei der Mitverbrennung von Klärschlämmen mengenmäßig die Zementwerke und Abfallverbrennungsanlagen nur

eine untergeordnete Rolle. Trotz der starken Zunahme der Klärschlammmitverbrennung bei Zementwerken ist die verbrannte Menge bezogen auf den Gesamtklärschlammfall nur wenig.

### **Vor- und Nachteile der Mitverbrennung von Klärschlamm**

Durch die Mitverbrennung von 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 CO<sub>2</sub>-Reduzierung bei, da Klärschlamm als klimaneutral angesehen wird.

Die Zementindustrie nutzt Klärschlamm aber auch gleichzeitig als Zuschlagstoff, was eine weitere Kosteneinsparung ermöglicht und zur Ressourcenschonung beiträgt.

Ein Nachteil der Mitverbrennung ist allerdings, dass der im Klärschlamm enthaltene Phosphor für immer 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. Auf die Rückgewinnung von Phosphor und die daraus resultierende Bedeutung für die zukünftige Klärschlamm Entsorgung wird im Kapitel „Phosphorrückgewinnung“ detaillierter eingegangen.

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

### **Entwicklungen alternativer Klärschlammbehandlungsverfahren**

Als Alternativen zu den thermischen Behandlungsverfahren sehen Experten sogenannte chemisch-physikalische Verfahren, wie beispielsweise die Nassoxidation, Hydrolyse, die Hydrothermale Carbonisierung (HTC), die Niedertemperaturkonvertierung oder die Hydrothermaloxidation (supercritical water oxidation) an. Derzeit werden auch eine Reihe von Klärschlammvergasungs- und -pyrolyseverfahren entwickelt. Sie befinden sich aber noch im Entwicklungsstadium oder wurden bisher nur in sehr geringer Zahl großtechnisch umgesetzt.

# LANDWIRTSCHAFTLICHE VERWERTUNG VON KLÄRSCHLAMM

## 05

Klärschlamm gehört zu den am häufigsten und regelmäßig kontrollierten Sekundärrohstoffdüngern, der einen Teil des Nährstoffbedarfes landwirtschaftlicher Nutzpflanzen abdecken kann. Vor allem in Betrieben, in denen keine

eigenen Wirtschaftsdünger anfallen, kann Klärschlamm darüber hinaus die Humusbilanz verbessern. Gleichzeitig stellt er aber auch eine Schadstoffsенке für unerwünschte Abwasserinhaltsstoffe aus Haushalten, Gewerbe und diffu-

sen Quellen dar, über deren Umweltrelevanz und Wirkung teilweise noch zu wenig bekannt ist. Eine damit einhergehende mögliche Schadstoffbelastung von Boden, Pflanze oder Grund- und Oberflächenwasser nur schwer einschätzbar, auch wenn Klärschlamm nur in vergleichsweise geringen Mengen aufgebracht werden darf.

Grundsätzlich darf Klärschlamm in der Landwirtschaft nur für Düngezwecke verwendet werden, wenn er aus kommunalen Abwasserbehandlungsanlagen stammt. Im Ökologischen Landbau, im Forst, auf Grünland und im Obst- und Gemüsebau ist die Ausbringung von Klärschlamm generell verboten, um die Übertragung von Krankheitserregern sicher zu verhindern. Für den Feldfutterbau gibt es Einschränkungen (Aufbringung nur vor der

Aussaat mit anschließender tiefwendender Einarbeitung (siehe Klärschlammverordnung)).

Des Weiteren werden im Klärschlamm immer wieder neue Abbauprodukte von neuen Arzneimitteln entdeckt. Diese gelangen u. a. durch menschliche Ausscheidungen schließlich auch in den Klärschlamm. Analytikern und Toxikologen ist es 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 charakterisieren und einschätzen. Die Fachleute können nur die potentielle Gefährdung infolge solcher Stoffe abschätzen – bis zu einer realen Einschätzung sind diese aber schon in die Umwelt gelangt [BRANDT].

### 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 ( $K_2O$ ) [LfL].

Die Bindungsform des im Klärschlamm enthaltenen Phosphors hängt u. a. von der Art der P-Fällung in 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 des Bodens und Düngemittels und den Gehalten an Eisen und Aluminium im Klärschlamm. Ein ungünstiges Phosphor-Eisen Verhältnis kann die Pflanzenverfügbarkeit stark vermindern [ABD EL-SAMIE]. Deshalb sollte für Klärschlamm, der landwirtschaftlich verwertet werden soll,

eine biologische P-Fällung einer chemischen P-Fällung während des Klärprozesses vorgezogen werden. Bei der Düngung mit Klärschlamm müssen die tatsächlichen Nährstoffgehalte, die oft stark von mittleren Gehaltsangaben abweichen, berücksichtigt und mit in die Nährstoffbilanzierung einbezogen werden. Die tatsächlichen Nährstoffgehalte und das tatsächliche Gewicht einer Partie sind dem düngemittelrechtlichen Begleitpapier zu entnehmen, welches jeder Partie beigefügt sein muss.

Nach Klärschlammverordnung dürfen innerhalb von drei Jahren maximal fünf Tonnen Klärschlammrockensubstanz je Hektar ausgebracht werden. Dieser Menge entsprechen zum Beispiel 100 m<sup>3</sup> Klärschlamm mit 5% TS (Nassschlamm).

Der Anwender hat die Ausbringungsmenge auf dem Lieferschein zu bestätigen. Dabei ist auf die Mengenbegrenzung und auf das Kombinationsverbot zu achten. Im genannten Zeitraum dürfen neben den Düngemitteln mit Klärschlamm keine Düngemittel mit Bioabfällen aufgebracht werden. Je eine Durchschrift des Lieferscheines geht an Landwirt, Transporteur und Kreisver-

waltungsbehörde, während das Original beim Kläranlagenbetreiber verbleibt und von diesem 30 Jahre aufzubewahren ist.

Klärschlämme aus verschiedenen Kläranlagen dürfen nicht miteinander vermischt werden. Die Vermischung von Klärschlamm mit Wirtschaftsdüngern (z. B. Gülle) ist zulässig. Von dem Gemisch darf aber nur so viel ausgebracht werden, dass der Klärschlammanteil 5 t TS in drei Jahren nicht überschreitet (vgl. AbfKlärV). Wird Klärschlamm in Güllegruben verbracht, so unterliegt das Gülle-Klärschlammgemisch, wie alle anderen Gemische mit Klärschlamm, der Klärschlammverordnung mit allen Beschränkungen. Die Ausbringung ist dann nur nach vorhergehender Boden- und Gemischuntersuchung zulässig. Wenn neben den Gehalten an Nähr- und Schadstoffen im Klärschlamm auch die der Zuschlagstoffe bekannt sind und die Gehalte im Gemisch zweifelsfrei berechnet werden können, kann die Untersuchung des Gemisches insgesamt unterbleiben. Nicht zulässig ist die Ausbringung des Gemisches auf Grünland und anderen bereits erwähnten Flächen mit Aufbringungsverbot für Klärschlamm.

### 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. Im Zuge der Novellierung der Klärschlammverordnung (AbfKlärV) wurden neue Grenzwertvorschläge für organische Schadstoffe geprüft. Relevante Schadstoffe wurden vier Kategorien zugeordnet [Bergs]:

**TABELLE 10: EINORDNUNG VON SCHADSTOFFEN IM KLÄRSCHLAMM ZUR ERMITTLUNG VON GRENZWERTVORSCHLÄGEN [BERGS]**

Kategorie	Schadstoff/Regelung
1	Bereits geregelte Schadstoffe; teilweise noch relevant (z. B. PCDD/-F, PCB, AOX); Grenzwert unverändert
2	Schadstoffe mit immer noch relativ hohen Belastungen des Abwassers oder Klärschlammes; Grenzwert neu (z. B. PAK)
3	Schadstoffe mit hoher ökotoxikologischer Relevanz, aber starken Abnahmen in vergangenen Jahren (z. B. TBT, DEHP) oder extrem hohen Konzentrationen; nur Monitoring
4	Kein Grenzwert und kein Monitoring (z. B. LAS, Nanopartikel)

Perfluorierte Tenside (PFT) sind beispielsweise eine Stoffgruppe, die erst vor Kurzem als von ihren gesundheitlichen Auswirkungen her relevante Inhaltsstoffe des Klärschlammes erkannt worden. Da sie aufgrund ihrer Eigenschaften vielseitig verwendet werden und sich damit auch weit verbreiten, wird mit der Novellierung der AbfKlärV ein Grenzwert eingeführt (0,1 mg/kg TS).

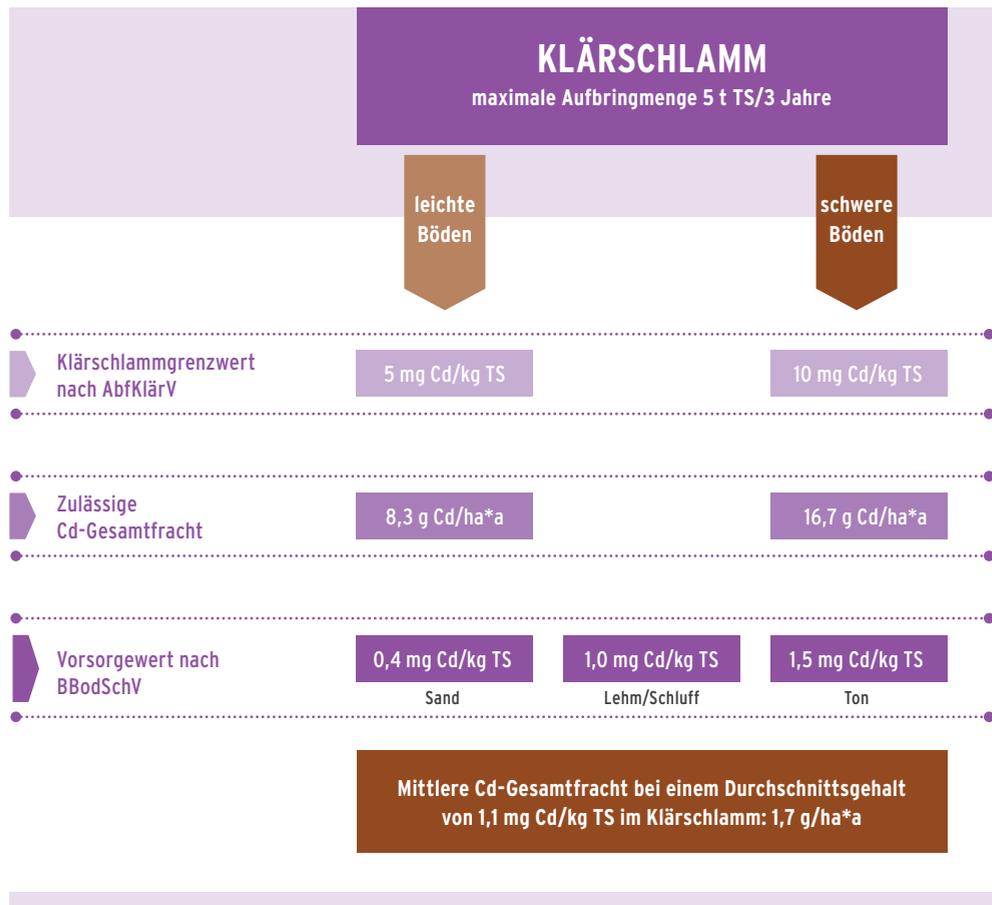
Am Beispiel Cadmium wird im Folgenden dargestellt, warum die Grenzwerte der AbfKlärV eine Überarbeitung erfordern, der durch die Novelle der Klärschlammverordnung Rechnung getragen werden soll. Cadmium ist neben Zink das einzige Schwermetall, dessen Übergang aus dem Boden in Getreidekörner in relevantem Ausmaß nachgewiesen werden kann. Aufgrund einer Überarbeitung der Bewertung der Toxizität hat die Europäische Behörde für Lebensmittelsicherheit (EFSA) den wöchentlich tolerierbaren Aufnahme von 7 µg/kg Körpergewicht auf 2,5 µg/kg Körpergewicht

abgesenkt, so dass generell der Eintrag von Cadmium zu minimieren ist. Dies gilt auch für die landwirtschaftliche Verwertung von Klärschlamm. Die derzeit möglichen Cadmiumfrachten bei Klärschlammdüngung sind in Bild 5 dargestellt.

Im Klärschlamm dürfen derzeit maximal 5 mg Cadmium pro kg TS enthalten sein, wenn der Klärschlamm auf sogenannte leichte Böden aufgebracht werden soll (Bild 5, erste Zeile). Bei einer maximalen Aufbringmenge von 5 t TS über einen Zeitraum von drei Jahren ergibt dies eine zulässige Gesamtfracht (Bild 5, zweite Zeile) von 8,3 g Cadmium pro Hektar und Jahr; im Fall der Aufbringung von Klärschlamm auf „sonstige Böden“ ist derzeit eine Cadmiumzufuhr von 16,7 mg pro Hektar und Jahr erlaubt.

Die zulässigen Gesamtfrachten überschreiten deutlich die tatsächlichen Cadmiumfrachten mit etwa 1,7 g Cadmium pro Hektar und Jahr (hier unterster Balken). Damit ist – bei Beibehal-

**BILD 5: MIT DEN MAXIMALEN AUFBRINGMENGEN NACH ABFKLÄRV MÖGLICHE ZULÄSSIGE CADMIUM-GESAMTFRACHTEN VERGLEICHEN MIT DEN TATSÄCHLICHEN MITTLEREN CADMIUMFRACHTEN [RUPPE ET AL.]**



Quelle: eigene Darstellung, Cd-Durchschnittsgehalte und Cd-Gesamtfrachten nach Ruppe et al. 2009  
ø 1,1 mg Cd/kg TS

tion der derzeitigen Grenzwerte – eine große Spanne bei der Qualität der Klärschlämme möglich. Der Aufbau einer Qualitätssicherung – wie in der Novellierung der AbfKlärV vorgesehen – könnte bei gleichzeitiger Anpassung der

Grenzwerte tendenziell zu einer homogenen Qualität von Klärschlämmen führen. Zum Vergleich sind (hier dunkellila dargestellt) die Vorsorgewerte nach der Bundesbodenschutzverordnung dargestellt.

## Vor- und Nachteile der landwirtschaftlichen Klärschlammverwertung

Bevor auf die Bedeutung von Phosphor und auf den Stand der Technik der Phosphorrückgewinnung eingegangen werden wird, sollen hier kurz die Vor- und Nachteile der landwirtschaftlichen Klärschlammverwertung in

Tabelle 11 dargestellt werden. Die Problematik beim Umgang mit bzw. der Entsorgung von Klärschlamm liegt in seiner Bedeutung als Schadstoffsенke und als Nährstofflieferant.

**TABELLE 11: VOR- UND NACHTEILE DER LANDWIRTSCHAFTLICHEN VERWERTUNG VON KLÄRSCHLAMM**

Pro	Kontra
Klärschlämme werden gründlich auf Schadstoffe untersucht, die AbfklärV sieht Grenzwerte für Schwermetalle und organische Schadstoffe vor	Auch die AbfklärV lässt offen, was möglicherweise an (derzeit noch) unbekanntem bzw. nicht geregelten Schadstoffen im Klärschlamm enthalten ist (z. B. Nanopartikel, Thallium, Tributylzinn (TBT), Mineralölkohlenwasserstoffe (MKW) und diverse Krankheitserreger)
Schlämme enthalten einen hohen Anteil an organischer Substanz (günstig für die Humusbildung)	Humusbildung kann auch auf anderem Wege (z. B. Fruchtfolgegestaltung) erfolgen
Preiswerte Nachlieferung an notwendigen Nährstoffen	Preiswerte Nährstoffnachlieferung ist auf anderem Wege möglich (z. B. Wirtschaftsdünger)
Kostengünstiger Phosphordünger, keine Importabhängigkeit	Die direkte Pflanzenverfügbarkeit des Phosphats hängt wesentlich davon ab, in welcher Form die Ausfällung erfolgte.

Bodenuntersuchung vor Klärschlammaufbringung (diese erfolgt aber auf Veranlassung und zu Lasten der Betreiber der Kläranlage).

# PHOSPHORRÜCKGEWINNUNG

## 06

Die statische Reichweite – also die Zeitspanne, die ein Rohstoff bei aktuellem Verbrauch weltweit noch zur Verfügung steht – der kontinentalen, erschlossenen Phosphorvorkommen beträgt etwa 360 Jahre [U.S. GEOLOGICAL SURVEY]. Problematisch ist dabei 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 pro 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 2033 erwartet [CORDELL ET.AL.].

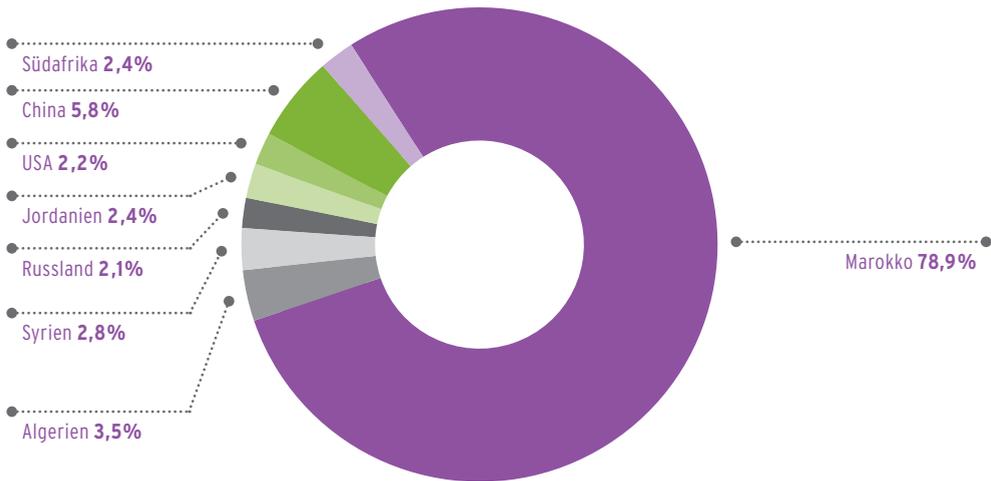
Die Food and Agriculture Organisation der Vereinten Nationen (FAO) geht von einem jährlichen Anstieg des globalen Phosphatdüngerbedarfes von 2% aus (das entspricht rund 4 Millionen Tonnen pro Jahr), wobei ca. 90% dieses Mehrbedarfes durch Asien und Amerika verursacht werden [FAO]. Dabei spielen das Wachstum der Weltbevölkerung und das Streben nach einem höheren Lebensstandard der Menschen in den Entwicklungsländern die größte Rolle. Vor allem der damit einhergehende Anstieg des Fleisch-

konsums wird den Phosphorverbrauch in die Höhe treiben, denn Nutztiere verbrauchen während der Aufzucht wesentlich mehr Energie in Form von Futter, als sie beim Schlachten liefern.

Aus Bild 6 geht hervor, dass sich etwa 90% der Lagerstätten unter der Kontrolle von nur fünf Staaten befinden und nahezu 50% der nachgewiesenen, kontinentalen Phosphorvorkommen auf der Erde in Afrika zu finden sind. Der Umstand, dass Marokko 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 als bedenklich einzustufen.

Weitere 35% der nachgewiesenen Vorkommen befinden sich im Hoheitsgebiet von Nationen die ein großes Eigeninteresse am Rohstoff Phosphor besitzen (China, USA). Dieser steht dem globalen Handel also nur begrenzt zur Verfügung.

**BILD 6: GLOBALE VERTEILUNG DER ERKUNDETEN RESERVEN VON ROHPHOSPHAT FÜR 2013 [U.S. GEOLOGICAL SURVEY]**



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 2007/2008 in Deutschland 138.000 t P in Form mineralischer Phosphatdünger verbraucht wurden [IWMI].

### Phosphorrückgewinnungspotentiale und -verfahren

Angesichts der wachsenden Erdbevölkerung und dem damit einhergehenden Phosphormehrbedarf [FAO] werden Rückgewinnungstechniken in Zukunft eine deutlich größere Rolle für die Versorgungssicherheit, die menschliche Gesundheit und die Schonung der natürlichen Ressourcen spielen. Im Rahmen der Initiative der Bundesregierung für den Ressourcenschutz förderte das Bundesministerium für Bildung und

Forschung (BMBF) und das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) die Entwicklung und den Einsatz neuer großtechnischer Verfahren zum Recycling von Phosphor aus kommunalem Klärschlamm, kommunalem Abwasser, Überschussgülle, Tiermehl und anderen phosphorhaltigen, organischen Materialien. Die nachfolgende Tabelle zeigt die Recyclingpotentiale einiger Stoffströme in Deutschland.

**TABELLE 12: THEORETISCHE PHOSPHOR-RECYCLINGPOTENTIALE VERSCHIEDENER STOFFSTRÖME IN DEUTSCHLAND [EIGENE ZUSAMMENSTELLUNG]**

Stoffstrom	Geschätzte rückgewinnbare Menge P in t/Jahr
Abwasser (kommunal)	54.000*
Abwasser (industriell)	15.000
Klärschlamm (kommunal)	50.000*
Klärschlammasche	66.000*
Wirtschaftsdünger	444.000
Tierische Nebenprodukte: (Kategorie 1-3, ohne Tierfette) (bis zu 6% P)	20.000
<b>Geschätzter Verbrauch an P in Deutschland</b>	<b>170.000</b>

\* Diese Potentiale sind nicht aufsummierbar, da sie verschiedene, konkurrierende Rückgewinnungspfade innerhalb des Abwasserpfades repräsentieren.

Bei vergleichenden Untersuchungen der Pflanzenverfügbarkeit verschiedener Recyclingprodukte mit marktgängigen Düngern wurde festgestellt, dass sich hohe Eisengehalte, verursacht durch den Einsatz von Eisensalzen als Fällmittel, negativ auf die Pflanzenverfügbarkeit auswirken. Auch für die Verwertung der Produkte zur elektrothermischen Phosphorherstellung (Thermphos, NL) muss das molare Fe:P-Verhältnis kleiner als 0,2 sein. Als sehr günstig haben sich dagegen Produkte aus Kläranlagen mit dem Bio-P-Verfahren erwiesen. Weiterführende Untersuchungen finden in verschiedenen Forschungsvorhaben statt.

Als besonders aussichtsreich können sowohl nasschemische Verfahren mit dem Fällungs-

produkt Magnesium-Ammonium-Phosphat (MAP), als auch thermisch-metallurgische Verfahren erachtet werden. Die MAP-Verfahren ermöglichen eine Rückgewinnung von rund 40% bis 70% des im Kläranlagenzulauf enthaltenen Phosphors und liefern mit dem MAP ein schadstoffarmes Produkt, welches nicht zuletzt wegen seiner guten Pflanzenverfügbarkeit hervorragend als 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 im MAP-Dünger verhältnismäßig hoch.

Die thermisch-metallurgischen Verfahren sind im Vergleich zur MAP-Fällung technisch

aufwendiger, ermöglichen aber eine nahezu vollständige Rückgewinnung (>90%) des im Kläranlagenzulauf befindlichen Phosphors. Ein weiterer Vorteil ist die gleichzeitige Nutzung der thermischen Energie des Klärschlammes und die Zerstörung der im Schlamm enthaltenen organischen Schadstoffe während der Verbrennung. Voraussetzung für eine effiziente thermisch-metallurgische Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm bzw. Klär-

schlammmasche ist die Monoverbrennung des Klärschlammes, da hier das Phosphor in relativ hohen Konzentrationen und einem überschaubaren Anteil an Verunreinigungen durch z. B. Schwermetalle vorliegt.

Der wesentliche Nachteil der Mitverbrennung ist, dass der darin enthaltene Phosphor für eine Rückgewinnung verloren ist. Stellt man dagegen die Verbrennung des in Deutschland

**TABELLE 13: VERFAHREN ZUR PHOSPHORRÜCKGEWINNUNG AUS DEM ABWASSERSTROM [MONTAG ET.AL. UND EIGENE ERHEBUNG]**

Wässrige Phase	Klärschlamm	Klärschlammmasche
Adsorptionsverfahren	Air Prex / MAP-Verfahren	Ash Dec (SUSAN)
CSIR Wirbelbettreaktor	Aqua Reci	BioCon
DHV Crystalactor <sup>®</sup>	CAMBI	Eisenbadreaktor (ATZ)
Kurita Festbett	KEMIKOND	EPHOS
Magnetseparator	KREPRO	PASCH
Nachfällung/Flockungsfiltration	LOPROX	SESAL(-Phos)
NuReBas-Prozess	Mephrec	SEPHOS
Ostara PEARL <sup>™</sup>	Peco	Bioleaching
Phosiedi	Phostrip	Mephrec
P-RoC (Prophos)	PRISA	Thermphos
RECYPHOS	Seaborne	PhosRec (Koop Schiefer)
REPHOS	Stuttgarter Verfahren	RECOPHOS
RIM NUT Ionenaustauscher	Unitika-Phosnix <sup>®</sup>	LEACHPHOS
Sydney Water Board Reactor	FIX-Phos	Eberhard-Verfahren
Phostrip	Gifhorner-Verfahren	RecoPhos (DE)
Phosnix	PROXNAN	EPHOS
	Kemira-KREPRO	Inocre
PRISA	POPROX-Verfahren	
NuReSys	Aqua-Reci	
Ebara	MEPHREC	
MAP Kristallisation Treviso	ATZ-Eisenbatreaktor	
RECYPHOS	RecoPhos (AT)	

insgesamt anfallenden Klärschlammes (knapp 2 Mio. Tonnen Trockenmasse pro Jahr) komplett auf die Monoverbrennung um, ließen sich theoretisch aus der anfallenden Asche rund 66.000 Tonnen Phosphor pro Jahr zurückgewinnen. Dies entspricht rund 55% des landwirtschaftlichen Verbrauchs an mineralischem Phosphor.

Tabelle 13 gibt einen Überblick über weltweit entwickelte und teilweise bereits etablierte

Verfahren zur Phosphor-Rückgewinnung. Ein Großteil der hier dargestellten Verfahren wurde in Deutschland entwickelt. Jedoch konnten bisher nur sehr wenige als Pilotanlagen oder im großtechnischen Maßstab realisiert werden.

Weiterführende Informationen können der Homepage [www.phosphorrecycling.de](http://www.phosphorrecycling.de) entnommen werden.

### Deutschland auf dem Weg zum wirtschaftlichen Phosphorrecycling

In Tabelle 14 sind die in Deutschland bereits realisierten bzw. konkret geplanten Anlagen zur Phosphorrückgewinnung mit ihren wichtigsten Parametern zusammengefasst.

Die Forschungs- und Entwicklungslandschaft spiegelt das gestiegene Interesse an Rückgewinnungstechniken wider, die es ermöglichen, den in verschiedenen „Abfallstoffströmen“ enthaltenen Phosphor zurückzugewinnen und nutzbar zu machen. Wie sich auf der im Mai 2009 in Vancouver durchgeführten „International Conference on Nutrient Recovery from Waste Water Streams“ zeigte, ist Deutschland in punkto Forschung und Entwicklung auf diesem Gebiet im internationalen Vergleich unter den führenden Nationen. Jedoch sind Staaten wie Kanada, Japan und die USA bei der großtechnischen Realisierung Vorreiter. In der Schweiz wird bereits eine Gesetzesvorla-

ge erarbeitet, welche die P-Rückgewinnung aus dem Abwasserstrom und Tiermehl vorschreibt und zum Ziel hat, die Schweiz von einem P-Importland zu einem P-Exporteur zu machen. Das Inkrafttreten des Gebotes war für 2011/12 geplant und sollte eine Rückgewinnungsquote zwischen 50 und 100% festschreiben, wobei eine Übergangsfrist bis 2015 eingeräumt wird. In der Schweiz ist die Klärschlammdeponierung seit 2008 ausnahmslos verboten.

Schweden verfolgt das Ziel, bis 2015 mindestens 60% des im Abwasser enthaltenen Phosphors zu recyceln und in der Landwirtschaft zu verwerten [SWEDISH EPA].

In Deutschland stehen bereits eine Vielzahl verschiedener technischer Verfahren zur Verfügung, allerdings befinden sie sich noch im Versuchsstadium. An einer großtechnischen

**TABELLE 14: IN DEUTSCHLAND REALISIERTE BZW. KONKRET GEPLANTE GROSSTECHNISCHE ANLAGEN (STAND 2010)  
[EIGENE ZUSAMMENSTELLUNG]**

Betreiber/Standort	Verfahren	Input	Output	Menge P <sup>1</sup> /a	Status/Bemerkung
Seaborne EPM AG/ KA Gifhorn	Seaborne (MAP-Fällung)	120 m <sup>3</sup> /d Gärsubstrat			läuft seit 2007
Remondis Aqua/ Altentreptow (MV)	REPHOS® MAP-Fällung	Molkereiabwasser (80 mg P/l)			läuft seit 2007
Berliner Wasser- betriebe/KW Waßmannsdorf und ABA Neuwerk- Mönchengladbach	AirPrex® Handelsname: „Berliner Pflanze“ MAP-Fällung	Faulschlamm  (100 m <sup>3</sup> /h)	2,5 t  MAP/d	ca. 115 t	Stand 2013
KW Neuwerk- Mönchengladbach	AirPrex®-MAP- Fällung	Faulschlamm (50 m <sup>3</sup> /h)	MAP		Stand 2013
Braunschweig- Steinhof	AirPrex®-MAP- Verfahren (voraussichtlich)		MAP		Stand 2013
Lingen	AirPrex®		MAP		Stand 2013
Hildesheim	FIX-Phos		CaP		Stand 2013
Mainz	Budenheim Process		CaP		Versuchsphase. Stand 2013
KA Offenburg (Baden-Württemberg)	Stuttgarter Verfahren (MAP-Fällung)	Faulschlamm	50 kg MAP/d	ca. 18 t	Stand 2011
Ash Dec jetzt Outotec (RETERRA) (Brandenburg)	SUSAN  Thermo- chemisch	Klärschlamm- masche  (ca. 9 % P)  (12.000 t/a)	ca. 10.000 t /a P-Dünger	geplant ca. 1.000 t	Geplante Inbetrieb- nahme 2014/2015
Ingitec (Nürnberg)	Mephrec® (Metallurgisch)	Klärschlamm (25% TS), 60.000 t/a (oder Klärschlamm- masche)	P-Schlacke 12.000 t/a	geplant ca. 500 t	Geplante Inbetrieb- nahme 2014
RecoPhos (Schönebeck)	Thermo- chemisch	Klärschlamm- masche	P-Dünger	Nicht bekannt	Geplante Inbetrieb- nahme 2014
P-RoC (Neuburg)	Kristallisation	Schlamm	Ca-P	ca. 20 t	Stand 2012

<sup>1</sup> Umrechnung der Phosphoranteile von: P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> = 43,64% und MAP (MgNH<sub>4</sub>PO<sub>4</sub> · 6H<sub>2</sub>O) = 12,62%

Umsetzung wird derzeit intensiv gearbeitet. Es gilt, die rechtlichen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen zu schaffen, die es den neuen Verfahren ermöglichen, sich im Kreislaufwirtschaftssystem zu etablieren.

Eine Möglichkeit bieten neben der Finanzierung über Förderprogramme auch Einnahmen aus der Abwasserabgabe. Der Abwasser-/ Klärschlamm Pfad birgt das größte Phosphorrückgewinnungspotential in sich, sodass das P-Recycling in Form eines Rückgewinnungsgebotes in der Abwasserverordnung verbindlich festgeschrieben werden soll, um so die Ausrüstung von Kläranlagen mit der geeigneten Rückgewinnungstechnik voranzutreiben. Um den im Klärschlamm enthaltenen Phosphor noch effektiver zu nutzen, müsste die Kapazität der Monoverbrennungsanlagen von derzeit knapp 500.000 t TS/a auf ca. 2 Mio. t TS/a ausgebaut werden. Die Anerkennung der ausschließlichen Klärschlammmonoverbrennung als Quelle erneuerbarer Energie und Förderung über das Erneuerbare Energien Gesetz (EEG) würde diese Kapazitätserweiterung voraussichtlich beschleunigen.

Um die in den Klärschlammaschen enthaltenen Rohstoffe (neben Phosphor auch wichtige Metalle) für die Zukunft zu sichern, sollten unseres Erachtens nach speziell dafür angelegte, rückbaufähige Deponien bzw. Platz auf vorhandenen Deponien geschaffen werden, bis genügend Kapazitäten vorhanden sind, die anfallenden Aschemengen weiter zu verarbeiten.

Die hier vorgestellten Verfahren liefern allesamt düngefähige Produkte. Die Schadstoffbelastungen sind geringer als bei konventionellen Mineraldüngern, die aus Rohphosphat sedimentären Ursprungs hergestellt wurden. Denn die Recyclingprodukte enthalten deutlich weniger Cadmium und Uran, als die aus sedimentären Rohphosphaten hergestellten Dünger [RÖMER ET. AL.]. Die erforderliche Pflanzenverfügbarkeit, d. h. eine ausreichende Düngewirkung, ist bei allen Produkten gegeben. Generell verfügen die MAP-Produkte gegenüber den Ascheprodukten über eine höhere Pflanzenverfügbarkeit. Eine kurze Gegenüberstellung der Vor- und Nachteile des MAP-Verfahrens und der thermischen Rückgewinnungsverfahren stellt Tabelle 15 dar.

Seriöse Aussagen zur Wirtschaftlichkeit der einzelnen Verfahren lassen sich nicht treffen, da bislang lediglich zwei Verfahren in großtechnischen Anlagen in Betrieb genommen wurden. Das von der Firma Remondis Aqua realisierte REPHOS-Verfahren hat sich bislang bewährt und operiert wirtschaftlich. Das Air-Prex® läuft auf verschiedenen Kläranlagen wirtschaftlich. Die Wirtschaftlichkeit der Verfahren ULOPHOS®, Mephrec® und RecoPhos® sei aus Sicht der Verfahrensentwickler und potentiellen Betreibern unter den gegebenen Rahmenbedingungen, auch mit geringen Verkaufserlösen für die Produkte, theoretisch gegeben. Konkrete Anlagen, bei denen diese Verfahren in der grosstechnischen Praxis umgesetzt wurden, bestehen noch nicht, sind

TABELLE 15: VERGLEICH NASSCHEMISCHE MAP-VERFAHREN MIT THERMISCHEN VERFAHREN

	MAP	thermisch
<b>Vorteile</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kostengünstiger</li> <li>• Leichter nachzurüsten</li> <li>• Bessere Pflanzenverfügbarkeit</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hoher Rückgewinnungsgrad (90%)</li> <li>• Simultane stoffliche und energetische Nutzung des Klärschlammes</li> <li>• Flexibler einsetzbar (für alle Klärschlämme und andere Stoffe) geeignet</li> <li>• Vollständige Zerstörung organischer Schadstoffe</li> <li>• Deutlich weniger Reststoffe (Abfall)</li> </ul>
<b>Nachteile</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Derzeit nur bis zu 40% Rückgewinnung</li> <li>• Nur für Bio-P-Anlagen geeignet</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Höhere Investitionskosten</li> <li>• Aufwändigere Verfahrensführung</li> </ul>

allerdings z. T. in Planung (siehe z. B. Mephrec®). Theoretisch kann davon ausgegangen werden, dass Phosphorrecyclingverfahren, die zur Zeit nicht wirtschaftlich rentabel betrieben werden können, diese Wirtschaftlichkeit bei den heute prognostizierten Weltmarktpreisen und unter Annahme eines Beginns der systematischen Einführung des P-Recyclings im Jahr 2012 in 3 bis 20 Jahren erreichen werden [SARTORIUS].

Die Einführung einer Beimischungsquote wird aufgrund des derzeitigen Stands der Technik im Bereich der Phosphorrückgewinnung nicht gefordert. Um dennoch die Entwicklung in diesem Bereich voranzubringen und hohe Phosphorrückgewinnungsmengen zu erreichen schlägt die Länderarbeitsgemeinschaft Abfall in ihrem Bericht „Bewertung von Handlungsoptionen zur

nachhaltigen Nutzung sekundärer Phosphorreserven“ verschiedene Maßnahmen, wie etwa Selbstverpflichtungen der Produzenten oder die Einrichtung eines Fonds oder ähnliches vor.

[http://www.laga-online.de/servlet/is/23875/Bericht\\_Phosphorr%C3%BCckgewinnung.pdf?command=downloadContent&filename=Bericht\\_Phosphorr%FCckgewinnung.pdf](http://www.laga-online.de/servlet/is/23875/Bericht_Phosphorr%C3%BCckgewinnung.pdf?command=downloadContent&filename=Bericht_Phosphorr%FCckgewinnung.pdf)

### Verwertungswege der Klärschlammaschen

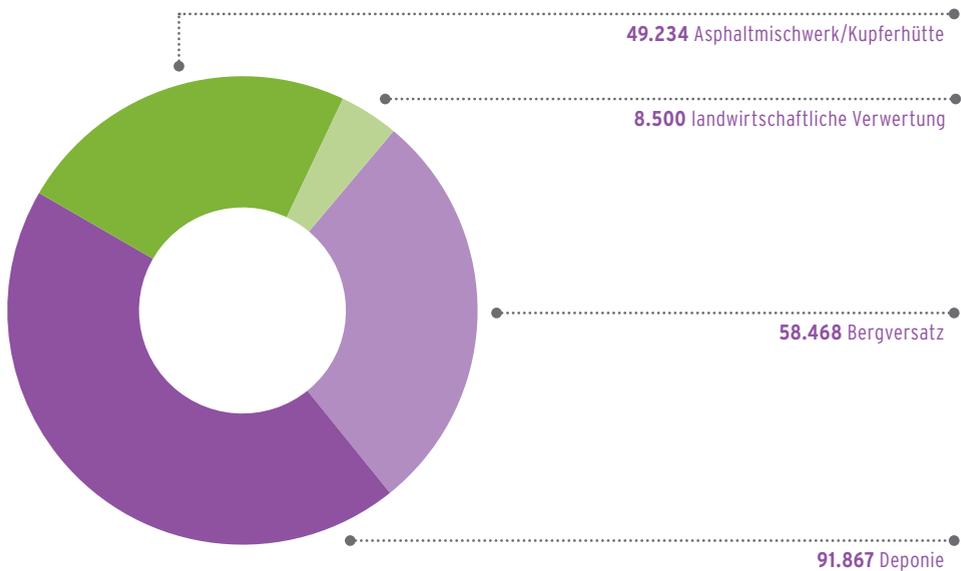
Derzeit wird, wie bereits schon erwähnt, in der Fachwelt diskutiert, Klärschlammaschen separat und leicht rückholbar abzulagern.

Allerdings schließen die momentanen Verwertungswege der Asche eine Rückholbarkeit der Aschen und damit des Phosphors aus.

Bild 7 verdeutlicht, dass der überwiegende Teil der Aschen auf Deponien verwertet wurde oder in den Bergversatz ging. Ein geringer Teil

wird, da er die Anforderungen der Düngemittelverordnung einhält, auf landwirtschaftlichen Flächen als Dünger genutzt.

**BILD 7: ENTSORGUNGSWEGE DER KLÄRSCHLAMMASCHEN AUS MONOKLÄRSCHLAMMVERBRENNUNGSANLAGEN FÜR DAS JAHR 2009 VON 18 ANLAGEN [EIGENE ERHEBUNG]**



## KLÄRSCHLAMMANFALL, ENTSORGUNG UND VERWERTUNG

07

Im Jahre 2010 wurden etwa zwei Millionen Tonnen Trockenmasse (t TM) Klärschlamm in Deutschland entsorgt. Rund die Hälfte dieser

Menge wurde thermisch entsorgt. Auf die landwirtschaftliche, landschaftsbauliche und die sonstige stoffliche Verwertung (z. B. durch Kom-

postierung oder Rekultivierungsmaßnahmen) entfielen 883.659 t TM Klärschlamm. Einen Überblick über die Entsorgungswege der einzelnen Bundesländer in Deutschland ist in der Tabelle 16 sowie in Bild 8 zu sehen. Bundesländer wie Ba-

den-Württemberg und Nordrhein-Westfalen verbrennen über 60% des in ihrem Bundesland anfallenden Klärschlammes. Eine überwiegende landwirtschaftliche Verwertung des Klärschlammes wird vor allem in den Bundesländern

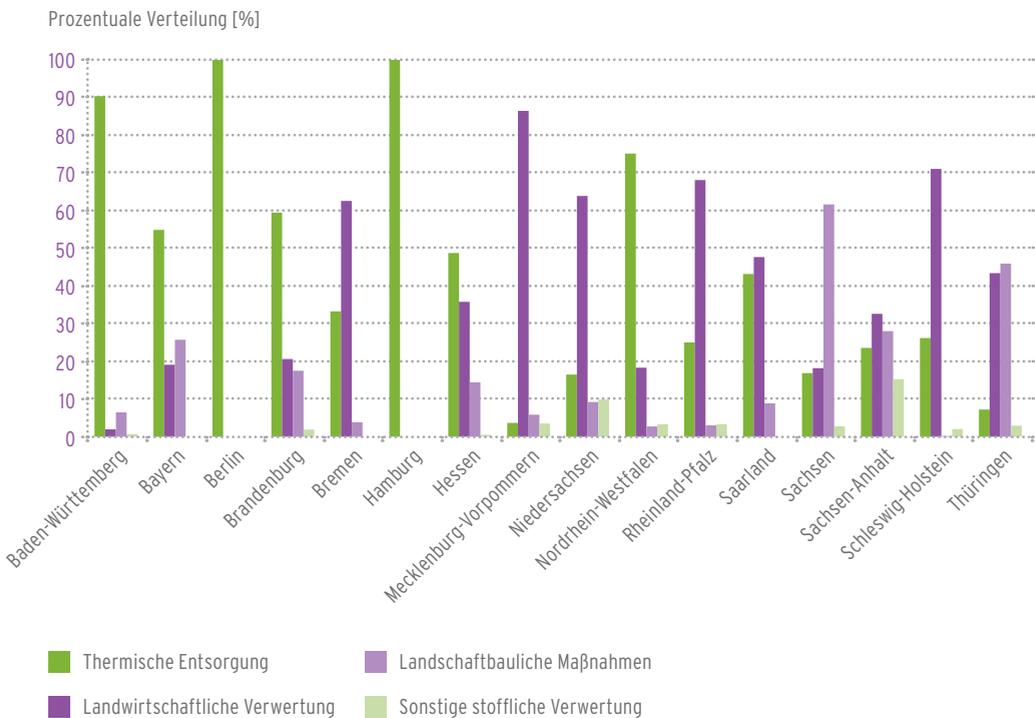
**TABELLE 16: KLÄRSCHLAMMENTSORGUNGSMENGEN UND WEGE 2011, UNTERSCHIEDEN NACH BUNDESLÄNDERN [DESTATIS G]**

Bundesland	Klärschlamm- mentsorgung gesamt	Landwirt- schaftliche Verwertung	Landschafts- bauliche Maßnahmen	Sonstige stoffliche Verwertung	Thermische Entsorgung	Deponierung
	[t TM/a]	[t TM/a]	[t TM/a]	[t TM/a]	[t TM/a]	[t TM/a]
<b>Baden-Württemberg</b>	244.505	5.306	16.304	2.219	220.676	-
<b>Bayern</b>	273.161	52.582	70.608	-	149.971	-
<b>Berlin</b>	44.351	-	-	-	44.351	-
<b>Brandenburg</b>	89.403	18.560	15.788	1.883	53.172	-
<b>Bremen</b>	19.011	11.894	772	-	6.345	-
<b>Hamburg</b>	46.700	-	-	-	46.700	-
<b>Hessen</b>	157.481	56.510	22.994	1.132	76.845	-
<b>Mecklenburg- Vorpommern</b>	35.407	30.578	2.139	1.319	1.371	-
<b>Niedersachsen</b>	200.648	128.169	18.869	20.193	33.417	-
<b>Nordrhein- Westfalen</b>	468.729	86.571	13.766	16.479	351.913	-
<b>Rheinland- Pfalz</b>	89.114	60.676	2.875	3.143	22.420	-
<b>Saarland</b>	19.751	9.425	1.784	-	8.542	-
<b>Sachsen</b>	85.449	15.679	52.671	2.539	14.560	-
<b>Sachsen- Anhalt</b>	59.569	19.486	16.761	9.204	14.118	-
<b>Schleswig- Holstein</b>	76.057	54.019	312	1.717	20.009	-
<b>Thüringen</b>	40.790	17.732	18.759	1.278	3.021	-
<b>Insgesamt</b>	<b>1.950.126</b>	<b>567.187</b>	<b>254.402</b>	<b>61.106</b>	<b>1.067.431</b>	-

Mecklenburg-Vorpommern, Niedersachsen, Rheinland-Pfalz und Schleswig-Holstein praktiziert. Auffällig ist, dass die Landes Freie Hanse-

stadt Bremen einen im Gegensatz zu den Stadtstaaten Berlin und Hamburg hohen Anteil an der landwirtschaftlichen Verwertung hat.

**BILD 8: PROZENTUALE VERTEILUNG DER ENTSORGUNGSWEGE IN DEN BUNDESLÄNDERN 2011 [DESTATIS G]**



### Entwicklung der Klärschlammmenge

1998 wurden etwa 2,2 Mio. t TM entsorgt. Seitdem hat die Menge des jährlich zu entsorgenden Klärschlammes kontinuierlich abgenommen. Die Menge sank bis 2009 auf knapp unter 2 Mio. t TM. Lediglich in den Jahren 2004 bis 2008 gab es einen leichten Anstieg um

wenige 10.000 t TM. Ein wesentlicher Grund für diesen Verlauf ist in der Zunahme der anaeroben Schlammbehandlung zu sehen, da sich dadurch die Menge an zu entsorgendem Klärschlamm verringert. Die folgende Grafik verdeutlicht diese Entwicklung:

**BILD 9: ENTWICKLUNG DER KLÄRSCHLAMMENGE [DESTATIS A, B, C, D, E, F, G]**

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

**TABELLE 17: ENTWICKLUNG DER KLÄRSCHLAMMENGEN UND DEREN ENTSORGUNGSWEGE [DESTATIS A, B, C, D, E, F, G]**

Jahr	Klärschlamm- entsorgung (gesamt) t TM	stoffliche Verwertung				
		Zusammen t TM	in der Landwirtschaft t TM    %		bei landschaftsbaulichen Maßnahmen t TM    %	
2011	1.950.126 <sup>1)</sup>	882.695	567.187	29	254.402	13,0
2010	1.887.408 <sup>1)</sup>	883.659	566.295	30	259.312	13,7
2009	1.956.447 <sup>1)</sup>	927.516	589.149	30,1	282.455	14,4
2008	2.054.102 <sup>2)</sup>	973.997	587.832	29	331.556	16
2007	2.055.906 <sup>2)</sup>	1.036.844	592.561	29	368.912	18
2006	2.048.507 <sup>2)</sup>	1.078.264	611.598	30	399.712	20
2004	2.260.846	1.175.694	627.989	-	492.768 <sup>3)</sup>	-
2001	2.429.403	1.399.456	754.837	-	583.269 <sup>3)</sup>	-
1998	2.459.177	1.490.074	783.662	-	628.550 <sup>3)</sup>	-

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

Das Klärschlammaufkommen 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 Abwasserreinigungsanlagen 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 Klärschlammengen und Entsorgungswege über

die Jahre hinweg dient Tabelle 17. Hier ist klar die Verschiebung der zu entsorgenden Klärschlammengen von der Deponierung und der landschaftsbaulichen Maßnahmen zur thermischen Verwertung hin zu erkennen.

In Bild 10 ist die Entwicklung der verschiedenen Entsorgungswege dargestellt. Die thermische Entsorgung von Klärschlamm nahm seit 1991 von 9 Prozent auf 52,5 Prozent im Jahr 2009 zu. Die Deponierung von Klärschlamm nahm von 42 Prozent auf fast Null Prozent ab. Grund hierfür ist das seit 1. Juni 2005 geltende Depo- nierungsverbot unbehandelter Abfälle. Eben- falls abgenommen hat die landschaftsbauliche Verwertung. Wurden 1998 noch 628.550 t TM

			Thermische Entsorgung		Deponie		Abgabe an andere Abwasser- behandlungsanlagen	Zwischenlagerung
sonstige stoffliche Verwertung								
t TM	%	t TM	%	t TM	%	t TM	t TM	
61.106	3	1.067.431	55	0	0			
58.052	3,1	1.003.749	53,2	0	0	-	-	
55.912	2,9	1.028.034	52,5	897	0	-	-	
54.609	3	1.077.624	53	2.481	0	-	-	
75.371	4	1.015.014	49	4.048	0	-	-	
66.954	3	965.115	47	5.128	0	-	-	
54.937	-	711.170	-	79.052	-	230.726	64.204	
61.350	-	554.924	-	159.673	-	234.227	81.123	
77.862	-	395.859	-	205.140	-	254.254	113.850	

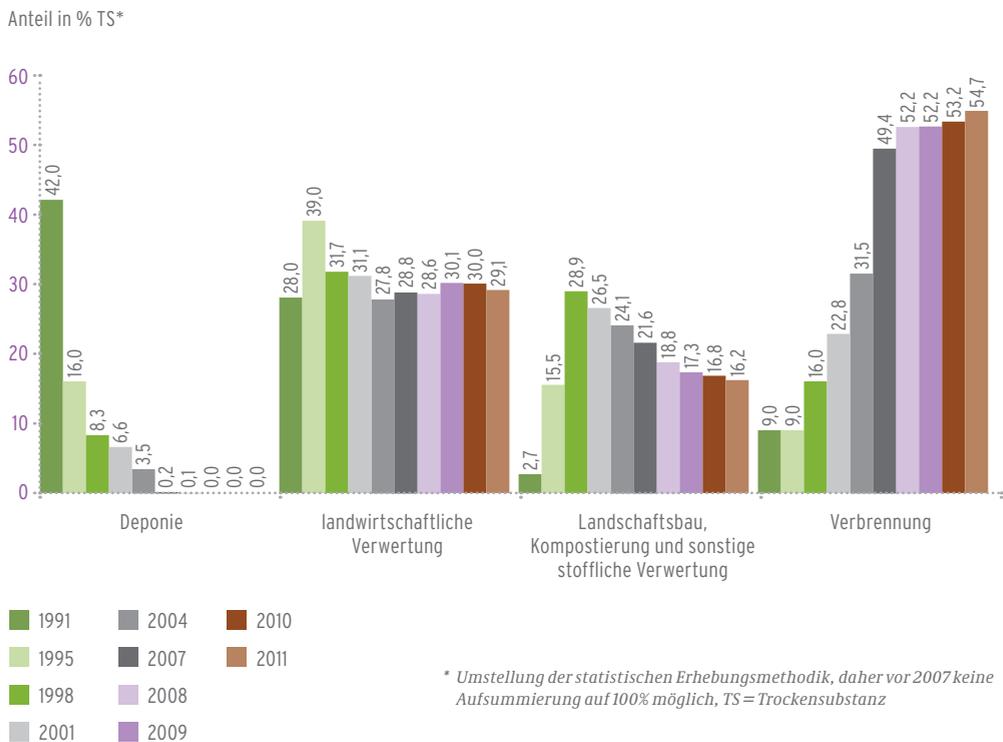
2) Ohne Abgabe an andere Abwasserbehandlungsanlagen

3) Kompostierung und landwirtschaftliche Maßnahmen wurden zusammengefasst

auf diesem Wege verwertet, so waren es 2009 nur noch 282.455 t TM. Die landwirtschaftliche Verwertung ist über die Jahre hinweg relativ konstant geblieben. 2004 wurden 627.989 t TM

Klärschlamm auf landwirtschaftlichen Flächen ausgebracht. 2009 waren es immer noch 589.149 t TM.

**BILD 10: KLÄRSCHLAMMENTSORGUNG IN DEN JAHREN 1991 BIS 2010 [UBA UND DESTATIS F]**



### Theoretische Kapazitäten zur Verbrennung von Klärschlamm

Ein Ausstieg aus der landwirtschaftlichen Verwertung hin zu einer komplett thermischen Verwertung erfordert den Aufbau von

Verbrennungskapazitäten. Nach Expertenschätzungen standen 2009 etwa 1,2 Mio. t TM in Deutschland zur Verfügung. Tabelle 18 zeigt in welchen Bereichen die verfügbaren Kapazitäten liegen.

TABELLE 18: BESTEHENDE VERBRENNUNGSKAPAZITÄTEN IN DEUTSCHLAND 2009 [SCHMITZ]

Anlagen	Genehmigte Kapazitäten [t TM/a]	Verfügbarkeit [%]	Genutzte Kapazität [t TM]
EnBW- Kraftwerke	69.375		
E.ON-Kraftwerke	170.475		
RWE-Kraftwerke	213.700		
Vattenfall-Kraftwerke	126.750		
Kraftwerke anderer Betreiber	136.200		
<b>Kraftwerke gesamt</b>	<b>716.500</b>	<b>70</b>	<b>501.550</b>
<b>Klärschlamm-Monoverbrennungsanlagen</b>	<b>554.750</b>	<b>90</b>	<b>499.275</b>
<b>Zementwerke</b>	<b>89.000</b>	<b>95</b>	<b>84.550</b>
<b>Müllverbrennungsanlagen</b>	<b>119.300</b>	<b>80</b>	<b>95.440</b>
<b>Klärschlammverbrennung Deutschland gesamt</b>	<b>1.479.550</b>		<b>1.180.815</b>
<b>Thermisch verwertete Menge Klärschlamm 2009</b>			<b>1.028.034</b>
<b>Gesamtmenge Klärschlamm 2009</b>			<b>1.956.447</b>

Die genehmigten Klärschlammmitverbrennungskapazitäten der Kraftwerke in Deutschland liegen nach [SCHMITZ] bei etwa 716.000 t TM pro Jahr (TM/a). Technisch können jedoch nur 500.000 t TM/a genutzt werden. 2009 lag die Kapazität der Monoverbrennungsanlagen bei etwa 500.000 t TM/a. Die momentanen Kapazitäten liegen (z. B. durch Zubau neuer Anlagen) jedoch etwas höher. Insgesamt waren 2009 also Kapazitäten in Höhe von etwa 1,2 Mio. t TM/a verfügbar (siehe Tabelle 18). Ein wichtiger Schritt bei einem Ausstieg aus der landwirtschaftlichen Verwertung des Klärschlammes

ist der Aufbau von neuen Anlagen, um ausreichend Kapazitäten zur Verfügung zu haben.

### Klärschlammverwertung in den Mitgliedstaaten der EU

In der Europäischen Union fallen im Jahr etwa 11,5 Mio. t TS Klärschlamm an. Tabelle 19 enthält die Mengen der zur Entsorgung anfallenden Klärschlämme in den Mitgliedstaaten der EU sowie deren als Prozentzahl dargestellte Entsorgungswege.

TABELLE 19: KLÄRSCHLAMMAUFKOMMEN IN EUROPA UND DEREN VERWERTUNGSWEGE (SORTIERT NACH DEN EINZELNEN MITGLIEDSTAATEN) NACH [EUROSTAT] UND [MILIEU; WRC; RPA], STAND 2010

Mitgliedsstaat	Bevölkerungsanteil mit Anschluss an kommunale Kläranlagen insgesamt	Gesamtaufkommen Klärschlamm in den EU-Mitgliedstaaten	Anteil an europäischen Gesamtaufkommen
	[%]	[Mio. kg TS/a]	[%]
Bulgarien	45,0	47,0	0,4
Zypern	30,0	10,8	0,1
Tschechische Republik	76,0	260,0	2,3
Estland	80,0	33,0	0,3
Ungarn	57,0	175,0	1,5
Lettland	65,0	30,0	0,3
Litauen	71,0	80,0	0,7
Malta	48,0	10,0	0,1
Polen	64,0	520,0	4,5
Rumänien	29,0	165,0	1,4
Slowakei	52,0	55,0	0,5
Slowenien	57,0	25,0	0,2
Österreich	93,0	273,0	2,4
Belgien	69,0	170,0	1,5
Dänemark	k. A.	140,0	1,2
Finnland	81,0	155,0	1,3
Frankreich	80,0	1.300,0	11,3
Deutschland	95,0	2.000,0	17,4
Griechenland	87,0	260,0	2,3
Irland	84,0	135,0	1,2
Italien	k. A.	1.500,0	13,0
Luxemburg	95,0	10,0	0,1
Niederlande	99,0	560,0	4,9
Portugal	70,0	420,0	3,7
Spanien	92,0	1.280,0	11,1
Schweden	86,0	250,0	2,2
Vereinigtes Königreich	k. A.	1.640,0	14,3
<b>Total EU 15</b>	<b>85,9</b>	<b>10.093,0</b>	<b>87,7</b>
<b>Total EU 27</b>	<b>71,0</b>	<b>11.503,8</b>	<b>-</b>

\*Mittelwerte

	Landwirtschaftliche Verwertung	Verbrennung	Deponierung	Andere Optionen
	[%]	[%]	[%]	[%]
	50,0	0,0	30,0	20,0
	50,0	0,0	40,0	10,0
	55,0	25,0	10,0	25,0
	15,0	-	-	85,0
	75,0	5,0	10,0	5,0
	30,0		40,0	30,0
	30,0	0,0	5,0	65,0
	-	-	100,0	-
	40,0	5,0	45,0	10,0
	0,0	5,0	95,0	
	50,0	5,0	5,0	10,0
	5,0	25,0	40,0	30,0
	15,0	40,0	1,0	45,0
	10,0	90,0	-	-
	50,0	45,0	-	-
	5,0	-	-	95,0
	65,0	15,0	5,0	15,0
	30,0	50,0	0,0	20,0
	5,0		95,0	
	75,0		15,0	10,0
	25,0	20,0	25,0	30,0
	90,0	5,0		5,0
	0,0	100,0		
	50,0	30,0	20,0	
	65,0	10,0	20,0	
	15,0	5,0	1,0	75,0
	70,0	20,0	1,0	10,0
	<b>38,0*</b>	<b>35,8*</b>	<b>18,3*</b>	<b>33,9*</b>
	<b>37,3*</b>	<b>23,8*</b>	<b>28,7*</b>	<b>31,3*</b>

Den größten Anteil am Gesamtklärschlamm-aufkommen in den EU-27 Ländern hat die Bundesrepublik Deutschland (18%). Die hohe Bevölkerungszahl und der hohe Anschlussgrad an kommunale Kläranlagen erklären diesen Klärschlammfall. Das Vereinigte Königreich entsorgt ebenfalls eine große Men-

ge an Klärschlamm im Jahr. 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.

## KOSTEN DER KLÄRSCHLAMMENTSORGUNG

### 08

Der Ausstieg aus der landwirtschaftlichen Klärschlammverwertung würde hauptsächlich die Produzenten von Klärschlamm betreffen. Denn dadurch müsste der Klärschlamm vermutlich weiter als bisher transportiert werden. Die möglicherweise höheren Kosten für die Entsorgung würden dann wahrscheinlich auf die Abwassergebühren aufgeschlagen und somit auf die Bevölkerung umgelegt werden [FELS ET AL.].

Inwieweit der Bürger den Ausstieg aber über die Abwasserkosten mitbezahlen muss, soll im Folgenden in einem ersten einfachen Ansatz untersucht werden.

Die Kosten der Abwasserentsorgung werden zurzeit durch die folgenden Faktoren bestimmt:

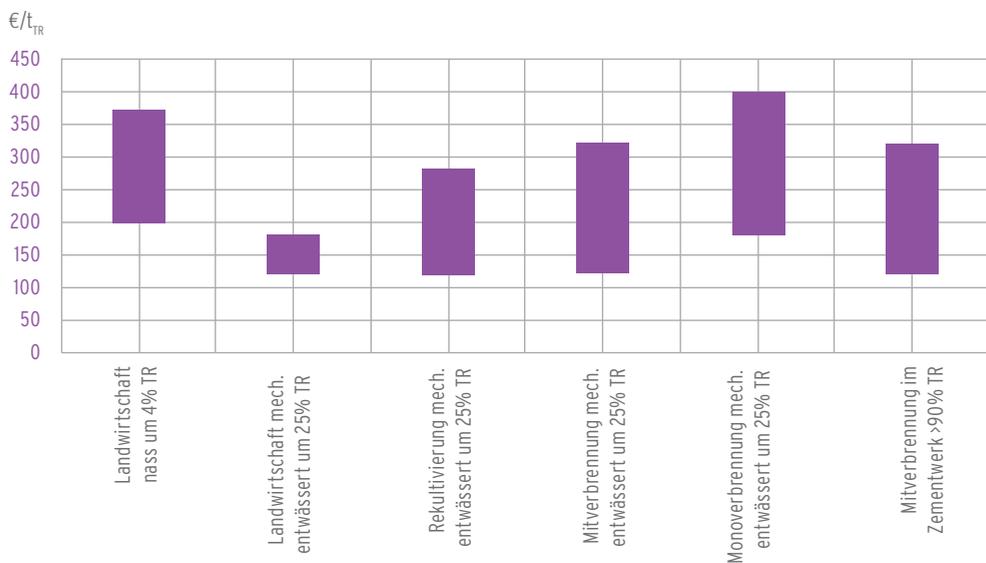
- Größe und Ausbaugrad der Kläranlage
- Saisonale Einflüsse (z. B. durch den Tourismus)
- Art der Klärschlamm Entsorgung
- Strukturelle Eigenschaften (z. B. durch Geländeerhebungen)
- Einwohnerdichte pro Kanalmeter
- Zuschüsse [FELS ET AL]

Nach [FELS ET AL] haben besonders die Anschaffungskosten von Kläranlagen und Kanalnetzen einen sehr langfristigen Einfluss auf die Abwasserentsorgungskosten. Etwa 75 bis 85% der Kosten sind unabhängig von der verbrauchten Menge Wasser. Der zweitgrößte Posten, der in die Abwasserkosten mit einfließt, sind Abschreibungen und Zinsen. Personalkosten sind mit etwa 14% kalkuliert. Weitere 10% entfallen

auf Material und Energie. Somit schlagen die Behandlung und Entsorgung von Klärschlamm lediglich mit 3% zu Buche, was bedeutet, dass der nachgeschaltete Entsorgungsweg im Vergleich zu den anderen Kosten wenig ins

Gewicht fällt. Eine Änderung der Entsorgung hätte deshalb wohl nur geringe Auswirkungen auf die Gesamtkosten und würde damit auch nur einen geringen Beitrag zur Erhöhung der Abwassergebühren liefern [FELS ET AL].

**BILD 11: KOSTEN DER KLÄRSCHLAMMENTSORGUNG EINSCHLIESSLICH DER KOSTEN FÜR ENTWÄSSERUNG UND TRANSPORT IN EURO PRO TONNE TR [DWA A, B]**



Aus Bild 11 geht hervor, dass die landwirtschaftliche Verwertung die zurzeit kostengünstigste Option der Klärschlamm Entsorgung ist. Die Kosten der landwirtschaftlichen Klärschlamm aufbringung betragen zwischen 120 Euro und 375 Euro je Tonne TS. Die thermische Mono-

verbrennung liegt dagegen zwischen 180 und 400 Euro je Tonne TS. Eine andere Quelle gibt Entsorgungskosten zwischen 8 und 130 Euro je Tonne Feuchtesubstanz an. Diese Kosten sind in Tabelle 20 dargestellt.

TABELLE 20: KOSTEN DER KLÄRSCHLAMMENTSORGUNG NACH [SCHUMACHER; NEBOCAT]

Entsorgungsoption	Entsorgungskosten [€/t <sub>FS</sub> ]		Zustand
	Min.	Max.	
Mitverbrennung Steinkohlekraftwerk	80	130	Getrocknet >85%
Mitverbrennung Zementwerk	90	100	Getrocknet >85%
Monoverbrennung	80	120	Mechanisch entwässert 20-45%TS
Mitverbrennung Müllverbrennungsanlage	80	100	Mechanisch entwässert 20-45%TS
Mitverbrennung Steinkohlekraftwerk	75	100	Mechanisch entwässert 20-45%TS
Mitverbrennung Braunkohlekraftwerk	50	75	Mechanisch entwässert 20-45%TS
Rekultivierung	30	45	Mechanisch entwässert 20-45%TS
Landwirtschaft, überregional	33	45	Mechanisch entwässert 20-45%TS
Landwirtschaft, regional	25	30	Mechanisch entwässert 20-45%TS
Landwirtschaft, flüssig	8	12	Flüssig 4-5%TS

Einer Studie für das Ministerium für Umwelt, Naturschutz und Landwirtschaft des Landes Schleswig-Holstein zufolge belaufen sich die Gesamtkosten aus volkswirtschaftlicher Sicht in Schleswig-Holstein für die landwirtschaftliche Verwertung auf 7,3 Mio. Euro und für die thermische Entsorgung auf 13,5 Mio. Euro. Die Auswirkungen eines Verbots in der landwirtschaftlichen Verwertung ließen eine Verdoppelung der Gesamtkosten erwarten [FELS ET.AL].

Die Auswirkungen eines Verzichts einer landwirtschaftlichen Klärschlammausbringung stellt sich wie folgt dar: Laut der Studie [FELS ET.AL] entfallen lediglich 3% der Gesamtkosten der Abwasserbewirtschaftung auf die Entsorgung des Klärschlammes. Der Rest wird durch Abwassertechnik, Zinsen und Abschreibungen

verursacht. Im Durchschnitt betragen die Abwasserkosten rund zwei Euro pro Kubikmeter. Die Studie errechnete eine Erhöhung von drei Cent pro Kubikmeter. Für einen Vierpersonenhaushalt würde dies eine Steigerung von 448 Euro pro Jahr auf 454 Euro pro Jahr bedeuten (also 6 Euro pro Jahr). Im Fall von Kläranlagen, bei denen der Klärschlamm nicht entwässert wird, wäre mit einer Erhöhung um vier Cent pro Kubikmeter zu rechnen. Bei den Ergebnissen handelt es sich um Modellrechnungen, deren Ergebnis von den eingesetzten Werten (Wasserverbrauch, Entsorgungskosten) abhängig ist [FELSET AL.].

Inwieweit eine Übertragung der Ergebnisse der Studie auf ganz Deutschland möglich ist, muss noch geprüft werden. Der Verzicht auf eine landwirtschaftliche Verwertung hätte natür-

lich Vor- und Nachteile für die verschiedenen Akteure. Die Abwassergebühren könnten zwar betroffen sein, allerdings fällt deren Erhöhung kaum ins Gewicht. Die Landwirtschaft müsste den bisherigen Dünger durch industriellen Dünger ersetzen. Ihr entgeht damit ein Kostenvorteil. Dem steht ein verminderter Schadstoffeintrag in die Böden gegenüber.

Ein großer Vorteil der Phosphorrückgewinnung ist, dass 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.

## ZUSAMMENFASSUNG UND EMPFEHLUNGEN

### 09

Klärschlamm ist in seiner Zusammensetzung sehr inhomogen und daher in seiner Qualität nur schwer charakterisierbar. Der Klärschlamm enthält neben einer Reihe von organischen, hormonell wirksamen Verbindungen und diversen Krankheitserregern auch Schwermetalle und Rückstände von Arzneimitteln, die bei einer direkten landwirtschaftlichen Verwertung in den natürlichen Kreislauf gelangen können.

Klärschlamm stellt die wohl kostengünstigste Phosphor- und Nährstoffquelle zur Düngung dar und enthält einen hohen Anteil an humusbildender Organik. Die Pflanzenverfügbarkeit des im Klärschlamm enthaltenen Phosphors ist indes stark von der Form der Ausfällung abhängig. Eine gute Humusbildung kann außerdem

auch durch alternative Verfahren (z. B. durch Fruchtfolge) erreicht werden.

Nach wie vor stellt Klärschlamm eine Schadstoffsenke für unerwünschte Abwasserinhaltsstoffe aus Haushalten, Gewerbe und diffusen Quellen dar, über deren Umweltrelevanz und Wirkung teilweise noch zu wenig bekannt ist. Trotz scharfer Kontrollen und strenger Grenzwerte für einige Schadstoffe im Klärschlamm kann nicht verhindert werden, dass nicht geregelte Schadstoffe (zum Beispiel einige Kohlenwasserstoffe) in den Boden gelangen. Ein Übergang bestimmter Schadstoffe in den Nahrungsmittelkreislauf ist nicht immer auszuschließen, auch wenn z. B. organische Schadstoffe sich in der Regel nicht in Pflanzen anreichern. Allerdings werden

auch immer wieder neue Abbauprodukte von Arzneimitteln im Klärschlamm entdeckt. Diese gelangen durch menschliche Ausscheidungen über die Kanalisation in die Kläranlage und schließlich in den Klärschlamm.

Daneben ist die landwirtschaftliche Klärschlammverwertung mit dem Risiko einer Weiterverbreitung von Krankheitserregern für Menschen, Tiere und Pflanzen verknüpft. Daher bestehen in der Klärschlammverordnung strenge Ausbringungseinschränkungen für Klärschlämme. So ist z. B. die Aufbringung von Klärschlämmen auf Gemüse- und Obstanbauflächen sowie auf Dauergrünland generell nicht zulässig. Auf Ackerflächen, die zum Anbau von Feldgemüse oder Feldfutter genutzt werden, müssen Wartezeiten eingehalten werden. Bei der Novellierung der Klärschlammverordnung soll zur weiteren Risikominimierung ein Qualitätssicherungssystem für Klärschlämme eingeführt werden. Zusätzlich sollen Klärschlämme zur Risikominimierung einer „hygienisierenden“ Behandlung unterzogen werden, welche die Konzentration der Krankheitserreger reduziert. Diese zusätzliche Behandlung des Klärschlammes verursacht Kosten und ist daher insbesondere für kleine Anlagen schwierig zu realisieren. Zur Minimierung des Risikos der Übertragung von Krankheitserregern bei der Ausbringung von Klärschlämmen ist es wichtig, dass auch in der neuen Klärschlammverordnung die strengen Ausbringungseinschränkungen erhalten bleiben.

Aufgrund des Vorkommens von Schadstoffen und Krankheitserregern bewertet das Umweltbundesamt unter Vorsorgeaspekten die landwirtschaftliche Verwertung von Klärschlamm als Dünger kritisch und spricht sich für den sukzessiven Verzicht auf diese Art der Verwertung aus. Da Klärschlamm eine wichtige Sekundärquelle für Phosphor ist und dieser künftig verstärkt für Düngungsmaßnahmen genutzt werden sollte, müssen parallel zum Rückgang der bodenbezogenen Klärschlammverwertung die erforderlichen Maßnahmen zur Rückgewinnung des im Klärschlamm enthaltenen Phosphors und ggf. anderer Nährstoffe ausgebaut werden. Hierfür kommen nach Auffassung des Umweltbundesamtes neben der direkten Nährstoffrückgewinnung aus dem Abwasser oder dem Klärschlamm insbesondere solche thermische Verfahren in Frage, bei denen eine Nutzung der Verbrennungssasche zu Düngezwecken gewährleistet ist. Hierzu bedarf es noch der Weiterentwicklung entsprechender Techniken. Das Umweltbundesamt geht davon aus, dass die flächendeckende Einführung solcher Rückgewinnungsverfahren innerhalb der kommenden zwei Jahrzehnte erreicht werden kann.

Mit einem Verzicht auf die landwirtschaftliche Klärschlammverwertung gemäß bisheriger Praxis 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 Ersatzmaß-

nahmen ergriffen werden, die der guten fachlichen Praxis in der Landwirtschaft nach dem Bundes-Bodenschutzgesetz (BBodSchG) entsprechen. Das Umweltbundesamt geht davon aus, dass eine intelligente Humusbewirtschaftung (z. B. über Fruchtfolgengestaltung) und der geplante Ausbau der Bioabfallsammlung und -verwertung dazu beitragen können, die entstehende Lücke zu schließen.

Phosphor wird derzeit aus dem Ausland importiert. Dieser weist aber immer schlechtere Qualitäten auf, weil er hohe Gehalte an Schwermetallen oder Radionukliden aufweist. Da Phosphor für das menschliche Leben essentiell ist und eine endlich verfügbare natürliche Ressource darstellt, muss dieser soweit wie möglich im Kreislauf gehalten werden. Mittelfristig sollten mindestens 20% des in Deutschland benötigten Rohphosphats aus Klärschlamm oder Klärschlammaschen zurückzugewonnen werden. Dazu werden seit geraumer Zeit Verfahren entwickelt, die den Phosphor aus dem Klärschlamm und der Klärschlammverbrennungsasche holen. Andere Verfahren konditionieren die Aschen so, dass der Phosphor pflanzenverfügbarer ist. Bisher gibt es aber nur wenige großtechnisch umgesetzte Anlage. Deshalb besteht hier ein großer Förderbedarf, dieser Verfahren großtechnisch umzusetzen und damit zu etablieren.

Aussagen darüber, welches Phosphorrückgewinnungsverfahren das „beste“ Verfahren ist, können derzeit nicht gemacht werden, da

die Auswahl des richtigen Verfahrens von zu vielen Faktoren abhängt (wie etwa Schwermetallgehalt der Klärschlammasche, Größe und Betriebsweise der Kläranlage und/oder Monoverbrennungsanlage, regionale Anbindung der Kläranlage an (Mit)Verbrennungsanlagen, Transportkosten und Preisentwicklung des Phosphors auf dem Weltmarkt etc.). Bevorzugt werden sollten aber Verfahren, die eine hohe Ausbeute an Phosphor haben und sich damit selber wirtschaftlich tragen können.

Es wird deutlich, dass die Verbrennungsanlagen mit ihren genehmigten Kapazitäten derzeit zur Kompensation der Mengen, die über die bisherigen Entsorgungswege verwertet werden, nicht ausreichen. Der Zubau neuer Feuerungsanlagen, vorzugsweise von Monoverbrennungsanlagen mit nachgeschalteter Phosphorrückgewinnung, ist deshalb anzustreben.

Durch die Mitverbrennung von Klärschlamm können fossile Brennstoffe eingespart werden, welche damit zu einer CO<sub>2</sub>-Reduktion beitragen. Darüber hinaus stellt dieser Klärschlammmentsorgungsweg einen im Vergleich zur Monoverbrennung ökonomisch günstigeren Weg dar. Klärschlammasche dient weiter auch als Zuschlagstoff bei der Zementherstellung, wodurch ebenfalls Ressourcen eingespart werden. Durch die Mitverbrennung wird aber wertvoller Phosphor aus dem Kreislauf zur Nahrungsmittelherstellung entfernt. Entweder ist der Phosphor fest im Zement eingebunden oder so stark in Schlacken und anderen Verbren-

nungsrückständen verteilt, dass dieser somit nicht mehr zur Verfügung steht. Deshalb sollte die Monoverbrennung der Mitverbrennung vorgezogen werden.

Aus einer ersten überschlägigen Abschätzung ergibt sich, dass die zu erwartenden Mehrkosten für die Verbraucher, im Falle einer Umstellung von der landwirtschaftlichen Verwertung auf die reine Monoverbrennung in Verbindung mit einer Phosphorrückgewinnung, die Abwasserentgelte nur geringfügig erhöhen können. Der Nutzen einer Umstellung bestünde zum einen in der Vermeidung von hygienischen und stofflichen Risiken für Böden und zum anderen darin, dass keine Mengen an Phosphor mehr importiert werden müssten, die sich in der Zukunft qualitativ weiter verschlechtern und im Preis steigen könnten. Hinzu kommt, dass diese zuerst von Schadstoffen bereinigt werden müssen. Schließlich würde durch die Umstellung ein neuer Markt eröffnet werden und zudem können auch positive Auswirkungen auf den Technologietransfer erwartet werden. Mit den Rückgewinnungsanlagen und Verbrennungskapazitäten würden darüber hinaus auch Arbeitsplätze geschaffen werden.

Darüber hinaus setzt sich in den letzten Jahren das Verfahren der solaren Klärschlamm-trocknung mehr und mehr durch. Der Vorteil liegt in den geringen Investitions- und Betriebskosten. Dennoch haben momentan die Trommel- und Scheibentrockner den insgesamt größten Durchsatz. Die als energetisch am günstigsten

zu betrachtende Trocknung ist aber die Trocknung am Standort der Verbrennungsanlage, zum Beispiel mittels Abwärmenutzung.

Tabelle 21 fasst die Vor- und Nachteile der momentanen Entsorgungswege zusammen:

Um den oben geforderten Verzicht auf die landwirtschaftliche Verwertung von Klärschlamm durchzusetzen, sind nach Ansicht des Umweltbundesamtes folgende Maßnahmen notwendig:

- Die Monoverbrennungskapazitäten müssen ausgebaut werden. Eine Phosphorrückgewinnung sollte dabei in die jeweiligen Anlagen integriert werden.
- Die Mitverbrennung von Klärschlamm sollte nur so lange zulässig sein, bis durch den Aufbau von ausreichenden Monoverbrennungskapazitäten eine gesicherte und umweltverträgliche Entsorgung gewährleistet ist. Die Mitverbrennung sehen wir deshalb nur als Übergangslösung auf dem Weg zu einer reinen Monoverbrennung an.
- Verbrennungskapazitäten sollen unter Berücksichtigung möglichst kurzer Transportwege bei der Klärschlammentsorgung geschaffen werden. So ließen sich zusätzliche Belastungen von Mensch und Natur infolge der Transportwege minimieren.
- Wird die Mitverbrennung der Monoverbrennung vorgezogen, weil aus wirtschaftlichen

TABELLE 21: VOR- UND NACHTEILE DER MOMENTANEN KLÄRSCHLAMMENTSORGUNGSWEGE

	Vorteile	Nachteile
Verwertung in der Landwirtschaft, dem Landschaftsbau und sonstige stoffliche Verwertung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nutzung der Nährstoffe und des Phosphors möglich</li> <li>• Entsorgungsweg, der die geringsten Kosten verursacht</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Klärschlamm birgt als Schadstoffsенke hygienische Risiken für Mensch und Umwelt</li> <li>• Schadstoffe werden nicht aus dem Kreislauf entfernt, sondern angereichert.</li> </ul>
Monoverbrennung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Langfristige Entsorgungsplanung für Kläranlagenbetreiber</li> <li>• Zerstörung der organischen Schadstoffe im Klärschlamm</li> <li>• Energiegewinnung</li> <li>• Rückgewinnung von Phosphor aus der Asche möglich</li> <li>• Verbrennung in Verbindung mit einer Phosphorrückgewinnung aus der Asche schont Ressourcen und eröffnet neue Märkte.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Phosphorrückgewinnung aus der Asche derzeit noch technisch aufwendig.</li> <li>• Eventuell zusätzliche Belastung durch Transport</li> <li>• Verursacht als Entsorgungsweg die höchsten Kosten</li> </ul>
Mitverbrennung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Zerstörung aller organischen Schadstoffe und Erreger im Klärschlamm</li> <li>• Energiegewinnung</li> <li>• Kostengünstigerer Entsorgungsweg als die Monoverbrennung</li> <li>• Ressourcenschonung durch Brennstoffeinsparung und Zuschlagstoffersatz</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Keine Verwertung der im Klärschlamm enthaltene Nährstoffe möglich</li> <li>• Rückgewinnung von Phosphor aus der Asche nicht möglich</li> <li>• Weite Transportwege führen zu Belastungen für Mensch und Umwelt</li> </ul>

oder logistischen Problemen eine Monoverbrennung mit anschließender Phosphorrückgewinnung nicht realisiert werden kann, müssen andere Phosphorrückgewinnungsverfahren etabliert werden. Zum Beispiel kommen hier Verfahren in Frage, die Phosphor nicht aus der Klärschlammasche, sondern direkt aus dem Abwasser oder dem Klärschlamm rückgewinnen. Das P-Rückgewinnungspotential

ist allerdings niedriger als das Potential bei einer Rückgewinnung aus Verbrennungaschen. Der bei diesen Verfahren entstehende phosphorarme Klärschlamm kann dann in der Mitverbrennung entsorgt werden.

- Die (Weiter)Entwicklung und der Ausbau von Verfahren zur Phosphorrückgewinnung aus den Stoffströmen Abwasser, Klärschlamm und

- Klärschlammasche soll verstärkt erfolgen. Dazu gehört auch die finanzielle Unterstützung von Rückgewinnungstechniken, etwa aus Förderprogrammen oder Nutzung von Mitteln aus der Abwasserabgabe und dem Klärschlammfonds bzw. des Klärschlamm-Entschädigungsfonds.
- Die Grenzwerte der Klärschlammverordnung (AbfKlärV) müssen für die Zwischenzeit bis zum vollständigen Ausstieg überprüft werden. Darüber hinaus gilt es zu überprüfen, ob aus Sicht des vorsorgenden Boden- und Gesundheitsschutzes bislang nicht erfasste Schadstoffe durch Grenzwerte geregelt werden müssen.
  - Die hygienischen Anforderungen an Klärschlamm, der auf landwirtschaftlichen Flächen oder bei landschaftsbaulichen Maßnahmen ausgebracht werden darf, müssen überprüft und gegebenenfalls verschärft werden. Die Minimierung des Infektionsrisikos für Mensch und Tier könnte durch Einführung eines Qualitätssicherungssystems und alternativ einer Klärschlammbehandlung erreicht werden. Die bestehenden Ausbringungsbeschränkungen sollten bei der Novellierung der Klärschlammverordnung mindestens beibehalten werden.
  - Es muss eine Weiterentwicklung gesetzlicher Anforderungen erfolgen, um einen hohen Anteil an rückgewonnenem Phosphor aus relevanten Stoffströmen (z. B. Abwasser, Klärschlamm) zu sichern.
  - Klärschlammaschen mit P-Gehalten von über zwei Prozent sollten zum Zweck einer möglichen Rückgewinnung separat und rückholbar abgelagert werden, zumindest so lange, bis sich ausreichende Phosphorrückgewinnungsanlagen etablieren konnten. Wenn nötig, müssen dafür zusätzliche sind Ablagerungskapazitäten geschaffen werden.
  - Es muss eine weitestgehende Umstellung auf Verfahren, die eine P-Rückgewinnung unterstützen, erfolgen. Wie etwa die Umstellung auf eine biologischer Phosphorelimination (BioPVerfahren) und im Zuge dessen eine Reduzierung der Eisen-Fällung auf Kläranlagen. Denn der Eisengehalt bestimmt die Qualität und insbesondere die Pflanzenverfügbarkeit des zurück gewonnenen Phosphors.
  - Die Entwässerung, Trocknung und der Transport des Klärschlammes benötigt Energie, die durch eine Verbrennung teilweise zurückgewonnen werden kann. Aufgrund der positiven Energiebilanz bietet sich daher die solare Trocknung mit gekoppelter Abwärmennutzung an.
- Nur durch das Zusammenwirken der oben genannten Maßnahmen lässt sich das Ziel einer umweltverträglichen Entsorgung von Klärschlamm gewährleisten. Nur so lässt sich eine unabhängige und ressourcenschonende Phosphorgewinnung verwirklichen. Hierfür gilt es jetzt, die Weichen zu stellen.

# ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Bild 1: Schlammanfall in Abhängigkeit von der Reinigungsstufe [eigene Darstellung]	8
Bild 2: Konzentration von Cadmium und Quecksilber im Klärschlamm [BMU]	12
Bild 3: Anzahl der Klärschlamm Trockner aufgeteilt nach Trocknerart	24
Bild 4: Mittlerer Klärschlamm durchsatz pro Trocknerart	25
Bild 5: Mit den maximalen Aufbringmengen nach AbfKlärV mögliche zulässige Cadmium-Gesamtfrachten verglichen mit den tatsächlichen mittleren Cadmiumfrachten [RUPPE ET AL.]	37
Bild 6: Globale Verteilung der erkundeten Reserven von Rohphosphat für 2008 [U.S. GEOLOGICAL SURVEY]	40
Bild 7: Entsorgungswege der Klärschlammaschen aus Monoklärschlammverbrennungsanlagen für das Jahr 2009 von 18 Anlagen [eigene Erhebung]	47
Bild 8: Prozentuale Verteilung der Entsorgungswege in den Bundesländern 2010 [DESTATIS F]	49
Bild 9: Entwicklung der Klärschlammmenge [DESTATIS A, B, C, D, E, F]	50
Bild 10: Klärschlamm entsorgung in den Jahren 1991 bis 2010 [UBA UND DESTATIS F]	52
Bild 11: Kosten der Klärschlamm entsorgung einschließlich der Kosten für Entwässerung und Transport in Euro pro Tonne TR [DWA A, B]	57
Bild 12: Konzentration von Kupfer im Klärschlamm [BMU]	102
Bild 13: Konzentration von Zink im Klärschlamm [BMU]	103
Bild 14: Konzentration von Nickel, Chrom und Blei im Klärschlamm [BMU]	103

# TABELLENVERZEICHNIS

## 11

Tabelle 1: Schlammkennwerte und ihre Bedeutung [KOPP; RÄBIGER]	7
Tabelle 2: Zusammensetzung des Klärschlammes nach [DWA] und [Olivia ET.AL.]	10
Tabelle 3: Konzentrationen von sieben Schwermetallen, sowie von Stickstoff und Phosphor im Klärschlamm zwischen 1977 und 2006. [BMU]	11
Tabelle 4: Konzentrationen an organischen Verbindungen im Klärschlamm aus Nordrhein-Westfalen nach [FRAGEMANN]	13
Tabelle 5: Behandlungsverfahren zur Hygienisierung von Klärschlamm	19
Tabelle 6: Eingesetzte Wärmemedien und die dazugehörigen Trocknungsaggregate [HEPKE]	23
Tabelle 7: Vergleich der Feuerungssysteme	27
Tabelle 8: Mitverbrennung in Kohlekraftwerken	30
Tabelle 9: Verbrannte Klärschlammmenge in Zementwerken von 2003 bis 2010 [VDZ A-H]	32
Tabelle 10: Einordnung von Schadstoffen im Klärschlamm zur Ermittlung von Grenzwertvorschlägen [Bergs]	36
Tabelle 11: Vor- und Nachteile der landwirtschaftlichen Verwertung von Klärschlamm	38
Tabelle 12: Theoretische Phosphor-Recyclingpotentiale verschiedener Stoffströme in Deutschland [EIGENE ZUSAMMENSTELLUNG]	41
Tabelle 13: Verfahren zur Phosphorrückgewinnung aus dem Abwasserstrom [MONTAG ET.AL. und eigene Erhebung]	42
Tabelle 14: In Deutschland realisierte bzw. konkret geplante großtechnische Anlagen (Stand 2010) [eigene Zusammenstellung]	44
Tabelle 15: Vergleich nasschemische MAP-Verfahren mit thermischen Verfahren	46
Tabelle 16: Klärschlamm entsorgungsmengen und -wege 2010, unterschieden nach Bundesländern [DESTATIS F]	48

Tabelle 17: Entwicklung der Klärschlammengen und deren Entsorgungswege [DESTATIS A, B, C, D, E, F]	50
Tabelle 18: Bestehende Verbrennungskapazitäten in Deutschland 2009 [SCHMITZ]	53
Tabelle 19: Klärschlammaufkommen in Europa und deren Verwertungswege (sortiert nach den einzelnen Mitgliedstaaten) nach [EUROSTAT] und [MILIEU; WRC; RPA], Stand 2010	54
Tabelle 20: Kosten der Klärschlamm Entsorgung nach [SCHUMACHER; NEBOCAT]	58
Tabelle 21: Vor- und Nachteile der momentanen Klärschlamm Entsorgungswege	63
Tabelle 22: Technische Daten der Monoklärschlammverbrennungsanlagen für kommunalen Klärschlamm (Stand 2012) [eigene Erhebung]	82
Tabelle 23: Technische Daten der betriebseigenen Klärschlammverbrennungsanlagen (Stand 2012) [eigene Erhebung]	88
Tabelle 24: Technische Daten der Kohlekraftwerke, die Klärschlamm mitverbrennen (Stand 2011) [eigene Erhebung]	90
Tabelle 25: Technische Daten deutscher Abfallverbrennungsanlagen, die Klärschlamm mitverbrennen (Stand 2012) [Erhebung durch die ITAD]	94
Tabelle 26: Maximal zulässige Schadstoffgehalte nach AbfKlärV für Boden und Klär- schlamm und nach dem Entwurf der AbfKlärV 2010 [ABFKLÄRV; BMU 2011B; BBODSCHV, MODIFIZIERT NACH BRANDT ]	99
Tabelle 27: Technische Daten der Klärschlamm trocknungsanlagen in Deutschland	104

# ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

12

## Gesetze/Verordnungen

AbfKlärV	Klärschlammverordnung
BBodSchV	Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung
BImSchG	Bundes-Immissionsschutzgesetz
KrW-/AbfG	Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz
KrWG-E	Entwurf eines Gesetzes zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz)
DüMV	Düngemittelverordnung
DüngG	Düngegesetz
DüV	Düngeverordnung
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
17.BImSchV	17. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes

## 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
FAO	Food and Agriculture Organization
IWW	IWW Rheinisch-Westfälisches Institut für Wasserforschung gemeinnützige GmbH
SRU	Sachverständigenrat für Umweltfragen

UBA	Umweltbundesamt
VDZ	Verein Deutscher Zementwerke

### Chemische Verbindungen/Elemente

AOX	Adsorbierbare organische Halogenverbindungen
B(a)P	Benzo(a)pyren
Ca	Kalzium
Ca(OH) <sub>2</sub>	Calciumhydroxid
Cd	Cadmium
CO <sub>2</sub>	Kohlenstoffdioxid
Cr	Chrom
Cu	Kupfer
DEHP	Di(2-Ethyl-Hexyl)phthalat
Fe	Eisen
Hg	Quecksilber
H <sub>2</sub> O	Wasser
K	Kalium
K <sub>2</sub> O	Kaliumoxid
LAS	Lineare Alkylbenzo-Sulfonate
MAP	Magnesium-Ammonium-Phosphat
MgNH <sub>4</sub> PO <sub>4</sub>	Magnesiumammoniumphosphat
MKW	Mineralölkohlenwasserstoff
N	Stickstoff
Na	Natrium
Ni	Nickel
P	Phosphor

PAK	Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe
Pb	Blei
PBDE	Bromierte Diphenylether
PCB	Polychlorierte Biphenyle
PCDD/PCDF	Polychlorierte Dibenzodioxine/-Furane
PFC	Perfluorcarbone
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Phosphorpentoxid
TBT	Tributylzinn
Zn	Zink

#### Parameter

GR	Glührückstand [%]
GV	Glühverlust [%]
H <sub>u</sub>	unterer Heizwert [kJ/kg, MJ/kg]
TEQ/TE	Toxizitätsäquivalente
TM	Trockenmasse [mg, g, kg]
TR	Trockenrückstand [%]
TS	Trockensubstanz [mg, g, kg]
TS <sub>R</sub>	Trockensubstanzgehalt [kg/m <sup>3</sup> , g/L]
WG	Wassergehalt [%]

#### Einheiten

a	Jahr
kJ	Kilojoule (10 <sup>3</sup> Joule)
mg	Milligramm (10 <sup>-6</sup> kg)
MJ	Megajoule (10 <sup>6</sup> Joule)

m <sup>3</sup>	Kubikmeter
t	Tonnen (10 <sup>3</sup> kg)
%	Prozent

### Weitere Abkürzungen

ATS	Aerob-thermophile Schlammstabilisierung
AVA	Abfallverbrennungsanlage
BHKW	Blockheizkraftwerk
EU	Europäische Union
EU-27	27 Mitgliedsländer der Europäischen Union
HTC	Hydrothermale Carbonisierung
EHEC	Enterohämorrhagische <i>Escherichia coli</i>
EAggEC	Enter aggregative <i>Escherichia coli</i>

## DANKSAGUNG

### 13

» 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 EcoSystemsInternational GmbH und Herrn Jasper von der IAA Ingenieurgesellschaft für Abfall und Abwasser mbH & Co.KG für die freundliche Mitarbeit bedanken. «

# LITERATURVERZEICHNIS

## 14

### **Literatur zum Kapitel „Was ist Klärschlamm?“:**

[ABFKLÄRV] Klärschlammverordnung (AbfKlärV); Ausfertigungsdatum: 15.04.1992; Zuletzt durch Artikel 9 der Verordnung vom 9. November 2010 (BGBl. I S. 1504) geändert

### **Literatur zum Kapitel „Wo fällt Klärschlamm an?“:**

[BISCHOFBERGER ET.AL.] Wolfgang Bischofsberger, Norbert Dichtl, Karl-Heinz Rosenwinkel, Carl Franz Seyfried, Botho Böhnke (Hrsg.): Anaerobtechnik, 2. Auflage; Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2005

### **Literatur zu den Kapiteln „Zusammensetzung von Klärschlamm“, „Schwermetalle im Klärschlamm“, „Organische Verbindungen“ und „Krankheitserreger und Hygieneanforderungen“:**

[KOPP] Dr.-Ing Julia Kopp: Eigenschaften von Klärschlamm; Tagungsbeitrag VDI-Fachkonferenz Klärschlammbehandlung; 27-28. Oktober 2010, Offenbach

[RÄBIGER] Prof. Dr.-Ing. N. Rübiger: Projekt wasser-wissen. Institut für Umweltverfahrenstechnik; Online abgerufen am/unter: 25.02.2011 <http://www.wasser-wissen.de/>

[GUJER] Prof. Dr. Willi Gujer; Siedlungswirtschaft; Institut für Umweltingenieurwissenschaften ETH Zürich, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1999, 2002 und 2007

[OLIVA ET.AL.] Judith Oliva, Antonia Bernhardt, Hubert Reisinger, Manfred Domenig, Hans-Jörg Krammer; Klärschlamm-Materialien zur Abfallwirtschaft; Umweltbundesamt AT; Report; Klagenfurt 2009

[DWA] Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.; Entwurf zum Merkblatt DWA-M 387 Thermische Behandlung von Klärschlämmen: Mitverbrennung; Hennef; 2009

[FRAGEMANN] Hans-Jürgen Fragemann, Dr. Dietmar Barkowski; Klärschlammbelastungen mit organischen Schadstoffen– Ergebnisse der landesweiten Untersuchungen in Nordrhein-Westfalen; Vortrag auf Expertentagung in Bonn am 6. Dezember 2006

[BMU] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit; Klärschlammverwertung in der Landwirtschaft; Internetseite; Online abgerufen am/unter: 16.02.2011  
<http://www.bmu.de/abfallwirtschaft/doc/40230.php>

### **Literatur zum Kapitel „Arzneimittelrückstände im Klärschlamm“:**

[EIBISCH], Eibisch, Nina: Einträge und Verhalten von Arzneimittelrückständen in Böden. Technische Universität Freiberg 11.01.2006

[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. und R. Michel: Antibiotikaspuren im Getreide? – Analytik, Befunde, Bewertung. Vortrag 59. Tagung der Getreidechemie 18.-19.06.2008

[BERGMANN ET. AL.] Bergmann, A.; Fohrmann, R. und F.-A. Weber: Zusammenstellung von Monitoringdaten zu Umweltkonzentrationen von Arzneimitteln. Gutachten im Auftrag des Umweltbundesamtes FKZ 360 14 013; 2010

[RÖNNEFAHRT] Rönnefahrt, Ines: Humanarzneimittel in der Umwelt – Neue Ansätze in der Risikobewertung in der EU. Jahrestagung 2002 Umweltchemie und Ökotoxikologie, Tagungsband, 189.

[SRU] Sachverständigenrat für Umweltfragen: Arzneimittel in der Umwelt. Stellungnahme Nr. 12. April 2007

[STUMPE] Stumpe, B: Mineralization and sorption of the steroid hormones 17 $\beta$ -estradiol, estrone, 17 $\alpha$ -ethinylestradiol and testosterone in natural and organic waste amended agricultural soils. Dissertation Ruhr Universität Bochum. 2010

[UBA] Umweltbundesamt: Hygienische Fragen der Umwelttechnik – Abwasserhygiene; in: Jahresbericht 1997 Umweltbundesamt S. 100-101

### **Literatur zum Kapitel „Schlammbehandlung“**

[GUJER] Prof. Dr. Willi Gujer: Siedlungswirtschaft; Institut für Umweltingenieurwissenschaften ETH Zürich, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1999, 2002 und 2007

[BRANDT] Brandt, Simone; Nutzung von Klärschlamm als Rohstoffquelle – Akuteller 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](http://www.andrakar.com/brandt/Rohstoffquelle_Klaerschlamm_Perspektiven_Br0211.pdf)

[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>

#### **Literatur zum Kapitel „Klärschlamm Trocknung“:**

[LEHRMANN] Lehrmann, Falko: Stand und Perspektiven der thermischen Klärschlamm Entsorgung. Vortrag zur VDI-Fachkonferenz Klärschlammbehandlung; Offenbach; 27 und 28. Oktober 2010

[Beckmann] Prof. Dr.-Ing. Beckmann, Michael: Stoff- und Energiebilanzen bei der Verbrennung von Klärschlamm; In: Sammelband zur VDI-Fachkonferenz „Klärschlammbehandlung – Technologie, Wertstoffrückgewinnung, Entwicklung (Hrsg. VDI); Oktober 2010

[Hepke] Dr.-Ing. Hepke, Hans-Jörg: Thermische Verfahren der Klärschlamm Trocknung; Tagungsbeitrag zur VDI-Fachkonferenz Klärschlammbehandlung am 27. und 28. Oktober 2010 in Offenbach

[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.

#### **Literatur zum Thema „Mitverbrennung in Zementwerke“**

[VDZ A] Verein Deutscher Zementwerke e.V.: Environmental Data of the German Cement Industry 2009; Düsseldorf August 2011

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

[VDZ C] Verein Deutscher Zementwerke e.V.: Umweltdaten der deutschen Zementindustrie 2008; Düsseldorf August 2009

[VDZ D] Verein Deutscher Zementwerke e.V.: Umweltdaten der deutschen Zementindustrie 2007; Düsseldorf September 2008

[VDZ E] Verein Deutscher Zementwerke e.V.: Umweltdaten der deutschen Zementindustrie 2006; Düsseldorf September 2007

[VDZ F] Verein Deutscher Zementwerke e.V.: Umweltdaten der deutschen Zementindustrie 2005; Düsseldorf September 2006

[VDZ G] Verein Deutscher Zementwerke e.V.: Umweltdaten der deutschen Zementindustrie 2004; Düsseldorf September 2005

[VDZ H] Verein Deutscher Zementwerke e.V.: Umweltdaten der deutschen Zementindustrie 2003; Düsseldorf November 2004

**Literatur zum Kapitel „Landwirtschaftliche Verwertung von Klärschlamm“:**

[ABD EL-SAMIE] Abd El-Samie IMF: Phosphordüngewirkung von Klärschlämmen aus Klärwerken mit Phosphatelimination durch Eisensalze. Dissertation, Georg-August-Universität Göttingen

[BRANDT] Brandt, Simone; Nutzung von Klärschlamm als Rohstoffquelle – Akuteller Stand in Deutschland und in der Europäischen Union sowie Perspektiven für die Zukunft; Masterarbeit, 23. Februar 2011; Berlin

[http://www.andrakar.com/brandt/Rohstoffquelle\\_Klaerschlam\\_Perspektiven\\_Br0211.pdf](http://www.andrakar.com/brandt/Rohstoffquelle_Klaerschlam_Perspektiven_Br0211.pdf)

[LFL] Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LFL): Landwirtschaftliche Verwertung von Klärschlamm. 2006; <http://www.Lfl.bayern.de>

[BERGS] Dr. Bergs, Claus-Gerhard: Neuerungen im Abfall- und Düngerecht – Auswirkungen auf die Verwertung und Beseitigung von Klärschlämmen, Vortrag VDI-Fachkonferenz Offenbach, 27.10.2010

[KRATZ S, SCHNUG] Kratz, Sylvia; Schnug, Ewald: Agronomische Bewertung von Phosphatdüngern, Vortrag bei Symposium: Ressourcen schonender Einsatz von Phosphor in der Landwirtschaft, Braunschweig, 10./11.11.2008, [www.jki.de](http://www.jki.de)

[RUPPE ET. AL.] Ruppe A, Bahr C, Pohl A: Fortschreibung von Beurteilungsmaßstäben für den Wirkungspfad Boden-Pflanze: Methodik zur flächenrepräsentativen Erfassung pflanzenverfügbarer Stoffgehalte in unbelasteten Böden und Stoffgehalten in Nahrungs- und Futtermittelpflanzen. Forschungsbericht; FKZ 206 74 200, Umweltbundesamt, Dessau (Veröffentlichung in Vorbereitung), 2009.

### **Literatur zum Kapitel „Klärschlammanfall, Entsorgung und Verwertung“:**

[SCHMITZ] Erich Schmitz: Perspektiven der Mitverbrennung von Klärschlämmen; 6. Klärschlammtage der DWA; Fulda, 12 Mai 2009

[DESTATIS A] Statistisches Bundesamt: Klärschlamm Entsorgung aus der biologischen Abwasserbehandlung 2006; online abgerufen am/unter: 24.02.2011  
<http://www.destatis.de/jetspeed/portal/cms/Sites/destatis/Internet/DE/Content/Statistiken/Umwelt/UmweltstatistischeErhebungen/Wasserwirtschaft/Tabellen/Content100/Klaerschlammtabelle2006,templateId=renderPrint.psml>

[DESTATIS B] Statistisches Bundesamt: Klärschlamm Entsorgung aus der biologischen Abwasserbehandlung 2007; online abgerufen am/unter: 24.02.2011  
<http://www.destatis.de/jetspeed/portal/cms/Sites/destatis/Internet/DE/Content/Statistiken/Umwelt/UmweltstatistischeErhebungen/Wasserwirtschaft/Tabellen/Content100/Klaerschlammtabelle2007,templateId=renderPrint.psml>

[DESTATIS C] Statistisches Bundesamt: Klärschlamm Entsorgung aus der biologischen Abwasserbehandlung 2008; online abgerufen am/unter: 24.02.2011  
<http://www.destatis.de/jetspeed/portal/cms/Sites/destatis/Internet/DE/Content/Statistiken/Umwelt/UmweltstatistischeErhebungen/Wasserwirtschaft/Tabellen/Content100/Klaerschlammtabelle2008,templateId=renderPrint.psml>

[DESTATIS D] Statistisches Bundesamt: Klärschlamm Entsorgung aus der biologischen Abwasserbehandlung 2009; online abgerufen am/unter: 24.02.2011

<http://www.destatis.de/jetspeed/portal/cms/Sites/destatis/Internet/DE/Content/Statistiken/Umwelt/UmweltstatistischeErhebungen/Wasserwirtschaft/Tabellen/Content100/Klaerschlammm2009,templateId=renderPrint.psml>

[DESTATIS E] Statistisches Bundesamt: öffentliche Wasserversorgung und Abwasserbeseitigung; Fachserie 19, Reihe 2.1, Umwelt; 2004

[DESTATIS F] Statistisches Bundesamt: Klärschlammbehandlung aus der biologischen Abwasserbehandlung 2010; online abgerufen am/unter: 01.02.2012  
<http://www.destatis.de/jetspeed/portal/cms/Sites/destatis/Internet/DE/Content/Statistiken/Umwelt/UmweltstatistischeErhebungen/Wasserwirtschaft/Tabellen/Content100/KlaerschlammmVerwertArt2010,templateId=renderPrint.psml#Fussnote5>

[DESTATIS G] Statistisches Bundesamt: Klärschlammbehandlung aus der biologischen Abwasserbehandlung 2011, online abgerufen am/unter: 14.08.2013  
<https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/GesamtwirtschaftUmwelt/Umwelt/UmweltstatistischeErhebungen/Wasserwirtschaft/Tabellen/KlaerschlammmVerwertArt2011.html;jsessionid=404E90E0D27330D202F7A246B409731C.cae3>

[UBA] Umweltbundesamt: Daten zur Umwelt; Klärschlammbehandlung; Online abgerufen am/unter: 24.02.2011 <http://www.umweltbundesamt-daten-zur-umwelt.de/umweltdaten/public/document/downloadImage.do?ident=19543>

### **Literatur zum Kapitel „Klärschlammbehandlung in den Mitgliedstaaten der EU“:**

[MILIEU; WRC; RPA] Milieu Ltd, WRC and RPA Environmental, economic and social impacts of the use of sewage sludge on land; Final Report for the European Commission; Part I: Overview Report;

[EUROSTAT] Gesamtklärschlammaufkommen aus der öffentlichen Abwasserbehandlung. Online abgerufen am/unter: 01. März 2011, <http://epp.eurostat.ec.europa.eu/tgm/refreshTableAction.do?tab=table&plugin=1&pcode=ten00030&language=de>

### **Literatur zum Kapitel „Phosphorrückgewinnung“**

[SCHNUG/PINNEKAMP] Schnug, Ewald und Pinnekamp, Johannes (TV Beitrag 2008); online abrufbar unter: <http://www.3sat.de/mediathek/mediathek.php?obj=10256>

[VACCARI] Vaccari, David A.: Phosphorus: A Looming Crisis, Scientific American, 2009 Nr. 6, S. 54-59 Droht ein Mangel an Phosphor? Spektrum der Wissenschaft, 2009 Nr. 11, S. 78-83

[SCHEIDIG] Dr.-Ing Scheidig, Klaus: Wirtschaftliche und energetische Aspekte des Phosphor-Recyclings aus Klärschlamm, KA Korrespondenz Abwasser, Abfall, 2009 (56) Nr. 11 S. 1138-1146

[RÖMER ET.AL.] Römer, Wilhelm; Gründel, Michael; Friedrich Güthoff, Friedrich: 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

[CORDELL ET. AL.] Cordell, Dana; Neset, Tina; White, Stuart; Drangert, Jan – Olof; Mavinic, D., Ashley, K.; Koch, F.: Preferred future phosphorus scenarios: A framework for meeting long-term phosphorus needs for global food demand, International Conference on Nutrient Recovery from Waste Water Streams, Vancouver May 10th -13th , 2009, IWA Publishing, London, New York (ISBN 1843392321)

[FAO] Food and Agriculture Organization of the United Nations; Current world fertilizer trends and outlook to 2011/12

[U.S. GEOLOGICAL SURVEY] U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries (Januar 2013)

[IWMI] International Water Management Institute: Comprehensive Assessment of water management in agriculture, 2006; online abrufbar unter [www.iwmi.cgiar.org/assessment](http://www.iwmi.cgiar.org/assessment)

[WRAP] Waste & Resources Action Programme: The food we waste, Food waste report v2, 2008

[FRAITURE] Fraiture, Charlotte de: Future Water Requirements for Food – Three Scenarios, International Water Management Institute (IWMI), SIWI Seminar: Water for Food, Bio-fuels or Ecosystems? in World Water Week 2007, Stockholm August 12th – 18th 2007

[LUNDQVIST ET. AL.] Lundqvist, J., C. de Fraiture and D. Molden: Saving Water: From Field to Fork – Curbing Losses and Wastage in the Food Chain, SIWI Policy Brief, Stockholm International Water Institute

[WHO] World Health Organization: Obesity and overweight, Fact sheet number 311, World Health Organisation Global Strategy on Diet, Physical Activity and Health, Genf

[Kabbe/Jakob] Kabbe, Christian und Dr. Jakob, Wolfgang, Process to recover phosphate from meat and bone meal with utilisation of waste heat, International Conference on Nutrient Recovery from Waste Water Streams, Vancouver May 10-13, 2009, IWA Publishing, London, New York (ISBN 1843392321)

[Sartorius] Sartorius, Christian; Technologievorausschau und Zukunftschancen durch die Entwicklung von Phosphorrecyclingtechnologien in Deutschland; Tagungsbeitrag zur Abschlusspräsentation im Zuge der Förderinitiative „Kreislaufwirtschaft für Pflanzennährstoffe, insbesondere Phosphor“; September 2011; Berlin

[SWEDISH EPA] Swedish Environmental Protection Agency, A Strategy for Sustainable Waste Management – Sweden’s Waste Plan, Stockholm 2005 (ISBN: 91-620-1249-5)

[von HORN ET.AL.] Dr. von Horn, Jana; Dr. Dr. Sartorius, Christian; Tettenborn, Felix: Technologievorausschau für Phosphorrecyclingtechnologien (Arbeitspaket 6) Im Rahmen des Projektes „Phosphorrecycling – Ökologische und wirtschaftliche Bewertung verschiedener Verfahren und Entwicklung eines strategischen Verwertungskonzeptes für Deutschland“ (PhoBe) im Auftrag des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (FKZ 02WA0807);2010

### **Literatur Zum Kapitel „Kosten der Klärschlammentsorgung“:**

[FELS ET.AL] Dr. Fels, Thomas; Dr. Heid, Markus und Dr. Kersten, Malte: 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

[SCHUMACHER; NEBOCAT] Werner Schumacher und Günter Nebocat: Kosten der Ersatzbrennstoffverbrennung in Monoverbrennungsanlagen; Tagungsbeitrag; Energie aus Abfall Band 6; TK Verlag, Neuruppin; 2009

[DWA A] Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.; Arbeitsgruppe AK-13.4: Klärschlammentsorgungskonzepte; Fachbeitrag für Korrespondenz Abwasser, Abfall; Heft 3/10; Hennef; 2010

[DWA B] Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.; DWA-Positionen; Position zur Klärschlammentsorgung; Hennef; 2010

[DESTATIS A] Statistisches Bundesamt Deutschland: Durchschnittliche Kosten für die Entsorgung von Abwasser aus privaten Haushalten 2005 bis 2007; online abgerufen am/unter: 14.02.2011, [http://www.destatis.de/jetspeed/portal/cms/Sites/destatis/Internet/DE/Content/Statistiken/Umwelt/UmweltstatistischeErhebungen/Wasserwirtschaft/Tabellen/Content75/Durchschnittskosten\\_\\_Abwasser\\_\\_Haushalte.psm1](http://www.destatis.de/jetspeed/portal/cms/Sites/destatis/Internet/DE/Content/Statistiken/Umwelt/UmweltstatistischeErhebungen/Wasserwirtschaft/Tabellen/Content75/Durchschnittskosten__Abwasser__Haushalte.psm1)

[DESTATIS B] Statistisches Bundesamt Deutschland: Gebiet und Bevölkerung – Fläche und Bevölkerung. online abgerufen am/unter: 14.02.2011  
[http://www.statistik-portal.de/Statistik-Portal/de\\_jb01\\_jahrta1.asp](http://www.statistik-portal.de/Statistik-Portal/de_jb01_jahrta1.asp)

[DESTATIS C] Statistisches Bundesamt Deutschland: Klärschlamm Entsorgung aus der biologischen Abwasserbehandlung 2007. online abgerufen am/unter: 14.02.2011  
<http://www.destatis.de/jetspeed/portal/cms/Sites/destatis/Internet/DE/Content/Statistiken/Umwelt/UmweltstatistischeErhebungen/Wasserwirtschaft/Tabellen/Content100/Klaerschlamm2007,templateId=renderPrint.psm1>

### **Literatur zum Kapitel im Anhang II „Relevante Rechtsvorschriften für die Klärschlamm Entsorgung“:**

[17.BIMSCHV] Siebzehnte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über die Verbrennung und die Mitverbrennung von Abfällen – 17. BImSchV); Ausfertigungsdatum: 23.11.1990; In der Fassung der Bekanntmachung vom 14. August 2003 (BGBl. I S. 1633), die durch Artikel 2 der Verordnung vom 27. Januar 2009 (BGBl. I S. 129) geändert worden ist.

[ABFKLÄRV] Klärschlammverordnung (AbfKlärV); Ausfertigungsdatum: 15.04.1992; zuletzt geändert durch Artikel 9 der Verordnung vom 9. November 2010 (BGBl. I S. 1504)

[BBODSCHV] Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV); Ausfertigungsdatum: 12.07.1999; zuletzt geändert durch Artikel 16 des Gesetzes vom 31. Juli 2009 (BGBl. I S. 2585)

[BMU 2011B] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit; Klärschlammverordnung (AbfKlärV) – Arbeitsentwurf für einen Referentenentwurf  
Einer Verordnung zur Neuordnung der Klärschlammverwertung auf Böden; Stand 01.06.2011

[BRANDT] Brandt, Simone; Nutzung von Klärschlamm als Rohstoffquelle – Akuteller 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](http://www.andrakar.com/brandt/Rohstoffquelle_Klaerschlamm_Perspektiven_Br0211.pdf)

[DÜMV] Verordnung über das Inverkehrbringen von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln (Düngemittelverordnung - DüMV); Ausfertigungsdatum: 16.12.2008; zuletzt geändert durch Artikel 1 der Verordnung vom 14. Dezember 2009 (BGBl. I S. 3905)

[DÜNGG] Düngegesetz (DüngG); Ausfertigungsdatum: 09.01.2009; zuletzt geändert durch Artikel 10 des Gesetzes vom 9. Dezember 2010 (BGBl. I S. 1934)

[DÜV] Verordnung über die Anwendung von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln nach den Grundsätzen der guten fachlichen Praxis beim Düngen (Düngeverordnung - DüV); Ausfertigungsdatum: 10.01.2006; In der Fassung der Bekanntmachung vom 27. Februar 2007 (BGBl. I S.221), zuletzt geändert durch Artikel 18 des Gesetzes vom 31. Juli 2009 (BGBl. I S. 2585)

[EWG] 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

[KRW/ABFG] Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Beseitigung von Abfällen (Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz - KrW-/AbfG) vom 27. September 1994 (BGB. I S. 2705); zuletzt geändert durch Artikel 8 des Gesetzes vom 11. August 2010 (BGBl. I S. 1163)

[KRWG] Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz – KrWG); Bundesgesetzblatt Jahrgang 2012 Teil I Nr. 10, ausgegeben zu Bonn am 29. Februar 2012.

# ANHANG I

15

Allgemein						
Standort	Bundesland	Anlagenbetreiber	Kapazität	TR	Kapazität	Inbetriebnahme
			[t/a]	[%]	[t TS/a]	[-]
<b>Altenstadt</b>	BY	Emter GmbH	160.000	25-30	55.000	2008
<b>Balingen</b>	BW	Zweckverband Abwasserreinigung Balingen	1.500	75-80	1.200 (Erweiterung auf 2.400)	2002
<b>Berlin-Ruhleben</b>	BE	Berliner Wasser Betriebe	325.000	26	84.100	1985
<b>Bitterfeld-Wolfen*</b>	ST	Gemeinschaftsklärwerk Betriebsgesellschaft mbH & Co. KG Greppin	50.700	25-90	15.200	1997
<b>Bonn</b>	NW	Tiefbauamt Bonn	29.100	23,5	8.000	1981
<b>Bottrop</b>	NRW	Emschergenossenschaft	110.000	40	44.000	1991
<b>Dinkelsbühl</b>	BY	KSV GmbH	21.425	25-30	5326	2008
<b>Düren</b>	NW	Wasserverband Eifel-Rur	35.000	40	14.000	1975
<b>Elverlingsen-Werdohl</b>	NW	WFA E Elverlingsen GmbH	200.000	28-32	61.320	2002
<b>Frankfurt am Main</b>	HE	Stadtentwässerung Frankfurth am Main	188.000	28	52.560	1981
<b>Gendorf*</b>	BY	Infraserv	40.000	20-35	10.000	2006
<b>Hamburg</b>	HH	VERA Klärschlammverbrennung GmbH	197.100	40	78.840	1997
<b>Herne</b>	NW	BAV Aufbereitung Herne GmbH	50.000	25-90	22.200	1990
<b>Karlsruhe</b>	BW	Stadt Karlsruhe	80.000	25	20.000	1982
<b>Lünen</b>	NRW	Innovatherm GmbH	235.000	25-95	95.000	1997
<b>München</b>	BY	Münchner Stadtentwässerung	88.000	25	22.000	1997
<b>Stuttgart</b>	BW	Tiefbauamt Stuttgart	130.000	25	32.000	2007
<b>Neu-Ulm</b>	BY	Zweckverband Klärwerk Steinhäule	64.000	25	16.000	1979
<b>Wuppertal</b>	NW	Wupperverband	128.000	25	32.000	1977
<b>Sande/Wilhelmshaven</b>	NS	Spitz GmbH			2.250	
<b>Straubing</b>	BY	Huber SE	9.000 t/a entwässertes KS	28%	2.500 tTR/a	2012
<b>Mannheim</b>	BW	Kopf	10.800	k. A.	k. A.	2010

**TABELLE 22: TECHNISCHE DATEN DER MONOKLÄRSCHLAMMVERBRENNUNGSANLAGEN FÜR KOMMUNALEN KLÄRSCHLAMM (STAND 2012) [EIGENE ERHEBUNG]**

Betriebsstunden 2009	Input		Entwässerung	
	Schlammzustand (Roh- / Faulschlamm)	Schlammarten	Aggregat zur Entwässerung	Restwassergehalt insges. (i. Mittel)
[h/a]	[-]	[-]	[-]	[%]
7.000	k. A.	kommunaler Klärschlamm	Dekanter	-
k. A.	Faulschlamm	Klärschlamm	Kammerfilterpresse	69
8.760	Rohschlamm 3,5% TS	Klärschlamm	Zentrifuge	74,0
7.738	Rohschlamm	Industrieller und kommunaler Klärschlamm	Zentrifuge	74
6.854	Faulschlamm	Klärschlamm, Schwimmschlamm	Zentrifuge	76,5
7.800	Faulschlamm	Klärschlamm	Membranfilterpresse	60
4309 (außer Betrieb seit 2010)	gefault	Kommunaler KS	NA	72
8.400	2009: Rohschlamm; (ab 2010 auch Faulschlamm)	Klärschlamm	Zentrifuge	74,00
7.313	Faulschlamm	Klärschlamm	KFP ZF	68-72
6.851 je Linie im Mittel; 20.552,5 Summe von 3 Linien parallel in Betrieb	Rohschlamm	Klärschlamm	Zentrifuge	71
k. A.	Rohschlamm	Industrieller und kommunaler Klärschlamm	Dekanter	26
23.463h=3Linien=7.821 pro Linie	Faulschlamm	Klärschlamm	Zentrifuge	78
k. A.	Faulschlamm	Klärschlamm	-	10-75
6.500	Rohschlamm	Klärschlamm, Rechengut, Fettfanggut	Zentrifuge	75
7.850	Faulschlamm	Klärschlamm, Filterkuchen	Zentrifugen, Membranfilterpressen	60
8.430	Faulschlamm	Klärschlamm	Zentrifuge	72
Linie 3: 4.809	Roh-, Faul-, Überschussschlamm	Klärschlamm, Rechengut, Fettfanggut	Zentrifuge	75
k. A.	Rohschlamm/Faulschlamm	Klärschlamm, Rechengut, Sand- und Fettfanggut	Zentrifuge	75,0
8.586	Faulschlamm	Klärschlamm	Zentrifuge, Kammerfilterpresse	75,0
außer Betrieb	Faulschlamm	Klärschlamm	extern	-
auf 7.500 h/a ausgelegt	Faulschlamm	Klärschlamm, Rechengut	Zentrifuge	72
7.000 h/a geplant	Faulschlamm	Klärschlamm, Rechengut		

Allgemein	Trocknung			
Standort	Aggregat	Rest-Wassergehalt nach Trocknung	Verbrennungstechnologie	Verbrennungseinheiten
	[-]	[%]	[-]	[-]
<b>Altenstadt</b>	Thermalölkreislauf	25-30	Rostfeuerung	2 Öfen
<b>Balingen</b>	Solartrocknung	20-25	Wirbelschichtvergaser	eine Vergasung
<b>Berlin-Ruhleben</b>	-	-	stationäre Wirbelschicht	3
<b>Bitterfeld-Wolfen*</b>	Scheibentrockner	55	stationäre Wirbelschicht	1
<b>Bonn</b>	-	-	stationäre Wirbelschicht	2
<b>Bottrop</b>	-	-	stationäre Wirbelschicht	2
<b>Dinkelsbühl</b>	Bandrockner	<10	Pyrobuster	1
<b>Düren</b>	Scheibentrockner	60	stationäre Wirbelschicht	1
<b>Elverlingsen-Werdohl</b>	-	-	stationäre Wirbelschicht	1
<b>Frankfurt am Main</b>	Etagenwirbler	ca. 30 (Eintritt in Wirbelschicht)	Etagenwirbler	4
<b>Gendorf*</b>	Scheibentrockner	50	Wirbelschicht	1
<b>Hamburg</b>	Scheibentrockner	58	stationäre Wirbelschicht	3
<b>Herne</b>	-	-	stationäre Wirbelschicht	1
<b>Karlsruhe</b>	Scheibentrockner	55	stationäre Wirbelschicht	2 (1+1)
<b>Lünen</b>	-	-	Wirbelschicht	1
<b>München</b>	Kontaktscheibentrockner	55	stationäre Wirbelschicht	2
<b>Stuttgart</b>	Scheibentrockner	55	stationäre Wirbelschicht	2
<b>Neu-Ulm</b>	Dünnschichtrockner	60	stationäre Wirbelschicht	2
<b>Wuppertal</b>	Dünnschichtrockner	55	stationäre Wirbelschicht	2
<b>Sande/Wilhelmshaven</b>	Fließbettrockner	15	Zykloiddrennkammer	1
<b>Straubing</b>	Bandrockner	35	Rost (Flugverbrennung)	1
<b>Mannheim</b>	Trommelrockner		Wirbelschichtvergaser	1

Verbrennung					
Heizwert des Klärschlammes im Jahresmittel	theor. Kapazität je Einheit (i. Mittel)	tatsächlich verbrannte Menge 2009	Hersteller Verbrennereinheit	Zusatzbrennstoff	
[kJ/kg]	[t TS/h]	[t TS/a]	[-]	[-]	
8.000	je 2,5 t TM/h	23.000			
	0,18		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	
	1,42	6.600,00	Raschka	Faulgas, Heizöl	
4.500	3,00	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 Faulschlamm: 3.700) KJ/kgTS	1,75	10.924	Lurgi	Erdgas	
1.000 in OS bzw. zwischen 10.000 und 13.000 kJ/kg.TS	7,00	185.421 t/a	TKEC	Kohle/Erdgas/Heizöl/SBS	
17.000 kJ/kg TS; 3.100 kJ/kg feucht	2,00	33.946,00	Lurgi	Heizöl (Leichtöl)	
	1,25			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	
	8		Raschka	Heizöl	
14.000-15.000	1,90/2,70	13.000,00	Raschka	Heizöl	
4.000	13	89.000	Raschka	Heizöl	
4.500/10.000	3	21.421	Raschka	Faulgas	
13,8 MJ/kg TS	4,00	22.700,00	Bamag	Faulgas, Heizöl	
k. A.	2,00	16.389,00	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	
	0,30	0,00	Steinmüller	Erdgas	
7.000 kJ/kg	530 kg/h	3.500 t/a	Fa. Zauner		
			Kopf		

Allgemein	Wärmenutzung					Abgasreinigungslinien
	Standort	Aggregat	Hersteller	Dampfparameter (i. Mittel)	elekt. Bruttoleistung	
			[bar/°C]	[MW]		
<b>Altenstadt</b>	Kessel mit Thermalöl			-	Wärme zur Trocknung	1
<b>Balingen</b>	BHKW	Kopf/EAG	-		Wärme, Strom	1
<b>Berlin-Ruhleben</b>	Wasserrohrkessel (Naturumlauf)	L. & C. Steinmüller	46/460	1 x 2,8/2 x 2,0	Strom, Wärme	3
<b>Bitterfeld-Wolfen*</b>	Naturumlauf	Bertsch	10/180	-	Wärme	1
<b>Bonn</b>	Abhitzezwangsdurchlaufkessel	Stahl	10/180		Wärme, Strom	2
<b>Bottrop</b>	Zwangsumlaufkessel	Raschka	35/400	3,5	Wärme, Strom	2
<b>Dinkelsbühl</b>	Abhitzedampfkessel	HTA GmbH	10/184	N.A	Trocknung	1
<b>Düren</b>	Abhitzekeessel Wärmeträgeröl	Ohl	-		Wärme	1
<b>Elverlingsen-Werdohl</b>	Dampfkessel	Bertsch	17/320		Hilfsdampf für Kraftwerksbedarf	1
<b>Frankfurt am Main</b>	Dampfkessel	Lentjes	38/380	3	Wärme, Strom	4
<b>Gendorf*</b>			20/215			
<b>Hamburg</b>	Naturumlaufkessel	AE & E	40/400	32 DT u. Dampf AHK	Wärme, Strom	3
<b>Herne</b>	Drehrohtrockner für Schlammkohle	Hoffmeyer	-		Wärme	2
<b>Karlsruhe</b>	Naturumlaufkessel	Raschka, Oschatz	25/300 25/300		Wärme, Strom	2
<b>Lünen</b>	Naturumlaufkessel	Noell-KRC	40/400	8,5	Strom	1
<b>München</b>	Abhitzekeessel	Wamser	40/400	0,269869514	Wärme für Eigenbedarf, Strom	4
<b>Stuttgart</b>	Abhitzekeessel	Bertsch	63/410	1,2 MW	Wärme, Strom	2
<b>Neu-Ulm</b>	Wasserrohrkessel	UMAG, Baumgarte	24/250 40/400	k. A.	Wärme, Strom	4
<b>Wuppertal</b>	Abhitzekeessel mit Naturumlauf	Blohm + Voss	31/355	---	Wärme, Strom	2
<b>Sande/Wilhelms-haven</b>	Abhitzekeessel mit Naturumlauf	Wulff	19/210		Wärme	4
<b>Straubing</b>	Wärmetauscher/Mikrogas-turbine	Turbine: Turbec		80 kW el.	800 kW therm.	1
<b>Mannheim</b>	BHKW			3,6 MW	Wärme	1

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

Abgasreinigung				Schlacke- bzw. Ascheverwertung/ Entsorgung	
Staubabscheider	weitere Abgasreinigung	weitere Abgasreinigung	weitere Abgasreinigung	Verwertung/Beseitigung in	Menge
[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[t/a]
Zyklon + Gewebefilter nach Flugstromadsorber	Entstickung (SNCR)	Flugstromadsorber	2-stufiger Wäscher	Vorwiegend landwirtschaftl. Verwertung, ansonsten Asphaltmischwerk	8.500
Zyklon + Keramikfilter	Nasswäsche	Teerkondensation		Asphaltmischwerk	500
Elektrofilter	Nass/Absorber	-		Bergversatz	14.400
Elektrofilter, Gewebefilter	Nass/2-stuf. Wäscher	Flugstromadsorber	-	Bergversatz	5.233
Elektrofilter	Quasitrocken/Absorber	Flugstromadsorber		Deponieabdeckung	3.200
Elektrofilter	Nass /2-stuf. NaOH-Wäscher	-	-	Asphaltmischwerk	18.000
Zyklon	Sorptionsmittel	Staubfilter		als Bauzuschlagsstoff geprüft, z. Z. auf Deponie	bis 1.700 (442 in 2009)
Nasswäscher	SO <sub>2</sub> -Wäscher	Festbettfilter zur Quecksilberabscheidung	SNCR-Anlage	Deponie/Deponiebau	3.467
Elektrofilter	Sprühtrockner, saurer Wäscher, SO <sub>2</sub> -Wäscher	HOK + Gewebefilter		Deponie/Deponiebau	35.000
Elektrofilter	Nass/4-stuf. Wäsche	Festbettadsorber (Aktivkohle)		Bergversatz	6.803
Elektrofilter	Nass/Pfeifenquenche, Gegenstromwäscher	Flugstromadsorber		Kupferhütte Flugasche	21.834
Gewebefilter	Trockensorption	Primäradditivierung		Asphaltmischwerk	8.900
Elektrofilter	Nass/Oxidations-Venturiwäscher, 3-stufig	-		Bergversatz	4.000
Elektrofilter, Gewebefilter	Quasitrocken, 2-stuf. Wäscher	Flugstrom-adsorber		Deponie/Deponiebau	40.000
Elektrofilter	Gewebefilter	2-stuf. Wäscher	Nass-Elektrofilter	Deponie/Deponiebau	8.500
Elektrofilter	Quasitrocken/Strahlwäscher, Füllkörperwäscher	Flugstromadsorber + HOK	Elektrofilter 2	Bergversatz	8.220 (2009)
Elektrofilter, Gewebefilter	Nass/Strahlwäscher, Füllkörperwäscher	Trockenadditiv, Gewebefilter, Flugstromadsorber		Bergversatz	7.400
Elektrofilter	Nass/2-stuf. Wäscher; saurer ohne Einbauten, bas. mit Füllkörper	Aktivkoksadsorber und Gewebefilter	-	Bergversatz	12.412
Gewebefilter, Heißgas-Zyklon	Trocken/Verdampfungskühler	Herdofenkoksfilter			
Hydrozyklon	Gewebefilter	SNCR	Kalkeindüsung	P-Recycling geplant	1.400 t/a
Keramikfilter	Trockner	Gaswäsche 2-Stufig	-		

TABELLE 23: TECHNISCHE DATEN DER BETRIEBSEIGENEN KLÄRSCHLAMMVERBRENNUNGSANLAGEN (STAND 2012) [EIGENE ERHEBUNG]

Allgemein							
Standort	Bundesland	Betreiber	Technologie	Dauerbetrieb ab	Betriebsstunden	Kapazität	TR
	[-]	[-]	[-]	[-]	[h/a]	[t/a]	[%]
<b>Burghausen</b>	BY	Wacker Chemie	1 Wirbelschicht	1976		20.000	21
<b>Frankenthal-Mörsch</b>	RP	BASF AG	2 Wirbelschichten	1992	Ofent: 7158 Ofen2: 6445	420.000	40
<b>Frankfurt Hoechst</b>	HE	Infraserv GmbH	2 Wirbelschichten	1994	Str I:8.164h; Str II:8.055h	205.000	35
<b>Leverkusen</b>	NW	Currenta GmbH	1 Etagenofen	1988	8000	120.000	27-40
<b>Marl</b>	NW	Infracor GmbH	1 Wirbelschicht	1980		40.000	25
<b>Bitterfeld-Wolfen</b>	SH	GKW				Technische Daten in Tabelle 22	
<b>Gendorf/Burgkirchen</b>	BY	Infraserv GmbH				Technische Daten in Tabelle 22	

Allgemein	Verbrennung				
Standort	Rest-Wassergehalt nach Trocknung	Verbrennungstechnologie	Verbrennungseinheiten	Heizwert des Klärschlammes im Jahresmittel	theor. Kapazität je Einheit (i. Mittel)
	[%]	[-]	[-]	[kJ/kg]	[t TS/h]
<b>Burghausen</b>	60	SW	1		0,6
<b>Frankenthal-Mörsch</b>	-	SW	2	2.000	7 t TR
<b>Frankfurt Hoechst</b>	-	SW	2	3.500	4,2
<b>Leverkusen</b>		EO	1	4.200	4,5
<b>Marl</b>		SW	1		3
<b>Bitterfeld-Wolfen</b>					
<b>Gendorf/Burgkirchen</b>					

Allgemein	Abgasreinigung			
Standort	Energienutzung	Abgasreinigungslinien	Staubabscheider	weitere Abgasreinigung
	[-]	[-]	[-]	[-]
<b>Burghausen</b>	Dampf zur Trocknung	1	Zyklon	Vorsättiger + venturi-Wäscher
<b>Frankenthal-Mörsch</b>	Wärme, Strom	2	Elektrofilter	Nass/Füllkörperkolonne
<b>Frankfurt Hoechst</b>	Wärme, Dampf	2	Elektrofilter	Nass/2 stufige Nasswäsche
<b>Leverkusen</b>	Wärme, Dampf	1	Wäscher	Nass/Einspritzkühler, 2-stuf. Rotationswäscher, Strahlgaswäscher
<b>Marl</b>	Dampf	4	Gewebefilter	Trocken + Nass
<b>Bitterfeld-Wolfen</b>				
<b>Gendorf/Burgkirchen</b>				

Input		Entwässerung		Trocknung	
Kapazität	Schlammzustand (Roh-/Faulschlamm)	Schlammarten	Aggregat zur Entwässerung	Restwassergehalt insges. (i. Mittel)	Aggregat
[t TM/a]	[-]	[-]	[-]	[%]	[-]
4.125	Rohschlamm	(komm. u.) industr. Klärschlamm	Bandfilterpresse	80	Dünnschichttrockner
110.000	Rohschlamm	industr. Klärschlamm	Kammer-/Membranfilterpresse	57	-
80.000	Rohschlamm	komm. u. industr. Klärschlamm	Membranfilterpresse	65-70	-
36.000	Rohschlamm	industr. Klärschlamm	Membranfilterpresse	60	
10.000	Rohschlamm	komm. u. industr. Klärschlamm	Eindicker, Siebbandpresse	75	

		Wärmenutzung				
tatsächlich verbrannte Menge 2009	Hersteller Verbrennereinheit	Zusatzbrennstoff	Aggregat	Hersteller	Dampfparameter (i. Mittel)	elekt. Bruttoleistung
[t TS/a]	[-]	[-]	[-]	[-]	[bar/°C]	[MW]
	Lurgi	Erdgas	Abhitzekeessel	Wehrle	16,5/200	
110.000	Rhein Stahl/MAB-Lentjes	Steinkohle, EBS, Heizöl EL	Naturumlauf	Lentjes	63/420	max. 13 MW (2009: 60.190 MWh (brutto))
70.000	Uhde	Kohle, Heizöl, Erdgas	Abhitzekeessel mit Naturumlauf	MAN/GHH	16/280	
23.387	Lurgi	Erdgas, Heizölsubstitute in Nachbrennk.	Strahlungszüge, Überhitzer, ECO	Lentjes	41/360	
	Raschka	Erdgas, betriebseigene Brenngase	Abhitzekeessel	Wehrle	25/220	

Schlackeverwertung/Entsorgung			
weitere Abgasreinigung	weitere Abgasreinigung	Verwertung/Beseitigung in	Menge
[-]	[-]	[-]	t/a
Aerosolabscheider	Absorptionswäscher	k. A.	k. A.
		Vermeidung, Bergversatz in Salzstöcken	42.736 (KS+Kohle+EBS)
keine	keine	Deponie/Bergwerkversatz	33.000
Flugstromreaktor		Beseitigung SAD Leverkusen	16.992
SCR, Festbettadsorber		k. A.	k. A.

TABELLE 24: TECHNISCHE DATEN DER KOHLEKRAFTWERKE, DIE KLÄRSCHLAMM MITVERBRENNEN (STAND 2011) [EIGENE ERHEBUNG]

Kraftwerksname/ Standort	Allgemeines zur Mitverbrennung			
	Bundesland	Betreiber	elek. Bruttoleistung [MW]	Kohleart 1) [-]
<b>Berrenrath/Köln Hürth</b>	NW	RWE Power AG	107	BK
<b>Boxberg N, P, Q</b>	SN	Vattenfall Europe Generation AG & Co. KG	1.907	BK
<b>Farge/Bremen</b>	HB	GDF Suez Energie GmbH	375	SK
<b>Deuben</b>	SA sachsen anhalt	Mitteldeutsche Braunkohlengesellschaft mbH	86 (install. Elektr. Leistung)	BK
<b>Duisburg HKW I</b>	NW	Stadtwerke Duisburg AG	144	SK
<b>Ensdorf 1 und 3/Saarbrücken</b>	SL	VSE AG	430	BaK
<b>Hamm/Westfalen</b>	NW	RWE Power AG	625	SK
<b>Heilbronn 5, 6 und 7</b>	BW	EnBW Kraftwerke AG	1.000	SK
<b>Helmstedt/Buschhaus</b>	NI	E.ON Kraftwerke GmbH	405	BK
<b>Herne 2, 3 und 4</b>	NW	Evonik Steag GmbH	950	Sk
<b>Lippendorf R uns S</b>	SN	Vattenfall Europe Generation AG & Co. KG	1.840	BK
<b>Lünen 6 und 7</b>	NW	Evonik Steag GmbH	500	SK
<b>Mehrum 3/Hannover</b>	NI	Kraftwerk Mehrum GmbH	750	SK
<b>Veltheim 2, 3 und 4/Weser</b>	NW	Gemeinschaftskraftwerk Veltheim GmbH	820	SK und erdgas
<b>Mumsdorf</b>	SA sachsen anhalt	Mitteldeutsche Braunkohlengesellschaft mbH	85 (install. Elekt. Leistung)	BK
<b>Oberkirch/Köhler</b>	BW	Koehler Energie GmbH		SK
<b>Staudinger 1, 3, 4 und 5/Hanau</b>	HE	E.ON Kraftwerke GmbH	1.760	SK und erdgas
<b>Völklingen-Fenne</b>	SL	Evonik Power Saar GmbH	425	SK
<b>Wachtberg-Frechen/Köln-Hürth</b>	NW	RWE Power AG	201	BK
<b>Weiber/Quierschied</b>	SL	Evonik Power Saar GmbH	724	SK
<b>Weisweiler/Aachen</b>	NW	RWE Power AG	2.293	BK
<b>Wilhelmshaven</b>	NI	E.ON Kraftwerke GmbH	788	SK
<b>Zolling-Leininger 5/München</b>	BY	GDF Suez Energie Deutschland AG	474	SK
<b>26. Ibbenbüren</b>	NW	RWE Power AG	752	SK

Daten beruhen auf Erhebung von 2005 und wurden 2011 erneuert.

Feuerung 2)	Wassergehalt der Kohle	Kohledurchsatz	Dauerbetrieb mit KS seit	Anz. der Linien die KS mitverbrennen
[-]	[%]	[t/h]	[-]	[-]
ZWS	51-61	30	Mitverbrennung in beiden Kesseln seit August 1994/Dauerbetrieb seit 2000	2
SF	56	-	Feb. 1999	2 Kessel
SF	10,5	100	2001 2003	1
SF	48-56	102	2002	5 Kessel
ZWS	10-20	30	2002/1995	1
SF	5-17	200	2001	2 Blöcke
SF	8-16	100	2002	1
SF	9	280	Apr. 1999 Aug. 1998	1
SF	45	300	1997	1
SF	11	110	2005	1
SF	52-54	-	2004	2 Blöcke
SF	11	160	2005	1
SF	6-8	240	2002	1
SF	8-12	113	2003	1
SF	48-56	128	2000	4 Kessel
ZWS	6-9	10	2003	1
SF	8-12	120	2004	1
SF	20	93	2001	1 von 2 Blöcken verbr. mit
ZWS	51-61	50	Mitverbrennung in beiden Wirbelschichtkesseln seit 2003	2
SF	9	250	Apr. 1999/1996	1
SF	55-60	200	Mitverbrennung in 2 von 8 Blöcken seit August 2008	2
SF	8,5	250	2004/2003	1
SF	6-12	136	1999	1
SF			Mitverbrennung seit 2001	1

Kraftwerksname/ Standort	Klärschlamm			
	Einbringung in die Feuerung	KS-Durchsatz im Anlieferzustand	KS-Durchsatz Trockenmasse	Feststoffgehalt im Anlieferzustand
	[-]	[1000 t OS/a]	[1000 t TM/a]	[% TR]
<b>Berrenrath/Köln Hürth</b>	zirkul. Wirbelschicht	215	65	mech. Entw. KS < 35% TS
<b>Boxberg N, P, Q</b>	Kohlefallschacht	140	42	30
<b>Farge/Bremen</b>	Kohlefallschacht-Zuteiler	20 15	18	22 > 90%
<b>Deuben</b>	vor Kohlemühle	84	25	20-37
<b>Duisburg HKW I</b>	zirkul. Wirbelschicht	18	5,4	25-35
<b>Ensdorf 1 und 3/Saarbrücken</b>	Mühle mit Kohlenstaub	81	24	25-45
<b>Hamm/Westfalen</b>	Kohleband, Mühle	10	9	25-95
<b>Heilbronn 5, 6 und 7</b>	Kohlefallschacht	60 mech. Entwässerter Schlamm und 25-20 thermisch getr. Schlamm	40	25-35 > 95
<b>Helmstedt/Buschhaus</b>	Kohleband, Mühle	100	50	25-95
<b>Herne 2, 3 und 4</b>	Kohlefallschacht	30	25	> 69
<b>Lippendorf R und S</b>	Kohlefallschacht	380	93	25-35
<b>Lünen 6 und 7</b>	direkt in die Feuerung	30	25	> 69
<b>Mehrum 3/Hannover</b>	Kohlefallschacht	35	11	25-35
<b>Veltheim 2, 3 und 4/Weser</b>	mit Dampfanzen direkt in Feuerung	45	13,5	25-35
<b>Mummsdorf</b>	vor Kohlemühle	100	28	20-37
<b>Oberkirch/Köhler</b>	Ascherücklauf	20	5	18-32
<b>Staudinger 1, 3, 4 und 5/Hanau</b>	Kohlefallschacht	60	18	25-35
<b>Völklingen-Fenne</b>	vor Kohlemühle	14	4,2	25-35
<b>Wachtberg-Frechen/Köln-Hürth</b>	zirkul. Wirbelschicht	280/260	85	mech. Entw. KS < 35% TS
<b>Weiber/Quierschied</b>	Mühle mit Kohlenstaub	6-10	5,5-9	90-95 *
<b>Weisweiler/Aachen</b>	Kohlefallschacht	140	35	22-33 max. 35% TS
<b>Wilhelmshaven</b>	Kohlefallschacht	50	12,5	25
<b>Zolling-Leininger 5/München</b>	Kohlefallschacht	35	9,5	25-35
<b>26. Ibbenbüren</b>		90	35 (10t/h)	20-40% TS

Daten beruhen auf Erhebung von 2005 und wurden 2011 erneuert.

		Abgasreinigung			
Herkunft	Schadstoffgehalte im KS	Staubabscheidung	DeNOx	SOx <sub>3</sub>	weiteres
[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
komm./indust.	Anforderungen > AbfKlärV	Elektrofilter	primär ZWS	pZWS	Flugstrom-Absorber m. BK
komm.	komm. Klärschlamm	Elektrofilter, Wäscher	Primärmaßnahme	NR	-
komm.	unter AbfKlärV	Elektrofilter	SCR-high-dust	NR	-
komm.	unter AbfKlärV	Elektrofilter	-	NR	-
komm.	komm. Klärschlamm	Elektrofilter	primär ZWS	pZWS	-
komm.	unter AbfKlärV	Elektrofilter	SCR-low-dust	SAS	-
komm.	komm. Klärschlamm	Elektrofilter	SCR-low-dust	NR	alkalischer Wäscher
komm.	unter AbfKlärV	Elektrofilter	SCR-high-dust	NR	-
komm./indust.	über AbfKlärV	Elektrofilter	Primärmaßnahme	NR	-
komm./indust.	unter AbfKlärV	Elektrofilter	SCR-low-dust	NR	-
komm./indust.	über AbfKlärV	Elektrofilter, Wäscher	SNCR	NR	-
komm./indust.	unter AbfKlärV	Elektrofilter	SCR-low-dust	NR	-
komm./indust.	unter AbfKlärV	Elektrofilter	SCR-high-dust	NR	-
komm./indust.	über AbfKlärV	Elektrofilter	SCR-high-dust	NR	-
komm.	unter AbfKlärV	Elektrofilter	-	NR	-
komm.	unter AbfKlärV	Gewebefilter	-	-	-
komm./indust.	unter AbfKlärV	Elektrofilter	SCR-high-dust	NR	-
komm.	unter AbfKlärV	Elektrofilter	feuerungsseitig	NR	-
komm./indust.	Anforderungen > AbfKlärV	Elektrofilter	primär ZWS	pZWS	Flugstrom-Absorber m. BK-Koks
komm.	unter AbfKlärV	Elektrofilter	SCR-high-dust	NR	-
komm.	unter AbfKlärV aber Hg < 5mg/kg TS	Elektrofilter	feuerungsseitig SNCR	NR (REA)	-
komm.	unter AbfKlärV	Elektrofilter	SCR-high-dust	NR	-
komm./indust.	unter AbfKlärV	Elektrofilter	SCR-high-dust	NR	-
komm.					

**TABELLE 25: TECHNISCHE DATEN DEUTSCHER ABFALLVERBRENNUNGSANLAGEN, DIE KLÄRSCHLAMM MITVERBRENNEN (STAND 2012) [ERHEBUNG DURCH DIE ITAD]**

Standort	Bundesland	Anlagenbetreiber	verbrannte Menge an Schlamm aus der Kommunalen Abwasserbehandlung (nur AVV 190805)
			[Mg/a]
<b>Bamberg</b>	BY	Zweckverband Müllheizkraftwerk Stadt und Landkreis Bamberg	14.032
<b>Coburg</b>	BY	Zweckverband für Abfallwirtschaft in Nordwest-Oberfranken	3.314
<b>Hamburg, Borsigstr.</b>	HH	MVB GmbH	2.642
<b>Hamburg, Rugenb.</b>	HH	MVR Müllverwertung Rugenberger Damm GmbH & Co. KG	3.226
<b>Hamburg, Stellingen</b>	HH	Stadtreinigung Hamburg	12.150
<b>Ingolstadt</b>	BY	Zweckverband Müllverwertungsanlage Ingolstadt	628
<b>Kamp-Lintfort</b>	NRW	Kreis Weseler Abfallgesellschaft mbH & Co. KG	3.700
<b>Köln</b>	NRW	AVG Köln mbH	
<b>Krefeld</b>	NRW	EGK Entsorgungsgesellschaft Krefeld GmbH & Co. KG	1.281 / 11.872
<b>München</b>	BY	AWM - Abfallwirtschaftsbetrieb München	9.730
<b>Velsen</b>	SL	AVA Velsen GmbH	125
<b>Würzburg</b>	BW	Zweckverband Abfallwirtschaft Raum Würzburg	8.445
<b>Zella-Mehlis</b>	TH	Zweckverband für Abfallwirtschaft Südwestthüringen (ZAST)	2848,76
<b>Burgau</b>	BY	Landkreis Günzburg Kreisabfallwirtschaftsbetrieb	-
<b>7 weitere nicht benannte Anlagen</b>			4.250
			4 Werte
<b>Mittelwert</b>			<b>5.424</b>
<b>Summe</b>			<b>65.091</b>

Schlamm aus der Kommunalen Abwasserbehandlung (nur AVV 190805)	Schlämme aus der industriellen Abwasserbehandlung	separate Trocknung vor Verbrennung	max. Kapazität
TS-Gehalt [%]	[Mg/a]		[Mg/a]
30% nach Entwässerung	entfällt	nein	entfällt
25	-	nein	-
-	-	-	-
28	-	-	-
25	-	-	-
80	-	-	-
25	-	Wirbelschicht	34
	10381	nein	-
30%/90%	-	-	-
-	-	nur Zentrifuge	-
25	-	-	-
40	-	flash dry system	24.000
-	-	nein	-
-	85	-	-
23	1.789	nein	140.040
2 Werte	3 Werte	3x nein, 3x k. A.	3 Werte
<b>34</b>	<b>4.085</b>		<b>54.691</b>
	<b>12.255</b>		<b>164.074</b>

# ANHANG II

## 16

### Relevante Rechtsvorschriften für die Klärschlammentsorgung

Die hier vorgestellten Gesetze und Verordnungen spiegeln die für die Entsorgung von Klärschlamm zutreffenden relevanten Regularien dar. Die hier getroffene Auswahl stellt nur die Bundesgesetze und -verordnungen dar, die zum Verbrennen von Klärschlamm zutreffend sind sowie die für die landwirtschaftliche Verwertung.

#### Das Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG)

Die rechtliche Grundlage für die Entsorgung von Abfällen und damit auch von Klärschlämmen ist das Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG). Das neue Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) ist am 29.2.2012 im Bundesgesetzblatt (BGBl. I S.212) verkündet worden und ist am 1.6.2012 in Kraft getreten. Ziel des neuen Gesetzes ist eine nachhaltige Verbesserung des Umwelt- und Klimaschutzes sowie der Ressourceneffizienz in der Abfallwirtschaft durch Stärkung der Abfallvermeidung und des Recyclings von Abfällen. Das Gesetzes schreibt eine fünfstufige Hierarchie (Vermeidung – Vorbereitung zur Wiederverwendung – Recycling – sonstige Verwertung (d.h. auch energetische) – Beseitigung) vor. Mit Einführung der Fünf-Stufen-Hierarchie setzt Deutschland die Anforderungen der EU-Abfallrahmenrichtlinie (2008/98/EG) um.

Soll Klärschlamm als Dünger in der Landwirtschaft verwendet werden, sieht § 11 des KrWG vor, dass zur Sicherung der ordnungsgemäßen und schadlosen Verwertung nähere Bestimmungen über die Verwendung per Rechtsverordnung geregelt sind. Auf dieser Rechtsgrundlage basiert künftig die Klärschlammverordnung (AbfKlärV).

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

Darüber hinaus unterliegt Klärschlamm, sofern er zur Düngung eingesetzt wird, dem Düngemittelrecht.

#### Klärschlammverordnung (AbfKlärV)

Diese Verordnung ist anzuwenden, soweit Klärschlamm auf landwirtschaftlich oder gärtnerisch genutzte Böden aufgebracht werden soll. Die Vorschriften des Düngemittelrechts bleiben davon unberührt.

Dabei sollen die in der Verordnung genannten Grenzwerte soweit wie möglich unterschritten werden. Das Wohl der Allgemeinheit darf durch das Aufbringen von Klärschlamm auf

landwirtschaftlich und gärtnerisch genutzten Böden nicht beeinträchtigt werden. Ebenso soll die Aufbringung des Schlammes nur soweit erfolgen, wie es die Boden-, Standort- und Anbaubedingungen sowie der Nährstoffbedarf der Pflanzen zulassen.

Zur Untersuchung des Klärschlammes sind die Betreiber der Abwasserbehandlungsanlage nach § 3 Absatz 5 verpflichtet, in Abständen von längstens sechs Monaten Klärschlammproben untersuchen zu lassen. Die Analysen umfassen:

1. die Nährstoffgehalte: Gesamt- und Ammoniumstickstoff, Phosphat, Kalium, Magnesium,
2. die Summe organischer Halogenverbindungen, angegeben als adsorbierte organisch-gebundene Halogene (AOX),
3. die Schwermetalle: Blei, Cadmium, Chrom, Kupfer, Nickel, Quecksilber, Zink und
4. den pH-Wert, Trockenrückstand, die organische Substanz und basisch wirksame Stoffe.

Vor einem erstmaligen Aufbringen und danach in Abständen von längstens zwei Jahren müssen Klärschlämme auf die Schadstoffgehalte an polychlorierten Biphenylen (PCB), sowie Dioxinen und Furanen untersucht werden [§ 3 ABFKLÄRV].

Untersuchungen des Bodens, auf denen der Klärschlamm aufgebracht werden soll, sind nach § 3 ebenfalls durch die Betreiber der Abwasseranlagen durchzuführen. Dies ist vor der

ersten Aufbringung und dann im Abstand von zehn Jahren erforderlich. Der Boden soll dabei auf Folgendes hin untersucht werden:

- pH-Wert
- Nährstoffgehalte: pflanzenverfügbares Phosphat, Kalium, Magnesium
- Schwermetalle: Blei, Cadmium, Chrom, Kupfer, Nickel, Quecksilber, Zink

Der Betreiber der Abwasserkläranlage kommt für die Kosten der Boden- und Klärschlammuntersuchungen auf.

Ein grundsätzliches Verbot besteht für die Aufbringung von Rohschlamm oder industriellen Klärschlämmen.

Ebenso verboten ist die Aufbringung von Klärschlamm

- auf Gemüse- und Obstanbauflächen,
- auf Dauergrünland und forstwirtschaftlich genutzten Böden,
- auf Ackerflächen mit Feldfutteranbau,
- in Naturschutzgebieten, Naturdenkmalen, Nationalparks,
- in Wasserschutzgebieten (Zone I und II),
- für den Fall, dass die in § 4 festgelegten Grenzwerte für Schlamm und den Boden nicht eingehalten werden.

Die Aufbringungsmenge darf innerhalb von drei Jahren höchstens fünf Tonnen Trocken-

substanz je Hektar betragen. Klärschlammkompost darf bis zu einer Menge von 10 t/ha aufgebracht werden, sofern er die Hälfte der organischen Schadstoffe und Schwermetalle enthält [§ 6 ABFKLÄRV]. Die bisher geltende Fassung der Verordnung stammt aus dem Jahr 1992. Seit Jahren wird bereits an einer Novellierung durch das BMU gearbeitet. Seit Oktober 2010 existiert ein zweiter Arbeitsentwurf. Tabelle 26 stellt die Unterschiede der bisherigen Fassung und der möglichen Neufassung der Verordnung in Bezug auf die Grenzwerte im Boden und im Klärschlamm dar.

### **EU-Klärschlammrichtlinie**

Die Richtlinie 86/278/EWG über den Schutz der Umwelt und insbesondere der Böden bei der Verwendung von Klärschlamm in der Landwirtschaft hat zum Ziel, die landwirtschaftliche Verwertung von Klärschlamm 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. Die Richtlinie enthält Grenzwerte für Schwermetalle in den Böden, Schlämmen und für die Mengen von Schwermetallen, die pro Jahr auf den Böden aufgebracht werden dürfen. Die Verwendung von Klärschlamm ist verboten, wenn die Konzentration eines oder mehrerer Schwermetalle in den Böden die festgesetzten Grenzwerte übersteigt. Die einzelnen Mitgliedstaaten müssen dazu geeignete Maßnahmen treffen, die sicherstellen, dass trotz einer Verwendung der Schlämme die Grenzwerte nicht

überschritten werden.

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 Register führen, in denen regelmäßig über die erzeugte Schlammmenge, die in der Landwirtschaft verwendete Menge sowie über Zusammensetzung und Eigenschaften der Schlämme berichtet wird [EWG].

### **Düngemittelrecht**

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

### **Düngegesetz (DüngG)**

Der Zweck dieses Gesetzes ist es, die Ernährung der Nutzpflanzen sicherzustellen, die Boden-

**TABELLE 26: MAXIMAL ZULÄSSIGE SCHADSTOFFGEHALTE NACH ABFKLÄRV FÜR BODEN UND KLÄRSCHLAMM UND NACH DEM ENTWURF DER ABFKLÄRV 2010 [ABFKLÄRV; BMU 2011B; BBODSCHV, MODIFIZIERT NACH BRANDT ]**

Schadstoff	AbfklärV 1992		Entwurf AbfklärV 2010	
	Boden	Klärschlamm	Boden <sup>1)</sup>	Klärschlamm <sup>2)</sup>
<b>Schwermetalle</b>				
As				18
Pb	100	900	40-100	150
Cd	1,5	10	0,4-1,5	3
Cr	100	900	30-100	120
Cu	60	800	20-60	800
Ni	50	200	15-70	100
Hg	1	8	0,1-1	2
Th				1,5
Zn	200	2.500	60-200	1.800
<b>Organisch persistente Schadstoffe</b>				
PCB		0,2 je Kongener		0,1 je Kongener
PCDD/PCDF		100 ng/kg TS		30 ng TEQ/kg TS
B(a)P				1
PFC (PFOA und PFOS)				0,1
AOX		500		400
Salmonella spp.				Keine Keime/ 50 g Nasssubstanz

1) Die höchstzulässigen Schwermetallgehalte dürfen die Vorsorgewerte gemäß Nummer 4.1 des Anhangs 2 der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV), in der jeweils geltenden Fassung, nicht übersteigen. Die Gehalte gelten in Abhängigkeit von der Bodenart und sind für Sand am niedrigsten, für Lehm/Schluff mittel und für Ton am höchsten.

2) Die Grenzwerte für Arsen, Blei, Cadmium, Chrom, Kupfer, Nickel, Quecksilber, Thallium, Zink und Perfluorierte Verbindungen gelten bis einschließlich 31. Dezember [2014]. Ab 01. Januar [2015] gelten die in Anlage 2 Tabelle 1 Nummer 1.4 der Düngemittelverordnung (DüMV) genannten Grenzwerte.

Fruchtbarkeit zu erhalten oder zu verbessern und Gefahren für Mensch und Tier durch Düngemittel und andere Substrate im Sinne dieses Gesetzes vorzubeugen oder sie abzuwenden. Zu diesem Zweck ist nach § 11 des Gesetzes ein Klärschlamm-Entschädigungsfonds einzurichten. Dieser soll Schäden an Menschen

und Sachen ersetzen, die sich aus den Folgen der ordnungsgemäßen landwirtschaftlichen Verwertung von Klärschlamm ergeben. Die Beiträge zu diesem Fonds sind durch die Hersteller oder Besitzer von Klärschlämmen zu entrichten, sofern diese die landwirtschaftliche Verwertung als Entsorgungsoption nutzen. 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 [vgl. § 3 Absatz 2 DÜNGG].

### **Düngeverordnung (DüV)**

Die Düngeverordnung konkretisiert die Anforderungen an die gute fachliche Praxis bei der Anwendung von Düngemitteln und das Vermindern von stofflichen Risiken durch deren Anwendung auf landwirtschaftlich genutzten Flächen.

Die Düngung hat zeitlich und mengenmäßig so zu erfolgen, dass eine bedarfsgerechte Ernährung der Pflanzen bei möglichst geringen Nährstoffverlusten gewährleistet werden kann.

Vor der Aufbringung von wesentlichen Nährstoffmengen an Stickstoff oder Phosphat mit Düngemitteln und anderen Substraten im Sinne dieses Gesetzes ist der Düngebedarf der Kultur zu ermitteln.

Berücksichtigt werden müssen dabei der Nährstoffbedarf des Pflanzenbestandes, die im Boden vorliegenden und während des Wachstums pflanzenverfügbar werdenden Nährstoffmengen, der Kalkgehalt oder die Bodenreaktion (pH-Wert) sowie der Humusgehalt des Bodens und die Anbaubedingungen, welche die Nährstoffbedingungen beeinflussen können (wie Kulturart, Vorfrucht, Bodenbearbeitung und Bewässerung). Im Zeitraum

vom 1. November bis zum 31. Januar ist es generell verboten, Düngemittel mit signifikanten Stickstoffgehalt und damit auch Klärschlämme auf Ackerflächen auszubringen. [DÜV]

### **Düngemittelverordnung (DüMV)**

Diese Verordnung 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 NP-Dünger oder NPK-Dünger zugelassen (Stickstoff (N), P-Phosphor (P) und Kalium (K)).

Nach § 10 (3) der aktuellen Fassung der DüMV dürfen Klärschlämme, die einen Grenzwert nach Anlage 2 Tabelle 1.4 der DüMV überschreiten, jedoch einen nach der Klärschlammverordnung für denselben Schadstoff geltenden Grenzwert einhalten, noch bis zum 31. Dezember 2014 gewerbsmäßig in den Verkehr gebracht werden. Danach dürfen Klärschlämme ausschließlich bei Einhaltung der Schadstoffanforderungen der Düngemittelverordnung in Verkehr gebracht werden. Die Klärschlammabgabe darf nur zur direkten Verwertung in unvermishtem Zustand geschehen [VGL. ANLAGE 2 TABELLE 7 ZEILE 7.4.3 DÜMV].

### **17. Bundes-Immissionsschutzverordnung (17. BImSchV)**

Diese Verordnung gilt für die Errichtung, die

Beschaffenheit und den Betrieb von Verbrennungs- oder Mitverbrennungsanlagen, in denen Abfälle eingesetzt werden, und soweit sie nach § 4 des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (BImSchG) genehmigungsbedürftig sind [VGL. § 17.BIMSCHV]. Die Verordnung gilt demnach auch für Anlagen, die Klärschlamm (mit-)verbrennen.

Zur Limitierung von Emissionen werden Grenzwerte für Gesamtstaub, Schwefeloxide, Stickoxide, Quecksilber, Kohlenmonoxid und Schwermetalle festgelegt.

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

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

Wesentliche Bedingung der Verordnung ist die Vorgabe, eine Nachverbrennungstemperatur der Verbrennungsluft von 850°C für zwei Sekunden einzuhalten, sowie die Verpflichtung des Betreibers, die Emissionswerte (kontinuierlich) zu überwachen und an die zuständige Behörde zu übermitteln [17.BIMSCHV].

# ANHANG III

17

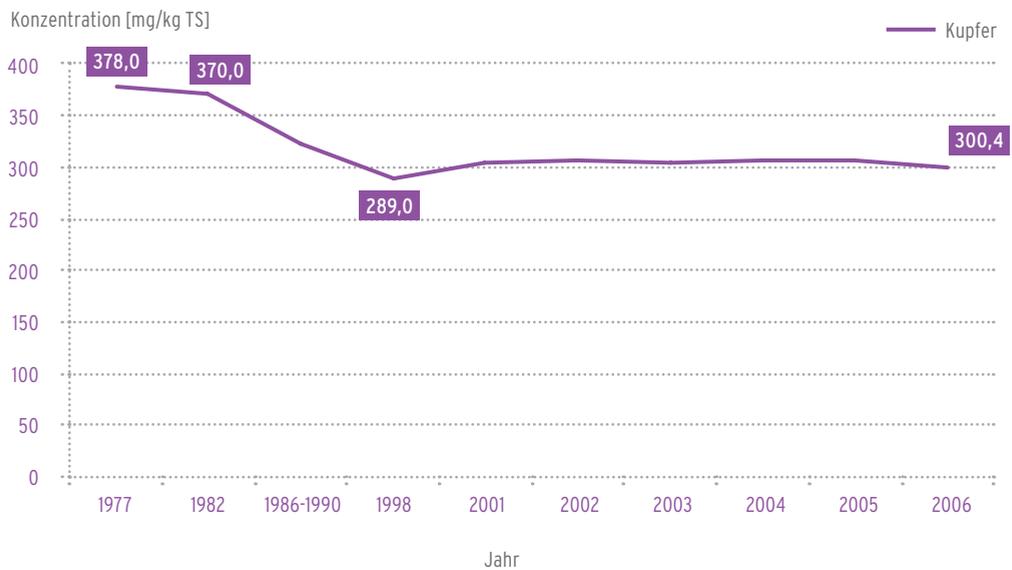
## Schwermetalle im Klärschlamm

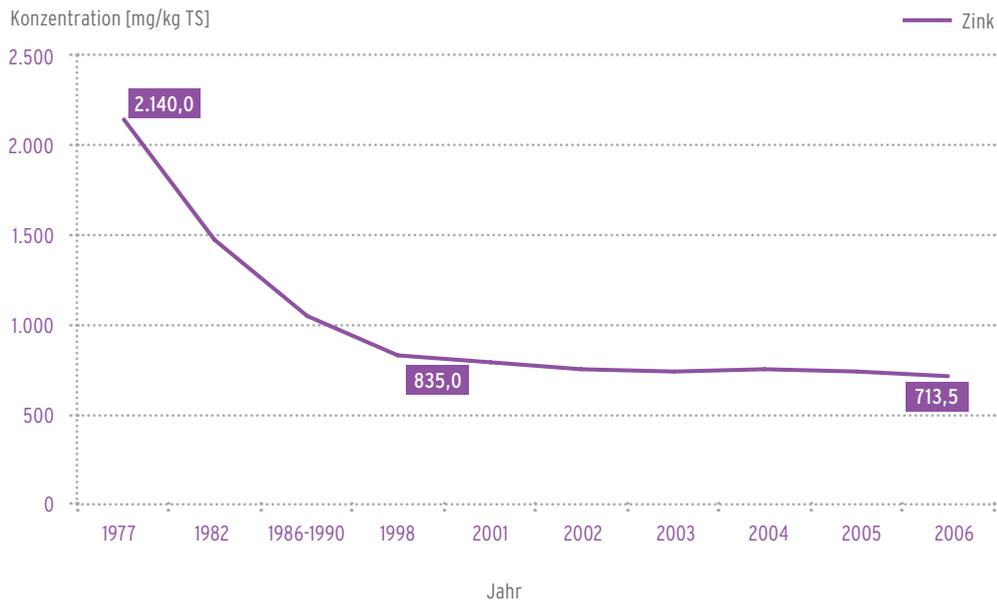
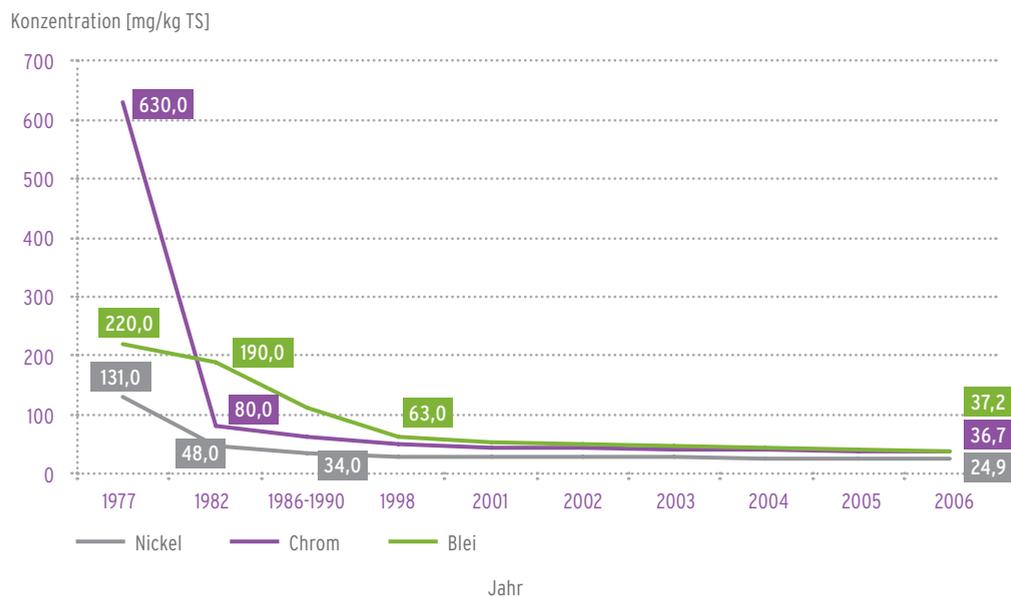
Bild 12 zeigt den Verlauf der Konzentration von Kupfer im Klärschlamm.

Bild 13 zeigt den Verlauf der Konzentration von Zink im Klärschlamm.

Bild 14 zeigt den Verlauf der Konzentration von Nickel, Chrom und Blei im Klärschlamm.

**BILD 12: KONZENTRATION VON KUPFER IM KLÄRSCHLAMM [BMU]**



**BILD 13: KONZENTRATION VON ZINK IM KLÄRSCHLAMM [BMU]****BILD 14: KONZENTRATION VON NICKEL, CHROM UND BLEI IM KLÄRSCHLAMM [BMU]**

# ANHANG IV

18

TABELLE 27: TECHNISCHE DATEN DER KLÄRSCHLAMMTROCKNUNGSANLAGEN IN DEUTSCHLAND

#	Standort	Bundesland	Trocknungssystem	Hersteller
1	Albstadt	BW	Solare Trocknung mit Abwärmenutzung	IST
2	Alfeld/Wettensen	NI	Trommeltrockner	Ammann
3	Allershausen	BY	Solare Trocknung	IST
4	Altenstadt	BY	Schneckenrockner	k. A.
5	Asse	NI	Solare Trocknung mit Abwärmenutzung	Thermo-System
6	Backnang	BW	Bandrockner	Huber
7	Bad Säckingen	BW	Trommeltrockner	Andritz
8	Balingen	BW	Bandrockner	Huber
9	Bernstadt	BW	Solare Trocknung	Thermo-System
10	Bitterfeld-Wolfen	ST	Scheibentrockner	Wulff Atlasstord
11	Blaufelden	BW	Solartrockner	RATUS
12	Bodnegg	BW	Solare Trocknung	Thermo-System
13	Bräunlingen	BW	Trommeltrockner	Swiss-Compi
14	Bredstedt	SH	Solare Trocknung	Thermo-System
15	Bruchmühlbach-Miesau	RP	Kaltlufttrockner	Klein
16	Bruckmühl	BY	Kaltlufttrockner	Klein
17	Burgebrach	BY	Solare Trocknung	Thermo-System
18	Burgrieden	BW	Solare Trocknung	IST
19	Duisburg	NW	Centridry	KHD
20	Düren	NW	Scheibentrockner	Atlasstord
21	Düsseldorf Nord	NW	Trommeltrockner	Andritz
22	Düsseldorf Süd	NW	Scheibentrockner	Wehrle
23	Edemissen	NI	Solare Trocknung	Thermo-System
24	Eggenstein-Leopoldshafen	BW	Bandfilter	RATUS

Durchsatz [tTS/a]	Trockenrückstand [% TR] nach Trocknung	Substratnutzung
1.000	40-70	k. A.
z. Z. außer Betrieb (vorher 2.000)	95	Kompostierung/Rekultivierung
200	60-70	k. A.
30.000	90	Verbrennung
88	70	k. A.
4.640	92-95	Mitverbrennung im Kraftwerk Heilbronn
z. Z. außer Betrieb (vorher 3.800-4.000)	92	Verbrennung
2.000	85	Thermische Verwertung (eigene)
220	70-90	Thermische Verwertung (Mitverbrennung)
15.167	45-50	Verbrennung (eigene Wirbelschicht)
200	50	Landwirtschaft
90	90	Thermische Verwertung (Mitverbrennung)
5.000 - 6.000	92	Mitverbrennung im Kraftwerk Heilbronn
108	70	landwirtschaftliche Verwertung
600	88	Rekultivierung, Landschaftsbau
266	76	Rekultivierung
190	70	k. A.
100-300	50-90	Kompostierung, Rekultivierung
z. Zt. keine Nutzung	68-70	Verbrennung
11.000	40 (Teiltrocknung)	Verbrennung (eigene Wirbelschicht)
5.000	92	Thermische Verwertung
7.000	94	Thermische Verwertung
288	75	k. A.
600	75	Rekultivierung, Verbrennung

#	Standort	Bundesland	Trocknungssystem	Hersteller
25	Ellwangen	BW	Solare Trocknung	Thermo-System
26	Elsfeld	BY	Kaltlufttrockner	Klein
27	Empfingen	BW	Solare Trocknung	k. A.
28	Enkenbach-Alsenborn	RP	Kaltlufttrockner	Klein
29	Erkelenz	NW	Dünnschichttrockner	Buss
30	Frankenhardt	BW	Solare Trocknung	Thermo-System
31	Freiburg-Forchheim	BW	Scheibentrockner	Stord
32	Füssen	BY	Solare Trocknung	Thermo-System
33	Göppingen	BW	Wirbelschichttrockner	VA WABAG
34	Griesheim	HE	Trommeltrockner	SMAG
35	Groß-Gerau	HE	Dünnschicht	Lineartrockner
36	Grüneck	BY	Zentrifuge, in Zukunft solare KS Trocknung	k. A.
37	Grünstadt	RP	Solare Trocknung	Thermo-System
38	Günzburg	BY	Zentrifuge, Solartrockner	Thermo-System
39	Hagen a. TW	NI	Solare Trocknung	IST
40	Hamburg	HH	Scheibentrockner	Stord
41	Handewitt	SH	Solare Trocknung	Thermo-System
42	Hattingen	NW	Trommeltrockner	Swiss Combi
43	Hayingen	BW	Solare Trocknung mit Abwärmenutzung	Huber
44	Herdwangen	BW	Solare Trocknung	Thermo-System
45	Herzebrock-Clarholz	NW	Siebbandtrockner	Dornier
46	Hetlingen	SH	Trommeltrockner	SCT
47	Hiddenhausen	NW	Zentrifuge	k. A.
48	Hochdorf Assenheim	RP	Solare Trocknung mit Abwärmenutzung	Roediger Bioenergie
49	Höhr-Grenzhausen	RP	Kaltlufttrockner	Klein
50	Holzminden	NI	Dünnschicht, Trommeltrockner	Buss

Durchsatz [tTS/a]	Trockenrückstand [% TR] nach Trocknung	Substratnutzung
700	70	Thermische Verwertung (Mitverbrennung)
5.300	80-90	Verbrennung
k. A.	k. A.	k. A.
220	85	Landwirtschaft, Landschaftsbau, Kompostierung
z. Zt. keine Nutzung	90	Nassschlamm in die Landwirtschaft oder alternativ Entwässerung mittels Dekanter und anschließender Verwertung in Kompostieranlage
143	75	Thermische Verwertung (Mitverbrennung)
8.000	92	Thermische Verwertung, Deponie
625	70	Thermische Verwertung (Monoverbrennung.)
2.500	93	Verbrennung im Kraftwerk
Einsatz nur in Spitzenzeiten	95	Kompostierung (Nassschlamm)
600	80-90	Landwirtschaft
20 m³/h bei 8 Stunden Betrieb	27 (in Zukunft 70-80%)	Mitverbrennung mit Steinkohle in Kraftwerk
363	50-70	k. A.
1.400	50-60	Landwirtschaft, Kompostierung, thermische Entsorgung
180	70	k. A.
45.000	42	Verbrennung (eigene)
220	75	Landwirtschaftliche Verwertung
5.000	93	Thermische Verwertung
88	80-90	Landwirtschaft
69	90	Thermische Verwertung (Mitverbrennung)
kein Betrieb (vorher 900)	85-90	Verbrennung (Kraftwerk oder MVA)
6.600	90	stoffliche oder thermische Verwertung
k. A.	23%	Verbrennung in verschiedenen Kraftwerken
1.250	90	Zementwerk
z. Zt. keine Nutzung	80	Rekultivierung (Nassschlamm)
kein Betrieb (vorher 1.500)	90	Rekultivierung/Verbrennung Kraftwerk Buschhaus

#	Standort	Bundesland	Trocknungssystem	Hersteller
51	Huglfing	BY	Solare Trocknung	IST
52	Iffezheim	BW	Solartrockner	IST
53	Ingolstadt	BY	Bandrockner mit Abwärme aus der MVA	Huber
54	Jerxheim	NI	Solare Trocknung mit Abwärmenutzung	Thermo-System
55	Juist	NI	Solare Trocknung	Thermo-System
56	Kamp-Lintford	NW	Dampfwirbelschichttrocknung	
57	Kandern-Hammerstein	BW	Solartrockner	IST
58	Karlsfeld	BY	Solare Trocknung	IST
59	Karlsruhe	BW	Scheibentrockner	Stord
60	Karlstadt	BY	Bandrockner	k. A.
61	Kassel	HE	Trommelrockner	Bird Humboldt
62	Kempten	BY	Bandrockner	k. A.
63	Krefeld	NW	Scheibentrockner	Wehrle
64	Kreßberg	BW	Solare Trocknung	Thermo-System
65	Lahr	BW	Wirbelschichttrockner	Sulzer
66	Lambsheim	RP	Solare Trocknung	Thermo-System
67	Landstuhl	RP	Kaltlufttrockner	Klein
68	Lauterstein-Albhof	BW	Solare Trocknung mit Abwärmenutzung	Roediger Bioenergie
69	Leintal-Göggingen	BW	Solare Trocknung	Thermo-System
70	Lepoldshafen	BW	Solare Trocknung	k. A.
71	Leutershausen-Sachsen	BY	Solare Trocknung mit Abwärmenutzung	Roediger Bioenergie
72	Leutkirch	BW	Wirbelschichttrockner	Vtech
73	Lichtenfels	BY	Bandrockner	Innoplana
74	Main-Mud	BY	Solare Trocknung mit Abwärmenutzung	IST
75	Mainz-Mombach	BW	Bandrockner	Sevar
76	Mannheim	BW	Trommelrockner	Bird Humboldt
77	Markt Au	BY	Solartrockner	Thermo-System
78	Markt Essenbach	BY	Solare Trocknung	Thermo-System
79	Marktbergel	BY	Solare Trocknung mit Abwärmenutzung	Huber

Durchsatz [tTS/a]	Trockenrückstand [% TR] nach Trocknung	Substratnutzung
120	60-70	k. A.
100-120	70-85	Landwirtschaft, Rekultivierung
3.500 mit 85% TR	85	k. A.
200	80	k. A.
120	55	k. A.
12.000	95	Mitverbrennung in MVA (eigene)
80-100	70-90	Verbrennung im Braunkohlekraftwerk Helmstedt
400	60-70	k. A.
10.000	40	Verbrennung (eigene)
5.100 t/a	k. A.	Thermische Verwertung im Zementwerk
5.500	98	Rekultivierung, Tendenz zur thermischen Verwertung
14.000	87	k. A.
13.720	92	Verbrennung in MVA
90	75	Thermische Verwertung (Mitverbrennung)
kein Betrieb	85	z. Zt. Deponie
230	70	Land. Verwertung
z. Zt. keine Nutzung	80-90	Landwirtschaft
1.000	90	Zementwerk
182	75	k. A.
k. A.	k. A.	k. A.
2.000	90	Zementwerk
1.500	96	Rekultivierung, Deponie still gelegt
1.000	93	Landwirtschaft/Verbrennung
1.000	60-70	k. A.
5.200	77	Mitverbrennung im Kraftwerk
10.000	95	z. Zt. noch Deponie
130	70-80	1/4 Landwirtschaft, 3/4 Rekultivierung
216	70	k. A.
	80-90	k. A.

#	Standort	Bundesland	Trocknungssystem	Hersteller
80	Memmingen	BY	Wirbelschichttrockner	VA WABAG
81	Miltenberg	BY	Solare Trocknung	k. A.
82	Mintaching	BY	Bandtrockner	HUBER SE
83	Mönchengladbach	NW	Trommeltrockner	Swiss-Combi
84	München-Nord	BY	Scheibentrockner	Wulff
85	Murnau	BY	Solare Trocknung mit Abwärmenutzung	IST
86	Neckarsulm	BW	Solare Trocknung mit Abwärmenutzung	Roediger Bioenergie
87	Neufahrn	BY	Solare Trocknung	IST
88	Neu-Ulm	BY	Dünnschichttrockner	
89	Niederkrüchten	NW	Dünnschichttrockner	Buss
90	Nordstemmen	NI	Solare Trocknung mit Abwärmenutzung	Thermo-System
91	Nürnberg	BY	Scheibentrockner	Buss
92	Oyten	NI	Trommeltrockner	Andritz
93	Oldenburg	NI	Solare Trocknung mit Abwärmenutzung	Thermo-System
94	Pocking	BY	Solare Trocknung	Thermo-System
95	Quierschied	SL	Scheibentrockner	Wehrle
96	Rastatt	BW	Wirbelschichttrockner	CT Umwelttechnik
97	Raubling	BY	Solare Trocknung	Thermo-System
98	Renningen	BW	Solare Trocknung	Thermo-System
99	Renquishausen	BW	Solare Trocknung	Thermo-System
100	Riepe	NI	Solare Trocknung mit Abwärmenutzung	Thermo-System
101	Rödental	BY	Solare Trocknung	Thermo-System
102	Röthenbach	BY	Solare Trocknung	IST
103	Rudersberg	BW	Solare Trocknung mit Abwärmenutzung	Huber
104	Salzkotten	NW	Bandtrockner	Stela-Laxhuber
105	Scheßlitz	BY	Solare Trocknung	Thermo-System
106	Schlitz-Hutzdorf	HE	Solare Trocknung	Thermo-System
107	Schlüsselfeld	BY	Solare Trocknung	Thermo-System
108	Schönaich	BW	Solare Trocknung	Thermo-System

Durchsatz [tTS/a]	Trockenrückstand [% TR] nach Trocknung	Substratnutzung
2.500-3.500	90	derzeit Rekultivierung, zukünftig Verbrennung
4.000 t/a	75	
2.000	90	Mitverbrennung im Kraftwerk
kein Betrieb (vorher 8.000-12.000)	90-95	Verbrennung (Mischung mit Nassschlamm)
15.000	50 (Teiltrocknung)	Mitverbrennung in der MVA
476	60-70	k. A.
2.000	90	Zementwerk
280	60-70	k. A.
10.000	40	Verbrennung in eigener Anlage
382	68	Aufbereitung + Verwertung durch RWE (Herten)
376	70	k. A.
kein Betrieb (vorher 12.000)	90	Mitverbrennung im Steinkohlekraftwerk + Zementwerk, Rekultivierung
750	92	Mitverbrennung im Kraftwerk, geringer Teil Deponie
10.000	65	Thermische Verwertung
360	70	k. A.
30.000	95	Verbrennung
3.500	90	Verbrennung Kraftwerk Heilbronn still gelegt
250	60	k. A.
288	70	Thermische Verwertung (Mitverbrennung)
21	90	k. A.
600	80	Land. Verwertung
400	75	k. A.
400	40-70	k. A.
250	80-90	k. A.
kein Betrieb (vorher 500)	80	Verbrennung
110	75	k. A.
280	70	k. A.
300	75	k. A.
1.000	70	Thermische Verwertung (Mitverbrennung)

#	Standort	Bundesland	Trocknungssystem	Hersteller
109	Schönerlinde	BE/BB	Trommeltrockner	Bird Humboldt
110	Schongau	BY	Solare Trocknung	Thermo-System
111	Schwarzenbruck	BY	Trommeltrockner	Rödiger (Mozer)
112	Sigmaringen	BW	Solare Trocknung	IST
113	Sinzig	RP	Scheibentrockner	KHD
114	St. Peter-Ording	SH	Solare Trocknung	Thermo-System
115	Starnberg	BY	Bandrockner	Sevar
116	Steinbrück	NI	Solare Trocknung mit Abwärmenutzung	Thermo-System
117	Steinen	BW	Scheibentrockner	Stord
118	Stockach	BW	Solare Trocknung	Thermo-System
119	Stuttgart-Mühlhausen	BW	Scheibentrockner	Wulff/Atlas Stord
120	Sulz/Vöhringen	BW	Solare Trocknung mit Abwärmenutzung	Roediger Bioenergie
121	Tübingen	BW	Trommeltrockner	Andritz
122	Ühlingen-Birkendorf	BW	Solare Trocknung	k. A.
123	Unterpleichfeld	BY	Solare Trocknung mit Abwärmenutzung (nötige Energie aus Biogasanlage)	Roediger Bioenergie
124	Unterschneidheim	BW	Solare Trocknung	Thermo-System
125	Vlotho	NW	Trommeltrockner	Andritz
126	Waibstadt	BW	Solare Trocknung	Thermo-System
127	Waldenburg	BW	Solare Trocknung	Thermo-System
128	Waldenburg	RP	Solartrockner, Bandfilter	Thermo-System
129	Wallmerod	RP	Kaltlufttrockner	Klein
130	Wangen	BY	Bandrockner	Klein
131	Wassmannsdorf	BE/BB	Zentrifuge	k. A.
132	Weddel-Lehre	NI	Solare Trocknung	Thermo-System
133	Wegscheid	BY	Solare Trocknung	Thermo-System
134	Weil am Rhein	BW	Solare Trocknung mit Abwärmenutzung	IST
135	Weißenhorn	BY	Kaltlufttrockner	Klein
136	Wilhelmsdorf	BW	Solare Trocknung	Thermo-System
137	Winterhausen	BY	Solare Trocknung	Thermo-System

Durchsatz [tTS/a]	Trockenrückstand [% TR] nach Trocknung	Substratnutzung
8.000	95	Verbrennung
496	40	Thermische Verwertung (Monoverbrennung)
kein Betrieb (vorher 650)	90	Kompostierung oder thermische Verwertung
450	40-70	Thermische Verwertung (Mitverbrennung)
350	95	z. Zt. Deponie
160	75	Landwirtschaft
z. Zt. keine Nutzung	95-98	z. Zt. Verwertung als Deponieabdeckung (auf ca. 30 % TR entwässert)
240	75	k. A.
800	90	Mitverbrennung im Kohlekraftwerk
750	70	Thermische Verwertung (Mitverbrennung)
20.000 - 25.000	48	Verbrennung
470	90	Zementwerk
2.000	93	Verbrennung
k. A.	k. A.	k. A.
700	90	thermische Verwertung in Zementwerk
128	80	Thermische Verwertung (Mitverbrennung)
400	70	Verbrennung
275	70	Thermische Verwertung (Mitverbrennung)
150	75	k. A.
100-130	75	Mitverbrennung im Braunkohle-Kraftwerk
z. Zt. keine Nutzung	85	Landwirtschaft
1.500 t TS/a	90	Thermische Verwertung
25.500 t/a	26,5	k. A.
180	55	k. A.
50	75	k. A.
1.440	60-80	Thermische Verwertung (Mitverbrennung)
200	80	Rekultivierung
264	75	Thermische Verwertung (Mitverbrennung)
1.100	60	k. A.

#	Standort	Bundesland	Trocknungssystem	Hersteller
138	Wittlich-Platten	RP	Solare Trocknung mit Abwärmenutzung	Roediger Bioenergie
139	Wolfratshausen	BY	Scheibentrockner	Stord
140	Wuppertal	NW	Dünnschichttrockner	Buss
141	Wyk auf Föhr	SH	Solare Trocknung	Thermo-System

	Durchsatz [tTS/a]	Trockenrückstand [% TR] nach Trocknung	Substratnutzung
	außer Betrieb (vorher 1.600)	90	Zementwerk
	1.050	90	Rekultivierung
	30.000	45	Verbrennung
	230	75	k. A.

