

Texte

05
09

ISSN
1862-4804

Anforderungen an die Novellierung
der Klärschlammverordnung
unter besonderer Berücksichtigung
von Hygieneparametern

Umwelt
Bundes
Amt



Für Mensch und Umwelt

UMWELTFORSCHUNGSPLAN DES
BUNDESMINISTERIUMS FÜR UMWELT,
NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT

Forschungsbericht 206 33 202
UBA-FB 001245



Anforderungen an die Novellierung der Klärschlammverordnung unter besonderer Berücksichtigung von Hygieneparametern

von

Susanne Klages

Dr. Ute Schultheiß

Tanja Frei

Carolin Becker

Helmut Döhler

KTBL Darmstadt

Ursula Schneider

Bernd Haberkern

iat Stuttgart und Darmstadt

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Die in der Studie geäußerten Ansichten
und Meinungen müssen nicht mit denen des
Herausgebers übereinstimmen.

Herausgeber: Umweltbundesamt
Postfach 14 06
06813 Dessau-Roßlau
Tel.: 0340/2103-0
Telefax: 0340/2103 2285
Internet: <http://www.umweltbundesamt.de>

Redaktion: Fachgebiet II 2.6
Dr. Ines Vogel

Dessau-Roßlau, März 2009

Berichts-Kennblatt

1. Berichtsnummer UBA-FB 001245	2.	3.
4. Titel des Berichts „Anforderungen an die Novellierung der Klärschlammverordnung unter besonderer Berücksichtigung von Hygieneparametern“		
5. Autor(en), Name(n), Vorname(n) Klages, Susanne; Schultheiß, Ute; Frei, Tanja; Becker, Carolin und Döhler, Helmut (KTBL, Darmstadt) Schneider, Ursula und Haberkern, Bernd (iat Stuttgart und Darmstadt)		8. Abschlussdatum 20.06.2008
6. Durchführende Institution (Name, Anschrift) Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft; Bartningstr. 49, 64289 Darmstadt		9. Veröffentlichungsdatum März 2009
7. Fördernde Institutionen (Name, Anschrift) Umweltbundesamt, Wörlitzer Platz 1, 06844 Dessau		10. UFOPLAN-Nr. FKZ: 206 33 202
		11. Seitenzahl 99
		12. Literaturangaben 113
		13. Tabellen und Diagramme 48
14. Abbildungen und Karten 10		15. Zusätzliche Angaben
		16. Kurzfassung Klärschlamm, der keiner hygienisierenden Behandlung unterworfen wurde, kann eine Vielzahl seuchen- und phytohygienisch relevanter Krankheitserreger enthalten. Dennoch beinhaltet die aktuelle AbfKlärV (1992) keine Hygienevorgaben für Klärschlamm. Das vorliegende Gutachten dokumentiert einerseits den aktuellen Wissensstand zum Hygienestatus von Klärschlamm und beschreibt und bewertet andererseits die gegenwärtigen Rahmenbedingungen für die Einführung strengerer Hygienevorschriften bei der bevorstehenden Novellierung der AbfKlärV. Von den ca. 10.000 in der Bundesrepublik Deutschland betriebenen Kläranlagen sind mehr als 1/3 sehr klein (GK 1; ca. 1.000 angeschlossene Einwohner), 1/3 besitzt eine Ausbaugröße von ca. 10.000 Einwohnern (GK 2-3). Bei diesen Größenklassen herrscht die simultane aerobe Stabilisierung vor, der anfallende Klärschlamm wird überwiegend – i. d. R. als Nassschlamm – landwirtschaftlich verwertet. Bei den restlichen ca. 20 % der Kläranlagen dominiert die nachgeschaltete anaerobe Stabilisierung im Faulturm (einstufig, mesophil, alkalisch). Klärschlamm dieser Anlagengröße wird i. d. R. weiter aufbereitet, teilweise landwirtschaftlich verwertet und teilweise verbrannt.

Die dem heutigen Stand der Technik entsprechenden Verfahren der Klärschlammhygienisierung sind aus verfahrenstechnischen Gründen für die verschiedenen Abwasserbehandlungsverfahren unterschiedlich geeignet. Für sehr kleine Kläranlagen (1.000 EW) stehen keine, für Kläranlagen mit einer Ausbaugröße von ca. 10.000 EW existieren nur wenige geeignete Hygienisierungsverfahren, die ein hohes Hygienisierungsniveau erzielen, zur Verfügung. Eine Berechnung von Investitions- und Betriebskosten der betrachteten Verfahren ergibt für sehr kleine Anlagen (1.000 EW) Hygienisierungskosten von 7 bis 59 €/EW und Jahr, für die 10.000 EW-Anlagen ist von Kosten zwischen 2 und 13 €/EW und Jahr auszugehen. Niedrige Kosten lassen sich für die o. g. Kläranlagen-Größenklassen insbesondere durch überbetriebliche Lösungen erreichen, z. B. gemeinsame Klärschlammbehandlung auf größeren Anlagen, Einsatz von Lohnunternehmen (mobile Klärschlammmentwässerung) oder Nutzung von auf den Anlagen bereits vorhandener Aggregate (Speichervolumen).

Sofern eine landwirtschaftliche Klärschlammverwertung weiterhin ermöglicht werden soll, wird vorgeschlagen, aufgrund der geringen Auswahl geeigneter Hygienisierungsverfahren für Kläranlagen bis ca. 10.000 EW Ausbaugröße die direkte Einbringung oder Einarbeitung von nicht hygienisiertem Klärschlamm parallel zur Anwendung von hygienisiertem Schlamm zuzulassen. Dies sollte – in Abstimmung mit der geplanten europäischen und nationalen Rechtsetzung – an Aufbringungs- oder Anbaubeschränkungen gekoppelt werden.

Zur Überwachung der Wirksamkeit der Hygienisierungsverfahren bietet sich eine Kombination aus einer Umsetzung des HACCP (Hazards analysis critical control point)-Konzeptes mit online-Überwachung von Prozesskennwerten und der Produktüberwachung (CEN TC 308 2007, Verordnung (EU) Nr. 1774/2002) an. Als Indikatororganismen für die Produktprüfung können dabei für die Seuchenhygiene *Salmonella ssp.*, *Escherichia coli* und *Enterococcaceae* (Verordnung (EU) Nr. 1774/2002) eingesetzt werden. Für den Bereich Phytohygiene kann, vorbehaltlich neuerer wissenschaftlicher Erkenntnisse, der unspezifische Parameter „keimfähige Samen und austriebsfähige Pflanzenteile“ übernommen werden (BioAbV 1998). Zur Validierung neuer Verfahren/Baumuster ist eine Prozessprüfung (Keimträgermethode) mit für das jeweilige Hygienisierungsniveau geeigneten Indikatororganismen möglich. Als seuchenhygienisch aussagekräftige Prüforganismen können *Salmonella senftenberg*, *Enterococcus faecalis* (niedriges und mittleres Hygienieniveau), Bovine parvovirus und Coliphage T1 (hohes Hygienieniveau), eingesetzt werden (Entwurf CEN TC 308/2007; Keimträgermethode). Als Prüforganismen für den Bereich Phytohygiene können – wie für Bioabfälle beabsichtigt (E-BioAbV 2007) – Kohlhernie-Erreger und Tomatensamen Verwendung finden.

Weiterer Forschungsbedarf besteht in den folgenden Bereichen:

- Neue Methoden der Klärschlammhygienisierung, insbesondere für kleinere Kläranlagen (GK 1, 2).
- Überbetriebliche Klärschlammbehandlung: Rahmenbedingungen, Umweltwirkungen, Kosten
- Hygienisierende Wirkung neuer Abwasser- und Klärschlammbehandlungsverfahren
- Praktikabilität des HACCP-Konzeptes für Kläranlagen
- Praktikabilität des Hygieneprüfsystems des E-BioAbV für Kläranlagen
- Methode zur Quantifizierung von Hygienierisiken
- Reduzierung des Seuchenrisikos durch flakkierende Maßnahmen
- Reduzierung des Seuchenrisikos durch Auflagen für Indirekteinleiter
- Aufnahme von seuchenhygienisch relevanten Organismen durch Nutzpflanzen
- Quantifizierung der Risiken einer Verbreitung von Phytopathogenen durch den Abwasser- und Klärschlammpfad

17. Schlagwörter

Klärschlamm, AbfKlärV, Hygienisierungsverfahren, landbauliche Verwertung, Seuchenhygiene, Phytohygiene

18. Preis

19.

20.

Report Cover Sheet

1. Report No. UBA-FB 001245	2.	3.
4. Title of Report „Requirements at the Amendment of German Sewage Sludge Ordinance with Special Regards to Hygiene Parameters”		
5. Author(s); surname(s), first name(s) Klages, Susanne; Schultheiß, Ute; Frei, Tanja; Becker, Carolin und Döhler, Helmut (KTBL, Darmstadt) Schneider, Ursula und Haberkern, Bernd (IVVA)	8. Completion Date 20.06.2008	
6. Performing Organisation (name, address) Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (KTBL), Bartningstr. 49, 64289 Darmstadt Ingenieurverbund Abwasser Abfall (IVAA) c/o iat Darmstadt, Havelstr.7a 64289 Darmstadt	9. Publication date March 2009	
	10. UFOPLAN No. FKZ: 206 33 202	
7. Funding Institution (name, address) Umweltbundesamt, Wörlitzer Platz 1, 06844 Dessau	11. Number of pages 99	
	12. References 113	
	13. Tables and diagrams 48	
	14. Figures and maps 10	
15. Additional Information		
16. Abstract Not sanitised sewage sludge can contain a large number of pathogens relevant for humans, animals or plants. However, German Sewage Sludge Ordinance (1992) does not contain any hygiene criteria for sludge. This survey report is, on one hand, documenting the present state-of-the-art of science and technology concerning the hygienic properties of sludge and the current framework requirements for an introduction of hygiene standards in the forthcoming amendment of the Sludge Ordinance on the other. More than 1/3rd of about 10.000 sewage treatment plants operated in the Federal Republic of Germany are very small (approx. 1.000 connected inhabitants), 1/3 have a size of approx. 10.000 inhabitants. For these size ranges of plants, the simultaneous aerobic sludge stabilization is dominant. In most of the cases the generated sludge – generally not further processed – is utilised in agriculture. For the remaining approx. 20 % of sewage treatment plants, anaerobic stabilisation in a digestion tower (single-stage, mesophile, alkaline) is prevailing. Sludge from these larger treatment plants is generally processed further, in part agriculturally recycled and in part combusted.		

Due to various reasons of process engineering, current methods of sludge sanitation according to present state-of-the-art of technology only to a limited degree are suitable for the different sewage treatment processes. For very small plants with approx. 1.000 connected inhabitants, there are no, for plants for approx. 10.000 inhabitants only a few suitable methods with a high sanitising level are available.

A calculation of investment- and operating costs for the monitored methods show for very small sewage treatment plants (approx. 1.000 inhabitants) sanitising costs of 7 to 59 €/inhabitant and year, for the 10.000 inhabitant-plants costs between 2 and 13 €/inhabitant and year. Low costs can be achieved for above-mentioned plants through cooperation, i.e. joint sludge sanitation on larger sewage treatment plants, integration of service contractors (taking up mobile sludge dewatering) or a reuse of existing plant and machinery on site (storage volume).

Provided that agricultural sludge-use is to be facilitated further on, injection or ploughing-in of not sanitised sludge of treatment plants up to 10.000 inhabitants shall be accepted parallel to the use of sanitised sludge. This should be linked – in accordance to projected european and national legislation – to additional requirements concerning spreading of sludge and cultivation of plants.

In order to control the efficiency of a sanitation-process, combining an implementation of the HACCP (Hazards analysis critical control point)-concept with an online-monitoring of process parameters and a system of product control (CEN TC 308 2007, Regulation (EU) Nr. 1774/2002) is recommended. For product control, the following pathogens can be used: *Salmonella ssp.*, *Escherichia coli* and *Enterococcaceae* (Regulation (EU) Nr. 1774/2002). Concerning phytohygienic control, subject to future scientific findings, the quite unspecific parameter „germinable seeds and vegetative propagules“ could be taken over from German Biowaste Ordinance (BioAbV 1998).

For the validation of new processes/prototypes a process-check (method with germ carriers) with indicator-organisms suitable for the sanitising-level to be aimed at is possible. The following pathogens have been tested to be suitable: *Salmonella senftenberg*, *Enterococcus faecalis* (low and medium sanitising level), Bovine parvovirus und Coliphage T1 (high sanitising level), (Draft amendment: CEN TC 308/2007). Concerning Phytohygiene – as aimed at for biowaste in the future Biowaste-Ordinance (Draft amendment: BioAbfV 2007) – *Plasmodiophora brassicae* and tomato seeds can be used as indicators.

Further research-need is required for the following topics:

- New sanitation methods for sewage sludge, especially methods suitable for small sewage treatment plants.
- Joint sludge sanitation: general conditions, impact on environment, costs
- Sanitising effect of new methods for wastewater- and sludge-treatment
- Feasibility of HACCP-concept for sewage treatment plants
- Feasibility of the hygiene-test-system of German Biowaste-Ordinance (Draft amendment: BioAbfV 2007) for sewage treatment plants
- Methods of risk assessment concerning hygienic property of sludge
- Reducing epidemic risks by the use of accompanying measures
- Reducing epidemic risks by means of provisions for indirect dischargers
- Uptake of hygienic relevant organisms by agronomic plants
- Quantifying risks of spreading plants pathogens by means of wastewater and sewage sludge pathways

17. Key words

Sewage sludge, Sewage Sludge Ordinance, sanitising methods, agricultural recycling, hygiene

18. Price

19.

20.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Krankheitserreger/Schadorganismen in Klärschlamm	1
2.1	Phytohygiene	1
2.1.1	Quarantäneschadorganismen	1
2.1.2	Viren	2
2.1.3	Bakterien	2
2.1.4	Pilze	3
2.1.5	Parasiten	3
2.1.6	Pflanzensamen	3
2.2	Seuchenhygiene	4
2.2.1	Epidemiologische Bedeutung von Krankheitserregern	4
2.2.2	Viren	5
2.2.3	Bakterien	6
2.2.4	Parasiten	8
2.2.5	Erreger in anderen organischen Düngemitteln	9
3	Hygienisierungsverfahren: Stand der Technik	12
3.1	Flüssigschlammbehandlung mit Kalkhydrat	12
3.2	Aerob-thermophile Stabilisierung (ATS)	13
3.3	Aerob-thermophile Stabilisierung (ATS) mit anschließender Faulung	14
3.4	Pasteurisierung	15
3.5	Langzeitlagerung	15
3.6	Klärschlammvererdung - Entwässerung in Schilfbeeten	15
3.7	Konditionierung mit Kalk oder Metallsalzen	16
3.8	Thermische Konditionierung	16
3.9	Behandlung von entwässerten Schlämmen mit Kalk	17
3.10	Anaerob-thermophile Stabilisierung	17
3.11	Kompostierung in Mieten	17
3.12	Kompostierung in Reaktoren	18
3.13	Trocknung	18
3.14	Klärschlammdeintegration	19
3.15	Desinfektionsmittel	20
3.16	Zusammenfassende Darstellung	20
4	Regelungen zur Hygienisierung von Klärschlamm	23
4.1	Empfehlungen, Normen, Gütesicherung	23
4.1.1	Empfehlungen	23
4.1.1.1	CEN	23
4.1.1.2	EFSA	25
4.1.2	Normung	25
4.1.3	Güte- bzw. Qualitätssicherungssysteme	25
4.2	Rechtliche Regelungen zur Hygiene von Klärschlamm	28
4.2.1	EU-Recht	28
4.2.2	Bundesrecht	29
5	Vergleichende Bewertung rechtlicher Vorgaben	30
5.1	Geltungsbereich	30
5.2	Anwendungsverbote und -beschränkungen	32
5.3	Hygienisierungsverfahren und Prüfmethode	33
5.4	Seuchenhygienische Prüforganismen für die Prozess- und Produktprüfung	36
5.5	Phytohygienische Prüforganismen für die Prozess- und Produktprüfung	38
5.6	Kontrollinstanzen und -instrumente	40
6	Schadensfälle	41
6.1	Nationaler Klärschlammfonds	41
6.1.1	Freiwilliger und gesetzlicher Klärschlammfonds	41
6.1.2	Gemeldete Schadensfälle	42
6.2	Internationales Rundschreiben zu Schadensfällen	42
7	Klärschlammmanfall und -qualitäten in Deutschland	42
7.1	Anzahl Kläranlagen, Abwasser-/Klärschlammbehandlungstechnik	43
7.1.1	Datenquellen	43
7.1.2	Datenauswertung	44

7.2	Einflussfaktoren auf Klärschlammmenge und -qualität	45
7.3	Interpretation des Datenrasters	49
8	Auswahlkriterien für die Hygienisierungsverfahren	51
9	Berechnungsgrundlagen und Kosten ausgewählter Hygienisierungsverfahren	55
9.1	Kalkhydratbehandlung von Flüssigschlamm	55
9.1.1	Konzepte der Kalkhydratzugabe	56
9.1.2	Ausstattung der Schlammspeicher	57
9.1.3	Investitionskostenberechnung	58
9.1.4	Betriebskostenberechnung	58
9.2	Pasteurisierung von Nassschlamm	59
9.2.1	Anlagenauslegung	61
9.2.2	Investitionskostenberechnung	61
9.2.3	Betriebskostenberechnung	62
9.3	Klärschlammvererdung von Nassschlamm	63
9.3.1	Anlagenauslegung	64
9.3.2	Investitionskostenberechnung	64
9.3.3	Betriebskostenberechnung	64
9.4	Langzeitlagerung von Nassschlamm in Schlammspeichern oder Trockenbeeten	64
9.4.1	Anlagenauslegung	64
9.4.2	Investitionskostenberechnung	66
9.4.3	Betriebskostenberechnung	66
9.5	Brantkalkzugabe nach der mechanischen Entwässerung	67
9.5.1	Anlagenauslegung	67
9.5.2	Investitionskostenberechnung	68
9.5.3	Betriebskostenberechnung	68
9.6	Kompostierung in Mieten	68
9.6.1	Anlagenauslegung	69
9.6.2	Investitionskostenberechnung	69
9.6.3	Betriebskostenberechnung	70
9.7	Langzeitlagerung von entwässertem Klärschlamm	71
9.7.1	Anlagenauslegung	71
9.7.2	Grundlagen für die Investitionskostenberechnung	71
9.7.3	Betriebskostenberechnung	71
9.8	Solare Trocknung	72
9.8.1	Anlagenauslegung	72
9.8.2	Investitionskostenberechnung	73
9.8.3	Betriebskostenberechnung	73
9.9	Thermische Trocknung	74
9.9.1	Investitionskostenberechnung	75
9.9.2	Betriebskostenberechnung	75
10	Kosten für Transport und Ausbringung	76
11	Diskussion	80
11.1	Hygienisierungsverfahren, die zu einem hohen Hygieneniveau führen	82
11.2	Hygienisierungsverfahren, die zu einem mittleren Hygieneniveau führen	83
11.3	Hygienisierungsverfahren, die zu einem niedrigen Hygieneniveau führen	83
11.4	Anlagengröße und Kostendegression	84
11.5	Ergänzende hygienisierende Maßnahmen	84
11.6	Prüfmethoden für die Hygienisierungsverfahren	85
11.6.1	Routinebetrieb	85
11.6.2	Neue Baumuster/Verfahren	85
12	Forschungsbedarf	86
13	Zusammenfassung	88
14	Literaturverzeichnis	90
15	Anhangtabellen	96

1 Einleitung

Die derzeitige Fassung der Klärschlammverordnung gilt seit dem 1. Juli 1992. Die Verordnung enthält keine Vorgaben zum Hygienestatus von Klärschlamm oder zu vorgeschriebenen Hygienisierungsmaßnahmen. Demgegenüber wurden in anderen Rechtsbereichen (z. B. Bioabfall-, Entwurf Düngemittelverordnung) die Anforderungen an die hygienische Beschaffenheit landbaulich verwertbarer Düngemittel und Bodenhilfsstoffe verschärft.

Das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit hat daher beschlossen, die Anforderungen an die hygienische Beschaffenheit von Klärschlamm einer Neubewertung zu unterziehen.

In dem vorliegenden Gutachten wird zunächst der Stand des Wissens zu den in Klärschlämmen detektierten Krankheitserregern für die Bereiche Seuchen- und Phytohygiene, insbesondere auch im Vergleich mit anderen Düngemitteln, zusammengestellt. Weiterhin erfolgt eine Darstellung der in Deutschland bzw. der Europäischen Union im gesetzlichen/vorgesetzlichen Bereich bereits geregelten Hygieneparameter mit den jeweils vorgegebenen Nachweisverfahren; dabei wird möglicher Regelungsbedarf aufgezeigt. Ein Schwerpunkt des Gutachtens liegt in der Darstellung und Bewertung ökonomischer Konsequenzen aus verschiedenen Handlungsoptionen zur Hygienisierung.

2 Krankheitserreger/Schadorganismen in Klärschlamm

Herkunft, Zusammensetzung, Lagerung und Transport sowie Behandlung und Verwendung von biogenen Rest- und Abfallstoffen bedingen die epidemiologischen Risiken. Krankheitserreger und Schadorganismen können sich in organischen Rest- und Abfallstoffen vermehren oder auch Absterbeprozessen unterliegen.

Nachfolgend sind sowohl für die Phyto- als auch die Seuchenhygiene Krankheitserreger und Schadorganismen, mit deren Vorkommen in Klärschlämmen zu rechnen ist, zusammengestellt.

2.1 Phytohygiene

Schadorganismen aus dem Bereich der Phytohygiene können sowohl über Abwasserinhaltsstoffe, z. B. durch die indirekt einleitende Lebensmittelindustrie, als auch über den Umweg der Darmpassage über das häusliche Abwasser in den Klärschlamm gelangen.

2.1.1 Quarantäneschadorganismen

Von besonderer Bedeutung sind Quarantäneschadorganismen sofern sie mit dem Klärschlamm Verbreitung finden, da sie i. d. R. nicht durch chemische Pflanzenschutzmaßnahmen eingedämmt werden können. Insgesamt sind mehr als 100 Quarantäneschadorganismen (QSO) im Anhang der EG-Ratsrichtlinie 2000/29/EG aufgeführt (Anforderungen an die Einfuhr und das Verbringen von Pflanzenmaterial). Ihre Einschleppung und Verbreitung in die Europäische Gemeinschaft ist verboten. Tabelle 1 zeigt beispielhaft Verbreitungspfade und Verseuchungsdauer der Anbaufläche. Befallsfreiheit kann nur durch lange Anbaupausen wieder erlangt werden.

Tab. 1: Beispiele für langfristige Bodenverseuchung durch Quarantäneschadorganismen (UNGER und PIETSCH 2002, verändert)

Erreger		Wirtspflanzen	Verbreitung durch	Verseuchungsdauer [a] Maßnahmen
Beet necrotic yellow vein virus <i>Polymyxa betae</i> (Vector)*	Rhizomania*	Zuckerrübe u. a.	Abwasser Boden (auch an Pflanzenmaterial) Gülle/Stallmist organische Reststoffe Saatgut	> 15 Jahre Befallsfreiheit
<i>Ralstonia solanacearum</i> Rasse 3	Schleimfäule der Kartoffel*	Kartoffel Tomate	Abwasser Organische Reststoffe Pflanzkartoffeln	unbekannt 4 Jahre Anbauverbot (VO)
<i>Synchytrium endobioticum</i>	Kartoffelkrebs*	Kartoffel	Abwasser Boden Organische Reststoffe Pflanzkartoffeln Stallmist	> 10 (-30) Jahre 10-20 Jahre Anbauverbot (EPPO)
<i>Globodera rostochiensis</i>	Kartoffelnematoden*	Kartoffel	Abwasser Boden Organische Reststoffe	20-30 Jahre Testung Anbauverbot

*Bekämpfungsrichtlinien der EU; ** EU-Schutzgebiete

2.1.2 Viren

Untersuchungen zu Pflanzenviren in Klärschlämmen liegen nur wenige vor.

Die Möglichkeit einer Pflanzenvirusüberdauerung nach der Passage durch den tierischen bzw. menschlichen Magen-Darmtrakt wurde durch KEGLER et al. (1984) und TOMLINSON et al. (1982), beide zitiert in LORENZ (2004) nachgewiesen.

UNGER und PIETSCH (2002) berichten, dass Rückstände und Schlämme aus der industriellen Nahrungsmittelverarbeitung u. a. den Erreger der Rhizomania-Krankheit in hohen Konzentrationen enthalten können: den Beet Necrotic Yellow Vein Virus, der in den widerstandsfähigen Dauersporen seines Vektors, den Plasmodiophoromyceten *Polymyxa betae* überdauern kann. DICKENS et al. (1995) stellen für *Polymyxa betae* fest, dass die üblicherweise durchgeführten Abwasserbehandlungen nicht zu einer vollständigen Inaktivierung des Erregers führen.

Der TMV (Tobacco Mosaik Virus) wurde im Rahmen der Prozessprüfung der BioAbfV (1998) eingeführt. IDELMANN et al. (1998) zeigen, dass dieser Virus i. d. R. durch Mikroorganismen-tätigkeit im Rotteprozess inaktiviert wird. LORENZ (2004) belegt die vollständige Inaktivierung des TMV bei Pasteurisierungsversuchen bei 1-stündiger Verweilzeit bei 85 °C.

2.1.3 Bakterien

Die Verbreitung bakterieller Pflanzenkrankheiten über den Abwasserpfad beschreibt STEINMÖLLER (2007). So wurden die Erreger der Schleimfäule der Kartoffel (*Ralstonia solanacearum*) über das häusliche Abwasser in die Themse eingetragen.

Die Wirkung der Anaerobbehandlung auf die bakterielle Ringfäule der Kartoffel (*Corynebacterium michiganense*) wurde von TURNER et al. (1983, zitiert in UNGER und PIETSCH 2002) im Labormaßstab untersucht. Demnach wurde nach 10 Tagen unter mesophilen Bedingungen eine vollständige Inaktivierung des Erregers erreicht.

2.1.4 Pilze

JEFREMENKO und JAKOVLEVA (1981) wiesen unter ungünstigen Verhältnissen (niedrige Temperatur, anaerobe Bedingungen) eine Überlebenszeit der Zoosporangien von *Synchytrium endobioticum*, dem Erreger des Kartoffelkrebses von 2 bis 3 Monaten nach. Der Erreger des Kartoffelkrebses keimt ohne Luft nicht aus und kann so lange überdauern (STACHEWICZ 2002).

2.1.5 Parasiten

SPAULL und MCCORMACK (1989), zitiert in UNGER und PIETSCH (2002), konnten während des gesamten Jahresverlaufs in Schlammproben aus neun Kläranlagen eine geringe Grundbelastung an Nematoden nachweisen.

Umfangreiche Untersuchungen liegen zur Überlebensfähigkeit von Kartoffel- (*Globodera* spp.) und Rübennematoden (*Heterodera schachtii*) bei der Abwasserreinigung und in Klärschlämmen vor (UNGER und PIETSCH 2002): Demnach können die Zysten durch mesophile anaerobe Behandlung und thermophile Verfahren zerstört werden. Nicht ausreichend erwiesen sich die aerobe Stabilisierung und auch eine Kalkbehandlung (pH 11,5). HEINICKE (1989) dokumentiert das Absterben der Zysten in einem Faulturm nach 2 bis 15 Tagen.

2.1.6 Pflanzensamen

Neben Phytopathogenen spielen Pflanzensamen als Kulturschädlinge pflanzlichen Ursprungs eine Rolle. Zur Überlebensfähigkeit von Pflanzensamen im Verlauf der Abwasser- und Schlammbehandlung wurden nur wenige Untersuchungen durchgeführt (Tab. 2).

Bereits CHYTIL (1986) weist darauf hin, dass eine Verschleppung von Ackerunkräutern durch Müllkomposte und Klärschlämme möglich ist und nur durch hygienisierende Maßnahmen unterbunden werden kann. Tomatensamen sind besonders hitzebeständig und widerstandsfähig gegenüber Rotteprozessen (PFEILSTETTER 1999). Die Abtötung ihrer Samen wird deshalb in der Bioabfallverordnung (1998) als Indikator für eine ordnungsgemäße Kompostierung genutzt. Tomatenpflanzen aus gekeimten, die Darmpassage überdauernden Samen können häufig auf nicht hygienisierten, zwischengelagerten Klärschlämmen angetroffen werden. So genannte Neophyten haben in den vergangenen Jahren vermehrt das öffentliche Interesse erlangt, primär, da sie die biologische Vielfalt bedrohen. An Bedeutung gewonnen haben insbesondere der Riesen-Bärenklau (*Heracleum mantegazzianum*) und das Beifußblättrige Traubenkraut (*Ambrosia artemisiifolia*); beide Pflanzen enthalten zudem Stoffe, die Verbrennungen oder Allergien beim Menschen verursachen können. Zu Neophyten existieren verschiedene Foren für Experten und Verbraucher ([WWW.NEOPHYTEN.DE](http://www.neophyten.de), [HTTP://WWW.FLORAWEB.DE/NEOFLORA/NATURSCHUTZ.HTML/](http://www.floraweb.de/neoflora/naturschutz.html); [WWW.BIOLOGISCHEVIELFALT.AT/HOT- TOPICS/NICHT-HEIMISCHE-ARTEN/NICHT-HEIMISCHE-PFLANZENARTEN-IN-OESTERREICH/](http://www.biologischevielfalt.at/hot-topics/nicht-heimische-arten/nicht-heimische-pflanzenarten-in-oesterreich/)). Hinsichtlich der Rolle der Klärschlämme bei der Verbreitung von Neophyten liegen jedoch keine Erkenntnisse vor (STARFINGER 2007).

Insgesamt ist der Wissensstand hinsichtlich Vorkommen und Bedeutung von Phytopathogenen im Klärschlamm gering. Tabelle 13 (Kap. 3) verdeutlicht, dass in Bezug auf die abtötende Wirkung von Erregern durch Klärschlammbehandlungs- bzw. Hygienisierungsverfahren noch Forschungsbedarf besteht.

Tab. 2: Lebensfähigkeit von Pflanzensamen bei verschiedenen Verfahren zur Klärschlammhygienisierung

Verfahren	Wirkung
mesophile anaerobe Schlammstabilisierung	keine vollständige Abtötung: <i>Amaranthus retroflexus</i> (Zurückgebogener Fuchsschwanz) <i>Chenopodium album</i> (Weißer Gänsefuß) <i>Cucurbita maxima</i> (Kürbis) <i>Echinochloa crus-galli</i> (Hühnerhirse) <i>Lycopersicon esculentum</i> (Tomate) <i>Polygonum lapathifolium</i> (Ampferknöterich) (Leist und Gießler 1998)
thermophile anaerobe Schlammstabilisierung, 5 Tage	vollständige Abtötung: <i>Amaranthus retroflexus</i> (Zurückgebogener Fuchsschwanz) <i>Chenopodium album</i> (Weißer Gänsefuß) <i>Echinochloa crus-galli</i> (Hühnerhirse) <i>Lycopersicon esculentum</i> (Tomate) <i>Polygonum lapathifolium</i> (Ampferknöterich) <i>Cucurbita maxima</i> (Kürbis) (LEIST und GIEßLER 1998)
Pasteurisierung	vollständige Abtötung: <i>Amaranthus retroflexus</i> (Zurückgebogener Fuchsschwanz) <i>Chenopodium album</i> (Weißer Gänsefuß) <i>Echinochloa crus-galli</i> (Hühnerhirse) <i>Lycopersicon esculentum</i> (Tomate) <i>Polygonum lapathifolium</i> (Ampferknöterich) keine vollständige Abtötung: <i>Cucurbita maxima</i> (Kürbis) (LEIST und GIEßLER 1998)
Kalkung	pH 12,6, Einwirkzeit von 24 Stunden: Reduktion der Keimfähigkeit der Tomatensamen auf 0-2 % pH 9,5 und 11, Einwirkzeit von 48 Stunden: vollständige Abtötung der Tomatensamen (TRONECKER 1987)
Kompostierung	ausreichend, um eine Freiheit von Phytopathogenen und von keimfähigen Samen zu erreichen (PFEILSTETTER 1999)

2.2 Seuchenhigiene

Klärschlamm kann praktisch jeden über den Darm ausgeschiedenen Krankheitserreger enthalten (Tab. 4 bis 9). Bei der Abwasser- und Schlammbehandlung werden die Krankheitserreger einerseits dezimiert, andererseits in den Klärschlamm überführt und dort i. d. R. aufkonzentriert. Von besonderer epidemiologischer Bedeutung und bestimmend für die Anforderungen an den mikrobiziden Behandlungsprozess sind dabei Salmonellen sowie Enteroviren, Spulwurmeier und Cryptosporidien (BÖHM 2003).

2.2.1 Epidemiologische Bedeutung von Krankheitserregern

BÖHM (2007) differenziert entsprechend dem Übertragungsmodus die in Tabelle 4 dargestellten epidemiologischen Risiken. Demnach besteht ein Zoonosenrisiko, wenn pathogene Erreger über Klärschlämme vom Tier auf den Menschen übertragen werden. Ein Tierseuchenrisiko existiert aufgrund einer möglichen Verbreitung von Tierkrankheiten durch den Klärschlamm. Ein umwelthygienisches Risiko besteht durch den Eintrag von Krankheitserregern oder anderen Organismen mit unerwünschten Eigenschaften in das Ökosystem (z. B. Bakterien mit Antibiotikaresistenzen).

Tab. 3: Epidemiologische Risiken der landwirtschaftlichen Verwertung organischer Rest- und Abfallstoffe (BÖHM 2007, verändert)

	Bestehendes Risiko	Übertragungsmodus
Zoonosenrisiko	direkte Übertragung auf den Menschen	– Handhabung kontaminierter Produkte im Haushalt
		– beruflicher Umgang mit kontaminierten Produkten
	indirekte Übertragung auf den Menschen	– durch Eintrag von Zoonoseerregern in die Nahrungskette
		– Durch über Vektoren kontaminierte Nahrungsmittel
Tierseuchenrisiko	direkte Übertragung auf landwirtschaftliche Nutztiere	– Kontamination von Weiden
		– Einschleppung von Krankheitserregern bei Lagerung und Verarbeitung in der Nähe von Tierhaltungen
		– aerogen bei der Ausbringung
	indirekte Übertragung landwirtschaftliche Nutztiere	– über Futter von kontaminierten Standorten
		– über belebte Vektoren
umwelthygienisches Risiko	Eintrag in die Umwelt, Belastung der Biozönose	– Persistenz in der Umwelt über die Fauna (z. B. Krankheitserreger)
		– Persistenz unerwünschter Eigenschaften in der Umwelt über die Mikroflora (z. B. Antibiotikaresistenzen)

2.2.2 Viren

Das Auftreten von humanpathogenen Viren mit langer Überlebensdauer in der Umwelt im Klärschlamm ist wahrscheinlich (Tab. 4). Noroviren, Enteroviren und Rotaviren besitzen die größte Umweltrelevanz (2007).

Tab. 4: Auswahl der von Menschen ausgeschieden Viren, deren Vorkommen im Klärschlamm bzw. Abwasser erwartet werden kann (BÖHM 2007, nach STRAUCH 1991, HURST 1989)

Virusgruppe	Auswahl von Typen	Hervorgerufene Krankheiten oder Symptome
Enteroviren		
Poliovirus	3	Poliomyelitis, Meningitis, Fieber
Coxsackievirus A	24	Herpangina, Atemwegsinfektion, Meningitis, Fieber
Coxsackievirus B	6	Myocarditis, Herzmissbildungen, Atemwegserkrankungen, Hautausschläge, Meningitis, Fieber
Echovirus	34	Meningitis, Atemwegserkrankungen, Hautausschläge, Durchfall, Fieber
weitere Enteroviren	4	Meningitis, Atemwegserkrankungen, haemorrhagische Konjunktivitis, Fieber
Adenovirus	41	Atemwegserkrankungen, Augeninfektionen
Reovirus	3	nicht definiert
Hepatitis A-Virus	1	Hepatitis
Rotavirus	4	Erbrechen und Durchfall
Astrovirus	5	Gastroenteritis
Norovirus (Norwalkagent)	2	Erbrechen und Durchfall
Coronavirus	1	Erkältung
Adeno-associated Virus	4	nicht genau definiert, aber mit Atemwegserkrankungen bei Kindern vergesellschaftet
Parvovirus	2	ein Typ steht möglicherweise mit Darminfektionen im Zusammenhang

2.2.3 Bakterien

Unter den bakteriellen Erregern, die in biologischen Rest- und Abfallstoffen in Europa vorkommen können (Tab. 5), befinden sich auch viele Zoonoseerreger, die sich im unbehandelten Material wegen des günstigen Nährstoffangebotes ggf. noch vermehren können.

Antibiotikaresistenzen

Ein erhöhtes Auftreten von gegenüber Antibiotika resistenten Keimen beim Menschen wie beispielsweise Tuberkelbazillen (Tuberkulose-Erreger), Methicillin-resistente Staphylokokken oder resistenten Salmonellen wird beobachtet. Besonders bedenklich ist die Entstehung von multiresistenten Bakterienstämmen (Bakterien, die gegen viele Antibiotika resistent sind), da die Übertragung derartiger Resistenzen auf humanpathogene Erreger zu Infektionen führen kann, welche nur noch mit sehr wenigen oder im Extremfall mit keinem Antibiotikum mehr therapierbar sind. In der Vergangenheit wurden immer wieder neue Wirkstoffe entwickelt, gegenüber denen noch keine Resistenzen bestanden. Inzwischen wird jedoch befürchtet, dass der medizinische Fortschritt ggf. nicht mehr in der Lage sein könnte, mit der Resistenzausbreitung Schritt zu halten (SRU 2007).

Antibiotikaresistente Bakterien wurden in kommunalen Abwässern nachgewiesen. Ihr Auftreten ist insbesondere bei Indirekteinleitungen aus Krankenhäusern und Schlachthöfen wahrscheinlich (SRU 2007, BÖHM 2007). Die Häufigkeit des Vorkommens ausgewählter multiresistenter Bakterien in kommunalem und Schlachthofabwasser zeigt Abbildung 1 (GÖZALAN 2004).

Tab. 5: Bakterielle Zoonoseerreger, die in biologischen Rest- und Abfallstoffen in Europa vorkommen können (PHILIPP und BÖHM 1997, nach DEDIE et al. 1993, verändert)

Erreger	Hauptreservoir, Infektionsquelle, Zwi- schenträger	Häufigkeit und Verbreitung
<i>Brucella spec.</i>	Haus- und Wildtiere, Futter, Einstreu, Abwasser	regional, weltweit
<i>Campylobacter spec.</i>	Haus- und Wildtiere, Geflügel, Gewässer	verbreitet, weltweit
<i>Clostridium perfringens</i>	Wasser, Boden, Darminhalt von Tieren	sporadisch bis gehäuft, weltweit
<i>Escherichia coli</i>	Tier, Mensch, Lebensmittel	verbreitet, weltweit
<i>Erysipelothrix rhusiopathiae</i>	Landw. Nutztiere, Dung, kommunales Abwasser	sporadisch oder grup- penweise, weltweit
<i>Leptospira interrogans subs.</i>	Haus- u. Heimtiere, Gewässer, Schlamm	regional, weltweit
<i>Listeria monocytogenes</i>	Haustiere, Milchprodukte, Erdboden	sporadisch, gruppen- weise, weltweit
<i>Bacillus anthracis</i>	Erdboden (ehemals Abdeckereien), Haus- und Wildwiederkäuer, Schweine	sporadisch, weltweit, regional
<i>Staphylococcus aureus</i>	Mensch, Hospitalismus, Haustiere, Le- bensmittel	sporadisch, gehäuft, weltweit
<i>Strep. Pyogenes Serovare</i>	Mensch und Haustiere	sporadisch, weltweit, regional
<i>Salmonella-Serovare</i>	Haussäugetiere, Geflügel, Reptilien, Ge- wässer, Abwasser	häufig, gruppenweise bis endemisch, welt- weit
<i>Shigella spec.</i>	Mensch, Abwasser	Häufig, weltweit
<i>Clostridium tetani</i>	Abwasser , Boden, Darm, Tier, Mensch	sporadisch, weltweit
<i>Yersinia spec.</i>	Wildnagetiere, Hausschwein	sporadisch, weltweit
<i>Pasteurella spec.</i>	Landw. Nutztiere, Haus- u. Wildnagetiere	sporadisch, weltweit
<i>Chlamydia psittaci</i>	Wild-, Zier- und Hausgeflügel	sporadisch bis Grup- penerkrankung

Die Bedeutung von über die Umwelt verbreiteter antibiotikaresistenter Staphylokokken und Enterokokken im Hinblick auf die Übertragung auf den Menschen ist derzeit nicht abschließend geklärt, jedoch ist die Zahl der Personen mit außerhalb des Krankenhauses erworbener Trägerschaft multiresistenter Keime („community aquired“) steigend und es wird vermutet, dass daran auch in die Umwelt eingebrachte multiresistente Bakterien beitragen. Dabei wird der Eintrag multiresistenter Salmonellen in die Umwelt als besonders kritisch angesehen, da sie wegen des breiten Wirtsspektrums über belebte Vektoren direkt oder indirekt auf Mensch und Tier übertragen werden können (BÖHM 2003).

Insgesamt wird vermutet, dass für die Resistenzausbreitung in der Umwelt der Eintrag von resistenten Bakterien von größerer Bedeutung ist als der Eintrag der Antibiotika selbst (SRU 2007).

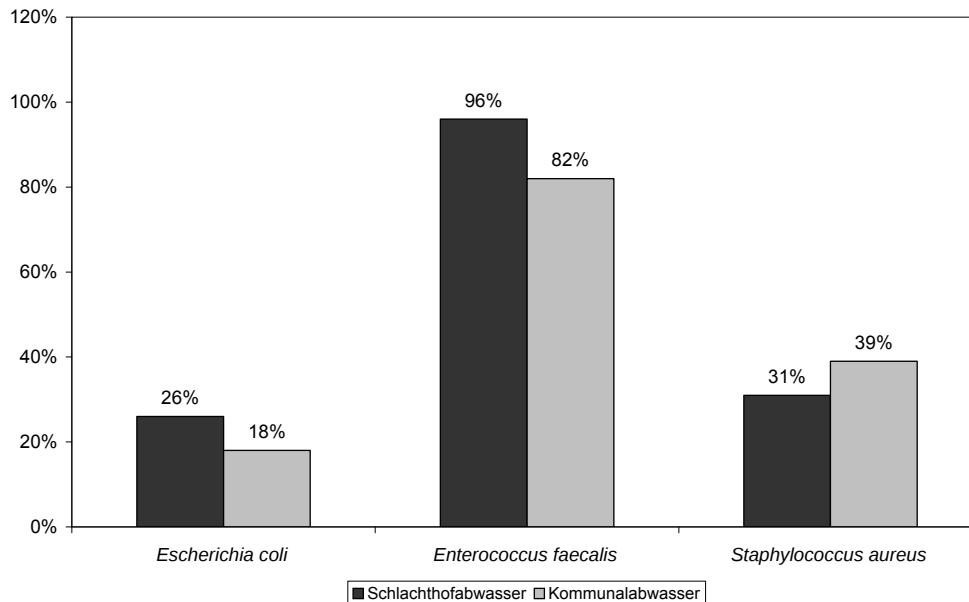


Abb. 1: Häufigkeit des Auftretens von multiresistenten Isolaten von *Escherichia coli*, *Enterococcus faecalis* und *Staphylococcus aureus* in kommunalen Abwässern mit und ohne Zulauf von Schlachthofabwasser (GÖZALAN 2004)

Aufnahme von pathogenen Bakterien durch Nutzpflanzen

Der Transfer von *Salmonella enterica* Serovaren aus mit präpariertem Festmist gedüngtem Boden in Salatpflanzen wurde von KLERKS et al. (2007) nachgewiesen. Der Umfang der Aufnahme variiert je nach Salatsorte und Bakterien-Serovar. Die Bakterien werden über Wurzelauausscheidungen in die Rhizospäre gelockt. Von dort gelangen die mit Flagellen ausgestatteten Mikroben in den Zellzwischenraum bzw. in die Zellen und können von dort durch Leitungsbahnen über weitere Strecken transportiert werden. Mit diesem Nachweis lässt sich erklären, warum auch in sterilisierten Pflanzenproben wiederholt für Lebewesen pathogene Keime detektiert werden konnten. Die Autoren schätzen das Krankheitsrisiko bei Verzehr eines solchen „infizierten“ Salats allerdings als sehr viel niedriger ein als durch andere Infektionsquellen mit Salmonellose.

2.2.4 Parasiten

Neben den Eiern der Band- und Rundwürmer besitzen die *Cryptosporidium parvum* und *Giardia lamblia* besondere Bedeutung (Tab. 6).

Tab. 6: Auswahl von Parasiten, die meist in Form von Dauerstadien im Klärschlamm vorkommen können (BÖHM 2007, nach STRAUCH 1991)

Protozoen (Einzeller)	Cestoden (Bandwürmer)	Nematoden (Rundwürmer)
<i>Cryptosporidium parvum</i> <i>Entamoeba histolytica</i> <i>Giardia lamblia</i> <i>Toxoplasma gondii</i> <i>Sarcocystis</i> spp.	<i>Taenia saginata</i> <i>Taenia solium</i> <i>Diphyllobothrium latum</i> <i>Echinococcus granulosus</i>	<i>Ascaris lumbricoides</i> <i>Ancylostoma duodenale</i> <i>Toxocara canis</i> <i>Toxocara cati</i> <i>Trichuris trichiura</i>

2.2.5 Erreger in anderen organischen Düngemitteln

Auch in Flüssigmist und anderen organischen Abfällen kann eine Reihe von Krankheitserregern auftreten (Tab. 7).

Tab. 7: Infektionserreger in Flüssigmist und organischen Abfällen (KLINGLER 1996)

Bakterien	Viren	Parasiten
Salmonellen (RG, SG, HK)	Erreger der Maul- und Klauenseuche	Spulwürmer
Escherichia coli (RG)	Schweinepest	Palisadenwürmer
Milzbrandbakterien (RG)	Bläschenkrankheit der Schweine	Saugwürmer
Brucellen (RG, SG)	Schweineinfluenza	Leberegel
Leptospiren (RG, SG)	Oldenburger Schweineseuche (TGE)	Lungenwürmer
Mykobakterien (RG, SG, HK)	Rota-Virus-Infektionen	Magendarmwürmer
Rotlaufbakterien (SG)	Teschener Erkrankung	
Clostridien (HK)	Aujesky'sche Krankheit	
Streptokokken	Atypische Geflügelpest	
Enterobacter	Blauzungenerkrankung	
	Retro-, Parvo-, Echo-, Enteroviren	

Besonders in Schlachthofabwässern sind eine Vielzahl von Krankheitserregern nachgewiesen worden (Tab. 8). In vielen Fällen handelt es sich zudem um Erreger von Zoonosen, die Mensch und Tier infizieren können.

Tab. 8: Auswahl von Krankheitserregern, die in Schlachthofabwasser nachgewiesen wurden (BÖHM 1999)

Erreger	Pathogen für	
	Mensch	Nutztier
Bakterien		
<i>Salmonella</i> spp.	X	X
<i>Escherichia coli</i>	(X)	X
<i>Yersinia enterocolitica</i>	X	X
<i>Clostridium perfringens</i>	(X)	X
<i>Listeria monocytogenes</i>	X	X
<i>Mycobacterium</i> spp.	X	X
<i>Bacillus anthracis</i>	X	X
Brucellen	X	X
<i>Campylobacter</i> spp.	X	X
Staphylococcen	(X)	X
Viren		
Enteroviren	-	X
Reoviren	-	X
Adenoviren	-	X
Parasiten		
Protozoen	X	X
Cestoden	X	X
Nematoden	(X)	X

Tabelle 9 ist zu entnehmen, dass die Abtötung von Krankheitserregern, hier dargestellt durch den so genannten D-Wert (Zeitspanne, in der bei einer bestimmten Temperatur die Anzahl an Bakterien oder Viren um eine Zehnerpotenz reduziert wird), zeitlich variabel verläuft, jedoch für einzelne Erregergruppen charakteristische Unterschiede aufweist. Parvoviren besitzen demnach mit mehreren Tagen den höchsten D-Wert und Enteroviren und *E. coli* mit wenigen Minuten den niedrigsten.

Hygienisierungsmaßnahmen zur Abtötung von tier- und humanpathogenen Erregern sollten demnach auf die im Substrat – in diesem Fall im Klärschlamm – möglicherweise vorhandenen Erregern ausgerichtet sein. Sie sollten zudem eine Sicherheit mit einbeziehen, um das unterschiedliche Verhalten von Organismen einer Erregergruppe zu berücksichtigen, z. B. durch Verlängerung der Behandlungszeit oder Temperaturerhöhung. Außerdem können durch so genannte Validierungsverfahren (vgl. Kap. 4.1.1.1 und 5.3) Rahmenbedingungen für eine zuverlässige Hygienisierung konkretisiert werden.

Tab. 9: D-Werte für unterschiedliche Erreger

Mikroorganismus	HOFERER (2001)		andere Autoren
Bakterien	D-Werte	D-Werte bei 50 °C	
<i>E. coli</i>	24 - 26 min	< 3,4 h (Rindermist: 45 °C)	KUDVA et al. 1998
Salmonellen	32 - 36 min	49 – 63 min	SOLDIERER und STRAUCH 1991
Fäkalstreptokokken	7,5 - 11,3 h	96 min, Wasserbad	METZLER und PESARO 1992
Viren	D-Werte	D-Werte bei 55 °C	
Bovine, Porcine, Humane Enteroviren	7 - 63 min	< 78 min, 46°C	MARTENS et al. 1999
Equines Rhinovirus	43 - 83 min	< 102 min, 46°C	MARTENS et al. 1999
Bovine(BPV), Porcine (PPV) Parvoviren	BPV: 10 - 31 h	BPV: 27 h, Wasserbad PPV: 20 h	METZLER und PESARO 1992 BOTNER 1990
Bakterien	D-Werte	D-Werte bei 55°	
<i>E. coli</i>	1 - 5 min	18-30 min, 53°C	OLSEN und LARSEN 1987
Salmonellen	3,6 - 6,6 min	15 min – 6 h 36 - 54 min, 53°C < 3,4 h 9 - 14 min	BÖHM et al. 1997 OLSEN und LARSEN 1987 PLYM-FORSHELL 1995 SOLDIERER und STRAUCH 1991
Fäkalstreptokokken	1,6 - 1,7 h	5 - 6 h 17 - 32 min < 6 h 13,2 min, Wasserbad 42 – 60 min	GRUNWALD 1995 LUND et al. 1996 MARTENS et al. 1999 METZLER und PESARO 1992 OLSEN und LARSEN 1987
Viren	D-Werte	D-Werte bei 55°C	
Bovine, Porcine, Humane Enteroviren	2 - 14 min	< 7,5 min < 34 min 13 - 16 min < 9 min < 1 min ca. 24 min	LUND et al. 1996 MARTENS et al. 1999 Mc KAIN und HOBSON 1987 MONTEITH et al. 1986 SPILLMANN et al. 1987, TRAUB et al. 1988 BÖHM et al. 1997
Eqines Rhinovirus	8 - 32 min	< 48 min ca. 40 min	MARTENS et al. 1999 BÖHM et al. 1997
Bovine (BPV), Porcine (PPV) Parvoviren	5 - 8 h	PPV: 32 h PPV: 11 – 54 h BPV: 6,9 h BPV: 6,3 h BPV: < 8,6 - 17,1 h BPV: 5 h	BOTNER 1990 LUND et al. 1996 MARTENS et al. 1999 METZLER und PESARO 1992 MONTEITH et al. 1986 SPILLMANN et al. 1987, TRAUB et al. 1988

¹⁾ D-Wert = Zeitspanne, in der bei einer bestimmten Temperatur die Anzahl an Bakterien oder Viren um eine Zehnerpotenz reduziert wird.

Abbildung 2 zeigt, dass eine Kombination von Einwirktemperatur und -zeit für die Abtötung von Pathogenen maßgeblich ist.

Abbildung 3 verdeutlicht, dass widerstandsfähigere Organismen eine höhere Einwirktemperatur benötigen, um bei gleichen Einwirkzeiten abgetötet zu werden. Daher ist mit der Entscheidung für die Durchführung eines bestimmten Hygienisierungsverfahrens bei festgelegten Randbedingungen auch das damit erreichbare Hygieneniveau determiniert (vgl. Kap. 4.1.1.1 und Kap. 8).

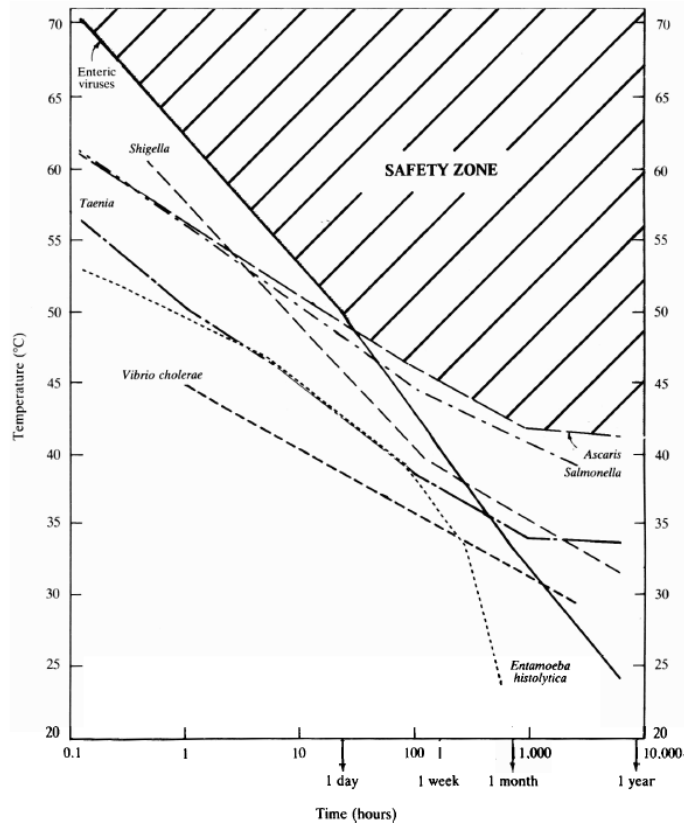


Abb. 2: Zeit- und Temperatureinfluss auf die Abtötung ausgewählter Krankheitserreger im Klärschlamm (FEACHEM et al. 1993)

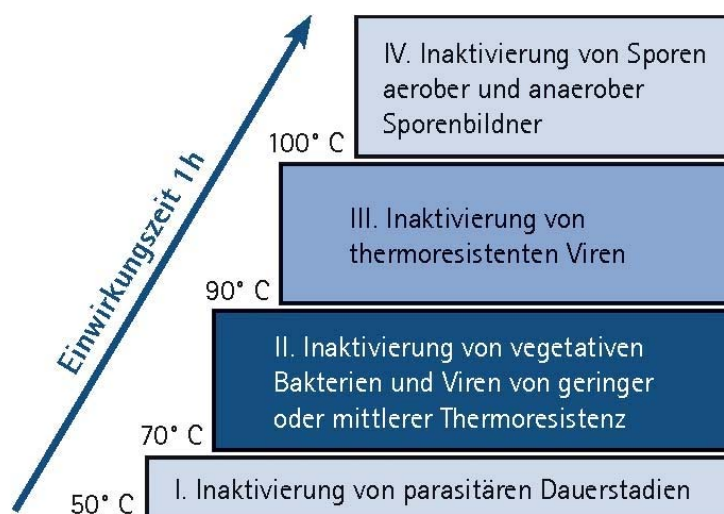


Abb. 3: Stufen der Widerstandsfähigkeit von Krankheitserregern im Hinblick auf ihre Inaktivierung bei thermischer Behandlung (BÖHM 2007)

3 Hygienisierungsverfahren: Stand der Technik

Ziel einer Hygienisierung ist die Unterbrechung von Infektionskreisläufen durch Abtötung von Krankheitserregern. Durch die Abtötung von Bakterien wird zudem der Verbreitung von Antibiotikaresistenzen entgegengewirkt. Hygienisierungsverfahren können auch anderen Prozesszielen der Schlammbehandlung (z. B. Stabilisierung, Entwässerung, Nachkonditionierung) dienen. Andererseits besitzen verschiedene Klärschlammbehandlungsverfahren hygienisierende Wirkung.

Die nachfolgenden Ausführungen zur Hygienisierung sind zusammengestellt aus den ATV-Arbeitsberichten (1986, 1988a, b), LANG (1987), Deutsche Veterinärmedizinische Gesellschaft e. V. (1988), aus Technischer Bericht: „Charakterisierung von Schlämmen – Anleitung für die gute Praxis bei der Klärschlammverwertung“ (CEN TC 308 WG 2 Guide 10, Stand 2007) und LUFA Hameln (1998).

Zur vollständigen Hygienisierung stehen verschiedene Verfahren unter Nutzung von Hitze- einwirkung, pH-Wert-Verschiebung oder Änderung anderer chemischer Eigenschaften zur Verfügung; den stärksten Einflussfaktor stellt die Temperatur dar. Eine Übersicht über die verbreiteten Hygienisierungsverfahren, differenziert nach deren Einsatz zu flüssigen bzw. entwässerten Klärschlämmen, zeigt Tabelle 10.

3.1 Flüssigschlammbehandlung mit Kalkhydrat

Die Behandlung von Flüssigschlamm kann mittels Kalkhydrat ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) und/oder Dolomitskalkhydrat ($\text{Ca}(\text{OH})_2 \cdot (\text{MgCa}(\text{OH})_2)$) sowie Branntkalk (CaO) erfolgen. Die Zugabe von Kalkhydrat zur Entseuchung von Flüssigschlamm oder zur Konditionierung zwecks Entwässerung führt zu einem Anstieg des pH-Wertes. Die pH-Wert-Erhöhung ist abhängig von der Kalkzugabe und der Pufferkapazität des Schlamms; mit NH_3 -Freisetzungen ist insbesondere bei anaerob stabilisiertem Schlamm zu rechnen. Der Schlamm gilt als seuchenhygienisch unbedenklich, wenn sein Anfangs-pH-Wert mindestens $12,5 \pm 0,3$ beträgt und das Gemisch mindestens drei Monate gelagert wird (ATV 1988a).

Die Kalkzugabe kann in Form von Kalkmilch oder durch eine Trockenkalkdosierung vorgenommen werden. Die erforderliche Kalkmenge liegt zwischen 6 und 10 kg/m^3 Nassschlamm (3-5 % TM; SÖLTER, in KTBL 2000). In Bezug auf die Klärschlamm-TM wird eine Dosierung von 0,3 kg CaO/kg Klärschlamm angegeben (CEN 2007). Die Flüssigentseuchung mit Kalk hat sich insbesondere aufgrund des geringen verfahrenstechnischen Aufwandes sowie der einfachen Bauweise und Betriebsführung bewährt. Zur Abtötung von thermoresistenten Viren und Dauerorganen von Parasiten wird Branntkalk empfohlen (CEN 2007, vgl. Kap. 3.9).

Tab. 10: Kennwerte für verbreitete Hygienisierungsverfahren (MÖLLER und ZINGLER 1996, ergänzt)

Entseuchungs- verfahren	Entseuchung durch	Einwirkdauer	Randfaktoren	empfehlenswerter Einsatz ¹⁾
A. für flüssige Klärschlämme				
1. Kalkhydratbehandlung	pH = 12,5 ± 0,3	Batchverfahren anschließend ≥ 3 Monate Lagerdauer	gute Durchmischung erforderlich	kleinere bis mittlere Kläranlagen
2. aerob-thermophile Stabilisierung	T ₁ = 50°C T ₂ = 55°C T ₃ = 60°C	t ₁ ≥ 23 h t ₂ ≥ 10 h t ₃ ≥ 4 h	pH ≥ 8,0 pH ≥ 8,2	Kläranlagen für ca. 10 000 bis 50 000 Einwohnerwerte
3. aerob-thermophile Vorstufe mit nachfolgender anaerob-mesophiler Stabilisierung	T ₁ = 60°C T ₂ = 65°C T ₃ = 70°C T ₄ = 80°C	t ₁ ≥ 60 min t ₂ ≥ 30 min t ₃ ≥ 25 min t ₄ ≥ 10 min		überlastete oder mittlere bis große Klärwerke
4. Pasteurisierungsanlagen (Vorpasteurisierung!)	T ₁ = 65°C T ₂ = 70°C T ₃ = 80°C	t ₁ ≥ 30 min t ₂ ≥ 25 min t ₃ ≥ 10 min		i. d. R. mittlere bis größere Klärwerke
5. Langzeitlagerung		t ≥ 5 Mon (18 Mon; vgl. A.5)	Lagerkapazität	kleinere bis mittlere Kläranlagen
6. Entwässerung/Stabilisierung in Schilfbeeten		t ≥ 18 Mon (12 Mon beschickungsfrei + 6 Mon Nachlagerung)	Platzbedarf	kleinere bis mittlere Kläranlagen
B. zur Klärschlammkonditionierung				
7. anorganische Konditionierung mit Kalkhydrat/Eisen	pH = 12,5 ± 0,3	Batchverfahren ≥ 3 Monate Lagerdauer nach Entwässerung	v. a. bei Klärschlamm-entwässerung mit Kammerfilterpresse	i. d. R. mittlere bis größere Kläranlagen
8. thermische Konditionierung/Desintegration von Klärschlamm	T ₁ = 80-90°C T ₂ = 180-210°C	t ₁ ? t ₂ ≥ 45 min	p ₁ = 5 – 20 bar p ₂ = ?	größere Klärwerke
C. für entwässerte Klärschlämme				
9. Branntkalknachbehandlung (CaO)	T = 55 bis 70°C u. pH ≥ 12,5	t ≥ 2 h		alle Klärwerke mit Entwässerungsanlagen
10. anaerob-thermophile Stabilisierung	T ₁ = 55°C	t ≥ 24 h	hydraulische Verweilzeit ≥ 20 d	größere Anlagen
11. Kompostierung in Mieten	T ₁ = 53-55 °C T ₂ = 65°C	t ₁ ≥ 2 Wochen t ₂ ≥ 1 Woche	Strukturmaterial erforderlich Nachrotte 3 Mon	kleine bis mittlere Anlagen mit Entwässerungsaggregat
12. Kompostierung in Reaktoren	T ₁ = 60°C T = 55°C zusätzlich in der Heißzone: T = 65°C	t ₁ ≥ 1 Woche t ₂ = 10 d t ≥ 2 d	Nachrotte bis insgesamt 3 Mon	größere Klärwerke mit Entwässerungsanlagen
13. Trocknung a) Solare Trocknung b) Niedertemperaturtrocknung c) Volltrocknung	T ₁ = variabel (+ Hochtemperatur-Pelletierung!) T ₂ = 40-80°C T ₃ ≥ 100-450 °C	t ₁ ≥ variabel t ₂ ≥ variabel t ₃ ≥ wenige min	TM ₁ < 90% TM ₂ ≥ 90 % TM ₃ ≥ 90 %	a) kleine bis mittlere Anlagen b, c) größere Klärwerke

¹⁾ die Größeneinteilung erfolgt in Anlehnung an die Einteilung laut Abwasserverordnung: kleine Anlage: GK 1 bis GK 3; mittlere Anlagen: GK 4; größere Klärwerke bis GK 5

3.2 Aerob-thermophile Stabilisierung (ATS)

Aufgrund von Luft- bzw. Sauerstoffzufuhr treten beim ATS-Verfahren infolge exothermer mikrobieller Abbau- und Stoffwechselvorgänge eine Erwärmung des Schlammes und eine pH-

Erhöhung auf Werte um pH 8 auf. Bei guter Wärmedämmung, optimaler Bemessung der Sauerstoffzufuhr und ausreichender Menge an organischer Substanz wird infolge der Temperaturerhöhung neben der Stabilisierung auch eine Klärschlammmentseuchung erreicht (FUCHS und SCHWINNING 1997, ATV 1988a, CEN 2007). Verfahrenstechnische Voraussetzungen:

- Zerkleinerung größerer Bestandteile
- ausreichende Wärmedämmung des Reaktors
- Betrieb von zwei Reaktionsbehältern in Reihenschaltung, um Kurzschlussströmungen zu verhindern
- Betrieb des ersten Behälters im quasi Batch-Verfahren mit 1 h Füllzeit und 23 h Verweilzeit
- Aufenthaltszeit bei gleicher Behältergröße: mindestens fünf Tage im gesamten System
- Einhaltung einer Mindesteinwirkdauer in Abhängigkeit von der Einwirktemperatur (Tab. 10)

Beim ATS-Verfahren sind die Erfordernisse der Abluftbehandlung (u. a. Rückführung von Ammoniak-Brüden in den Abwasserreinigungskreislauf) und der Schlammabkühlung vor der landwirtschaftlichen Verwertung zu beachten (MÖLLER und ZINGLER 1996).

3.3 Aerob-thermophile Stabilisierung (ATS) mit anschließender Faulung

In einer aerob-thermophilen Vorstufe zur Faulung wird durch Temperaturerhöhung infolge exothermer Oxidationsvorgänge und eventuell zusätzlich durch eine mittels Fremdenergie betriebene Stützheizung eine Entseuchung des Rohschlamm bewirkt. Die nachfolgende anaerob-mesophile oder anaerob-thermophile Stabilisierung gewährleistet die notwendige Prozesssicherheit für die Entseuchung (MÖLLER und ZINGLER 1996). Der behandelte Schlamm gilt als seuchenhygienisch unbedenklich, wenn

- in der Vorstufe die Anforderungen einer Vorpasteurisierung erfüllt sind oder eine Einwirktemperatur von mindestens 60 °C über einen Zeitraum von mindestens vier Stunden eingehalten wird und
- in der anaeroben Stufe die Prozesstemperaturen mindestens 30 °C betragen (ATV 1988a).

In der Vorstufe soll eine relativ kurze Aufenthaltszeit den Abbau der organischen Substanz begrenzen, die für eine gute Methanproduktion im Faulbehälter notwendig ist. Durch Teilstabilisierung kann eine Entlastung unterdimensionierter Faultürme erreicht werden. Wegen der erforderlichen Abkühlung des Schlamm (ca. 40 °C) vor der Beschickung des Faulbehälters werden bei dieser Verfahrenskombination Wärmetauscher eingesetzt. Eine Abluftbehandlung ist erforderlich (MÖLLER und ZINGLER 1996).

Vergleichende seuchenhygienische Untersuchungen bei verschiedenen Kombinationen aerober und anaerober Klärschlammbehandlungsverfahren sind PHILIPP (1988b) und NEES (1988) zu entnehmen. Während nach aerob-thermophiler Schlammstabilisierung mit anschließender Faulung keine Salmonellen mehr nachweisbar sind, wurden die Anforderungen bei den Enterobacteriaceen nicht in allen untersuchten Proben erfüllt (PHILIPP 1988b). Auch NEES (1988) zeigt, dass bei aerob-thermophiler luft- bzw. sauerstoffbegaster Kurzzeitbehandlung und anschließender mesophiler Faulung die gestellten Hygieneanforderungen nicht erfüllt werden. Diese Ergebnisse weisen auf die Notwendigkeit einer Prozesskontrolle hin. Bei einer anaerob-thermophil-mesophilen Klärschlammstabilisierung kann bei ordnungsgemäßen Betrieb seuchenhygienisch unbedenklicher Klärschlamm produziert werden (PENDINGER 1990).

3.4 Pasteurisierung

Dieses Behandlungsverfahren erfordert eine Schlamm-erhitzung auf Temperaturen von mindestens 65 °C bis unterhalb 100 °C (30 Minuten Einwirkzeit; ab 80 °C mindestens 10 Minuten Einwirkzeit).

Verfahrenstechnische Vorgaben (ATV 1988a):

- ausreichend hohe Temperatur mit entsprechender Einwirkzeit
- Zerkleinerung größerer Bestandteile im Rohschlamm, um eine Rekontaminierung durch nicht entseuchte Partikel-Kompartimente zu verhindern (Partikelgröße maximal 5 mm)
- Verhinderung von Kurzschlussströmungen im Reaktor
- Erhitzung des Rohschlammes vor der Schlammstabilisierung (Vorpasteurisierung), um ein erneutes Wachstum pathogener Keime nach der Faulung aufgrund fehlender Antagonisten zu verhindern

Untersuchungen von PHILIPP (1981) zeigen, dass die Pasteurisierung von Rohschlamm bei einer Temperatur von 70 °C und einer Einwirkzeit von 30 Minuten zu einer Abtötung von Salmonellen führt, und im anschließenden Faulprozess keine Reinfektion des Faulraum-inhaltes erfolgt. SAIER (1987) untersucht die Inaktivierung von Viren mittels thermischer Behandlung bei 70 °C. Dabei werden das Rotavirus SA-11 und das Poliovirus Typ 1 bereits während der Aufheizphase vor Erreichen der Pasteurisierungstemperatur von 70 °C inaktiviert, während Bovines Parvovirus auch durch eine Pasteurisierung nicht vollständig inaktiviert wird (vgl. Philipp 1988a). Im Hinblick auf die Eliminierung von Viren ist nach SAIER (1987) der Vorpasteurisierung der Vorzug zu geben.

3.5 Langzeitlagerung

Im Hinblick auf eine Hygienisierung ist auch die (Zwischen-)Lagerung von Klärschlamm von Bedeutung. Insbesondere bei kleineren Anlagen findet häufig eine längere Zwischenspeicherung von Nassschlamm in Schlammteichen/-silos aber auch von entwässertem Schlamm in Schlamm-lagern statt, um die Ausbringungsbeschränkungen bei der landwirtschaftlichen Verwertung zu überbrücken bzw. bei externen Dienstleistern genügend große Mengen für eine wirtschaftliche Entwässerung bereit zu stellen. Hier werden i. d. R. mehrere Monate Lagerzeit erreicht. Diese Schlamm-lager erreichen im Falle einer Kalkung relativ lange Einwirkzeiten und sind insofern wichtig für eine eventuelle Hygienisierung.

Über die für eine entseuchende Wirkung erforderliche Dauer einer Langzeitlagerung von Klärschlamm liegen unterschiedliche Ergebnisse vor, die von wenigen Monaten bis zu mehr als einem Jahr Lagerzeit reichen (vgl. HAIBLE 1988). HAIBLE (1988) konnte bereits nach fünf Monaten Lagerzeit keine Salmonellen im Klärschlamm mehr nachweisen. Enteroviren werden innerhalb von 11 Monaten abgetötet, Askarideneier sind zu diesem Zeitpunkt noch zu 14 % lebensfähig.

3.6 Klärschlammvererdung - Entwässerung in Schilfbeeten

Zur Abwasser- als auch zur Klärschlammbehandlung sind verschiedene Systeme im Einsatz (Schilf-Binsen-Anlage, Wurzelraument-sorgung, bewachsene Bodenfilter, Hydroponik-Hydrokultur, Wasserhyazinthe-teiche; vgl. LANG 1988b), die häufig auch als „Klärschlamm-vererdungsverfahren“ beschrieben werden. Zur Klärschlammbehandlung durch Makrophyten werden am häufigsten Schilf (*Phragmites communis* Trin.) und Flechtbinsen (*Scirpus lacustris* L.) eingesetzt (vgl. LANG 1988b). Die in Abwasser und Schlamm vorhandenen Substanzen werden entweder von den Pflanzen aufgenommen bzw. in unterschiedlichem Umfang im Wurzelbereich abgebaut oder z. T. im Boden festgelegt. In der Praxis werden Beschickungszeiten bis 15 Jahre erreicht.

Mehrjährige vergleichende bakteriologische und parasitologische Untersuchungen an Klärschlamm-entwässerungsbeeten wiesen im Hinblick auf die Eliminierung pathogener Mikroorganismen – auch Salmonellen – keinen eindeutigen Vorzug der schilfbepflanzten Filterbeete gegenüber den unbepflanzten Kontrollbeeten auf. Die bakteriologischen Untersuchungen der aus den Filterbeeten entleerten (16 Monate nach Abschluss der Schlammbeschickung) und zusätzlich sechs Monate gelagerten Schlamm-Erde-Wurzelgemisches erbrachten relativ geringe Werte an Enterobacteriaceen ($2,2 \cdot 4 \cdot 10^2$), Fäkalstreptokokken ($2,2 \cdot 4 \cdot 10^3$) und Coliformen Bakterien ($1 \cdot 10^2$); Salmonellen wurden nicht ermittelt. Die eingebrachten Eier von *Ascaris suum* bewahrten ihre Infektionsfähigkeit ca. 12 Monate (LANG 1988b).

Nach neueren Untersuchungen kann gut vererdetes Material, d. h. Material aus einem Beet mit flächendeckendem Schilfbestand, nach einem halben Jahr beschickungsfreier Zeit bereits verwertet werden. Die Autoren verweisen jedoch – insbesondere bei Vorhandensein von Bestandeslücken im Schilfbewuchs – auf die bereits von PHILIPP und STRAUCH (1988) veröffentlichten Empfehlungen, um eine seuchenhygienische Unbedenklichkeit des Klärschlamm (nach ATV/VKS-Arbeitsgruppe 3.2.2 „Entseuchung von Klärschlamm“, 1996 bis 1998) einzuhalten:

- ein beschickungsfreies Jahr vor der Räumung
- eine sechsmonatige Nachlagerung, z. B. in Mieten vor der Verwertung (EKO-PLANT 2000).

3.7 Konditionierung mit Kalk oder Metallsalzen

Die Konditionierung mittels Kalk und Metallsalzen (Fe-, Al-Salze) dient dazu, bei der anschließenden Entwässerung des Klärschlammes einen weitestgehenden Wasserentzug zu erreichen. Dabei wird in Abhängigkeit vom Stabilisierungsgrad des Schlammes zwischen 200 und 1.000 kg Kalkhydrat ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) je t TM eingesetzt (SÖLTER, in KTBL 2000). Vor der Zudosierung zum Schlamm wird Kalkhydrat durch Wasserzusatz zu einer 20-30 %igen Suspension (Kalkmilch) aufbereitet, die Metallsalze zuvor als 10 %ige Lösung zugemischt; bei Einhaltung einer Reaktionszeit für die anschließende Nacheindickung von 6-10 h lassen sich TM-Gehalte von 10-16 Gew.-% erreichen (SCHLEGEL 1996).

Die im Klärschlamm vorhandenen Mikroorganismen werden durch Erhöhung des pH-Wertes auf $12,5 \pm 0,3$ abgetötet. Der so konditionierte Klärschlamm wird i. d. R. mit Kammerfilterpressen entwässert und muss für eine ausreichende Hygienisierung vor seiner landwirtschaftlichen Verwertung drei Monate zwischenlagern (ATV 1988b).

3.8 Thermische Konditionierung

Bei der thermischen Schlammkonditionierung, die über eine Fremderhitzung und z. T. mittels Druck erfolgt, wird zwischen nieder- und hochthermischen Verfahren differenziert (LANG 1988a):

- hochthermische Konditionierung: Druck im Schlammreaktionsbehälter 15-20 bar, Temperatur 180-210 °C, Einwirkzeit ca. 45-60 Minuten
- niederthermische Konditionierung: Temperatur 80-90 °C.

Bei der thermischen Konditionierung, die auch mit dem Ziel der Desintegration von Klärschlamm eingesetzt wird, ist davon auszugehen, dass bei ordnungsgemäßigem Betrieb ein seuchenhygienisch unbedenklicher Schlamm produziert werden kann. Untersuchungen von LANG (1988a) zeigen allerdings, dass bei unzuverlässiger Bedienung oder technisch bedingten Defekten Störungen im Behandlungsprozess auftreten können (z. B. Kurzschlussströmungen) und dadurch ungenügend entseuchter Schlamm anfällt.

3.9 Behandlung von entwässerten Schlämmen mit Kalk

Die Nachbehandlung maschinell entwässerter Schlämme mit Branntkalk bzw. Dolomitbranntkalk dient der Verfestigung und Hygienisierung von Schlämmen. Die bei der exothermen Reaktion entstehenden Temperaturen liegen zwischen 55 und 70 °C. Bei der Behandlung mit Branntkalk wird Ammoniak frei; die Installation einer Abluftbehandlungsanlage ist sinnvoll. Der Schlamm gilt als seuchenhygienisch unbedenklich, wenn der Anfangs-pH-Wert des Schlammes mindestens 12,5 +/- 0,3 und die Temperatur des gesamten Gemisches mindestens 55 °C während zwei Stunden betragen (ATV 1988a). Um diese Anforderungen zu erreichen, werden in der Literatur unterschiedliche Angaben zur Kalkmenge gemacht, die entwässerten Schlamm (20-30 % TM) zugegeben werden müssen:

- 70-150 kg CaO/t bei auf 20-30 % TM entwässerten Klärschlamm (SÖLTER, in KTBL 2000)
- 0,4 bis 1,1 kg CaO/kg Klärschlamm-TM (CEN 2007)
- 25-35 Gew.-% der Klärschlamm-TM (MÖLLER und ZINGLER 1996)
- 75 kg CaO/m³ Filterkuchen (BUNDESVERBAND DER DT. KALKINDUSTRIE E.V. 2007)
- 400-500 g CaO/kg Klärschlamm-TM (KASSNER 1986)
- 0,9 kg CaO/kg Klärschlamm-TM, anschließend 24 h Lagerzeit bzw. 0,45 kg CaO/kg Klärschlamm-TM, anschließend 2 Monate Lagerzeit (SCHIRM 2005).

Umfassende Untersuchungsergebnisse zur Hygienisierung von Klärschlamm mittels Kalk sind PFUDERER (1985), OSTERTAG (1987, 1988) und BOLANZ et al. (1988) zu entnehmen. KOCH und STRAUCH (1981) weisen die Inaktivierung von Poliovirus und Bovines Parvovirus mittels Branntkalk nach. Kalkhydrat hat eine hohe entseuchende Wirkung auf bakterielle und virale Krankheitserreger, allerdings nur bedingt auf Dauerformen von Bakterien (Sporenbildner) und parasitäre Dauerformen (Wurmeier) (OSTERTAG 1988). Nach LANG (1987) führen hohe pH-Werte ohne zusätzliche Temperaturerhöhung nicht zu einer vollständigen Inaktivierung der Askarideneier. Beim Einsatz von Branntkalk wird durch die pH-Wert- und Temperaturerhöhung eine Abtötung von Askarideneiern erreicht (vgl. OSTERTAG 1987). Die unvollständige Inaktivierung von Wurmeiern beim Einsatz von Kalkhydrat führt zur o. g. Forderung einer dreimonatigen Nachlagerung des Kalk-Schlamm-Gemisches. Dies kann zu Engpässen bei der Lagerkapazität führen.

3.10 Anaerob-thermophile Stabilisierung

Die mesophile Faulung von Klärschlämmen ist Stand der Technik zur Klärschlammstabilisierung. Obwohl mittlere Verweilzeiten von 30 Tagen und mehr erreicht werden, kann im mesophilen Betrieb keine vollständige Hygienisierung des Klärschlammes realisiert werden, auch aufgrund der i. d. R. kontinuierlichen Klärschlammeneinspeisung in den Reaktor. Hierzu ist ein thermophiler Betrieb des Faulturms erforderlich unter Betriebsbedingungen, wie sie für Biogaslagen in der Bioabfallverordnung ermittelt wurden mit Einwirktemperaturen von 55 °C, einer Mindestverweilzeit von 24 Stunden und einer durchschnittlichen hydraulischen Verweilzeit von 20 Tage (BioAbfV 1998). Im Arbeitspapier zur Novelle der BioAbfV wird bei 50 °C eine längere nachzuweisende Mindestverweilzeit und eine durch Prozessprüfung zu belegende Hygienisierung des Materials alternativ ermöglicht. Aus bautechnischen Gründen ist i. d. R. keine Umrüstung vorhandener mesophil betriebener Faultürme zu einer thermophil betriebenen Anlage möglich.

3.11 Kompostierung in Mieten

Die Kompostierung von Klärschlamm unter Zugabe von Strukturmaterial (z. B. Bioabfälle, insbesondere Holzhäcksels, Stroh, Sägespäne) führt durch die bei aeroben mikrobiellen Umsetzungsvorgängen erzeugte Wärme zu einer Entseuchung des Mischgutes; darüber hinaus kommt der Bildung von antibiotisch wirkenden Stoffwechselprodukten Bedeutung zu.

In allen Bereichen des Mischgutes muss eine Reaktionstemperatur von mindestens 55 °C über eine Einwirkzeit von drei Wochen erreicht werden (ATV 1988a). Für Bioabfallkomposte ist in der BioAbfV bei gleicher Temperatur eine Einwirkdauer von zwei Wochen vorgeschrieben (BioAbfV 1998). Eine Mietenkompostierung ist vor allem für kleinere bis mittlere Anlagengrößen einsetzbar.

Verfahrenstechnische Voraussetzungen:

- Anfangswassergehalte des Mischgutes: 40 bis 60 %
- ausreichende Belüftung des Mischgutes durch Umsetzen der Mieten und/oder Zwangsbelüftung
- Sohlabdichtungen, um Einträge mit dem Sickerwasser in den Boden zu verhindern.

Derzeit erfolgt die Klärschlammkompostierung hauptsächlich in externen Abfallbehandlungsanlagen, die nicht Bestandteil einer Kläranlage sind. Der Klärschlammkompost wird vor allem im Landschaftsbau eingesetzt (Rekultivierung von Abraumhalden und Deponien, Lärmschutzwälle, etc.).

3.12 Kompostierung in Reaktoren

Für die Klärschlammkompostierung soll das gesamte Mischgut bei einer Reaktorpassagedauer von mindestens zehn Tagen einer Mindesttemperatur von 55 °C unterliegen. Der Reaktorpassage muss sich eine mindestens zweiwöchige Nachrotte in Mieten mit mindestens einmaligem Umsetzen bzw. eine Nachrotte in einem zweiten Reaktor anschließen (ATV 1988a). Für die Bioabfallkompostierung ist in geschlossenen Reaktoren bei 60 °C Reaktionstemperatur eine Verweilzeit von einer Woche ausreichend (BioAbfV 1998). Entstehende Brüden können der Abwasserreinigung zugeführt oder müssen anderweitig entsorgt werden.

Verfahrenstechnische Voraussetzungen:

- störungsfreier Betriebsablauf und richtige Bemessung der Luftzufuhr (zwangsbelüftet)
- ausreichende Temperatureinwirkung während erforderlicher Einwirkzeit in allen Reaktorbereichen
- Anfangswassergehalt: weniger als 70 %.

STRAUCH et al. (1980a, b) zeigen, dass in Bioreaktoren ein hygienisch einwandfreies Produkt erzielt werden kann, während bei einer Mietenkompostierung bei winterlichen Temperaturen die Wirkung auf Salmonellen und einem Enterovirus unzuverlässig ist.

3.13 Trocknung

Mit der Klärschlamm-trocknung, die einer maschinellen Schlammentwässerung folgen kann, werden unterschiedliche Ziele verfolgt:

- weitgehende Gewichts- und Volumenreduktion im Hinblick auf Lager- und Transportkosten
- bessere Vermarktungs- bzw. Entsorgungsmöglichkeiten (größere Flexibilität durch verschiedene Absatzmärkte und einfachere Zwischenlagerung)
- Vorbehandlung zur Heizwerterhöhung bei einer Schlammverbrennung; dabei wird die weitergehende Trocknung zunehmend in den Verbrennungsprozess integriert (z. B. bei Etagen- und Wirbelschichtöfen).

Bessere Einhaltung düngemittelrechtlicher Vorgaben: es werden Klärschlämme erzeugt, die annähernd homogen sind und gute Lagerungs- und Transporteigenschaften besitzen. Getrocknete granulatformige Klärschlammprodukte weisen günstige Ausbringeigenschaften auf.

Die Verfahren der Klärschlamm-trocknung können folgendermaßen eingeteilt werden:

- **Hochtemperatur-trocknung:** Hierbei das Medium (Luft, Wasser etc.) durch Zuführung von Energie auf Temperaturen über 100 °C (bis > 450 °C, abhängig von Trocknungsverfahren) erhitzt. Diese Verfahren sind von den Umgebungsbedingungen (z. B. Lufttemperatur und -feuchtigkeit) unabhängig.
- **Kaltluft-/Niedertemperatur-trocknung:** Das Trocknungsmedium wird auf Temperaturen bis max. 40 °C („Kaltluft“) bzw. < 80 °C („Niedertemperatur“) erwärmt. Bei ausreichend niedriger relativer Luftfeuchtigkeit erfolgt bei der Kaltluft-trocknung der Austrieb und Abtransport der Schlammfeuchtigkeit i. W. durch den sehr hohen Luftaustausch. Mittlerweile jedoch wird bei diesem Trocknungsverfahren die Trocknung bevorzugt im Umluftbetrieb bei etwas höheren Temperaturen (ca. 60 °C bis < 80 °C) durchgeführt.
- **Solare Trocknung:** Das Trocknungsmedium bzw. der Schlamm wird lediglich durch solare Einstrahlung erwärmt, gleichzeitig wird ein hoher Luftaustausch gewährleistet. Dieses Verfahren ist in hohem Maße von den Umgebungsbedingungen (Sonneneinstrahlung, Luftfeuchtigkeit und -temperatur) abhängig und kann in der Regel keine Trockensubstanzgehalte von über 90 % TM gewährleisten.

Durch die Klärschlamm-trocknung werden i. d. R. aufgrund der Temperatureinwirkung Pathogene abgetötet. Bei Volltrocknung (90-95 % TM, vgl. KASSNER und SCHMUKER 1990) kann ein hygienisiertes Produkt erzeugt werden, bei dem die verbleibenden geringen Wassergehalte eine Wiederverkeimung nahezu ausschließen.

Bei einer solaren Klärschlamm-trocknung und anderen Trocknungsverfahren, bei denen keine ausreichend hohen Temperaturen auf den Klärschlamm einwirken oder keine Volltrocknung erfolgt, kann nicht von einem hygienisierten Produkt ausgegangen werden. Durch die s. g. Hochtemperaturpelletierung wird angestrebt, im Anschluss an die solare Klärschlamm-trocknung die Hygienisierung zu verbessern. Dieses Verfahren befindet sich im Versuchsstadium. PHILIPP et al. (2006) berichten, dass Fäkalikoliforme, Salmonellen, Enterobacteriaceae sowie Eier des Spulwurms *Ascaris suum* zuverlässig reduziert bzw. eliminiert werden konnten. Lediglich *Enterococcus faecalis* konnte nur um 4 Zehnerpotenzen vermindert werden.

3.14 Klärschlamm-desintegration

Die eingesetzten Verfahren zur Klärschlamm-desintegration werden als zusätzlicher Behandlungsschritt mit dem Ziel des weitergehenden Abbaues organischer Substanz durchgeführt (DICHTL et al. 1997, MÜLLER 1998). Bei diesen Verfahren wird die Zellwand der Mikroorganismen zerstört, um die Zellflüssigkeiten einem biologischen Abbau zugänglich zu machen (Tab. 11). Außerdem werden eine Verringerung der zu entsorgenden Klärschlammmenge, eine Verbesserung der Entwässerbarkeit, eine Verbesserung des C/N-Verhältnisses zur Denitrifikation sowie eine höhere Gasausbeute im Faultrum erreicht. Diesen Optimierungsmöglichkeiten steht die Erhöhung der Stickstofffracht im Schlammwasser, ein Mehrverbrauch an Konditionierungsmitteln und die für die Desintegration benötigte Energie sowie Kosten für den zusätzlichen Verfahrensschritt gegenüber (vgl. DICHTL et al. 1997, KÖPPKE 1999).

Im Hinblick auf eine mögliche Hygienisierungswirkung liegen für diese Verfahren noch keine belastbaren Erfahrungswerte vor. Untersuchungen von NIEDERWÖHRMEIER et al. (1988) zeigen, dass eine Entseuchung von Klärschlamm mit der Mikrowellenbehandlung im Prinzip erreicht werden kann; die Abtötung von Sporen ist allerdings nicht gewährleistet. Bedingt durch ungleichmäßige Durchwärmung können Kälteinseln auftreten, die eine verminderte Keimreduzierung bewirken.

Tab. 11: Übersicht der Verfahren zur Klärschlammdeintegration

physikalische Verfahren	mechanisch	z. B. Mühlen, Ultraschall, Lysatzentrifuge
	Thermisch	- Trocknen/Gefrieren - Temperaturbereiche von 80–200 °C; großtechnisch erprobte Verfahren: Cambi, Pondus (ehemals Limus)
	Elektrisch	
	Osmotisch	z. B. Dekompression
chemische Verfahren	Hydrolyse	alkalisch oder sauer
	Oxidation	Ozon, Nassoxydation (z. B. Loprox-Verfahren, Vertech-Verfahren)
	Detergentien	
biologische Verfahren	enzymatische Lyse	
	Autolyse	

3.15 Desinfektionsmittel

Für die Entseuchung von Klärschlamm wurden neben Kalk als Desinfektionsmittel auch Formaldehyd, Natronlauge und Peressigsäure geprüft (Tab. 12). Für einige Desinfektionsmittel liegen praktische Erfahrungen vor, z. T. ist eine geeignete Anwendungstechnik zu schaffen (BÖHM und NIEDERWÖHRMEIER 1988). Die Verfahren besitzen allerdings keine praktische Relevanz. Formaldehyd ist giftig und wird als Arbeitsstoffe mit „begründetem Verdacht auf krebserzeugendes Potenzial“ eingestuft.

Tab. 12: Einsatz von Desinfektionsmitteln zur Klärschlammhygienisierung

Desinfektionsmittel	Konzentration	Probleme	Sonstiges
Formaldehyd	0,5- bzw. 1 %ige Formalin-Lösung; (BÖHM und NIEDERWÖHRMEIER 1988)	Wiederverkeimung nach Ausgasung des Desinfektionsmittels, Fixierung an organische Substanz oder Polymerisation häufige Anwendung niedriger Wirkstoffkonzentrationen kann zur Resistenzbildung bei Bakterien führen	biologisch abbaubar; Desinfektion vor Faulung kanzerogene Wirkung Beeinträchtigung der Mikro- und Mesofauna des Bodens
Natronlauge	1 %ige Lösung NaOH (BÖHM und NIEDERWÖHRMEIER 1988)	pH-Wert >13 für mindestens 24 Stunden	Gesamtkeimzahl nach 15 min auf Wert um 10^5 KBE/ml vermindert Fäkalstreptokokken sinken auf Werte $< 10^3$ KBE/ml
Peressigsäure	Konzentration von 0,4 bis 0,5 %ige Lösung (BRITZIUS und BÖHM 1981)		

3.16 Zusammenfassende Darstellung

Eine Zusammenfassung der Ergebnisse aus den Kapiteln 1 bis 3 zeigt Tabelle 13. Dort sind die gängigen, und in Kapitel 3 beschriebenen Hygienisierungsverfahren mit dem durch sie erzielbaren Hygieneniveau (vgl. Kap. 1, Abb. 3 sowie Kap. 4, Tab. 14 bis 16) verknüpft. Die Wirkung gegenüber seuchenhygienischen Erregern wird anhand einzelner Literaturdaten beurteilt, die Wirkung gegenüber phytohygienischen Erregern ist in Anlehnung an STEINMÖLLER (2007) beschrieben.

Während durch die Langzeitlagerung von Klärschlamm und die Klärschlammvererdung eher das niedrigere Hygienisierungsniveau erreicht werden kann, sind mit chemischen Verfahren wie der Kalkung niedrige bis mittlere Niveaus erreichbar und mit thermischen Verfahren können mittlere bis hohe Hygienisierungsziele realisiert werden (BÖHM 2007, mündl. Mitteilung). Eine Zusammenstellung britischer und amerikanischer Vorschriften zu verschiedenen Hygienisierungsverfahren ist der Anhangtabelle 1 zu entnehmen. Beispiele für nationale Hygienevorgaben im europäischen Raum gibt Anhangtabelle 2. Dabei zeigt sich, dass Klärschlamm-anwendung oftmals verboten ist im Gemüsebau, bei Kartoffeln, Heilkräutern oder bei Beerenobst. Weiterhin sind Einschränkungen bei der Ausbringung von Klärschlamm insgesamt und der Ausbringungszeiten (d.h. Wartezeiten bei bestimmten Kulturen) festgelegt.

Tab.13: Beurteilung von Klärschlammbehandlungs- und Hygienisierungsverfahren nach seuchen- und phytohygienischen Gesichtspunkten

Verfahren	Hygiene niveau ¹⁾	Wirkung gegenüber seuchenhygienischen Erregern	Wirkung gegenüber phytopathogenen Erregern (nach STEINMÖLLER 2007)
A. für flüssige Klärschlämme			
Kalkung	2 mittel	Brantkalk wird zur Abtötung thermoresistenter Viren und Dauerorganen von Parasiten empfohlen (CEN 2006)	zur Behandlung mit Kalkhydrat und Brantkalk liegen bisher keine wissenschaftlichen Untersuchungen vor. Wirkung auf Dauersporen des Kartoffelkrebses wird als gering beurteilt (LANGERFELD 1984)
Aerob-thermophile Behandlung	2-3 mittel-hoch	in Kombination mit nachgeschalteter Faulung: Salmonellen nicht nachweisbar, Enterobacteriaceen vereinzelt nachweisbar (PHILIPP 1988B); ermittelte Temperaturen einer vorgegebenen Zeit im gesamten Substrat müssen eingehalten werden	Erfolg versprechend; ermittelte Temperaturen einer vorgegebenen Zeit im gesamten Substrat müssen eingehalten werden
Anaerob-thermophile Behandlung	2-3 mittel-hoch	Bei ordnungsgemäßigem Betrieb kann seuchenhygienisch unbedenklicher Klärschlamm produziert werden (PENDINGER 1990)	Erfolg versprechend; ermittelte Temperaturen einer vorgegebenen Zeit im gesamten Substrat müssen eingehalten werden
Pasteurisierung	3 hoch	ermittelte Temperaturen einer vorgegebenen Zeit im gesamten Substrat müssen eingehalten werden: Abtötung von Salmonellen: 70°C, 30 Min (PHILIPP 1981); Wirkung auf Viren unterschiedlich, z. B. wird <i>Bovines Parvovirus</i> nicht abgetötet (SAIER 1997)	hohe Wahrscheinlichkeit, dass Schadorganismen abgetötet werden
Langzeitlagerung mesophil/psychrophil	1 niedrig	Nach 5 Monaten Lagerzeit Salmonellen nicht nachweisbar, nach 11 Monaten Enteroviren N.N., Askarideneier zu 14 % überlebensfähig (HAIBLE 1988).	nicht ausreichend (keine hygienisierende Methode)
Klärschlammvererdung mesophil/psychrophil	1 niedrig	Nach mindestens 12 Monaten beschickungsfreiem Betrieb und 6 Monaten Nachlagerung niedriger Gehalt an Enterobacteriaceen, Fäkalstreptokokken und Coliformen Bakterien. Askarideneier weiterhin teilwei-	nicht ausreichend (keine hygienisierende Methode)

		se überlebensfähig (LANG 1988b)	
B. zur Klärschlammkonditionierung			
Kalkung	2 mittel	Kalkhydrat: hohe entseuchende Wirkung auf bakterielle und virale Krankheitserreger, nur bedingt auf Dauerformen von Wurmeiern und sporenbildende Bakterien (OSTERTAG 1988); Empfohlen wird 3-monatige Nachlagerung des entwässerten Klärschlammes (ATV 1988b)	zur Behandlung mit Kalkhydrat und Branntkalk liegen keine wissenschaftlichen Untersuchungen vor. Wirkung auf Dauersporen des Kartoffelkrebses wird als gering beurteilt (LANGERFELD 1984)
Thermische Konditionierung	3 hoch	bei ordnungsgemäßigem Betrieb und ausreichend hohen Temperaturen Hygienisierung (LANG 1988a)	ausreichende Hygienisierung (Überprüfung notwendig)
Klärschlamm-desintegration	?	es liegen keine ausreichenden Ergebnisse zur hygienisierenden Wirkung vor; Wirkung der Mikrowellenbehandlung: NIEDERWÖHRMEIER et al. (1988)	es liegen keine wissenschaftlichen Untersuchungen vor
C. für entwässerte Klärschlämme			
Kalkung	2 mittel	Kalkhydrat: hohe entseuchende Wirkung auf bakterielle und virale Krankheitserreger, nur bedingt auf Dauerformen von Wurmeiern und sporenbildende Bakterien (OSTERTAG 1988). Askarideneier werden nur bei gleichzeitiger Temperatur- und pH-Erhöhung abgetötet (OSTERTAG 1987).	zur Behandlung mit Kalkhydrat und Branntkalk liegen bisher keine wissenschaftlichen Untersuchungen vor. Wirkung auf Dauersporen des Kartoffelkrebses wird als gering beurteilt (LANGERFELD 1984)
Kompostierung	3 hoch	bei ordnungsgemäßigem Betrieb kann hygienische einwandfreies Produkt erzeugt werden (STRAUCH et al. 1980a, b)	i. d. R. werden im Laufe einer ordnungsgemäßen Kompostierung die meisten Schadorganismen abgetötet; Angaben zu Erregern sind sehr unterschiedlich (NOBLE und ROBERTS 2004)
Thermische (Voll-) Trocknung	3 hoch	Hochtemperaturtrocknung: ausreichende Hygienisierung; bei hohen TM-Gehalten außerdem Schutz vor Wiederverkeimung (KASSNER und SCHMUCKER 1990)	es liegen keine wissenschaftlichen Untersuchungen vor
Solare Trocknung/Hochtemperaturpelletierung (HTP)	1-2 niedrig- mittel	Niedertemperaturtrocknung/Solare Trocknung: nur bei zusätzlicher Behandlung ausreichendes Hygienisierungsniveau: z. B. kann anschließende Hochtemperaturpelletierung das Hygienisierungsniveau merklich steigern (PHILIPP et al. (2006)	es liegen keine wissenschaftlichen Untersuchungen vor

¹⁾ NACH ENTWURF CEN TC 308 GUIDE 10 (STAND 2007), BÖHM (2007)

4 Regelungen zur Hygienisierung von Klärschlamm

4.1 Empfehlungen, Normen, Gütesicherung

4.1.1 Empfehlungen

4.1.1.1 CEN

Die europäischen Staaten besitzen mit dem CEN (Comité Européen de Normalisation) ein gemeinsames Normungskomitee. Seit 1985 sollen EU-Richtlinien nur grundlegende Anforderungen enthalten und durch europäische Normen ergänzt werden. Die Mitgliedsorganisationen sind zur unveränderten Übernahme von CEN-Normen und zur Zurückziehung der entsprechenden nationalen Normen verpflichtet (WUNDER 1998).

Zum Thema „Charakterisierung von Schlämmen - Gute fachliche Praxis bei der Verwendung von Schlämmen“ wurde von der Arbeitsgruppe CEN/TC 308 ein Arbeitsdokument erstellt, welches als „Technischer Bericht“ erscheinen soll (ein Zwischenstand wurde als Version 6 im Oktober 2006 verabschiedet, das Dokument ist aber weiter in der Bearbeitung).

Zur Qualitätssicherung von Klärschlämmen wird als zentrales Element des aktuellen Entwurfs des CEN-Arbeitspapiers TC 308 das HACCP (Hazards analysis critical control point)-Konzept herangezogen. Dieses System wird in der Lebensmittelindustrie eingesetzt und hat sich dort zur Sicherung der Produktqualität bewährt. Bei Einsatz im Abwasserbereich zur Absicherung der hygienischen Eigenschaften wird zunächst die Kläranlage einer Risikoanalyse unterzogen und es werden für den Klärschlamm relevante Einflussgrößen auf dessen Hygienestatus definiert. Diese s. g. "kritischen Kontrollpunkte", also die für die Hygienisierung des Klärschlammes relevanten Prozessparameter, insbesondere

- die Temperatur
- die Einwirkzeit
- der pH-Wert
- der TM-Gehalt
- die Konzentration oder Einsatzmenge von Betriebsstoffen

bestimmen die Klärschlammqualität. Über s. g. „Validierungsverfahren“, wie z. B. die „Prozessprüfung“ der E-BioAbfV, müssen diese physikalischen Einflussgrößen auf ihre Wirkung hin überprüft werden. Bei gut dokumentierten Hygienisierungskonzepten können Literaturwerte das aufwändige Validierungsverfahren ersetzen. Einmal dergestalt geeicht, führt die Anwendung des HACCP-Konzeptes zu einem qualitätsgesicherten Klärschlamm. Grundsätzlich werden in dem CEN-Entwurf TC 308 unterschiedliche Hygieneniveaus bzw. Hygienisierungsziele für Klärschlämme definiert (Tab. 14).

Das Hygienierisiko von Klärschlamm kann nach CEN TC 308 durch zwei Strategien eingedämmt werden (Tab. 15):

- Entweder der Klärschlamm wird einer hygienisierenden Behandlung unterzogen, sodass die Krankheitserreger abgetötet oder dezimiert werden
- oder zwischen Klärschlammapplikation und Anbau bzw. Ernte ist eine Mindestwartezeit einzuhalten.

Eine weitere Möglichkeit stellt zudem die direkte Einarbeitung oder Einbringung von Klärschlamm dar (vgl. E-DüMV 2007).

Tab. 14: Hygieneniveau für Klärschlämme (ENTWURF CEN TC 308 GUIDE 10, Stand 2007)

Hygieneniveau	Inaktivierte Erreger	Überlebende Erreger
1 niedrig	vegetative Bakterien Viren mit mittlerer Widerstandsfähigkeit	parasitäre Stadien Viren mit hoher Widerstandsfähigkeit
2 mittel	vegetative Bakterien Viren mit mittlerer Widerstandsfähigkeit infektiöse parasitäre Stadien	Viren mit hoher Widerstandsfähigkeit Sporen von Sporenbildnern
3 hoch	vegetative Bakterien Viren mit mittlerer und starker Widerstandsfähigkeit infektiöse parasitäre Stadien	aerobe und anaerobe Sporenbildner

Hinweis: pathogene Prionen sind in dieser Betrachtung nicht berücksichtigt. Sofern diese im Klärschlamm enthalten sind, müssen andere Behandlungsmethoden als die genannten genutzt werden.

Tab. 15: Schlammnutzung nach verschiedenen Hygieneniveaus (ENTWURF CEN TC 308 GUIDE 10, Stand 2007)

Hygieneniveau	Ausbringung*	ergänzende Empfehlungen
1 niedrig	• Ackerland	
	• Obstbaumkulturen und Weinbau	
	• Obst- und Gemüsebau, Erntegut mit Bodenkontakt ist nicht zum Rohverzehr geeignet	Ausbringung nur vor der Saat oder vor der Pflanzung innerhalb der selben Wachstumsperiode
2 mittel	• Weideland, Futterbau	keine Ernte oder Beweidung innerhalb von 6 Wochen nach der Klärschlammausbringung
	• Baumplantagen, Wiederaufforstungsflächen, Wälder • Landgewinnung • Parks, Grünflächen, Stadtgärten, alle städtischen Flächen, zu der öffentlicher Zugang besteht	nur gut stabilisierter und geruchloser Schlamm
3 hoch	• Obst- und Gemüsebau, Erntegut mit Bodenkontakt ist auch zum Rohverzehr geeignet	Ausbringung nur vor der Saat oder vor der Pflanzung

*Anmerkung: Nach deutschem Recht (AbfKlärV 1992) ist derzeit keine Ausbringung von Klärschlamm auf Obst- und Gemüseflächen zulässig.

Die unterschiedlichen Hygieneniveaus der Klärschlämme sollen mit jeweils hierfür geeigneten Testorganismen nachgewiesen werden (Tab. 16). Diese sind in s. g. Keimträgern mit dem zu hygienisierenden Substrat in die jeweilige Behandlungseinheit einzubringen. Nach Abschluss des Hygienisierungsprozesses ist die Überlebensrate der Indikatoren zu ermitteln.

Tab. 16: Testorganismen zur Validierung von Behandlungsprozessen und zur Hygieneniveauabsicherung (ENTWURF CEN TC 308 GUIDE 10, Stand 2007); Keimträgermethode)

Hygieneniveau	empfohlener Testorganismus	minimale Reduktion
1 niedrig	zur biologischen und chemischen Behandlung: <i>Salmonella senftenberg</i> W 775, H ₂ S-negativ zur thermischen oder physikalischen Behandlung: <i>Enterococcus faecalis</i> ATCC 2912*	mindestens 5 log für alle Testorganismen
2 mittel	zur chemischen Behandlung: <i>Salmonella senftenberg</i> W 775, H ₂ S negativ oder Eier von <i>Ascaris suum</i> zur biotechnologischen und thermischen oder andere physikalischen Behandlung: <i>Enterococcus faecalis</i> ATCC 2912*	mindestens 5 log für <i>Salmonella senftenberg</i> und <i>Enterococcus faecalis</i>
3 hoch	zur biotechnologischen und chemischen Behandlung: <i>Bovine parvovirus</i> Haden zur thermischen oder anderen physikalischen Behandlung: <i>Bovine parvovirus</i> Haden oder Coliphage T1*	mindestens 3 log für <i>Bovine parvovirus</i> mindestens 5 log für Coliphage T1

*Nach einer Reduktion der einheimischen Bakterien und/oder Viren mit Input-Outputanalyse können außerdem die Parameter „Enterococci“ oder „Coliphagen“ genutzt werden.

4.1.1.2 EFSA

Die EFSA (European Food Safety Authority) hat zu verschiedenen biologischen Behandlungsmethoden für Düngemittel (Wirtschaftsdünger tierischer Herkunft, Gärreste und Komposte, die Nebenprodukte tierischer Herkunft enthalten) Stellungnahmen veröffentlicht (EFSA 2005a, b), wonach mindestens die Behandlungsstandards der Verordnung (EU) Nr. 1774/2002 einzuhalten sind. Auf das HACCP-Konzept wird als ein bewährtes Konzept zur Prozessüberwachung verwiesen. Ausdrücklich wird betont, dass aufgrund divergierender Aussagen zur keimreduzierenden Wirkung von mesophilen anaeroben Verfahren diese nicht zur Hygienisierung von Kategorie 3-Material nach Verordnung EU Nr. 1774/2002 geeignet sind (EFSA 2007).

Zur Klärschlammbehandlung existieren keine EFSA-Veröffentlichungen.

4.1.2 Normung

Zur Klärschlammbehandlung und -entsorgung gibt es auf EU-Ebene keine Normen. In dem zuständigen Gremium TC 308 des CEN wurde von der strengen Regelungswirkung einer Norm Abstand genommen, da es zwischen den Ländern in der praktischen Umsetzung der unterschiedlichen Entsorgungsverfahren große Unterschiede gab. Da man befürchtete, dass es durch eine Normung zu einer deutlichen Einschränkung von Verfahren und Techniken kommen würde, wurden anstelle der Normen die Technischen Berichte („technical reports“) verfasst. Dieses Vorgehen wurde für die Themen Klärschlammmentwässerung, -trocknung und -hygienisierung beibehalten, da auch hier der Nachteil befürchtet wurde, dass Verfahren für bestimmte Zeit festgeschrieben und damit die technische Entwicklung gehemmt würde (F. SCHMITT 2007, mündl. Mitteilung).

4.1.3 Güte- bzw. Qualitätssicherungssysteme

Mit dem Ziel der Vermarktungs- bzw. Akzeptanzförderung sind in Deutschland verschiedene Güte- bzw. Qualitätssicherungssysteme für die landbauliche Klärschlammverwertung entwickelt worden (Tab. 17). Diese gehen teilweise über die qualitativen Anforderungen des Gesetzgebers an Klärschlämme hinaus und/oder sie stellen eine umfassendere Kontrolle der

Klärschlammqualität bzw. -ausbringung sicher. Klärschlämme bzw. Kläranlagen, die bestimmte Anforderungen erfüllen, werden zertifiziert.

Tab. 17: Güte- bzw. Qualitätssicherungssysteme (Stand: Juli 2007)

Träger	Qualitätssicherung Land- bauliche Abfallverwertung (VDLUFA-QLA GmbH)	Bundesgütegemein- schaft Serodünger e.V. (BQSD)	Bundesgütegemein- schaft Kompost e.V. (BGK)
Mitgliedsinstitutionen/Gesellschafter des Trägers	Verband der landwirtschaftlichen Untersuchungs- und Forschungsanstalten (VDLUFA) e. V., Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (DWA) e. V.	insbes. landwirtschaftliche Maschinenringe und Lohnunternehmen	insbes. Betreiber von Kompostierungs- und Biogasanlagen
zertifizierte Produkte	Klärschlamm Gärprodukte Kompost Filtrationskieselgur Champignon-Kompost	Klärschlamm Klärschlammkompost Kompost	Klärschlammkomposte, Klärschlammmerden, Kompost, Gärprodukte
Zertifizierung	Ausgangsstoffe (I) Endprodukt (II) Anwendungskonzeption (III) (Auditierung durch unabhängige Gutachter (I und III), Analytik durch notifizierte Labore (II))	Qualitätszeichen für das Endprodukt Überwachungszeichen für die landw. Verwertung (Vergabe durch externe Zertifizierungsstelle)	Endprodukt
Differenzierung der Gütekriterien f. d. Endprodukt	Bei Bioabfällen in drei Qualitätsstufen: Gold, Silber, Bronze ¹⁾ Bei Klärschlämmen drei Hygienestandards ²⁾	keine	keine
Hygienische Anforderungen an den Behandlungsprozess	BioAbfälle nach Vorgaben der BioAbfV Klärschlämme mit hohem und höherem Standard: indirekte Prozessprüfung und Endproduktkontrolle auf Salmonellen	nach Vorgaben der BioAbV und AbfKlärV	Prozessprüfung und Prozessüberwachung in Anlehnung an BioAbV
Hygienische Anforderungen an das Endprodukt	Bioabfälle: Produktprüfung nach BioAbfV sowie weitere Grenzwerte Klärschlamm hohem oder höherem Standards: Reduktion <i>Salmonella senftenberg</i> um 5 Zehnerpotenzen		Prüfungen der hygienisierten Bioabfälle nach BioAbfV
Hygienische Anforderungen an d. Ausbringungsverfahren	direkte Einbringung oder Einarbeitung (vgl. Tab. 18)	bodennahe Ausbringung, Einarbeitung, Einhaltung von Ausbringungszeiten	keine

1) QLA, Bioabfälle: Qualitätsstufe u.a. abhängig von Gleichförmigkeit der Nährstoffe, Schwermetallgehalten.

2) QLA, Klärschlämme, Einteilung in:

- konventionell stabilisierte Schlämme (simultan aerobe Stabilisierung, mesophil anaerobe Faulung): dürfen auf Ackerflächen ausgebracht werden, sind direkt in den Boden einzubringen oder direkt nach der Ausbringung in den Boden einzuarbeiten.
- nach hohem Standard entseuchte Schlämme (aerob thermophile Stabilisierung (>55°C, 20 Tage), anaerob thermophile Faulung (> 53 °C, 20 Tage), Kalkkonditionierung (pH-Wert >12, 24 h) müssen eine Reduktion von *S. senftenberg* W775 um mindestens 5 Zehnerpotenzen nachweisen.
- nach höherem Standard entseuchte Schlämme müssen eine Reduktion von *S. senftenberg* W775 um mindestens 5 Zehnerpotenzen und die Embryonierungsrate von exponierten *Ascaris Suum*-Eiern um 99,9 % nachweisen.

Das System der „Qualitätssicherung Landbauliche Abfallverwertung GmbH“ (QLA, gegründet 2004) umfasst die drei Kategorien „Ausgangsstoffe“, „Endprodukte“ und „Anwendungskonzeption“, es müssen mindestens die Kategorien „Ausgangsstoffe“ und „Endprodukte“ zertifiziert werden. Bestandteil der Zertifizierung der „Ausgangsstoffe“ sind Maßnahmen der Indirekteinleiterüberwachung, der Kontrolle der direkt angelieferten Stoffe (z. B. Fettabscheider und Abwasser/ Schlämme aus Kleinkläranlagen) sowie der auf der Kläranlage eingesetzten Abwasser- und Klärschlammbehandlungsmittel.

Ebenso wurden Kriterien zur Beurteilung der Qualität der „Endprodukte“, also behandelte Klärschlämme, Klärschlammkomposte und Klärschlammgemische festgelegt, die u. a. hinsichtlich der Grenzwerte weit über die Vorgaben der Klärschlammverordnung hinausgehen. Es werden bei Klärschlämmen drei Hygienestandards unterschieden, in Abhängigkeit hiervon sind unterschiedliche Vorgaben an die Anwendung definiert (Tab. 18). Diese Differenzierung der Anwendungsbereiche entspricht im Wesentlichen einem Konzept des 3. Arbeitspapiers zur Novellierung der EU-Klärschlamm-Richtlinie (EUROPEAN COMMISSION 2000). Die QLA GmbH beabsichtigt, bei Umsetzung dieser Vorgaben in deutsches Recht ihr Qualitätssicherungssystem daran anzupassen.

Die Kategorie „Anwendungskonzeption“ definiert Qualitätsstandards bei der Verwertung der Klärschlämme. Diese umfassen u. a. Vorgaben an Ausbringungszeitpunkt, Applikationstechnik, Feststellung des Düngebedarfs, Dokumentation und Beratung. Für konventionell stabilisierte Schlämme ist nur die direkte Einarbeitung/Einbringung erlaubt, für Klärschlämme mit hohem oder höherem Hygienestandard sind erweiterte Anwendungsbereiche zulässig

Tab. 18: Vorgeschlagene Anwendungsbereiche für qualitätsgesicherte Klärschlämme entsprechend der hygienischen Eigenschaften (QLA 2006)

Anwendungsbe- reich	konventionell stabili- sierte Schlämme	nach hohem Stan- dard entseuchte Schlämme (Keimre- duzierung)	nach höherem Stan- dard entseuchte Schlämme (Keim- inaktivierung)*
Grünland, Weideland	nein	nein	ja
Feldfutterpflanzen	nein	ja, nur vor Aussaat und bei unverzüglicher Einarbeitung oder Eindringen	ja
Ackerland	ja, nur bei unverzüglicher Einarbeitung oder direkter Einbringung	ja, nur bei unverzüglicher Einarbeitung/direkter Einbringung oder als Kopfdüngung	ja
Am Boden wachsendes Gemüse und Obst (roh)	nein	nein	ja
Obstbäume, Weinbau, Anpflanzungen von Bäumen, Wiederaufforstung	nein	nein	ja
Parks, Grünflächen, Stadtgärten, öffentlich zugängliche städtische Bereiche	nein	nein	ja, nur gut stabilisierte und geruchlose Schlämme
Wälder	nein	nein	nein
Rekultivierungsflächen	ja, 10 Mon nach der Ausbringung kein öffentlicher Zugang	ja, 10 Mon nach der Ausbringung kein öffentlicher Zugang	ja

*Anmerkung: Die hier gemachten Angaben beziehen sich auf das 3. Arbeitspapier zur Novellierung der EU-Klärschlammrichtlinie. Eine Umsetzung im Rahmen der Qualitätssicherung kann erst erfolgen, wenn die Vorgaben in nationales Recht umgesetzt werden.

Bei der Bundes-Qualitätsgemeinschaft Sero-Dünger e. V. (BQSD, gegründet 1991) gibt es ein mehrstufiges Qualitätssicherungssystem mit zwei Qualitätszeichen für Klärschlamm. Für das Überwachungszeichen „Verwertung“ werden über den durch die AbfKlärV vorgegebenen Rahmen hinaus Dokumentationen gefordert, um die Transparenz der einzelnen Maßnahmen

zu erhöhen und so eine bessere Akzeptanz bei den Klärschlammabnehmern zu erreichen. Die Anforderungen an den Behandlungsprozess entsprechen denen der AbfKlärV. Hygienische Anforderungen an das Endprodukt werden nicht festgeschrieben, allerdings ist für die Ausbringung von nicht hygienisiertem Klärschlamm die bodennahe Ausbringung und die Einarbeitung vorgesehen.

Die Bundesgemeinschaft Kompost e. V. (BGK) hat zusammen mit dem Verein zur Gütesicherung von Veredlungsprodukten aus Abwasserschlämmen e. V. (VGVA) die Qualitätssicherung für Veredlungsprodukte aus Abwasserschläm und damit für Klärschlammkomposte und Klärschlammern entwickelt und bietet seit 2003 das RAL-Gütezeichen an. Der Ansatz, nur schadstoffarme Klärschlämme zur Herstellung von Komposten/Erden zu verwenden, soll eine gute Qualität der Produkte sicherstellen. Es werden Analysen über das gesetzlich geforderte Maß hinaus durchgeführt, eine Hygienisierung der Klärschlammprodukte wird gewährleistet. Diese Qualitätssicherung bezieht allerdings Verwertungsaspekte der beurteilten Stoffe nicht mit ein.

4.2 Rechtliche Regelungen zur Hygiene von Klärschlamm

Auf EU-, Bundes- und Landesebene sind Rechtsvorgaben für die landbauliche Klärschlammverwertung erlassen worden. Außerdem gelten im Abfallrecht für Bioabfälle und im Hygienerecht für tierische Nebenprodukte Vorgaben, deren Übertragbarkeit für Klärschlämme geprüft werden kann (Tab. 19).

Tab. 19: Rechtliche Regelungen, die Vorgaben für Klärschlämme und andere Düngemittel enthalten sowie Regelungen mit Schnittstellencharakter

	Hygienerecht	Düngemittelrecht	Abfallrecht
EU	Verordnung Nr. 1774/2002	Verordnung Nr. 2003/2003	Klärschlamm-Rili Abfallrahmen-Rili Bodenschutzstrategie
Bund	TierNebG TierNebV	DüMG DüV (E-) DüMV	KrW-/AbfG (E-) BioabfV AbfKlärV
Land	Verwaltungsvorschriften zum		
	E-Vollzug TierNebG	Vollzug DüV	Vollzug BioAbfV Vollzug AbfKlärV

4.2.1 EU-Recht

Die EU-Rechtsetzung (Verordnungen, Richtlinien, Entscheidungen) besitzt grundsätzlich Vorrang vor nationalem Recht, wobei EU-Verordnungen unmittelbar gelten, Richtlinien einer Umsetzung in nationales Recht bedürfen.

Für die EU-Klärschlamm-Richtlinie 86/278/EWG (1986) sind schon mehrere Novellierungsentwürfe vorgelegt worden; die Arbeiten ruhen bis zur Verabschiedung einer EU-Bodenschutzstrategie, die sich auch in Bezug auf den Einsatz von Klärschlamm und Bioabfall als Düngemittel und Bodenhilfsstoff positionieren wird.

Die EU-Düngemittelverordnung 2003/2003 regelt europaweit in den Verkehr gebrachte Düngemittel. Ausgenommen hiervon sind organische Düngemittel, sodass Klärschlamm dieser Verordnung nicht unterliegt.

Die Verordnung (EG) Nr. 1774/2002 beinhaltet Hygienevorgaben für nicht für den menschlichen Verzehr bestimmte tierische Nebenprodukte. Ziel ist, als nicht genussaugliche geltende Erzeugnisse tierischen Ursprungs nicht in die Nahrungskette gelangen zu lassen. Die Verordnung gilt nicht für Klärschlämme, ihre Standards können aber vergleichsweise herangezogen werden.

4.2.2 Bundesrecht

Auf der Bundesebene wird Klärschlamm im Abfall- und Düngemittelrecht durch Gesetze und diese umsetzende Verordnungen geregelt. Schnittstellen existieren außerdem mit dem Hygienerecht (Tab. 19). Zur geltenden Klärschlammverordnung wurden außerdem Verwaltungsvorschriften zum Vollzug der AbfKlärV verabschiedet. Zur geltenden Bioabfallverordnung wurden von einer Bund-Länder-Arbeitsgruppe „Hinweise zum Vollzug der BioAbfV“ erstellt. Zur kürzlich novellierten Düngeverordnung sind bislang keine neuen Verwaltungsvorschriften der Länder verabschiedet worden.

4.2.2.1 Abfallrecht

Die Klärschlammverordnung (AbfKlärV 1992) soll gegenwärtig novelliert werden. Ein Eckpunktepapier zur Neufassung der Verordnung wurde vom BMU herausgegeben (BERGS 2007) und auf einer Expertentagung im Dezember 2006 diskutiert. Das Eckpunktepapier, die wissenschaftlichen Beiträge sowie Stellungnahmen von Verbänden zur geplanten Novellierung sind in einem Tagungsband zusammengefasst (KTBL 2007).

Als weiterer, dem Abfallrecht unterstehender und zur Düngung und Bodenverbesserung eingesetzter Stoff ist der Bioabfall mit der Bioabfallverordnung (BioAbfV 1998) reglementiert. Bereits in dieser geltenden Fassung sind umfassende Hygienevorgaben für Bioabfälle gemacht, die landbaulich eingesetzt werden sollen. Diese Vorgaben sollen insbesondere für anaerob behandelte Abfälle angepasst werden (Arbeitsentwurf BioAbfV, Stand Feb. 2007). Der in der Novelle der BioAbfV vorgesehene Prüfungsumfang zum Nachweis der seuchen- und phytohygienischen Unbedenklichkeit bei Kompostierungs- und Vergärungsanlagen ist in Anhangtabelle 4 dargestellt.

4.2.2.2 Düngemittelrecht

Die Düngeverordnung (DüV 2007) gilt auch für die Anwendung von Klärschlamm. Allerdings sind hier bislang keine speziellen Regelungen für die Klärschlammanwendung getroffen worden. Anwendungsbeschränkungen aufgrund von hygienischen Eigenschaften wurden für Düngemittel ausgesprochen, die Knochenmehl, Fleischknochenmehl sowie Fleischmehl enthalten (§ 8 Abs. 2).

Die Düngemittelverordnung (DüMV 2003) gilt generell für das Inverkehrbringen von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Pflanzenhilfsmittel und Kultursubstraten. Klärschlamm wird sowohl als Ausgangsstoff zur Herstellung dieser Stoffe als auch als in den Verkehr zu bringender Stoff geregelt. Im Entwurf der novellierten Düngemittelverordnung (E-DüMV, Stand April 2007) werden erstmals auch konkrete Hygienevorgaben (§ 5) ausgesprochen. Düngemittel, die in den Verkehr gebracht werden, dürfen demnach in 50 g Probenmaterial keine Salmonellen enthalten. Außerdem dürfen keine Ausgangsstoffe pflanzlichen Ursprungs eingesetzt werden, die widerstandsfähige Schadorganismen enthalten.

Alternativ können Düngemittel auch sofort in den Boden eingebracht oder eingearbeitet werden. Bei Schnitt- und Weidenutzung ist eine Wartezeit von 6 Wochen einzuhalten und es sind Mindestabstände zu „sensiblen“ Bereichen, wie Kinderspielplätzen, einzuhalten. Für Klärschlämme gilt zusätzlich, dass dieser nicht aus Kläranlagen stammen darf, in die Abwässer aus Schlachthöfen eingeleitet werden und es ist eine regionale Klärschlammverwertung angestrebt.

Für Düngemittel, die nach DüMV zugelassene, nach Verordnung (EU) Nr. 1774/2002 hygienisierte tierische Nebenprodukte außer Wirtschaftsdüngern tierischer Herkunft enthalten, gelten außerdem nach Anlage 2 Tabelle 7.2, Spalte 3 u. a. folgende Einschränkungen:

- sofortige Einarbeitung
- keine Anwendung auf Futterbau- oder Grünlandflächen

- bei Anwendung auf sonstigen Grünflächen, Zier- und Sportrasen nach Aufbringung wässern.

4.2.2.3 Hygienerecht

Das Tierische Nebenprodukte-Beseitigungsgesetz (TierNebG 2004) sowie die Tierische Nebenprodukte-Beseitigungsverordnung (TierNebV 2006) setzen die direkt wirksame Verordnung (EG) Nr. 1774/2002 mit „Hygienevorgaben für nicht für den menschlichen Verzehr bestimmte tierische Nebenprodukte“ in nationales Recht um.

5 Vergleichende Bewertung rechtlicher Vorgaben

Im folgenden Kapitel werden die oben aufgeführten Rechtsvorgaben hinsichtlich verschiedener Kriterien verglichen:

- Geltungsbereich der Rechtsvorgabe
- Anwendungsverbote und -beschränkungen
- Zugelassene Hygienisierungsverfahren und vorgeschriebene Prüfmethoden
- Seuchenhygienische Prüforganismen für die Prozess- und Produktprüfung
- Phytohygienische Prüforganismen für die Prozess- und Produktprüfung

5.1 Geltungsbereich

Die EU-Klärschlammrichtlinie (86/278/EWG) regelt die Verwendung von Klärschlamm in der Landwirtschaft (Tab. 20).

Die AbfKlärV gilt für landwirtschaftlich und gärtnerisch genutzte Böden. Der Landschaftsbau und der Forst bleiben unberücksichtigt (über § 12 BBodSchV wird allerdings der Anwendungsbereich der AbfKlärV auf andere Bereiche ausgeweitet).

Die BioAbfV als weitere Regelung des Abfallrechts gilt demgegenüber für landwirtschaftlich, gärtnerisch und forstwirtschaftlich genutzte Böden. Nach Inkrafttreten der direkt wirksamen Verordnung (EG) Nr. 1774/2002 sind nicht für den menschlichen Verzehr bestimmte tierische Nebenprodukte von den Vorschriften der BioAbfV ausgenommen. Dies gilt nicht für Küchen- und Speisereste aus privaten Haushalten, den s. g. „Abfällen aus der Biotonne“.

Gemäß DüV dürfen nur solche Stoffe auf landwirtschaftlich genutzten Flächen aufgebracht werden, die den Vorgaben der DüMV entsprechen.

Die Verordnung (EG) Nr. 1774/2002 regelt die gesamte Handhabung der nicht für den menschlichen Verzehr bestimmten tierischen Nebenprodukte einschließlich des Inverkehrbringens sowie die Aufbringung auf Böden. Ergänzend wird in Verordnung (EG) Nr. 181/2006 vom 1.2.2006 festgelegt, dass für die Herstellung organischer Düngemittel Material der Kategorie 2 und 3 genutzt werden darf. Außerdem werden Mitgliedstaaten ermächtigt, auf der Basis von Artikel 33 der Verordnung (EG) Nr. 1774/2002 schärfere Regeln zu erlassen.

Tab. 20: Geltungsbereich, Regelungsgegenstand und Abgrenzung zu anderen Rechtsbereichen verschiedener Rechtsvorgaben

	Geltungsbereich	Regelungsgegenstand	Abgrenzung zu anderen Rechtsbereichen
Abfallrecht			
EU-Klärschlamm-Richtlinie (1986)	Verwendung von Klärschlamm in der Landwirtschaft	Klärschlamm	
AbfKlärV (1992)	• landwirtschaftlich • gärtnerisch genutzte Böden	• Klärschlamm • Klärschlammkomposte • Klärschlammgemische	Vorschriften des Düngemittelrechts bleiben unberührt
BioAbfV (1998) und E-BioAbfV (Arbeitspapier Stand Feb. 2007)	• landwirtschaftlich • forstwirtschaftlich • gärtnerisch genutzte Böden	• unbehandelte Bioabfälle • behandelte Bioabfälle • Gemische	• Vorschriften des Düngemittelrechts und Pflanzenschutzrechts bleiben unberührt • BioAbfV gilt nicht, soweit AbfKlärV Anwendung findet • BioAbfV gilt nicht für tierische Nebenprodukte mit Ausnahme von „Abfällen aus der Biotonne“
Düngemittelrecht			
DüV (2007)	• landwirtschaftlich genutzte Flächen • andere Flächen, sofern es die Verordnung eindeutig bestimmt	• Düngemittel • Bodenhilfsstoffe • Kultursubstrate • Pflanzenhilfsmittel	
DüMV (2003)	keine	Inverkehrbringen von • EG-Düngemitteln • Nicht-EG-Düngem. • Bodenhilfsstoffen • Kultursubstraten • Pflanzenhilfsmitteln	• eingesetzte Klärschlämme müssen der AbfKlärV entsprechen • eingesetzte Bioabfälle müssen der BioAbfV entsprechen
E-DüMV (Stand April 2007)	keine	Inverkehrbringen von • Nicht-EG-Düngem • Bodenhilfsstoffen • Kultursubstraten • Pflanzenhilfsmitteln	• sind in AbfKlärV oder BioAbfV gleichwertige Schadstoffgrenzwerte getroffen sind Klärschlämme und Bioabfälle von den entsprechenden Vorgaben der DüMV ausgenommen
Hygienerecht			
Verordnung (EG) Nr. 1774/2002 (Hygienevorschriften für nicht für den menschl. Verzehr bestimmte tierische Nebenprodukte)	Aufbringung auf Böden	• Abholung, Sammlung, Beförderung, Lagerung, Behandlung, Verarbeitung, Verwendung und Beseitigung tierischer Nebenprodukte • Inverkehrbringen (Ausfuhr, Durchfuhr) tierischer Nebenprodukte	• Stoffe im Abwasser von Tierkörperbeseitigungsanlagen und Schlachthöfen, die das Feststoffrückhaltesystem mit einer Maschenweite von 6 mm passieren, unterliegen nicht der Verordnung • Veterinärvorschriften zur Tilgung und Überwachung von Tierseuchen
TierNebV (2006)	Vorschriften der Verordnung (EG) Nr. 1774/2002	Vorschriften der Verordnung (EG) Nr. 1774/2002	• „Abfälle aus der Biotonne“ (= Küchen- und Speiseabfälle aus privaten Haushaltungen) unterstehen der BioAbfV • Stoffe im Abwasser von Tierkörperbeseitigungsanlagen und Schlachthöfen, die das Feststoffrückhaltesystem mit einer Maschenweite von 6 mm passieren, unterliegen der AbfKlärV

5.2 Anwendungsverbote und -beschränkungen

Tabelle 21 zeigt, aus welchem Ziel der jeweiligen Rechtsvorschrift sich die Aufbringungsverbote und -beschränkungen herleiten lassen. Neben den eigentlichen Verboten und Beschränkungen sind weitere, die hygienischen Eigenschaften beeinflussende Vorgaben aufgeführt.

So sehen Düngemittelrecht und Hygienerecht jeweils unterschiedliche Siebmaschenweiten vor, die bei Schlachthanlagen und sonstigen Verarbeitern tierischer Nebenprodukte vorzusehen ist, sofern sie Abwasser als Indirekteinleiter der Kläranlage zuführen. Demnach können nach EU-Recht tierische Nebenprodukte mit einer Partikelgröße von 6 mm im der Kläranlage zugeführten Abwasser enthalten sein. Die Behandlung dieser tierischen Stoffe, die auch in den Klärschlamm gelangen, unterliegt der AbfKlärV. Im Düngemittelrecht ist vorgesehen, die zugelassene Siebmaschenweite aus Hygienegesichtspunkten auf 2 mm zu verringern.

Tab. 21: Aufbringungsverbote und -beschränkungen verschiedener Rechtsvorgaben

	Ziel der Rechtsvorgabe	Aufbringungsverbote und -beschränkungen	weitere Vorgaben
Abfallrecht			
EU-Kärschlamm-Richtlinie (1986)	Vermeidung schädlicher Auswirkungen auf Böden, Vegetation, Tiere und Menschen	Beschränkungen • Weiden oder Futteranbauflächen (Wartezeit ≥ 3 Wochen) • Obst- und Gemüsekulturen: während der Vegetationszeit, ausgenommen Obstbaumkulturen • Obst- und Gemüsekulturen: 10 Mon bei Erntegut mit Bodenkontakt und Rohverzehr	
AbfKlärV (1992)	Wohl der Allgemeinheit darf nicht beeinträchtigt werden	Verbote • forstwirtschaftlich genutzte Böden • Gemüse- und Obstbauflächen • Dauergrünlandflächen • Wasserschutzzone I und II • Uferrandstreifen Beschränkungen • Feldgemüsebau • Anbau von Feldfutter, Zuckerrüben (bei Rübenblattverfütterung), Silo- und Grünmais	
BioAbfV (1998) E-BioAbfV (Stand Februar 2007)	seuchen- und phytohygienische Unbedenklichkeit: d. h. • keine Beeinträchtigung der Gesundheit von Mensch und Tier durch Freisetzung oder Übertragung von Krankheiten, • keine Schäden an Pflanzen, Pflanzenerzeugnissen oder Böden durch die Verbreitung von Schadorganismen	Verbote (E-BioAbfV) Aufbringung Bioabfällen oder Gemischen, die durch Pasteurisierung und anaerobe Behandlung hygienisiert worden sind, auf • Tabak- und Tomatenanbauflächen im Freiland • Gemüse- und Zierpflanzenanbauflächen Beschränkungen • forstwirtschaftlich genutzte Böden (Ausnahmegenehmigung) • Feldgemüse- und Feldfruchtanbauflächen (Einarbeitung) • Grünlandflächen (nur besonders benannte Bioabfälle sowie Gemische zulässig); E-BioAbfV: ≥ 3 Wochen Wartezeit zur Futternutzung	E-BioAbfV: Eine biologisch stabilisierende Behandlung von Bioabfällen ist vor deren Verwertung durchzuführen (Minimierung von Geruchsbelästigungen)
Düngemittelrecht			
E-DüMV (Stand April 2007)	Inverkehrbringen nur wenn bei sachgerechter Lagerung	Beschränkungen für nicht hygienisierte Düngemittel gilt: • direkte Einbringung oder Einarbeitung	Klärschlämme dürfen nur verwendet werden, wenn im

	und Anwendung keine Risiken durch mögliche Krankheitserreger, Toxine und Schaderreger im Produkt für die Fruchtbarkeit des Bodens, Gesundheit von Menschen, Haustieren und Nutzpflanzen besteht und der Naturhaushalt nicht gefährdet wird	tung • bei Futternutzung ≥ 6 Wochen Wartezeit • Mindestabstand zu Sportanlagen, Kinderspielflächen und Parkanlagen sowie dem Rand der geschlossenen Wohnbebauung Für hygienisierte Düngemittel, die tierische Nebenprodukte nach Verordnung (EG) Nr. 1774/2002 außer Wirtschaftsdüngern tierischer Herkunft enthalten, gilt: • sofortige Einarbeitung • keine Anwendung auf Futterbau- oder Grünlandflächen • bei Anwendung auf sonstigen Grünflächen, Zier- und Sportrasen nach Aufbringung wässern	Einzugsbereich Einleitungen aus Tierkörperbeseitigungsanlagen und Schlachthöfen über ein Feststoffrückhaltesystem mit einer Maschenweite von 2 mm verfügen
DüV (2007)		Verbote für Düngemittel aus Knochenmehl, Fleischknochenmehl oder Fleischmehl gilt: • keine Aufbringung auf Grünland • keine Kopfdüngung im Gemüse- und Feldfutterbau • sofortige Einarbeitung bei sonstigen landwirtschaftlich genutzten Flächen	
Hygienerecht			
Verordnung (EG) Nr. 1774/2002 TierNebV (2006)	(umfangreiche Auflistung von Gründen in Präambel)	Verbote das Ausbringen anderer organischer Düngemittel und Bodenverbesserungsmittel als Gülle auf Weideland ist verboten	Siebmaschenweite vor Abwassereinleitung aus Tierkörperbeseitigungsanlagen und Schlachthöfen beträgt mind. 6 mm

5.3 Hygienisierungsverfahren und Prüfmethode

In Tabelle 22 sind die in den verschiedenen Rechtsvorgaben vorgesehenen Hygienisierungsverfahren und Kontrollmethoden aufgelistet. Hinsichtlich der Kontrollmethoden werden die Prozessprüfung (direkte Prozessprüfung; Verfahrenskontrolle), die Prozessüberwachung (indirekte Prozessprüfung; Prozesskontrolle) und die Produktprüfung (Produktkontrolle) unterschieden (E-BioAbfV 2007). Diese Kontrollmethoden verfolgen dabei unterschiedliche Strategien:

Prozessprüfung

Bei der Prozessprüfung werden s. g. Keimträger mit Indikatororganismen, d. h. repräsentative Krankheitserreger aus dem Bereich Seuchen- und Phytohygiene, befüllt und dem Behandlungsprozess für die Dauer der Mindestaufenthaltszeit zugeführt. Im Rahmen eines KTBL-Vorhabens (UFOPLAN-FKZ 903 33 397) im Vorfeld der geplanten Novellierung der BioAbfV wurde der Prozessprüfung für die anaerobe Behandlung eine begrenzte Aussagekraft bescheinigt, da

- es sich um eine Momentaufnahme handelt
- nur ein räumlich begrenzter Bereich im Reaktor untersucht wird und
- die Prüfung keine Aussage über die tatsächliche Infektiösität des Gärrests liefert.

Prozessüberwachung

Die Prozessüberwachung wird kontinuierlich bzw. quasi-kontinuierlich durchgeführt, die für das jeweilige Verfahren charakteristischen Rahmenbedingungen werden überwacht und abgeglichen. Dies sind z. B. Temperatur, Druck, pH-Wert, Füllstände, Befüll- und Entnahmekzeiten. Für die Messung dieser Parameter können bei Anwendung des HACCP(Hazards analysis critical control point)-Konzepts s. g. „Kritische Kontrollpunkte“ definiert werden.

Produktprüfung

Da die wissenschaftliche Basis für die Methodik der Prozessprüfung insbesondere im Bereich Phytohygiene noch relativ gering ist, wird der (End)produktprüfung, d. h. Prüfung der hygienisierten Bioabfälle, große Bedeutung beigemessen; auf eine repräsentative Probeentnahme ist hierbei zu achten.

Die Eckdaten der in der BioAbfV (1998) festgeschriebenen Hygienisierungsverfahren sollen in der Novelle der BioAbfV (Stand Februar 2007) auf der Basis umfangreicher Untersuchungen - insbesondere für Gärreste - modifiziert werden. Eine Prozessprüfung unter Verwendung von Keimträgern ist demnach für die Validierung der Pasteurisierung nicht mehr erforderlich. In der Praxis hat sich nämlich seit dem Inkrafttreten der BioAbfV gezeigt, dass die vorgeschriebene Prozessprüfung – möglicherweise aufgrund ihrer Komplexität – meist nicht/bzw. nur fehlerhaft durchgeführt wird.

Im Hygienerecht sind nach Verordnung (EG) Nr. 1774/2002 insgesamt sieben Behandlungsmethoden, bei denen unterschiedliche Temperatur-Zeit-Kombinationen eingehalten werden müssen, zugelassen. Anders als das bundesdeutsche Recht sieht das EU-Hygienerecht generell keine Validierung des gewählten Hygienisierungsverfahrens mittels Prozessprüfung vor Ort vor. Stattdessen sollen die „kritischen Kontrollpunkte“ zur kontinuierlichen Prozessüberwachung nach dem aus dem Bereich der Lebensmittelhygiene stammenden HACCP-Konzept definiert werden.

Unter Hygieneexperten wird allerdings auch die Auffassung vertreten, dass die Prozessüberwachung die Prozessprüfung nur bedingt ersetzen kann, da bei der Prozessprüfung das die Testorganismen beinhaltende tierische oder pflanzliche Gewebe eine Wirkung auf die Tenazität des Prüforganismus besitzt. Für den Bereich Kompostierung wird nun angestrebt, diesen „Abschirmeffekt“ rechnerisch bei einer Temperaturdatenauswertung zur Bewertung der abtötenden Wirkung auf Phytopathogene zu berücksichtigen und so die Aussagekraft der Prozessüberwachung zu verbessern (IDELMANN 2005).

Da für den Klärschlamm derzeit auf Bundes- und EU-Ebene keine Hygieneauflagen bestehen, sind in diesem Zusammenhang auch keine Hygienisierungsverfahren zugelassen. Im Hinblick auf die geplante Einführung der Hygienisierung von Klärschlämmen ist eine Beurteilung der unterschiedlichen Prüfmethoden hinsichtlich ihrer Durchführbarkeit und Aussagefähigkeit erforderlich. Der Prozessüberwachung kommt dabei der ein hoher Stellenwert zu, da

- kontinuierlich anfallende Informationen über den hygienisierenden Prozess auf der Kläranlage verarbeitet werden können
- ggf. vorhandene Prozessüberwachungssysteme eingesetzt werden können
- der Ansatz dem s. g. HACCP-Konzept entspricht.

Für thermische Verfahren im Batch-Betrieb bei definierten Behandlungszeiten (z. B. Pasteurisierung) besteht Konsens darüber, dass eine Validierung durch eine Prozessprüfung unter Verwendung von Einlegeproben mit Testorganismen nicht erforderlich ist. Alle anderen Verfahren (thermisch und chemisch) benötigen nach Auffassung von BÖHM (2007, mündl. Mitteilung) eine Validierung ihrer Wirksamkeit. Bei standardisierten Verfahren kann diese einmalig als s. g. Baumuster-Prüfung (substratabhängig) erfolgen. Das CEN empfiehlt in diesem Zusammenhang eine Validierung von Verfahren, deren hygienisierende Wirkung nicht eingeordnet werden kann (CEN 2007, vgl. Kap. 4.1.1.1).

Tab. 22: Zugelassene Hygienisierungsverfahren und Kontrolluntersuchungen des Düngemittel-, Abfall- und Hygienerechts für Sekundärrohstoffdünger und andere Abfälle zur Verwertung

	zugelassene Hygienisierungsverfahren	vorgeschriebene Prüfmethoden
Abfallrecht		
EU-Klärschlamm-Richtlinie (1986)	keine	keine
AbfKlärV (1992)	keine	keine
BioAbfV (1998)	• aerobe Hygienisierung: 55°C für 2 Wochen oder 65 °C (in geschlossenen Anlagen 60°C) für 1 Woche • anaerobe Hygienisierung: 55°C für 24 h; hydraulische Verweilzeit 20 d • anderweitige Hygienisierung: 70 °C 1 h	• direkte Prozessprüfung • indirekte Prozessprüfung • Produktprüfung
BioAbfV (Arbeitsentwurf Februar 2007)	• Pasteurisierung: 70 °C, 1 h • aerobe Behandlung (Kompostierung): • anaerobe Behandlung (thermophile Vergärung) mind. 50 °C, Nachweis der Mindestverweilzeit • anderweitige Behandlung zur Hygienisierung	• Prozessprüfung (für die Pasteurisierung nicht erforderlich) • Prozessüberwachung • Prüfungen der hygienisierten Bioabfälle
Düngemittelrecht		
DüMG (1977)	Keine	keine
E-DüMV (Stand April 2007)	Kartoffeln, Rüben: nur hygienisiert	Düngemitteluntersuchung
DüV (2007)	Keine	keine
Hygienerecht		
Verordnung (EG) Nr. 1774/2002 (Hygienevorschriften für nicht für den menschlichen Verzehr bestimmte tierische Nebenprodukte)	7 zugelassene Behandlungsmethoden (versch. Temperatur-Zeit-Relationen von 133 °C, 20 bar, 20 min bis 70 °C, 1 h) ^{*)}	• Prozesskontrolle nach HACCP • Endproduktprüfung
TierNebV (2006)	vgl. 1774/2002	vgl. 1774/2002
Richtlinien, Normen		
EFSA	• biologische • chemische • physikalische Methoden	Prozessüberwachung nach HACCP
CEN (2007)	• biologische • chemische • physikalische Methoden	Prozessüberwachung nach HACCP
ATV-VKS 3.2.2 (1988)		• Verfahrenskontrolle • Betriebskontrolle • Prozesskontrolle

*) siehe Anhangtabelle 3

5.4 Seuchenhygienische Prüforganismen für die Prozess- und Produktprüfung

Zur Untersuchung des Hygienestatus werden neben DIN-Vorschriften zur Klärschlammuntersuchung (DIN 38414: Schlamm und Sedimente 1992) meist für Komposte erarbeitete Untersuchungs- und Auswertungsmethoden wie das LAGA Merkblatt 10 (1995), die BioAbfV (1998) und das VDLUFA-Methodenbuch (Kap. 6.4, 1999) herangezogen. Dabei wird die hygienische Unbedenklichkeit der Produkte meist qualitativ mittels Prozess- und Produktprüfungen festgestellt (Tab. 23).

In Verbindung mit der Vorgabe der alten Klärschlammverordnung (1982), ab 1. Januar 1987 auf Grünland und Feldfutterbauflächen nur noch seuchenhygienisch unbedenklichen Klärschlamm auszubringen, hatte sich bereits die ATV/VKS-Arbeitsgruppe 3.2.2 "Entseuchung von Klärschlamm" die Aufgabe gestellt, die seuchenhygienische Unbedenklichkeit von Klärschlamm zu definieren sowie Nachweismethoden zu benennen (ATV 1986, 1988a, b, LANG 1987). Die Einhaltung der Anforderungen sollte durch ein dreistufiges System kontrolliert werden, welches in seinen wesentlichen Elementen dem der BioAbfV entspricht.

Mit der Novellierung der Düngemittelverordnung (E-DüMV) wird erstmalig im Düngemittelrecht ein Grenzwert zur Definition der seuchenhygienischen Unbedenklichkeit definiert: demnach darf ein Düngemittel, welches in den Verkehr gebracht werden soll, in 50 g Probenmaterial keine Salmonellen enthalten.

Anstelle einer Prozessprüfung mit Indikatororganismen besitzt im Hygienerecht nach Verordnung (EG) Nr. 1774/2002 die kontinuierliche Prozessüberwachung, bei der kritische Kontrollpunkte definiert und dort verfahrensspezifische Parameter kontinuierlich überwacht werden, größeres Gewicht. In der Verordnung (EG) Nr. 1774/2002 wurden anstelle der zunächst als Indikatororganismen für die Prüfung des hygienisierten Materials verwendeten *Enterobacteriaceae* *Escherichia coli* bzw. *Enterococcaceae* eingeführt (Verordnung (EG) Nr. 208/2006 vom 7.2.2006).

Sowohl hinsichtlich der Methodik als auch der aufgeführten Richt-/bzw. Grenzwerte gehen die von der ATV/VKS-Arbeitsgruppe zur Charakterisierung der seuchenhygienischen Unbedenklichkeit von Klärschlamm aufgestellten Anforderungen über die für Bioabfälle geltenden Anforderungen (LAGA Merkblatt 10, BioAbfV) hinaus.

Im Rahmen der CEN-Arbeit wird diskutiert, für den Nachweis der verschiedenen Hygieneniveaus unterschiedliche Testorganismen mit abgestufter Tenazität für die Prozessprüfung einzusetzen (CEN 2007). Dieses Prinzip hat aber in der Rechtssetzung bislang keinen Eingang gefunden.

Tab. 23: Methoden zur Charakterisierung der human- und veterinärhygienischen Unbedenklichkeit für Klärschlamm, Bioabfälle und tierischen Nebenprodukte

Verfahren	Prozessprüfung		Prüfung des hygienisierten Materials	
	quantitativ	qualitativ	quantitativ	qualitativ
Abfallrecht				
LAGA Merkblatt 10 (1995)	-	Keimträger: <i>S. senftenberg</i> W 775 in (9-30)* x 25 g Probeneinwaage n. n.	-	1 Prüfung mit mind. 3-5 Sammelproben <i>Salmonella</i> ssp. in 25 g Probeneinwaage n. n.
BioAbfV (1998)		Keimträger: <i>S. senftenberg</i> W 775 in 24 Proben n. n.		
E-BioAbfV (Stand Feb. 2007)	-	Keimträger: • Kompostierung: <i>S. senftenberg</i> W 775 in (2 x 24)* n. n.; bei Kleinanlagen in (2 x 12)* n. n. (2 x 24)* n. n. • Vergärung: <i>S. senftenberg</i> W 775 in (2 x 8)* n. n.	-	In 50 g der Sammelproben (aus 5 Teilchargen) Salmonellen n. n.
ATV-VKS 3.2.2 (ATV 1988b)	• mit Keimträger: <i>Salmonella senftenberg</i> W 775 mind. um Faktor 10 ⁴ reduziert • ohne Keimträger: <i>Salmonella</i> ssp. in 10 g Probeneinwaage mind. um Faktor 10 ⁴ reduziert	Keimträger: zugesetzte Askarideneier (nicht) nachweisbar (innerhalb von 6 Wochen 5 Sammelproben vom Roh- und Abgabeschlamm)	Enterobacteriaceen ≤ 10 ³ KBE/10 g Probeneinwaage	• gemäß DIN 38414 <i>Salmonella</i> ssp. in 1 g Probeneinwaage (nicht) nachweisbar • parasitäre Entwicklungsstadien in 20 g Probeneinwaage n. n. (Untersuchungshäufigkeit nicht vorgegeben)
Düngemittelrecht				
E-DüMV	-	-	-	in abgabefertigem Material: <i>Salmonella</i> n. n. in 50 g
Hygienerecht				
Verordnung (EG) Nr. 1774/2002	-	- „Kritische Kontrollpunkte“ werden festgelegt und kontrolliert (HACCP)	• direkt nach Hygienisierungseinheit: <i>Escherichia coli</i> oder <i>Enterococcaceae</i> ≤ 5 x 10 ³ KBE in 1 g • in abgabefertigem Material: <i>Escherichia coli</i> oder <i>Enterococcaceae</i> ≤ 10 ³ KBE in 1 g	in abgabefertigem Material: <i>Salmonella</i> n. n. in 1 g
TierNebV (2006)	-	vgl. 1774/2002	vgl. 1774/2002	vgl. 1774/2002
SchHaltHygV (1999)	-	-	-	<i>Salmonella</i> in 50 g n. n.

*) Zahl bzw. Wiederholungen der Einlegeproben/Jahr variiert in Abhängigkeit von der Anlagentechnik und der Kapazität der Anlage

5.5 Phytohygienische Prüforganismen für die Prozess- und Produktprüfung

In Tabelle 24 sind Prüfmethoden und Zielwerte zur Charakterisierung der phytohygienischen Unbedenklichkeit aufgelistet. Für Bioabfälle wurden für den Bereich Phytohygiene erstmals mit dem LAGA Merkblatt 10 (1995) Methoden vereinbart, und zwar ausschließlich für die Durchführung einer Prozessprüfung. Für die Prüfung des hygienisierten Materials im Rahmen einer „Produktprüfung“ ist keine Methode vorgeschrieben. Die Bioabfallverordnung (1998) orientierte sich hinsichtlich der Methodik und Zielwerte für die Prozessprüfung weitgehend am LAGA Merkblatt 10.

Im Vorfeld der geplanten Novellierung der BioAbfV wurden unter KTBL-Projektkoordination (UFOPLAN-FKZ 903 33 397) Untersuchungen an Biogasanlagen (DBU-Vorhaben Az. 15008; UFOPLAN-FKZ 200 33 331) zur Aussagefähigkeit der in der BioAbfV vorgeschriebenen Methoden mit folgendem Ergebnis durchgeführt (Tab. 25):

- Im mesophilen Betrieb können auch nach sehr langen Verweilzeiten (13 bis 70 Tage) Indikatororganismen (Keimträgermethode) nicht vollständig abgetötet werden.
- Für Biogasanlagen ist die Prozessprüfung nach BioAbfV in Bezug auf die Indikatororganismen *Salmonella Senftenberg*, Kohlhernie und Tomatensamen praktikabel. Sowohl bei der thermophilen Betriebsweise (55 °C) als auch bei der Pasteurisierung (70 °C) werden o. g. Indikatororganismen innerhalb praxisrelevanter Testzeiten sicher abgetötet.
- Der Tabak-Mosaik-Virus (TMV) besitzt demgegenüber eine sehr hohe Tenazität. Bei thermophiler Betriebsweise (55 °C) erfolgt auch bei Beprobungszeiten im Bereich der hydraulischen und weit über der realen Verweilzeit keine ausreichende Abtötung des Indikators im Keimträger. Dies gilt auch für die nach BioAbfV vorgesehenen Pasteurisierungsbedingungen (70 °C, 1 h).

Bei Erarbeitung der BioAbfV wurde der TMV als Indikatororganismus für die Vergärung aus Gründen der Gleichbehandlung mit der Kompostierung ungeprüft aus diesem Bereich übernommen. Insgesamt sollte die große Erregervielfalt bei den Phytopathogenen durch eine Bandbreite an Indikatoren abgedeckt werden. Zur epidemiologischen Relevanz des TMV selbst liegen kaum Daten vor, seine Einbeziehung in das Prüfsystem der BioAbfV wird jedoch mit Hinweis auf verwandte Viren und andere widerstandsfähige Schadorganismen, die im Bioabfall vorkommen können, verteidigt. Fachleute schätzen allerdings in anderen Bereichen des Pflanzenverkehrs das Risiko der Krankheitsübertragung wesentlich höher ein als bei Vergärungsanlagen. In der Novelle der BioAbfV wird aus den genannten Gründen für Vergärungsanlagen der Indikator TMV gestrichen.

Tab. 24: Prüfmethoden und Zielwerte zur Charakterisierung der phytohygienischen Unbedenklichkeit

	Prozessprüfung	Prüfung des hygienisierten Materials
LAGA Merkblatt 10 (1995)	Einlegeproben: Tabak-Mosaik-Virus: Richtwert im Biotest: ≤ 8 Läsionen/Pflanze; Richtwertüberschreitung: max. 30 % <i>Plasmidiophora brassicae</i> : Befallsindex: $\leq 0,5$; Richtwertüberschreitung: max. 30 % Tomatensamen: Richtwert im Biotest: ≤ 2 % keimfähige Samen/Probe); Richtwertüberschreitung: max. 30 %	keine
BioAbfV (1998)	Einlegeproben (18-36)*: Tabak-Mosaik-Virus: Richtwert im Biotest: ≤ 8 Läsionen/Pflanze; Richtwertüberschreitung: max. 30 % <i>Plasmidiophora brassicae</i> : Befallsindex: $\leq 0,5$ je Prüfbereich; Richtwertüberschreitung: max. 30 % Tomatensamen: (Richtwert im Biotest: ≤ 2 % keimfähige Samen je Prüfbereich); Richtwertüberschreitung: max. 30 %	keimfähige Samen und austriebsfähige Pflanzenteile: ≤ 2 pro Liter Prüfsubstrat
BioAbfV (Arbeitspapier Stand Feb. 2007)	Keimträger: Pasteurisierung : keine Prozessprüfung erforderlich Kompostierung (2 x 36), bei Anlagenkapazität $\leq 3\,000$ t/a halbierte Probenzahl Tabak-Mosaik-Virus: Richtwert im Biotest: ≤ 4 % der Restinfektiosität (Relativwert zur Positivkontrolle) je Prüfbereich; Richtwertüberschreitung: max. 30 % <i>Plasmidiophora brassicae</i> : Befallsindex: $\leq 0,5$ je Prüfbereich; Richtwert darf nicht überschritten werden Tomatensamen: Richtwert im Biotest: ≤ 2 % keimfähige Samen je Prüfbereich; Richtwert darf nicht überschritten werden Vergärung (2 x 16), bei Anlagenkapazität $\leq 3\,000$ t/a halbierte Probenzahl <i>Plasmidiophora brassicae</i> : Befallsindex: $\leq 0,5$ je Prüfbereich; Richtwert darf nicht überschritten werden Tomatensamen: Richtwert im Biotest: ≤ 2 % keimfähige Samen je Prüfbereich; Richtwert darf nicht überschritten werden Anlagen zur anderweitigen Hygienisierung: Sachverständigengutachten	keimfähige Samen und austriebsfähige Pflanzenteile: ≤ 2 pro Liter Prüfsubstrat
E-DüMV (Stand April 2007)	keine Verwendung von Ausgangsstoffen pflanzlicher Herkunft, die von widerstandsfähigen Schadorganismen befallen sind und nicht einer geeigneten Hygienisierung unterzogen wurden	keine

*) Zahl bzw. Wiederholungen der Einlegeproben/Jahr variiert in Abhängigkeit von der Anlagentechnik und der Kapazität der Anlage

Tab. 25: Ergebnisse der Inbetriebnahmeprüfungen von Praxisanlagen

Behandlung	Prozessprüfung				Prüfung der hygienisierten Bioabfälle	
	Salmonella	Plasmodiophora brassicae	Tomatensamen	Tabak Mosaik Virus	Salmonella	keimfähige Samen und austriebsfähige Pflanzenteile
Pasteurisierung (70°C)	-	-	-	(+) ¹⁾	-	-
Thermophile Vergärung	-	-	-	(+) ²⁾	-	-
Mesophile Vergärung	(+) ³⁾	(+) ³⁾	(+) ³⁾	+	(+)	-

- Organismus wird nach Abschluss der Prüfung nicht nachgewiesen: Prüfung bestanden

+ Organismus wird nach Abschluss der Prüfung nachgewiesen: Prüfung nicht bestanden

(+) Organismus wird nicht nachgewiesen, sofern folgende Expositionszeiträume überschritten wurden:

1) ausreichend eliminiert nach 2 Stunden, 74 °C

2) ausreichend eliminiert nach 28 Tagen, 55 °C

3) ausreichend eliminiert nach 24 Stunden, 40-50 °C

Für hygienisierten Klärschlamm wurde bislang keine Nachweismethode zur Charakterisierung seiner phytohygienischen Unbedenklichkeit erarbeitet. Eine Übertragung von Vorgaben der BioAbfV, insbesondere die Prüfung auf keimfähige Samen und austriebsfähige Pflanzenteile im Rahmen der Prüfung der hygienisierten Bioabfälle wie auch die Heranziehung des TMV als Prüfparameter im Rahmen der Prozessprüfung ist in Anbetracht der mit den Prüfparametern der BioAbfV bislang gemachten Erfahrungen kritisch zu hinterfragen.

Auch im Düngemittelrecht soll die Phytohygiene künftig geregelt werden. Der Zielwert „keimfähige Samen und austriebsfähige Pflanzenteile“ wurde hierfür als zu pauschal verworfen. Er kann z. B. beim Einsatz von Nachwachsenden Rohstoffen in Biogasanlagen zu Fehlinterpretationen führen. Anstelle einer pauschalen Anforderung enthält der E-DüMV (April 2007) daher die Forderung, dass Kartoffeln und Rüben (und deren Abfallprodukte) nur hygienisiert zu Düngemitteln verarbeitet werden dürfen. Sofern weitere Ausgangsstoffe von Düngemitteln sich als relevant für die Ausbreitung von Pflanzenkrankheiten herausstellen sollten, können hierfür künftig vergleichbare Regelungen getroffen werden. Darüber hinaus sieht der Entwurf der Düngemittelverordnung (2007) vor, dass Ausgangsstoffe pflanzlichen Ursprungs nicht von widerstandsfähigen Schadorganismen befallen sein dürfen, insbesondere von

- einem der in § 1a Abs. 1 der Pflanzenbeschauverordnung genannten Schadorganismus
- thermoresistenten Viren, v. a. solche aus der Tobamovirus-Gruppe oder
- pilzlichen Erregern mit widerstandsfähigen Dauerorganen, insbesondere *Synchytrium endobioticum*, *Sclerotinia*-Arten, *Rhizoctonia solani*, *Plasmodiophora brassicae*

und nicht einer geeigneten hygienisierenden Behandlung unterzogen wurden.

5.6 Kontrollinstanzen und -instrumente

Die Vorgaben des Klärschlammverordnung werden von den zuständigen Stellen, den landwirtschaftlichen Fachbehörden für die Aufbringungsfläche und den abfallrechtlichen Behörden für die stofflichen Eigenschaften über das Lieferscheinverfahren für jede auf die landwirtschaftliche Fläche aufgebrachte Charge protokolliert. Der Kläranlagenbetreiber ist nach AbfKlärV verpflichtet, spätestens zwei Wochen vor der Abgabe des Klärschlammes eine Durchschrift des ausgefüllten Lieferscheins an die zuständige Behörde zu senden (Tab. 26).

Dieser enthält genaue Angaben insbesondere zu den Boden- und Klärschlammuntersuchungen. Der Lieferschein wird nach dem Vermerk des Abgabezeitpunktes an den Ausbringer übergeben und muss im Fahrzeug mitgeführt werden. Der Landwirt bestätigt die Anlieferung und das Aufbringen des Klärschlammes. Anschließend erhalten Landwirt, Ausbringer, Kläranlage und die zuständige Behörde jeweils ein Exemplar bzw. eine Durchschrift des Lieferscheins. Der Lieferschein ist vom Betreiber der Abwasserbehandlungsanlage 30 Jahre lang aufzubewahren. Mit diesem Vorgehen wird eine Rückverfolgbarkeit der Herkunft des Klärschlammes gewährleistet. Nicht sichergestellt werden kann mit diesem Lieferscheinverfahren allerdings, dass die Kennzeichnung des betreffenden Klärschlammes und seine tatsächlichen Gehalte an Nähr- und Schadstoffen übereinstimmen.

Alternativ zum Lieferscheinverfahren – das für Bioabfälle ohnehin weniger umfangreich ist als für Klärschlämme – erlaubt die BioAbfV, dass Gütegemeinschaften einen Teil der Kontrollaufgaben übernehmen. Auch hier sind die Aufbringungsflächen zu registrieren, eine Voranzeigespflicht besteht allerdings nicht.

Düngemittel, die in Verkehr gebracht werden, unterliegen der Kennzeichnungspflicht des Düngemittelrechts (DüMV 2003, E-DüMV 2007). Das Düngemittelrecht sieht für die Düngemittelverkehrskontrolle eine stichprobenhafte Untersuchung der in Verkehr gebrachten Düngemittel (auch Klärschlämme) vor. Dabei wird insbesondere die Übereinstimmung von deklarierten und tatsächlichen Eigenschaften überprüft. Der Umfang der derzeit jährlich so überprüften Klärschlämme ist bundeslandbezogen unterschiedlich und i. d. R. nicht sehr hoch.

In Verkehr gebrachte Tierische Nebenprodukte sind mit einem Lieferschein zu versehen. Anlagenbetreiber, z. B. einer Biogasanlage, haben in Bezug auf die Vorgaben der Verordnung (EG) Nr. 1774/2002 die Probenahme und Analyse von hygienisierten Einsatzstoffen und ggf. dem behandelten Endprodukt zu veranlassen. Für die Einhaltung der Vorgaben des Hygienerechts sind die Veterinärbehörden zuständig. Sie bestimmen die Stelle, welche die Kontrolle durchführt.

Tab. 26: Kontrollmethoden und -instanzen des Abfall-, Düngemittel- und Hygienerechts

	Kontrollmethode	Kontrollinstanzen
Abfallrecht		
AbfKlärV	Lieferscheinverfahren	zuständige Behörden für die Klärschlammabgabe und die Aufbringungsfläche
BioAbfV	Lieferscheinverfahren	zuständige Behörden für Aufbringungsfläche alternativ: <i>Gütegemeinschaften</i>
Düngemittelrecht		
E-DüMV (2007)	Stichproben	Düngemittelverkehrskontrollstellen der Länder
Hygienerecht		
Verordnung (EU) Nr. 1774/2002 und TierNebG (2004)	Lieferschein/Stichproben	nach Landesrecht zuständige Behörde

6 Schadensfälle

6.1 Nationaler Klärschlammfonds

6.1.1 Freiwilliger und gesetzlicher Klärschlammfonds

Durch den gesetzlichen Klärschlammfonds (KlärEV 1998) sollen Sach- und Personenschäden sowie Folgeschäden, die durch eine Verwertung von Klärschlamm entstehen, abgedeckt werden. Dieser gesetzliche Entschädigungsfonds ist seit 1999 in Kraft und ergänzt damit den

„freiwilligen Entschädigungsfonds“, der von der Bundesarbeitsgemeinschaft Deutscher Kommunalversicherer (BADK) verwaltet wird.

Nach KlärEV ist vom Klärschlammabgeber ein Beitrag von 20 DM/t TM bzw. 10,23 €/t TM an den Fonds zu entrichten, bis ein Fondsvolumen von 125 Mio. DM (bzw. 63,91 Mio. €) angespart ist. Dies ist mittlerweile der Fall. Durch den Fonds wird einerseits das finanzielle Risiko aufgrund von Schäden durch die landwirtschaftliche Klärschlammverwertung vermindert und andererseits die Akzeptanz für Klärschlamm unter Landwirten vergrößert. Der gesetzliche Klärschlammfonds wird von der Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung verwaltet; Anträge auf Entschädigung sind schriftlich bei dieser einzureichen. Der durch die landbauliche Verwertung von Klärschlamm Geschädigte hat bei Sachschäden einen Selbstbehalt von 1125 DM bzw. 575,20 € pro Schadensfall zu tragen. Die maximale Regulierungssumme beträgt 5 Mio. DM (bzw. 2,56 Mio. €) pro Schadensfall. Der Landwirt ist verpflichtet, den Schaden selbst nachzuweisen.

6.1.2 Gemeldete Schadensfälle

Beim freiwilligen Klärschlammfonds sind im Zeitraum von 1993 bis 2001 insgesamt 18 Schadensfälle reguliert worden. Meist waren auskeimende Pflanzensamen nach erfolgter Klärschlammanwendung die Schadensursache, außerdem wurden Mangelsymptome aufgrund unausgewogener Nährstoffversorgung der angebauten Nutzpflanzen festgestellt und Abnahmeverträge aufgekündigt.

Beim gesetzlichen Fonds sind seit 1999 zwei Schadensfälle gemeldet worden, eine Schadensregulierung ist bislang noch nicht erfolgt. Die geringe Inanspruchnahme des gesetzlichen Fonds könnte durch den relativ hohen Selbstbehalt des potenziell Geschädigten im Vergleich zu den Regulierungssummen, die im freiwilligen Fonds gezahlt wurden, begründet sein. Ggf. sind vom Landwirt auch die Gutachterkosten für einen Nachweis zu erbringen. Damit wird eine Schadensmeldung unwirtschaftlich.

Darüber hinaus sind in der Literatur keine Schadensfälle veröffentlicht.

6.2 Internationales Rundschreiben zu Schadensfällen

Verschiedene Ansprechpartner im europäischen Ausland (Frankreich, Griechenland, Großbritannien, Österreich, Polen, Schweden) wurden nach Schadensfällen infolge Klärschlamm- aufbringung befragt. Lediglich aus Großbritannien kam die Mitteilung, dass keine auf Klärschlamm zurückzuführenden seuchenhygienischen Vorfälle bekannt seien. Von keimfähigen Tomatensamen wäre des Öfteren berichtet worden, diese hätten sich jedoch nicht als Problem herausgestellt (EVANS, mündl. Mitteilung 2007).

7 Klärschlammanfall und -qualitäten in Deutschland

Zur Kalkulation der Folgekosten durch Einführung der Klärschlammhygienisierung im Rahmen der bevorstehenden Novellierung der AbfKlärV wird folgendes Verfahren beschritten:

Zunächst werden aufgrund statistischer Angaben für die Bundesrepublik Deutschland die Anzahl kommunaler Kläranlagen ermittelt und die dabei eingesetzte Abwasser- und Klärschlammbehandlungstechnik abgeleitet. In einem zweiten Schritt werden den jeweils in definierten Kläranlagen-Größenklassen anfallenden Klärschlämmen mit unterschiedlichen Eigenschaften geeignete Hygienisierungsverfahren zugewiesen. Als „Sonderfall“ wird außerdem eine zentrale Hygienisierung von Klärschlämmen kleinerer Anlagen berechnet.

Für die einzelnen Hygienisierungsverfahren werden in einem weiteren Schritt Investitions- und Betriebskosten berechnet. Außerdem wird kalkuliert, wie sich Ausbringungskosten bei einer landbaulichen Verwertung durch das jeweilige Hygienisierungsverfahren verändern. Aus den Hygienisierungskosten sowie den zusätzlich anfallenden Ausbringungskosten erge-

ben sich die Kosten der Hygienisierung (bezogen auf an die Kläranlage angeschlossenen Einwohner).

7.1 Anzahl Kläranlagen, Abwasser-/Klärschlammbehandlungstechnik

7.1.1 Datenquellen

Für die Auswertung der Häufigkeitsverteilung bestimmter Verfahrensschritte auf Kläranlagen wurden vor allem die Angaben des Statistischen Bundesamtes verwendet, die sowohl eine Differenzierung nach Größenklassen der Kläranlagen als auch nach Bundesländern erlauben:

- Statistik der öffentlichen Abwasserbeseitigung, Fachserie 19 Reihe 21 und Aufbereitungstabelle K.1 nach Art der Abwasserbehandlung und Ausbaugrößenklassen aus der Erhebung für 2001 (veröffentlicht in 2003) und für 2004 (veröffentlicht in 2006).
- Auswertung der Erhebungen zum Mineralölsteuergesetz (Angaben zur Anzahl der Kläranlagen mit Schlammfäulung und Faulgasmengen, geordnet nach Größenklassen und Art der Verwertung für 2004)

Für einzelne Parameter wurden Sonderauswertungen der Statistischen Landesämter hinzugezogen, z. B. „Statistische Daten 3/2004 zur Wasserwirtschaft in Baden-Württemberg“.

Eine weitere Quelle zur Häufigkeitsverteilung waren die Auswertungen der Deutschen Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall, (DWA, früher ATV), insbesondere zum Bereich Klärschlammverwertung. Hier wurden, auch zur Beurteilung der historischen Entwicklung, folgende Veröffentlichungen ausgewertet:

- ATV-Information „Zahlen zur Abwasser- und Abfallwirtschaft“, 1996
- ATV-DVWK-Broschüre: „Zahlen und Fakten zum Thema Wasser“, 2004
- „Stand der Klärschlammbehandlung und -entsorgung in Deutschland – Ergebnisse der DWA-Klärschlammhebung 2003“ (Oktober 2005)

Die Daten der bundesweiten DWA-Klärschlammhebung (2005) wurden nach Häufigkeit in den Kläranlagen und/oder nach Anteilen an der gesamten Schmutzfracht in Einwohnerwerten (EW) ausgewertet. Es erfolgt in der Regel keine Differenzierung nach Größenklassen oder Bundesländern. Dies erschwert eine Verknüpfung mit den statistischen Daten des Bundesamtes, wenn dabei Größenklassen berücksichtigt werden sollen.

Außerdem ergab der Vergleich verschiedener Datenquellen Unstimmigkeiten bei den jeweiligen TM-Frachten, die sich aus der mangelnden Repräsentativität der Probenahmen (bei stark schwankenden TM-Gehalten) und sonstigen Messfehlern erklären lassen. Im Weiteren wird bei der Berechnung von Klärschlammfrachten in der Regel ein spezifischer Schlammanteil von 55 g TM/EW'd bei anaerobem Schlamm und 60 g TM/EW'd bei anaerob stabilisiertem Schlamm angesetzt. Dieser wird mit der mittleren Belastung der Kläranlagen (in EW) laut Angaben des Statistischen Bundesamtes multipliziert.

Weitere Daten zur „Klärschlammabtrocknung und -verbrennung“ stammen aus dem gleichnamigen UBA-Bericht (2004), der eine systematische Erfassung aller größeren Klärschlammabtrocknungsanlagen enthält.

Berücksichtigung finden ausschließlich kommunale Kläranlagen. Privat betriebene Kleinkläranlagen werden nicht in die Betrachtung einbezogen; dies sind allein in Bayern ca. 100.000 Anlagen, an die insgesamt ca. 400.000 EW – ca. 3 % der Bevölkerung – angeschlossen sind (SEYLER 2008).

Mit diesen Daten zur Häufigkeitsverteilung ist eine Gewichtung nach weit verbreiteten und eher seltenen Verfahren möglich, die dann eine Auswahl relevanter Verfahren ermöglicht.

Da sich die wesentlichen Einflussfaktoren für Art und Menge des anfallenden Klärschlammes (Anzahl der Kläranlagen und behandelte Schmutzfracht, Art der Stabilisierung, Art und Umfang der Schlammentwässerung) in den letzten Jahren nicht erheblich verändert haben, können die statistischen Daten aus den Jahren 2003 und 2004 für den Ist-Zustand herangezogen werden. Eine Ausnahme bilden allenfalls die Anlagen mit Klärschlamm-trocknung, bei denen eine deutliche Zunahme zu registrieren ist.

Die Anteile der jeweiligen Entsorgungspfade für den Klärschlamm haben sich in den letzten Jahren deutlich verändert. Neben dem Einsatz in der Landwirtschaft und im Landschaftsbau wird mittlerweile ein hoher Anteil des Klärschlammes thermisch verwertet. Die alleinige Verbrennung von Klärschlamm („Monoverbrennung“) wird zu 21 % angewandt (Abb. 4) und besitzt den Vorteil, dass anfallende Aschen ggf. als Phosphatdünger wiederverwertet werden können. Für die Verbrennung mit Festbrennstoffen („Mitverbrennung“), z. B. in Kohlekraftwerken, die bei 14 % der Klärschlämme erfolgt, müssen keine separaten Verbrennungsanlagen für Klärschlamm errichtet werden.

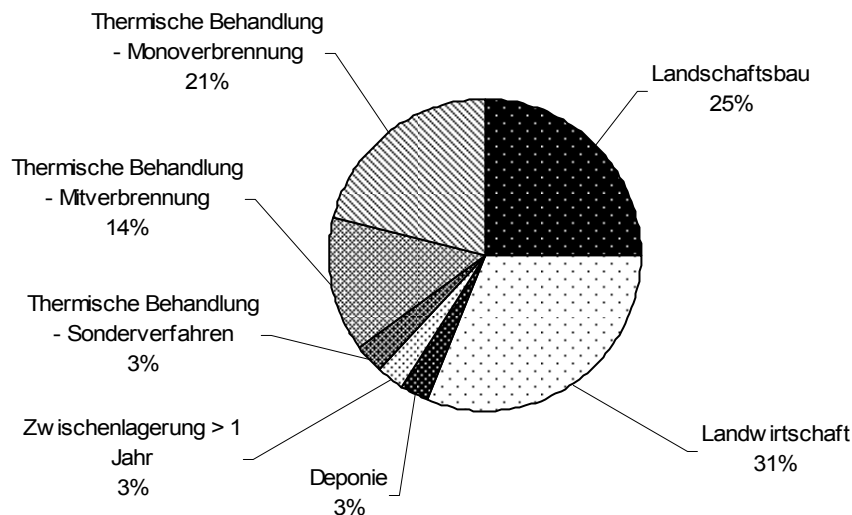


Abb. 4: Klärschlammverbleib in Deutschland 2003 (DURTH et al. 2005)

7.1.2 Datenauswertung

Im Hinblick auf eine Bewertung von Hygienisierungsverfahren hinsichtlich ihrer technischen Machbarkeit und ihrer betriebswirtschaftlich sinnvollen Mindestgröße werden die Kläranlagen zunächst in Größenklassen (GK) eingeteilt. Sofern nicht anders mitgeteilt, beziehen sich diese Größenklassen im Weiteren auf die Einteilung laut Abwasserverordnung, die folgende Größenklassen unterscheidet, wobei sich die EW-Zahlen auf die Ausbaugröße beziehen:

GK 1: ≤ 1.000 EW

GK 2: > 1.000 – 5.000 EW

GK 3: > 5.000 – 10.000 EW

GK 4: > 10.000 – 100.000 EW

GK 5: > 100.000 EW

In diesen Größenklassen werden dann zum einen die Anzahl der betroffenen Kläranlagen, die jeweilige Schmutzfracht und die daraus resultierende Schlammfracht (zunächst in t TM) aufgelistet. Für die Umrechnung in Schlamm-mengen (in m³/a) wurden dann mittlere TM-

Gehalte von 4 % für Nassschlamm, 25 % für maschinell entwässerten Klärschlamm und 85 % für getrockneten Schlamm angesetzt.

Für die Differenzierung der Klärschlammverwertung nach Größenklassen wurden, wenn keine spezifischen Angaben für die einzelnen Größenklassen vorlagen, auf Basis der statistischen Daten plausible Annahmen getroffen. Dabei wurde Folgendes zugrunde gelegt:

- Nassschlamm wird nur landwirtschaftlich verwertet oder an größere Kläranlagen abgegeben. Diese Entsorgungspfade werden vor allem von kleineren Kläranlagen der GK 1 bis 3 genutzt.
- Die landwirtschaftliche Verwertung wird generell eher in kleinen Anlagen genutzt, während sie in GK 5 fast vernachlässigbar ist.
- Trocknungsanlagen werden praktisch ausschließlich in GK 5 eingesetzt.
- Bei der maschinellen Klärschlammmentwässerung wird nur in bei stationären Anlagen Kalk eingesetzt, während externe Dienstleister nur mit Metallsalzen und Polymeren arbeiten.

7.2 Einflussfaktoren auf Klärschlammmenge und -qualität

Bei der Verfahrenstechnik für die Abwasserbehandlung hat in der Praxis eine starke Konzentration auf wenige statistisch relevante Grundtypen (Belebungsanlagen mit aerober oder anaerober Schlammstabilisierung) stattgefunden und die Reinigungsleistung zwischen Anlagentypen und Größenklassen unterscheidet sich kaum noch. Wichtig im Hinblick auf eine Hygienisierung der Schlämme ist, dass bei der Abwasserreinigung das gewählte Behandlungsverfahren (Tropfkörper, Belebungsverfahren, belüftete Teiche etc.) nur insofern die Schlammqualität beeinflusst, als die Stabilisierung der anfallenden Schlämme unterschiedlich ist (Abb. 5, 6).

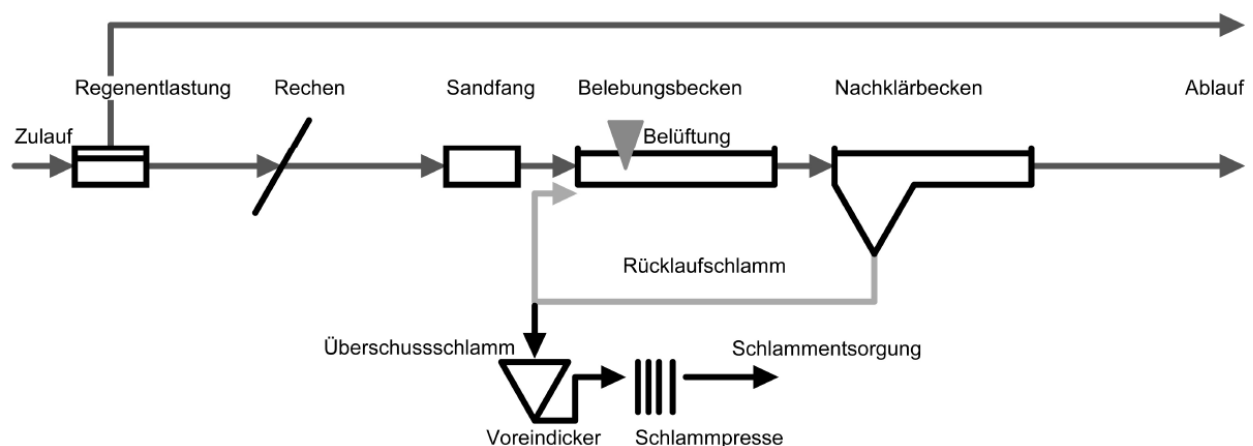


Abb. 5: Schema einer Kläranlage mit aerober Klärschlammstabilisierung (KONWIKI 2003)

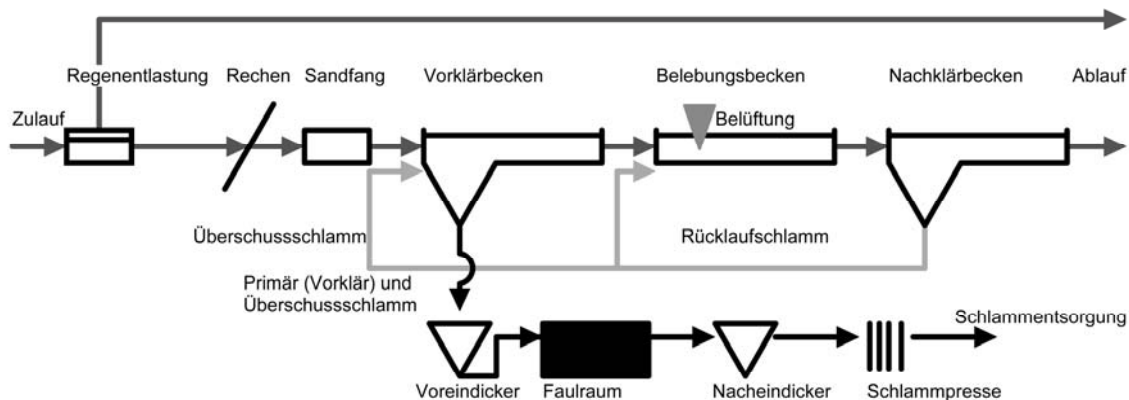


Abb. 6: Schema einer Kläranlage mit anaerober Klärschlammstabilisierung (KONWIKI 2003)

Für die weitere Betrachtung wird somit unterschieden zwischen Kläranlagen mit (simultaner) aerober Stabilisierung (Abb. 5, i. d. R. ohne Vorklärung) und solchen mit (getrennter) anaerober Stabilisierung (Abb. 6 mit Vorklärung), da sich dies stark auf die Stickstoffgehalte und insbesondere den Gehalt an Ammonium auswirkt. Ersteres findet praktisch ausschließlich in kleinen Kläranlagen bis etwa 20.000 EW Ausbaugröße Anwendung, letzteres überwiegend bei größeren Anlagen. Die in kleineren Anlagen teilweise praktizierte kalte Faulung in so genannten Emscherbrunnen wird im Weiteren gleichgesetzt mit mesophiler Schlammfäulung, da die produzierte Klärschlammqualität vergleichbar ist.

Das jeweils angewandte Verfahren der Klärschlamm-entwässerung beeinflusst maßgeblich die Auswahl des geeigneten Hygienisierungsverfahrens. Bei der Klärschlamm-entwässerung muss bei Anlagen mit anaerober Stabilisierung zunächst unterschieden werden zwischen Voreindickung (vor der Fäulung) und Nachentwässerung nach der Faulstufe. Je stärker die Voreindickung von Primärschlamm aus der Vorklärung und von Überschussschlamm aus der biologischen Stufe, umso geringer ist die Rückbelastung mit Ammonium aus der Schlamm-entwässerung bzw. umso höher ist im Umkehrschluss der verbleibende Stickstoffanteil im Klärschlamm. Im Hinblick auf die Hygienisierung ist diese Differenzierung bei der Voreindickung aber zu vernachlässigen.

Dagegen ist das eingesetzte Verfahren zur Klärschlamm-(Nach)Entwässerung entscheidend für die Auswahl und die Kosten einer Hygienisierung. Die wesentlichen Verfahren mit den jeweils erzielbaren TM-Gehalten sind in Tabelle 27 dargestellt.

Tab. 27: Durch Entwässerung erreichbare TM-Gehalte

Art der Entwässerung	Erreichbare TM-Gehalte [%]
rein gravitäre Eindickung (Nacheindicker, Schlammsilo)	3 – 10
Entwässerung über Trockenbeete (mit oder ohne Schilfbewuchs)	30 – 50
Kammerfilterpressen	25 – 35
Zentrifugen	20 – 30

Bei der maschinellen Entwässerung ist außerdem die Auswahl des Konditionierungsmittels wichtig. Hier wird bei Kammerfilterpressen teilweise noch Kalk eingesetzt und damit eine Hygienisierung des Schlammes als Nebeneffekt erreicht.

Bei allen Kläranlagen, die eine Klärschlamm-trocknung einsetzen, findet zumindest bei einer Erhitzung auf höhere Temperaturen eine (Teil-)hygienisierung statt. Derzeit wird eine Trocknung wegen der relativ hohen Kosten nur dann eingesetzt, wenn eine thermische Verwertung angestrebt wird. Ausnahme sind einige kleinere Anlagen, zumeist mit solarer Trocknung, deren Schlamm landwirtschaftlich verwertet wird.

Bei kleineren Anlagen findet häufig eine längere Zwischenspeicherung von Nassschlamm statt (vgl. Kap. 3.5). Der Anteil von s. g. Trockenbeeten und Klärschlammvererdungsbeeten an der Gesamtkapazität ist sehr gering.

Zusammenfassend wird für die weitere Betrachtung differenziert nach:

- aerober und anaerober Stabilisierung,
- Grad der Entwässerung (Nassschlamm oder maschinell entwässert),
- Art des Entwässerungsaggregates und des eingesetzten Konditionierungsmittels (Kalk, Metallsalze, Polymere),
- Art und Dauer der (Zwischen-)lagerung.

Im Hinblick auf die Verfügbarkeit von Personal, die technische Machbarkeit und die Rentabilität zusätzlicher Verfahrensschritte zur Schlammhygienisierung wird darüber hinaus nach Größenklassen der Kläranlagen unterschieden.

In Tabelle 28 sind die berechneten Anfallmengen von Klärschlamm in Deutschland differenziert nach Kläranlagen-Größenklassen, dem Anlagentyp, den Klärschlammarten und den jeweiligen Verwertungswegen dargestellt. Dabei wird unterschieden in Nassschlamm, mobil oder stationär entwässertem Schlamm sowie getrocknetem Schlamm. Hinsichtlich der Verwertungswege wird differenziert in landwirtschaftliche Verwertung und thermische Verwertung (Monoverbrennung, Mitverbrennung, Zementwerk) sowie, bei kleineren Anlagen, ein Transport zu einem zentralen Klärwerk.

Im oberen Teil sind die Klärschlammanfallmengen je Kläranlagen-Größenklassen differenziert, im unteren Teil die in den verschiedenen Größenklassen jeweils anfallenden Klärschlammarten zusammengefasst.

Tab. 28: Berechnete Anfallmengen von Klärschlamm in Deutschland

Berechnung der Klärschlamm-mengen nach Größenklassen und Anlagentyp																		
Größenklasse	GK1 < 1.000 BS/TK/Teich			GK2/3 BS/TK			GK4a BS			GK4b/5 BB			Summe Mittelw.					
Σ Anzahl Kläranlagen	4.305			3.655			1.078			1.150			10.188					
Σ Ausbaugröße (1.000 EW)	1.583			12.911			33.438			123.796			157.234					
Σ angeschl. EW (1.000 EW)	1.278			10.145			20.125			94.634			126.182					
KS-Entwässerung 1)	NS	ME	ME	NS	ME	SE	SE	SE	SE	ME	SE	SE	ME	SE	KT			
KS-Verwertung 2)	LW	LW	TV	ZKA	LW	LW	LW	LW	LW	LW	LW	LW	LW	LW	TV	TV		
% von KS-Menge	50%	40%	0%	10%	30%	30%	15%	5%	25%	20%	10%	2%	10%	30%	10%	25%		
spez. KS-Anfall (gEW ⁻¹ d)	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	55	55	55	55	55		
KS-Mengen (1.000t/a)	14	11	0	3	67	67	33	11	88	110	22	132	0	40	380	475		
Anzahl der KA	2.153	1.722	0	431	1.097	1.097	548	183	216	270	54	323	0	108	230	288		
Berechnung der Klärschlamm-mengen nach Klärschlammarten																		
1. Nassschlamm . Ø 4% TR																		
	aerob stabilisiert LW			anaerob stab. LW			LW			Verbrennung			LWwert.			Verbrennung		
KS-Mengen n. GK (1.000t/a)	125			38			343			166			950			380		
Anzahl der KA	3.357			23			4.089			872			575			288		
KS-Mengen n. GK (1.000 m3/a)	3.118			950			979			862			3.800			1.520		
davon mit/ohne Kalkkonditionierung																		
KS-Mengen (1.000t/a)	2a. SEO			2b. SEK			3a. SEO			3b. SEK			3a. SEK			3b. SEK		
Anzahl der KA	310			33			760			460			115			190		
KS-Mengen n. GK (Mio m3/a)	3.852			237			460			115			760			1.069		
	1.238			133			3.040			760			223			4.312		

1) NS=Nassschlamm; ME=mobile Entwässerung; SE=stationäre Entwässerung; KT=Trocknung vor Ort oder in zentraler Anlage, solare Trocknung

2) LW=landwirtschaftliche Verwertung; TV=thermische Verwertung (Monoverbrennung, Mitverbrennung, Zementwerk); ZKA=Transport zur zentralen Kläranlage, SEO=ohne Kalkkonditionierung, SEK=mit Kalkkonditionierung

7.3 Interpretation des Datenrasters

Bei der **Klärschlammmentwässerung** (Nachentwässerung) werden i. d. R. Kammerfilterpressen (33 % der EW) und vor allem bei größeren Anlagen Zentrifugen (18 % der Anlagen, aber 47 % der EW) eingesetzt. Bandfilterpressen bilden eher die Ausnahme. Bei über der Hälfte der Anlagen wird der Klärschlamm entweder nur eingedickt und als Nassschlamm landwirtschaftlich verwertet oder die Klärschlammmentwässerung wird von externen Entsorgern mit mobilen Aggregaten durchgeführt. Da es sich hier vor allem um kleinere Anlagen (GK 1 bis 3) handelt, betrifft dies jedoch nur 14 % der EW.

Die **Klärschlammstabilisierung** wird zu 75 % über Faultürme mit überwiegend einstufiger, mesophiler, alkalischer Faulung erreicht. Für 16 % der EW wird die Faulung zweistufig betrieben. 12 % des Klärschlammes wird simultan aerob stabilisiert. In den übrigen Fällen (13 %) wird der Schlamm entweder als Rohschlamm verbrannt, an andere Anlagen abgegeben oder anderweitig stabilisiert. Im Hinblick auf die Hygienisierung ist zu beachten, dass Faultürme i. d. R. nicht ausgelastet sind. Gemessen an der Dimensionierung mit 20 Tagen Aufenthaltszeit für den Schlamm gibt es nach einer Umfrage auf allen hessischen Kläranlagen mit Faulung eine Reservekapazität von 100 %, d. h. durchschnittliche Aufenthaltszeiten von 40 Tagen können erreicht werden.

Von den in 2004 erfassten 1152 Anlagen mit Faulgaserzeugung verfügen 722 (63 %) über ein BHKW (Mineralölsteuererhebung), mit stark steigender Tendenz. Dies ist bedeutend für die Bereitstellung von Abwärme für eine eventuelle thermische Hygienisierung. Wird das Faulgas zur Stromerzeugung genutzt, steht kaum Abwärme für die Schlammheizung zur Verfügung.

Die **Klärschlammhygienisierung** mit Kalk wird auf rund 10 % der Anlagen (13,6 % der EW) durchgeführt, wobei Kalk oft auch zur Konditionierung vor der Entwässerung zugegeben wird. Die Pasteurisierung wird nur auf 6 Anlagen praktiziert (0,4 % EW) und hat damit derzeit keine Bedeutung.

Auf etwa 80 kommunalen Kläranlagen sind **Klärschlamm Trocknungsanlagen** installiert, entsprechend ca. 0,8 % aller Kläranlagen. Die Trocknungsanlagen weisen eine Gesamtkapazität von ca. 340.000 t TM/a auf, entsprechend ca. 17 % der Einwohnerwerte (Stand 08/2004). Damit könnten theoretisch ca. 17 % des in Deutschland anfallenden Klärschlammes (Schätzung DWA: 2 Mio. t TM/a) getrocknet werden. Die solaren Trocknungsanlagen stellen mit ca. 20 Anlagen in den GK 2-4 etwa 1,5 % der vorhandenen Trocknungskapazität. Die Niedertemperaturtrocknung (Kaltlufttrocknung/Umlufttrocknung) erfolgt in ca. 10 Anlagen der GK 3-5, mit einem Anteil an der gesamten Trocknungskapazität von ca. 2 %. Der Einsatz dieser Verfahren weist steigende Tendenz auf.

Die **Klärschlammverbrennung** mit Stromerzeugung und (teilweise) energetischer Nutzung der Abwärme betrifft 37 % der gesamten Klärschlammmenge (in 2006 bereits auf über 40 % angestiegen) und wird betrieben in

- Monoklärschlammverbrennungsanlagen auf kommunalen Kläranlagen (17 Anlagen, mit Ausnahme einer Anlage alle GK 5, Gesamtkapazität ca. 484.000 t TM/a, geschätzte Auslastung 70 %)
- industriellen Klärschlammverbrennungsanlagen (k. A. zu Mengen an mit verbranntem kommunalem Klärschlamm, wegen der hohen Kosten allerdings eher geringer Anteil)
- Stein- und Braunkohlekraftwerken (genehmigte Kapazität Stand 08/04: 667.000 t TM/a, eingesetzte Menge ca. 280.000 t TM/a)
- Zementwerken (derzeit nur Probetrieb, Genehmigungsverfahren laufen)
- Abfallverbrennungsanlagen; spielt aus Kapazitätsgründen (ca. 49.000 t TM/a) und aus ökonomischen Gründen nur eine untergeordnete Rolle.

Die direkte **Klärschlammdeponierung** ist seit dem Auslaufen der Übergangsfrist für die Ablagerung von Abfällen mit erhöhtem organischem Anteil im Juni 2005 nicht mehr relevant. Dies gilt aufgrund der sehr geringen Mengen auch für die Mitbehandlung von Klärschlamm in mechanisch-biologischen Behandlungsanlagen mit anschließender Deponierung.

Eine untergeordnete Rolle spielen **Sonderverfahren** (z. B. die Niederdruck-Nassoxidation - Loprox-Verfahren -, das Choren-Verfahren zur Erzeugung von Green Diesel und die Nieder-temperaturkonvertierung - Thermokatalyse), die bisher nur als Pilotanlagen existieren.

Auf Basis dieser Ergebnisse wurden die Klärschlamm-mengen in Abhängigkeit von der Größenklasse und dem gewählten Entsorgungspfad zusammengefasst (Tab. 28, Abb. 7 bis 9). Die wichtigsten Schlussfolgerungen sind:

Nassschlamm spielt zwar bei der Bewertung des Anteils an der gesamten TM-Fracht nur eine minimale Rolle (< 5 %), betrifft aber rund ein Drittel aller Kläranlagen, darunter fast alle kleinen Kläranlagen. Auch der Anteil an der Klärschlamm-menge (in m³ FM) liegt aufgrund des geringen Feststoffgehaltes etwa bei einem Drittel. Das bedeutet, dass hier große Mengen bei sehr dezentralem Anfall betrachtet werden müssen.

Getrockneter Klärschlamm fällt nur auf relativ wenigen großen Anlagen an, macht aber fast 25 % der gesamten TM-Fracht aus.

Die landwirtschaftliche Verwertung betrifft mehr als 75 % der kommunalen Kläranlagen, aber nur rund 50 % der gesamten TM-Fracht.

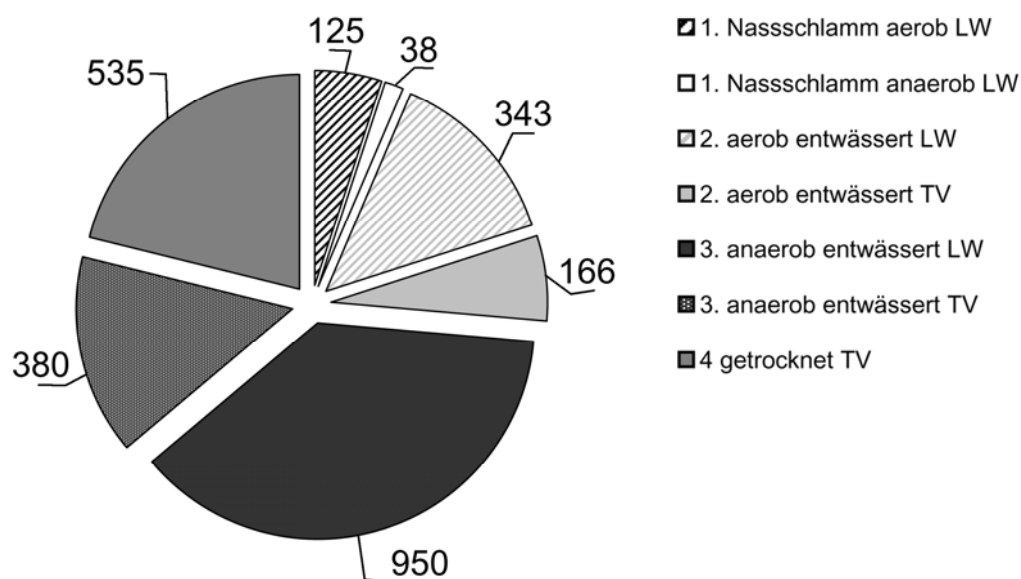


Abb. 7: TM-Fracht nach Klärschlammarten (1000 t/a)

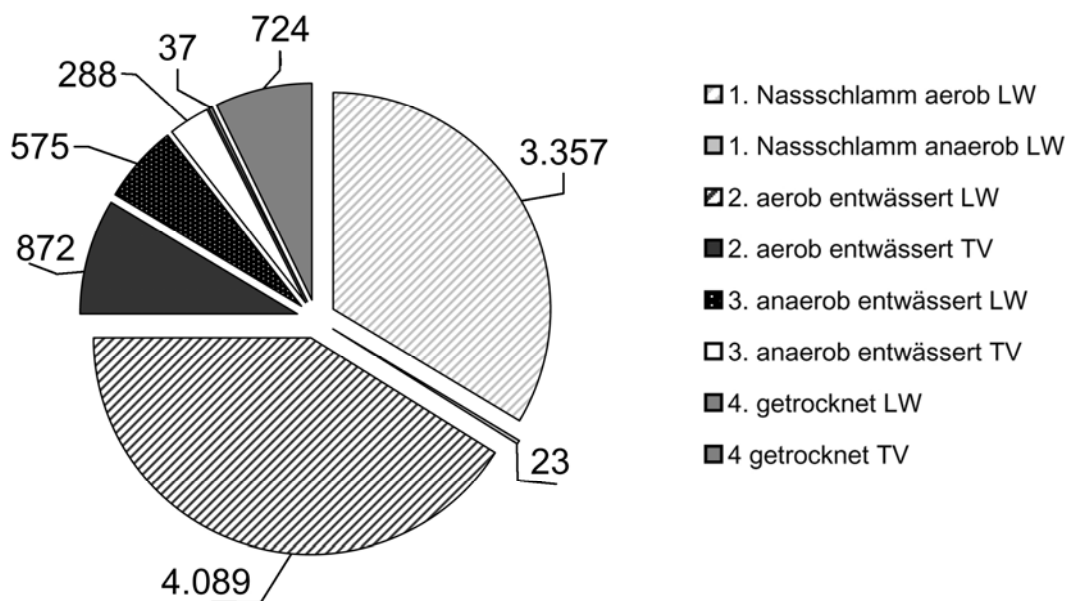


Abb. 8: Anzahl der Kläranlagen nach Klärschlammarten

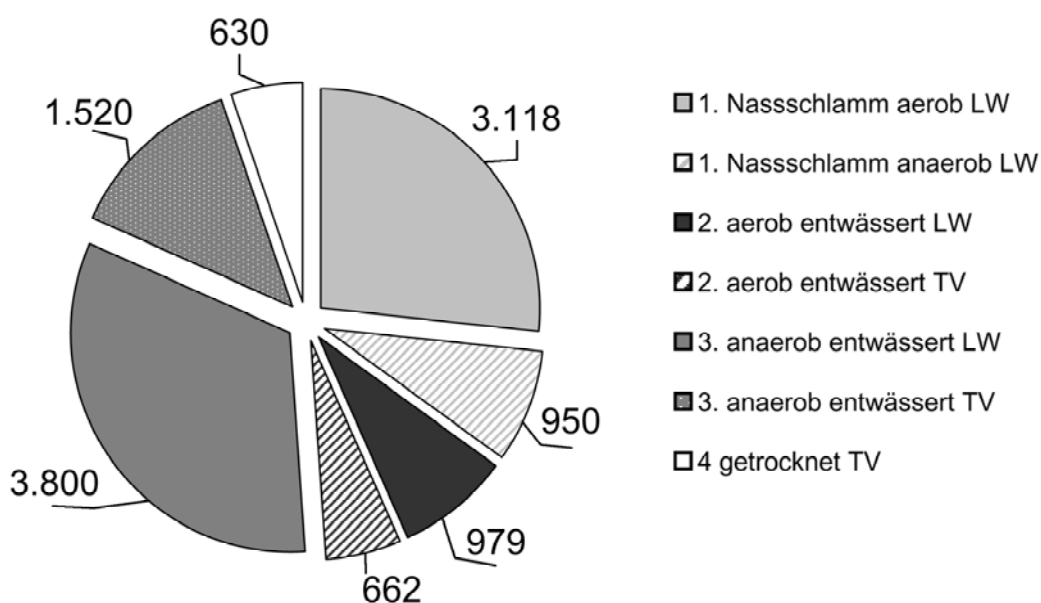


Abb. 9: Schlammengen nach Klärschlammarten (1000 m³/a)

8 Auswahlkriterien für die Hygienisierungsverfahren

Die unterschiedlichen Verfahren der Klärschlammhygienisierung sind nicht für alle Kläranlagengrößen gleichermaßen geeignet. Insbesondere Verfahren mit hohem anlagentechnischem Aufwand und erhöhten Anforderungen an die Bauweise und Betriebsführung sind auf kleinen Kläranlagen auch nicht wirtschaftlich einsetzbar. Daher wurden den in Tabelle 28 typisierten Kläranlagen der Größenklassen 1.000 EW, 10.000 EW, 50.000 EW und 300.000 EW und den dabei jeweils anfallenden Klärschlammarten Hygienisierungsverfahren zugeordnet, die

- sich aufgrund der chemischen, physikalischen und biologischen Schlammeigenschaften eignen
- auf die jeweils charakteristischen technischen und logistischen Rahmenbedingungen der Kläranlagen abgestimmt sind und die
- dem Stand der Technik entsprechen.

Die Auswahl der Verfahren wurde in Expertengesprächen abgestimmt mit:

- Dr. U. Loll, Obmann der DWA-AG „Hygienisierung von Klärschlamm sowie
- Prof. Dr. R. Böhm, Institut für Umwelt- und Tierhygiene, Universität Hohenheim.

Tabelle 29 zeigt, mit welchen Schlamm-mengen auf Kläranlagen unterschiedlicher Größenordnung bei dem spezifischen Schlammanfall von 60 g/(EW*d), zu rechnen ist.

Tab. 29: Berechnete Klärschlamm-anfall-mengen bei einem spezifischen Schlammanfall von 60 g/(EW*d) als Dimensionierungshilfen für Hygienisierungsanlagen

	aerobe Stabilisierung		anaerobe Stabilisierung	
	1.000 EW	10.000 EW	50.000 EW	300.000 EW
Nassschlamm	550 t/a FM TM = 4 % spez. Gew.= 1 t/m ³ 550 m ³ /a 22 t/a TM	5.500 t/a FM TM = 4 % spez. Gew.= 1 t/m ³ 5.500 m ³ /a 220 t/a TM	Faulschlamm, eingedickt: 27.000 t/a FM TM = 4 % spez. Gew.= 1 t/m ³ 27.000 m ³ /a 1.100 t/a TM	Faulschlamm, eingedickt: 165.000 t/a FM TM = 4 % spez. Gew.= 1 t/m ³ 165.000 m ³ /a 6.600 t/a TM
entwässerter Schlamm	88 t/a FM TM = 25 % Schüttdichte = 1 t/m ³ 88 m ³ /a	880 t/a FM TM = 25 % Schüttdichte = 1 t/m ³ 880 m ³ /a	3.700 t/a FM TM = 30 % Schüttdichte = 1 t/m ³ 3.700 m ³ /a	22.000 t/a FM TM = 30 % Schüttdichte = 1 t/m ³ 22.000 m ³ /a
getrockneter Schlamm	-	-	-	7.800 t/a FM TM = 85 % Schüttdichte = 0,5 t/m ³ 15.600 m ³ /a

Tabelle 30 veranschaulicht, welche Anlagengrößen und -typen in der vorliegenden Studie mit den zur Auswahl stehenden Hygienisierungsverfahren kombiniert werden und welche Kriterien zu einem Verzicht auf das Verfahren bei einer Kläranlagen-Größenklasse geführt haben.

Die jeweiligen Hygienisierungsverfahren wurden den gemäß CEN definierten Hygieneniveaus (CEN 2007, vgl. Tab. 14) zugeordnet. In Abhängigkeit von den hygienisierenden Einflussfaktoren (z. B. Temperatur, pH-Wert, Einwirkzeit, etc.) werden bei Anwendung von Verfahren mit mittlerem und hohen Hygieneniveau auch widerstandsfähigere Organismen abgetötet (BÖHM 2007, vgl. Abb. 3).

Tab. 30: Klärschlamm-Hygienisierungsverfahren nach Kläranlagen-Größenklassen

Verfahren	1.000 EW	10.000 EW	50.000 EW	300.000 EW
	aerobe Stabilisierung		anaerobe Stabilisierung	
Kalkhydrat-Behandlung	für Nassschlamm ▪ mobil ▪ ohne Speicher ▪ mit Speicher	für Nassschlamm ▪ ohne Speicher ▪ mit Speicher	zu hoher Materialeinsatz	
Brantkalk-Behandlung		zu entwäss. KS	zu entwäss. KS	zu hoher Materialeinsatz
Pasteurisierung	Einsatz nur vor anaerober Behandlung		anaerobe Stabilisierung im Anschluss	
Kompostierung		Weiterverarbeitung entwäss. KS	Weiterverarbeitung entwäss. KS	erforderlicher Flächenbedarf zu hoch
Langzeitlagerung	Für Nassschlamm ▪ Rundbehälter ▪ Trockenbeet für entwäss. KS	für entwäss. KS	erforderliches Behältervolumen zu groß	
Vererdung	für Nassschlamm	für Nassschlamm	erforderlicher Flächenbedarf zu hoch	
Solare Trocknung/Hochtemperaturpelletierung (HTP)	für entwäss. KS ▪ mobiler Entwässerung ▪ mobile Entwässerung und HTP	für entwäss. KS ▪ stationäre Entwässerung ▪ stationäre Entwässerung und HTP	erforderlicher Flächenbedarf zu hoch	
Thermische (Voll-)Trocknung	hohe Investitionskosten/ungeeignet für o. g. Größenklassen			für entwässerten KS

Definition der Hygieneniveaus gemäß CEN (2007; vgl. Tab. 14): hellgrau: niedriges Hygieneniveau, mittelgrau: mittleres Hygieneniveau, dunkelgrau: hohes Hygieneniveau

Aus den Expertengesprächen ergaben sich folgende Kriterien für die Auswahl der verschiedenen Hygienisierungsverfahren:

- Mit dem Kalk Einsatz als chemische Hygienisierungsmethode lassen sich – sorgfältig durchgeführt – mittlere Hygienisierungsniveaus erreichen. Kalk ist auch auf kleineren (Kalkhydrat) bis mittleren (Brantkalk) Kläranlagen einsetzbar.
- Die Pasteurisierung nach aerober oder anaerober Stabilisierung ist nicht empfehlenswert, da hierdurch ein erneuter Nährstoffaufschluss stattfindet, sodass der Klärschlamm biologisch instabil wird. Da alle Gegenspieler der pathogenen Organismen bei der Pasteurisierung abgetötet werden, ist das Material zudem für Reinfektionen mit Pathogenen äußerst anfällig. Eine Pasteurisierung kann daher nur vor einer Stabilisierung eingesetzt werden. Da die aerobe Stabilisierung den gesamten Abwasserstrom betrifft, kommt eine vorgeschaltete Pasteurisierung für die kleineren Kläranlagen, die i. d. R. aerob stabilisieren, aus Kostengründen nicht in Betracht. Auf größeren Kläranlagen kann die Pasteurisierung vor der dort häufig vorzufindenden anaeroben Stabilisierung im Faulturm angesiedelt werden.
- Die Kompostierung ist als Entseuchungsmethode auch von langzeitgelagerten Schlämmen wirkungsvoll, sofern mit ausreichend Strukturmaterial und C-Trägern gearbeitet wird, z. B. mit Bioabfall.

- Für eine Langzeitlagerung im Schilfbeet (Vererdung) oder anderweitig sollte im Hinblick auf einen hohen Entseuchungsgrad eine Lagerzeit von mindestens 1 Jahr nach Beschickungsende gewählt werden.
- Die solare Trocknung als neues Verfahren wird ausgewählt, da sie in jüngster Zeit insbesondere auf kleinen und mittleren Anlagen eingesetzt wird, um eine kostengünstige Volumenreduzierung und Stabilisierung des Klärschlammes zu erreichen. Noch im Versuchsstadium befindet sich die Hochtemperaturpelletierung, mit der die mangelnde Hygienisierungswirkung der Solaren Trocknung ausgeglichen werden soll.
- Mit der thermischen (Voll-)trocknung wird i. d. R. ein wirkungsvoller Hygienisierungseffekt erreicht. Allerdings ist eine Trocknungsanlage nur für größere Kläranlagen wirtschaftlich und wird meist nur als Vorbereitungsschritt zur thermischen Verwertung durchgeführt.
- Die aerob-thermophile Stabilisierung, bei welcher der Klärschlamm belüftet wird, soll nicht in die ökonomische Betrachtung aufgenommen werden, da sie eine sehr ungünstige Energiebilanz aufweist: Die Belüftung ist energieaufwändig und im Gegensatz zur Vergärung wird kein energiereiches Biogas erzeugt.
- Im Faulturm (vgl. Biogasanlage) können wegen der kontinuierlichen Beschickung und s. g. Kurzschlussströmungen – insbesondere bei mesophilem Betrieb – ggf. nur unzureichende Hygienisierungsleistungen erreicht werden. Die Errichtung von Faultürmen ist mit größerem technischem Aufwand verbunden und wird erst ab einer gewissen Kläranlagengröße rentabel. In der Regel verfügen geeignete Kläranlagen über einen mesophil betriebenen Faulturm. Eine technische Umrüstung auf den hygienisch wirkungsvolleren thermophilen Betrieb ist material- und konstruktionsbedingt nicht möglich. Deshalb soll die anaerob thermophile Vergärung in der vorliegenden Studie nicht weiter verfolgt werden.
- Die Klärschlammdeintegration ist noch im Erprobungsstadium und eher für mittlere bis größere Anlagen von Interesse.
- Als entwicklungsfähig für den Einsatz in kleineren Kläranlagen wird die Klärschlamm-Behandlung mit Mikrowellen eingeschätzt.

Ziel des vorliegenden Gutachtens ist es, in Bezug auf Hygienisierungsvorschriften für die Novelle der AbfKlärV eine Entscheidungshilfe zu bieten. Aus den in Kapitel 7 dargestellten Häufigkeiten der Kläranlagen-Größenklassen und der jeweils erzeugten Klärschlammengen und Klärschlammarten wird ersichtlich, dass es sich bei ca. $\frac{3}{4}$ aller Kläranlagen in Deutschland um Anlagengrößen ≤ 10.000 EW handelt, für die die Vorgaben der Klärschlammhygienisierung in Bezug auf verfügbare Technik, Logistik und Kosten eine Herausforderung darstellt. Die restlichen, ca. $\frac{1}{4}$ der in Deutschland bestehenden Kläranlagen weisen eine Größe auf, die häufig eine weitergehende Abwasser- und Klärschlammbehandlung erfordern. Der Klärschlamm dieser Anlagen wird zunehmend thermisch verwertet. Sofern Klärschlamm dieser Anlagengröße landwirtschaftlich verwertet wird, hat er i. d. R. eine gewisse Vorbehandlung erfahren. Mit zunehmenden Anlagendurchsätzen nehmen zudem die einwohnerspezifischen Kosten für die Hygienisierung ab.

In Tabelle 10 wird eine Bewertung der Hygienisierungsverfahren vorgenommen. Danach ist die aerob-thermophile Stabilisierung erst für Kläranlagen ab ca. 10.000 EW geeignet, die s. g. duale thermophile anaerobe Stabilisierung für größere Kläranlagen ab ca. 30.000 EW. Dies begründet den Sachverhalt, dass thermophile aerobe und aerob/anaerobe Verfahren (s. g. duale Stabilisierung) oben als wirksame Hygienisierungsverfahren aufgeführt, bei der weitergehenden Kostenbetrachtung aber nicht mehr betrachtet werden.

Aufgrund des begrenzten Umfangs der Studie und der o. g. Zielsetzung wurde der Schwerpunkt der Technikbewertung und Kostenbetrachtung auf die Frage der Machbarkeit für kleinere Kläranlagen gelegt.

Es wird infolgedessen davon ausgegangen, dass bei den entsprechenden Rahmenbedingungen und hohen Anlagendurchsätzen die beiden o. g. thermophilen Verfahren wirtschaftlich sind.

Abbildung 10 zeigt die für die weiteren Ausführungen ausgewählten Klärschlammhygienisierungsverfahren. Die Verfahrensbeschreibungen können im Wesentlichen Kapitel 3 entnommen werden. Annahmen und Kenndaten für die Berechnungen werden in Kapitel 9 aufgeführt.

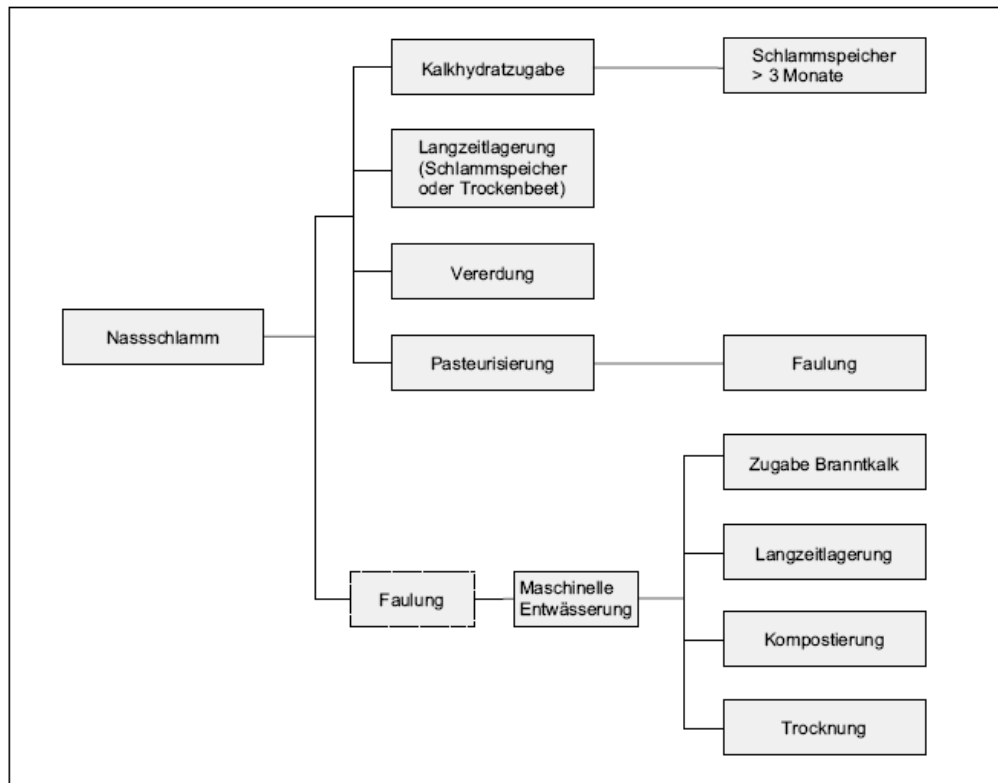


Abb. 10: Verfahren der Klärschlammhygienisierung

9 Berechnungsgrundlagen und Kosten ausgewählter Hygienisierungsverfahren

Im Folgenden werden für die ausgewählten Klärschlamm-Hygienisierungsverfahren die Berechnungsgrundlagen beschrieben und Kosten der einzelnen Hygienisierungsverfahren dargestellt.

9.1 Kalkhydratbehandlung von Flüssigschlamm

Je nach Kläranlagengröße und -ausstattung sind verschiedene Konzepte für die Kalkhydratzugabe möglich:

- Kalkmilchzugabe direkt aus Tankwagen in den Schlamm-speicher
- Kalkmilchlager und -dosierstation auf der Kläranlage
- Kalkmilchaufbereitungsanlage auf der Kläranlage

Alternativ kann die Kalkmilchzugabe auch vor der maschinellen – ggf. mobilen – Entwässerung erfolgen (mit oder ohne Kalkmilchaufbereitungsanlage auf der Kläranlage) mit anschließender dreimonatiger Lagerung des entwässerten Schlammes.

Nach Empfehlung der DWA sollte die Partikelgröße des Klärschlammes < 5 mm Durchmesser sein. Eine Absiebung oder Zerkleinerung des Nassschlammes vor der Kalkhydratzugabe ist in der Regel nicht erforderlich, da Kläranlagen heutzutage üblicherweise mit Feinrechenanlagen mit einem freien Durchgang für Partikel mit 5-8 mm Durchmesser ausgestattet sind. Dies wird als ausreichend vorausgesetzt.

9.1.1 Konzepte der Kalkhydratzugabe

Kalkmilchzugabe direkt in den Schlammspeicher

Bei der Einmischung der Kalkmilch direkt in den gefüllten Schlammspeicher erfolgt die Dosierung direkt aus dem Kalkmilchliefervfahrzeug; eine Lager- und Dosierstation auf der Kläranlage ist nicht erforderlich.

Der Schlammspeicher muss dabei über eine wirksame Mischeinrichtung verfügen, um eine homogene Einmischung der Kalkmilch in den Schlamm sicherzustellen. Vorteilhafter ist ein vorgeschalteter Reaktionsbehälter oder ein Umpumpen des Schlammes mit gleichzeitiger Kalkmilchzugabe in die Schlammlleitung, bis ein konstanter pH-Wert im Schlamm erreicht ist.

Ein übliches Silofahrzeug transportiert 25 t Kalkmilch. Da der Preis i. d. R. je Fahrzeug berechnet wird, erhöht sich bei Abnahmemengen von weniger als 25 t der Einheitspreis je t Kalkmilch deutlich. Ein gemeinsamer Bezug der Kalkmilch durch mehrere Kläranlagen kann zu einer Optimierung der Baugrößen für die Schlammspeicher sowie einer Reduzierung der Lieferkosten für Kalkmilch führen. Denkbar ist außerdem, eine gemeinsame Aufbereitungsstation für Kalkmilch zu installieren und die Kalkmilch mit einem gemeinsam angeschafften Transportfahrzeug zu den dezentralen Kläranlagen zu transportieren.

Kalkmilchlager und -dosierstation auf der Kläranlage

Folgende Ausstattung des Lagerbehälters für die Kalkmilch, inkl. Dosiereinrichtung, ist vorzusehen:

- Rührwerk mit Intervallschalter
- Füllstandsüberwachung mit Min-/Max-Grenzwertgeber
- Dosierpumpe (Exzentrerschneckenpumpe oder Membranpumpe)

An den Standort der Lager- und Dosierstation sind folgende Anforderungen zu stellen:

- Frostfreie Aufstellung (d. h. in einem Gebäude)
- Alternativ: Isolierung und Begleitheizung
- Leitungen: so kurz wie möglich, doppelt ausgelegt (wegen Verstopfungsgefahr)

Zusätzlich empfohlene Ausstattung:

- Mischreaktor mit pH-Sonde (alternativ: direkte Einmischung in Schlammspeicher)

Durch Einsatz eines Reaktionsbehälters lässt sich der einzustellende pH-Wert von $12,5 \pm 0,3$ besser überwachen als bei direkter Einmischung in den Schlammspeicher. Außerdem werden dadurch die Ammoniakemissionen gering gehalten.

Kalkmilchaufbereitungsanlage auf der Kläranlage

Der Kalkbedarf für die Konditionierung von 5.500 m^3 Schlamm, d. h. der Menge, die in einer für 10.000 EW ausgelegten Kläranlage anfällt, beträgt jährlich ca. 240 m^3 bzw. 275 t. Für diese Kalkmilchmenge ist die Anlieferung im Tankwagen und Lagerung auf der Kläranlage

nicht mehr wirtschaftlich. Hier wird eine Kalkmilchaufbereitungsanlage vorgesehen mit der aus Kalkhydrat oder Branntkalk Kalkmilch hergestellt wird.

Eine Kalkmilchaufbereitungsanlage besteht im Wesentlichen aus folgenden Komponenten:

- Kalksilo für Kalkhydrat oder Branntkalk mit Abluftfilter, Überdrucksicherung und Füllstandsmessung
- Zellenradschleuse
- Kalkförderer (z. B. Schnecke)
- Trockengutdosierer
- Kalklöschbehälter (nur bei Branntkalk)
- Aufschlämmbehälter mit automatischer Wasserdosierung, incl. Rührwerk und Füllstandsüberwachung
- Pumpstation für Kalkmilchdosierung

Beim Einsatz von Branntkalk ist ein geringeres Silovolumen erforderlich, da die Schüttdichte ca. doppelt so hoch ist wie bei Kalkhydrat. Dafür ist zusätzlich ein Kalklöschbehälter mit Rührwerk, Temperaturüberwachung und Wasserdosierung vorzusehen.

Üblicherweise wird auf den Kläranlagen Kalkhydrat eingesetzt, da damit neben dem geringeren anlagentechnischen Aufwand auch geringere Gesundheitsgefährdung beim Umgang mit dem Ausgangsprodukt verbunden ist.

Die Kalkmilch wird chargenweise aufbereitet, so dass auch hier ein Kalkmilchlagerbehälter installiert wird. Es gelten hierfür die bereits genannten Anforderungen.

Kalkhydratzugabe vor der (mobilen) maschineller Entwässerung

Eine Kalkzugabe vor der maschinellen Entwässerung ist nur beim Einsatz von Kammerfilterpressen zu empfehlen. Bei Zentrifugen kann es zu erhöhten Verschleißerscheinungen kommen, so dass eine Kalkzugabe zum Nassschlamm nicht erfolgen sollte. Bei Bandfilterpressen setzen sich die Filterbänder sehr schnell zu. Auch hier ist eine Kalkzugabe zum Nassschlamm nicht zu empfehlen.

Durch die Kalkzugabe erhöht sich, bezogen auf die TM, die auszubringende Klärschlammmenge, allerdings wird auch ein höherer Trockensubstanzgehalt im Filterkuchen erreicht. Die Filterkuchenmenge wird sich bei Annahme einer Steigerung des TM-Gehaltes von 25 % (ohne Kalkzugabe) auf 30 % (mit Kalkzugabe) um ca. 4 % erhöhen. Eine Konditionierung mit organischen Flockungshilfsmitteln ist nicht erforderlich.

9.1.2 Ausstattung der Schlammspeicher

Die erforderliche Einwirkzeit von drei Monaten bedingt, dass auf der Kläranlage bei Nassschlammverwertung mindestens zwei, besser drei Schlammspeicher vorhanden sind für die Schritte „Befüllen – Einwirken – Entleeren“. Sind nur zwei Speicher vorhanden, muss die Entleerung nach der Einwirkzeit innerhalb eines relativ kurzen Zeitraumes erfolgen.

Erfolgt die Kalkhydratzugabe vor einer maschinellen Entwässerung des Schlammes, kann der zusätzliche Schlammspeicher zur Sicherstellung der Einwirkzeit entfallen. Dafür ist ein überdachter Schlammagerplatz vorzusehen.

Bei der Auslegung des Schlammspeichervolumens sind neben der erforderlichen Einwirkzeit von drei Monaten auch die sich aus dem Düngemittelrecht ergebenden Ausbringungsbeschränkungen für Klärschlamm zu berücksichtigen.

Schlammspeicher sind in der Regel mit einem Trübwasserabzug sowie einem Rührwerk ausgestattet. In den Schlammspeichern, in denen der kalkstabilisierte Schlamm einwirkt, muss eine Umwälzeinrichtung mit größerer Leistung installiert werden, da der kalkstabilisierte

Schlamm stärker zur Sedimentation neigt. Sämtliche Anlagenteile müssen beständig gegen die hohen pH-Werte und Ammoniak sein.

Bei Kläranlagen an geruchssensiblen Standorten bzw. zur Minderung von NH_3 -Emissionen ist die Abluft ggf. aus den Schlammspeichern zu fassen und zu behandeln (z. B. Einleitung in Belebungsanlage).

Zur Protokollierung der Prozessbedingungen sind von jeder Charge prüffähig festzuhalten:

- der Anfangs-pH-Wert des Schlammes und
- die Einwirkzeit.

9.1.3 Investitionskostenberechnung

Für die Ermittlung der Investitionskosten werden die folgenden fünf Varianten betrachtet:

„Kalkhydrat mobil 1000 ohne KS-Speicher“: Kläranlage mit einer Kapazität von 1000 EW; Kalkhydratzugabe vor der (mobilen) maschinellen Entwässerung; überdachter Schlammplatz wird als vorhanden vorausgesetzt.

„Kalkhydrat 1000 ohne KS-Speicher“: Kläranlage mit einer Kapazität von 1000 EW; Kalkmilchlager und -dosierstation auf der Kläranlage; offener, mindestens zwei getrennte Behälter umfassender Nassschlamm-speicher mit ausreichend Lagervolumen wird als vorhanden vorausgesetzt.

„Kalkhydrat 1000 mit KS-Speicher“: Kläranlage mit einer Kapazität von 1000 EW; Kalkmilchlager und -dosierstation auf der Kläranlage; offener, mindestens zwei getrennte Behälter umfassender Nassschlamm-speicher mit ausreichend Lagervolumen ist zu errichten.

„Kalkhydrat 10000 ohne KS-Speicher“: Kläranlage mit einer Kapazität von 10000 EW; Kalkmilchaufbereitungsanlage auf der Kläranlage; offener, mindestens zwei getrennte Behälter umfassender Nassschlamm-speicher mit ausreichend Lagervolumen wird als vorhanden vorausgesetzt.

„Kalkhydrat 10000 mit KS-Speicher“: Kläranlage mit einer Kapazität von 10000 EW; Kalkmilchaufbereitungsanlage auf der Kläranlage; offener, mindestens zwei getrennte Behälter umfassender Nassschlamm-speicher mit ausreichend Lagervolumen ist zu errichten.

Des Weiteren werden bei der Kostenermittlung folgende Anlagenkomponenten berücksichtigt:

- Kalkmilchlager und -dosierstation
- Mischreaktor
- Kalkmilchaufbereitungsanlage (nur bei Anlagegröße 10.000 EW)
- zusätzliches Rührwerk im Schlamm-speicher

Außerdem sind die Kosten folgender Betriebsmittel in die Berechnung eingegangen:

- $\text{Ca}(\text{OH})_2$
- Strom
- Wasser (bei Kalkmilchaufbereitung auf der Kläranlage)

Eine Abluftbehandlung wird bei der Kostenschätzung nicht berücksichtigt.

9.1.4 Betriebskostenberechnung

Für die Betriebskostenberechnung wird von einer Dosiermenge von $10 \text{ kg Ca}(\text{OH})_2/\text{m}^3$ ausgegangen (DWA-Empfehlung: $7\text{-}15 \text{ kg}/\text{m}^3$). Damit ergibt sich bei 20 %iger Kalkmilch eine Dosierung von 50 kg bzw. $44 \text{ l Kalkmilch}/\text{m}^3$ Schlamm mit folgenden Auswirkungen:

- Erhöhung Nassschlammmenge um 4,4 %
- Erhöhung der Trockenmasse im Schlamm um 25 % (bei 4 % TM im Schlamm)
- weitergehende Eindickung während Lagerzeit auf 5 % TM

Insgesamt ergeben sich für die Kalkhydratbehandlung von Nassschlamm bei unterschiedlichen Rahmenbedingungen für die Anlagengrößen 1.000 EW und 10.000 EW die in Tabelle 31 zusammengestellten Kosten.

9.2 Pasteurisierung von Nassschlamm

Das Verfahren ist nur für größere Kläranlagen, die bereits über einen Faulturm verfügen, sinnvoll (vgl. Kap. 8.1). Es wurden deshalb die Varianten für die 50.000 EW- sowie die 300.000 EW-Kläranlage berechnet.

Für den – sehr verbreiteten – Fall, dass größere Kläranlagen über ungenutzte Faulraumkapazitäten verfügen, kann für kleinere Anlage eine Mitpasteurisierung und anschließende erneute Stabilisierung im Faulturm erwogen werden. Um das Transportvolumen zu verringern wird hierzu vor dem Transport eine Klärschlammmentwässerung vorgenommen. Der entwässerte Klärschlamm wird vor der Pasteurisierungsanlage dem Stoffstrom der größeren Anlage zugesetzt und durchläuft mit ihm die anschließenden Behandlungsgänge. Eine anteilmäßige Rücknahme des behandelten Klärschlammes durch die kleineren Anlagen wird ebenfalls berücksichtigt. Dieser Mitbehandlung von Klärschlämmen sind derzeit noch gesetzliche (AbfKlärV 1992) sowie verfahrenstechnische Grenzen gesetzt, die in dem TM-Gehalt des zu hygienisierenden Klärschlammes begründet ist. Geringe TM-Gehalte bedingen hohe Transport- und Behandlungskosten. Letztendlich sollte der hygienisierte Nassschlamm auch als solcher weiter verwertet werden, da bei einer Entwässerung das anfallende Presswasser erneut dem Klärprozess zugeführt („Rückbelastung!“) oder anderweitig entsorgt werden müsste. Abgepresster Klärschlamm ist zwar transportwürdiger, für die Pasteurisierung und Faulung sind aber Höchstwerte für die TM einzuhalten, da sich ansonsten Fördern und Pumpen des Klärschlammes problematisch gestaltet. Außerdem sind die aerob stabilisierten Klärschlämme für eine alleinige Faulung aufgrund des geringen oTM-Gehaltes nur bedingt geeignet.

In Anlehnung an die BioAbfV wird von einer Behandlungstemperatur von 70 °C während einer Behandlungsdauer von 60 Minuten bei Batch-Betrieb ausgegangen. Eine kontinuierliche Betriebsweise (24 h, 7 d/Woche) soll jedoch angestrebt werden mit dem Ziel, eine möglichst effektive Wärmenutzung durch Wärmerückgewinnung sicherzustellen. Hierfür sind mindestens drei Pasteurisierungsbehälter erforderlich, in denen die Verfahrensschritte „Befüllen – Einwirken – Entleeren“ im Batch-Betrieb zeitlich versetzt ablaufen können.

Die Klärschlammpasteurisierung wird durchgeführt mittels

- Dampf (Schlammmenge erhöht sich durch Wasserdampf um ca. 10 %)
- Wärmetauscher und
- Tauchbrenner.

Zur Protokollierung der Prozessbedingungen der Pasteurisierung sind fortlaufend und prüffähig aufzuzeichnen:

- Temperatur im Reaktor und
- Einwirkzeit.

Tab. 31: Kosten für die Kalkhydratbehandlung von Nassschlamm

Verfahrensbezeichnung	Einheit	Kalkhydrat mobil 1000 ohne KS- Speicher	Kalkhydrat 1000 oh- ne KS-Speicher	Kalkhydrat 1000 mit KS-Speicher	Kalkhydrat 10000 ohne KS-Speicher	Kalkhydrat 10000 mit KS-Speicher
Parameter	Einheit					
Einwohner		1.000	1.000	1.000	10.000	10.000
Abwasserbehandlung		aerobe Stabilisierung, der Hygienisierung vorgeschaltet				
TM-Gehalt vor Hygienisierung	%	4	4	4	4	4
Klarschlammmenge FM	m³/a	550	550	550	5500	5500
Klarschlammmenge TM	t/a	22	22	22	220	220
TM-Gehalt nach Kalkzugabe und La- gerung	%	28 (entwässert)	5	5	5	5
Klarschlammmenge FM	m³/a	98	550	550	5500	5500
Klarschlammmenge TM	t/a	27,5	27,5	27,5	275	275
Kostenarten						
Fixe Kosten	€/Jahr	0	12.272	20.878	36.254	57.826
Abschreibung	€/Jahr	0	6.562	10.768	19.948	30.203
Zinsansatz	€/Jahr	0	2.853	5.296	7.800	14.246
Versicherungen	€/Jahr	0	794	1.310	2.402	3.668
Reparatur/Instandhaltung	€/Jahr	0	2.063	3.503	6.104	9.710
Variable Kosten		7.500	3.324	3.324	9.315	9.315
Energie	€/Jahr	0	66	66	990	990
Betriebsstoffe	€/Jahr	2.200	2.200	2.200	6.600	6.600
Arbeit	€/Jahr	900	1.058	1.058	1.725	1.725
Transport	€/Jahr	0	0	0	0	0
mobile Entwässerung	€/Jahr	4.400	0	0	0	0
Summe jährliche Kosten	€	7.500	15.596	24.201	45.569	67.141
Kosten je Einwohner/Jahr	€	8	16	24	5	7
Kosten je Tonne KS-TM	€	341	709	1.100	207	305
Kosten je Tonne KS-FM	€	14	28	44	8	12

9.2.1 Anlagenauslegung

Für die weiteren Betrachtungen wird eine Pasteurisierung mit Wärmetauschern zugrunde gelegt. Es errechnen sich folgende Rohschlammengen bei:

- **gemeinsamer Eindickung von Primär- und Überschussschlamm in der Vorklärung:**
80 g/(EW*d) mit einem mittleren TM-Gehalt von 3 %, d. h. es fällt eine tägliche Rohschlammmenge von ca. 2,7 l/(EW*d) an.
- **maschineller Überschussschlammeindickung:**
Primärschlamm: 35 g/(EW*d) mit einem mittleren TM-Gehalt von 3 %, d. h. es fallen täglich ca. 1,2 l/(EW*d) Primärschlamm an.
Überschussschlamm: 45 g/(EW*d) mit einem mittleren TM-Gehalt von 5 %, d. h. es fallen täglich außerdem 0,9 l/(EW*d) Überschussschlamm an.
Rohschlamm (Summe aus Primär- und Überschussschlamm): 2,1 l/(EW*d)

Für eine Kläranlage mit einer Kapazität von 50.000 EW ergeben sich erforderliche Behandlungskapazitäten für den anfallenden Rohschlamm von 38.300-49.300 m³/a, bzw. 105-135 m³/d. Für eine Kläranlage mit einer Kapazität von 300.000 EW ergeben sich erforderliche Behandlungskapazitäten für den anfallenden Rohschlamm von 230.000-296.000 m³/a, bzw. 630-811 m³/d.

Es wird deutlich, dass bei der Pasteurisierung von Klärschlamm recht hohe Durchsätze kostenintensiv zu behandeln sind, der Klärschlamm nach der biologischen Stufe sich aber auch ohne zusätzliche Maßnahmen nicht weiter als bis auf 3-4 % eindicken lässt. Abhilfe ist z. B. mit einer Überschussschlammeindickung möglich, die Installation einer solchen ist aber mit weiteren Kosten verbunden, so dass die Variante in der vorliegenden Betrachtung nicht weiter verfolgt wird.

9.2.2 Investitionskostenberechnung

Für die Ermittlung der Investitionskosten werden folgende vier Varianten betrachtet:

„**Pasteurisierung 1000 in 50000**“: Aus einer Kläranlage mit einer Kapazität von 1.000 EW wird Klärschlamm zu einer 20 km entfernten zentralen Kläranlage mit Restkapazitäten in einer für 50.000 EW ausgelegten Pasteurisierungsanlage sowie eines Faulturms transportiert; es erfolgt eine Pasteurisierung mit Wärmetauschern und gemeinsame anschließende Stabilisierung und Entwässerung des Klärschlammes.

„**Pasteurisierung 10000 in 50000**“: Aus einer Kläranlage mit einer Kapazität von 10.000 EW wird Klärschlamm zu einer 50 km entfernten zentralen Kläranlage mit Restkapazitäten in einer für 50.000 EW ausgelegten Pasteurisierungsanlage sowie eines Faulturms transportiert, auf der eine Pasteurisierung mit Wärmetauschern und gemeinsame anschließende Stabilisierung und Entwässerung des Klärschlammes durchgeführt wird.

„**Pasteurisierung 50000**“: Kläranlage mit einer Kapazität von 50.000 EW; Pasteurisierung mit Wärmetauschern.

„**Pasteurisierung 300000**“: Kläranlage mit einer Kapazität von 300.000 EW; Pasteurisierung mit Wärmetauschern.

Dabei ist folgende Anlagentechnik zu berücksichtigen:

- Beschickungspumpe
- Mazerator
- drei Pasteurisierungsbehälter mit Temperaturüberwachung

- Entleerungspumpe
- Wärmetauscher zur Schlammwärmerückgewinnung und zur Wärmerückgewinnung
- Heißwasserkreislauf für Entseuchung der Pasteurisierungsstufe (insbesondere bei diskontinuierlich betriebenen Pasteurisierungsanlagen)
- Heizungsanlage (bei Kläranlagen mit Faulung bereits vorhanden, jedoch sind in diesem Fall technische Anpassungen, z. B. ein zusätzlicher Heizkreis mit höherer Vorlauftemperatur von mindestens 90 °C, erforderlich)
- Schaltanlage (Prozess muss vollautomatisch ablaufen).

9.2.3 Betriebskostenberechnung

Die Betriebskosten einer Pasteurisierungsanlage werden maßgeblich vom Wärmebedarf bestimmt. Da der Wärmebedarf linear von der Schlammmenge abhängig ist, ist eine gute Eindickung des Schlammes vor der Pasteurisierung zu empfehlen. Dabei muss der Schlamm jedoch pumpfähig bleiben.

Für die Erwärmung von 1 m³ Schlamm um 1 °C ist eine Energiezufuhr von ca. 1,16 kWh erforderlich. Es wird eine mittlere Temperatur des Rohschlammes von 12 °C für die weiteren Berechnungen zugrunde gelegt. Verluste aus der Wärmebereitstellung (Brennerwirkungsgrad) sowie Abstrahlverluste über Rohrleitungen und Behälteroberflächen werden nicht angesetzt, da diese anlagenspezifisch sehr stark variieren können.

Der Rohschlamm aus der Pasteurisierung muss vor der Zugabe zur Faulanlage auf ca. 40 °C abgekühlt werden. Durch Rückgewinnung über Wärmetauscher (geschätzter Wirkungsgrad: 70 %) kann eine effizientere Wärmenutzung erreicht werden. Unter Berücksichtigung des Bedarfs für die Faulung ergibt sich der erforderliche Zusatz-Wärmebedarf für die Pasteurisierung von 11,9 kWh/m³.

• Erwärmung auf 70 °C:	$1,16 \cdot (70 - 12)$	67,3 kWh/m ³
• Vorhandener Bedarf für Faulung:	$1,16 \cdot (36 - 12)$	27,8 kWh/m ³
• Wärmerückgewinnung:	$0,7 \cdot 1,16 \cdot (70 - 36)$	27,6 kWh/m ³
• Zusatz-Wärmebedarf für Pasteurisierung: (ohne Berücksichtigung von Wärmeverlusten)		11,9 kWh/m ³

Somit sind für die beiden Anlagengrößen folgende Wärmemengen zur Rohschlammpasteurisierung erforderlich:

- 50.000 EW: 0,45 - 0,6 MWh/a
- 300.000 EW: 2,74 - 3,52 GWh/a

Insgesamt ergeben sich für die Pasteurisierung von Nassschlamm bei verschiedenen Rahmenbedingungen für die Anlagengrößen 50.000 EW und 300.000 EW sowie Verfahrensvarianten mit der gemeinsamen Pasteurisierung von Klärschlamm aus unterschiedlichen Kläranlagen die in Tabelle 32 zusammengefassten Kosten.

Tab. 32: Kosten für die Pasteurisierung von Nassschlamm

Verfahrensbezeichnung		Pasteurisierung 1000 in 50000	Pasteurisierung 10000 in 50000	Pasteurisierung 50000	Pasteurisierung 300000
Parameter	Einheit				
Einwohner		1.000	10.000	50.000	300.000
Abwasserbehandlung		aerobe Stabilisierung		anaerobe Stabilisierung, der Hygienisierung nachgeschaltet	
TM-Gehalt vor Hygienisierung	%	25	25	3	3
Klärschlammmenge FM	m³/a	88	880	45.000	260.000
Klärschlammmenge TM	t/a	22	220	1.460	8.700
TM-Gehalt nach Hygienisierung und Faulung (Abbau org. Substanz: 40 %)	%			2	2
Klärschlammmenge FM	m³/a			45.000	260.000
Klärschlammmenge TM	t/a			900	5.200
TM-Gehalt nach Entwässerung	%	30	30	30	30
Klärschlammmenge FM	m³/a	88	880	3.000	17.340
Klärschlammmenge TM	t/a	22	220	900	5.200
Kostenarten					
Fixe Kosten	€/Jahr	1.923	19.228	96.142	240.057
Abschreibung	€/Jahr	1.148	11.483	57.417	139.417
Zinsansatz	€/Jahr	367	3.672	18.360	51.390
Versicherungen	€/Jahr	116	1.162	5.810	14.050
Reparatur/Instandhaltung	€/Jahr	291	2.911	14.555	35.200
Variable Kosten	€/Jahr	5.560	15.999	42.060	213.699
Reparatur/Instandhaltung	€/Jahr	0	0	0	0
Energie	€/Jahr	781	7.812	39.060	209.199
Betriebsstoffe	€/Jahr	0	0	0	0
Arbeit	€/Jahr	60	600	3.000	4.500
Transport	€/Jahr	319	3.187	0	0
mobile Entwässerung	€/Jahr	4.400	4.400	0	0
Summe jährliche Kosten	€	7.483	35.227	138.202	453.756
Kosten je Einwohner/Jahr	€	7	4	3	2
Kosten je Tonne KS-TM	€	340	160	125	69
Kosten je Tonne KS-FM	€	14	6	37	21

9.3 Klärschlammvererdung von Nassschlamm

Bei der Klärschlammvererdung ist keine mechanische Entwässerung des Schlammes erforderlich, so dass dieses Verfahren insbesondere für Kläranlagen ohne ein eigenes Entwässerungsaggregat geeignet ist, d. h. für Kläranlagen der Größenklassen 1 bis 3 und somit bis zu einer Ausbaugröße von 10.000 EW. Bei höheren Ausbaugrößen wirkt sich der Flächenbedarf als limitierend aus.

9.3.1 Anlagenauslegung

Über einer wasserdichten Fläche (z. B. Abdichtung mit Teichfolie) wird eine Filter- und Drainschicht aufgebaut, um das anfallende Sickerwasser fassen und ableiten zu können. Über dieser Schicht wird das Pflanzsubstrat aufgebracht. Dabei kommen sowohl Lehm- und Tonboden als auch Sand zum Einsatz. In dieses Pflanzsubstrat werden Schilfpflanzen gesetzt (Zuchtschilf oder standortnaher Schilf, ca. 6-7 Pflanzen pro m²).

Der Klärschlamm wird mit TM-Gehalten zwischen 1,5 und 5 % TM auf das Schilfbeet gepumpt. Nach 4 bis 8 Jahren Befüllung und einem Jahr Ruhezeit des Beetes wird die Klärschlammerde aus dem Beet ausgebaut und mindestens 6 Monate in Mieten nachgelagert. Aufgrund der mindestens 1½-jährigen beschickungsfreien Zeit sind demnach mindestens zwei Beete zu errichten.

Bis zum Ausbau des Beetes erfolgt entsprechend Herstellerangaben (S. REHFUS, EKO-PLANT 2007, mündl. Mitteilung) ein Abbau der organischen Trockensubstanz aus Klärschlamm und Schilfrückständen von ca. 45 %. Aufgrund des Kompostierungseffekts bei der Nachlagerung ist mit einer weiteren Reduktion der organischen TM um ca. 1/3 zu rechnen.

9.3.2 Investitionskostenberechnung

Für die Investitionskostenermittlung bei der Klärschlammvererdung werden folgende zwei Varianten betrachtet:

„**Vererdung 1000**“: Kläranlage mit einer Kapazität von 1.000 EW; Vererdung in einem zweigeteilten Vererdungsbeet

„**Vererdung 10000**“: Kläranlage mit einer Kapazität von 10.000 EW; Vererdung in einem zweigeteilten Vererdungsbeet

Der Flächenbedarf für eine Klärschlammvererdungsanlage liegt nach Literaturangaben zwischen 0,25 und 1,5 m²/EW, für die Berechnungen wird ein Flächenbedarf von 1 m²/EW angenommen.

9.3.3 Betriebskostenberechnung

Für die Betriebskostenberechnung sind insbesondere folgende Faktoren relevant:

- Schilfpflanzen
- Strom (Beschickungspumpen)
- Diesel (Ausbau Beete)

Insgesamt ergeben sich für die Vererdung von Nassschlamm bei unterschiedlichen Rahmenbedingungen für die Anlagengrößen 1.000 EW und 10.000 EW die folgenden Kosten (Tab. 33).

9.4 Langzeitlagerung von Nassschlamm in Schlammspeichern oder Trockenbeeten

9.4.1 Anlagenauslegung

Die Langzeitlagerung von Nassschlamm kann in konventionellen Schlammspeichern, aber auch in so genannten Trockenbeeten erfolgen. Die Dauer der **Langzeitlagerung von Nassschlamm** sollte mindestens ein Jahr nach Beschickungsende des Behälters betragen. Für die weiteren Berechnungen wird eine Lagerdauer von 15 Monaten zugrunde gelegt.

Für die Lagerung in Schlammspeichern sind zwei Schlammspeicher vorzusehen, die alternierend gefüllt und geleert werden, um die Mindestverweilzeit gewährleisten zu können. Die Speicher werden als konventionelle Schlammstapelbehälter mit Trübwasserabzug und Umwälzeinrichtung vorgesehen. Es werden runde Stahlbehälter mit einer Höhe von 4 bis 5 m, dichter Sohle, Rührwerk und Trübwasserabzug angenommen. Es wird angenommen, dass während der Lagerung eine Eindickung auf ca. 7 % TM und ein TM-Abbau um 10 % erfolgen.

- Für die Anlagengröße 1.000 EW ergibt sich ein erforderliches Speichervolumen von je Speicher $(550/12 \cdot 15)$ ca. 700 m³, d. h. insgesamt 1.400 m³.
- Für die 10.000 EW-Anlage berechnet sich das Speichervolumen zu ca. $3 \cdot 7.000$ m³. Diese Konzeption wird nicht weiter verfolgt, da aufgrund des hohen Platzbedarfes mit hohen Kosten zu rechnen ist.

Tab. 33: Kosten für die Vererdung von Nassschlamm

Verfahrensbezeichnung		Vererdung 1000	Vererdung 10000
Parameter	Einheit		
Einwohner		1.000	10.000
Abwasserbehandlung		aerobe Stabilisierung	
TM-Gehalt vor Hygienisierung	%	4	4
Klärschlammmenge FM	m ³ /a	550	5500
Klärschlammmenge TM	t/a	22	220
Klärschlammmenge TM bei Ausbau (TM-Abbau 45 %)	t/a	16,5	16,5
Klärschlamm TM nach Nachlagerung (TM-Abbau ca. 30 %)	t/a	12,9	129
Klärschlammmenge FM bei 0,8 t/m ³ FM und 50 % TM	m ³ /a	32,3	323
Klärschlammmenge FM bei 0,8 t/m ³ FM und 40 % TM	m ³ /a	40,4	404
Kostenarten			
Fixe Kosten	€/Jahr	17.560	127.843
Abschreibung	€/Jahr	8.131	57.368
Zinsansatz	€/Jahr	5.489	42.001
Versicherungen	€/Jahr	1.009	7.158
Reparatur/Instandhaltung	€/Jahr	2.932	21.316
Variable Kosten	€/Jahr	1.200	2.400
Reparatur/Instandhaltung	€/Jahr	0	0
Energie	€/Jahr	0	0
Betriebsstoffe	€/Jahr	0	0
Arbeit	€/Jahr	1.200	2.400
Summe jährliche Kosten	€	18.760	130.243
Kosten je Einwohner/Jahr	€	19	13
Kosten je Tonne KS-TM	€	853	592
Kosten je Tonne KS-FM	€	34	24

Bei der **Langzeitlagerung im Trockenbeet** sind mindestens zwei voneinander getrennte Beete sowie eine Lagerfläche für den aus dem Beet ausgeräumten Schlamm vorzusehen, um die Mindestverweilzeit sicherstellen zu können. Als Füllhöhe für die Trockenbeete werden max. ca. 0,8 m empfohlen, da bei größeren Beschickungshöhen Probleme beim Ausbau des Schlammes aus den Beeten auftreten können. Der Schlamm ist dann in tieferen Schichten pastös und somit nicht mehr pumpfähig, aber auch nicht stichfähig. Der TM-Gehalt des

Endproduktes kann stark schwanken. Er wird für die weiteren Berechnungen mit durchschnittlich 25 % TM und ein TM-Abbau von 20 % angenommen.

- Für die Anlagengröße von 1.000 EW wird eine Beetfläche pro Beet von ca. 860 m² (550/12*15/0,8), entsprechend ca. 1.700 m², benötigt.
- Für den Klärschlamm einer 10.000 EW-Anlage ergibt sich eine erforderliche Beetfläche von ca. 17.000 m². Diese Variante wird nicht näher betrachtet, da der Platzbedarf hoch ist und entsprechend hohe Kosten mit sich bringt.

9.4.2 Investitionskostenberechnung

Für die Investitionskostenermittlung der Langzeitlagerung werden nur Varianten für eine 1000 EW-Kläranlage berücksichtigt, und zwar in zwei verschiedenen Bauausführungen:

„Langzeitlagerung 1000 Rundbehälter“: Kläranlage mit einer Kapazität von 1.000 EW; einjährige Langzeitlagerung im Rundbehälter

Langzeitlagerung 1000 Trockenbeet“: Kläranlage mit einer Kapazität von 1.000 EW; einjährige Langzeitlagerung im Trockenbeet

9.4.3 Betriebskostenberechnung

Für die Betriebskostenermittlung sind folgende Betriebsmittel zu berücksichtigen:

- Strom
- Diesel (nur Ausbau Trockenbeete)

Für die Langzeitlagerung von Nassschlamm ergeben sich damit für die Anlagengröße 1.000 EW die folgenden Kosten (Tab. 34).

Tab. 34: Kosten für die Langzeitlagerung von Nassschlamm

Verfahrensbezeichnung		Langzeitlagerung Rundbehälter 1000 NS	Langzeitlagerung Trockenbeet 1000 NS
Parameter	Einheit		
Einwohner		1.000	1.000
Abwasserbehandlung		aerobe Stabilisierung	
TM-Gehalt vor Hygienisierung	%	4	4
Klärschlammmenge FM	m ³ /a	550	550
Klärschlammmenge TM	t/a	22	22
TM-Gehalt nach Langzeitlagerung	%	7	25
Klärschlammmenge FM	m ³ /a	283	70,4
Klärschlammmenge TM	t/a	19,8	17,6
Kostenarten			
Fixe Kosten		33.235	27.092
Abschreibung	€/Jahr	15.983	12.517
Zinsansatz	€/Jahr	9.725	8.498
Versicherungen	€/Jahr	1.969	1.553
Reparatur/Instandhaltung	€/Jahr	5.558	4.523
Variable Kosten		1.320	1.320
Reparatur/Instandhaltung	€/Jahr	0	0
Energie	€/Jahr	720	720
Betriebsstoffe	€/Jahr	0	0
Arbeit	€/Jahr	600	600
Summe jährliche Kosten	€	34.555	28.412
Kosten je Einwohner/Jahr	€	35	28
Kosten je Tonne KS-TM	€	1.571	1.291
Kosten je Tonne KS-FM	€	63	52

9.5 Branntkalkzugabe nach der mechanischen Entwässerung

Bei Zusatz von CaO (Calciumoxid, Branntkalk, ungelöschter Kalk) zu entwässertem Klärschlamm erwärmt sich das Kalk-Klärschlamm-Gemisch auf Temperaturen zwischen 55 und 70 °C. Dabei soll der Anfangs-pH-Wert des Kalk-Klärschlamm-Gemisches $12,5 \pm 0,3$ und die Temperatur des gesamten Gemisches mindestens 55 °C während 2 Stunden betragen.

Die Zugabe von Branntkalk kann nach jedem Entwässerungsverfahren erfolgen. Werden Kammerfilterpressen eingesetzt, ist eine zusätzliche Zerkleinerungseinrichtung vorzusehen, um eine bessere Einmischung des Kalks in den Filterkuchen zu erreichen. Üblicherweise wird bei Vorhandensein einer Kammerfilterpresse die Kalkmilchzugabe zum Nassschlamm vorgezogen, da der Kalk gleichzeitig als Konditionierungsmittel dient und damit auf die Zugabe von Polymeren als Flockungshilfsmittel verzichtet werden kann.

9.5.1 Anlagenauslegung

Folgende Anlagentechnik ist für eine Kalkzugabe nach der mechanischen Entwässerung erforderlich:

- Kalksilo, ca. 35 m³, mit Zellenradschleuse
- Rohrförderschnecke
- Feindosiereinrichtung
- Doppelwellenpaddelmischer
- Gurtförderer

Nach der Kalkzugabe sollte die Förderung des konditionierten Schlammes nicht mit einer Schnecke erfolgen, da durch die Zerkleinerungswirkung eine „Vermatschung“ des Schlammes auftreten kann.

Durch die starke Temperaturentwicklung und die pH-Wert-Anhebung entstehen geruchssensitive Brüden (Ammoniak). Aus diesem Grund sollte insbesondere das Mischaggregat geschlossen ausgeführt werden. Auch eine Kapselung des Förderbandes sowie der Schlammcontainer, ggf. in Verbindung mit einer Abluftabsaugung und -behandlung ist wegen der NH₃-Emission zu empfehlen. Für eine ausreichende Lüftung im Entwässerungsgebäude ist auf jeden Fall Sorge zu tragen, auch um den MAK-Grenzwert von max. 30 mg NH₃ /m³ sicher unterschreiten zu können.

Es wird davon ausgegangen, dass der Abwurf des Schlammes in Transportcontainer erfolgt, und in diesen die erforderliche Temperaturerhöhung sichergestellt ist. Eine dreimonatige Nachlagerung des gekalkten Klärschlammes ist vorzusehen.

Zur Protokollierung der Prozessbedingungen sind von jeder hergestellten Charge prüffähig zu festzuhalten:

- Mischungsverhältnis von Kalk zu Schlamm-trockenmasse
- Anfangs-pH-Wert des Kalk-Klärschlamm-Gemisches
- Temperatur frühestens zwei Stunden nach Mischung an drei Stellen, davon eine in der Außenzone des Gemisches.

9.5.2 Investitionskostenberechnung

Die Ermittlung der Investitionskosten wird für die Kläranlagen-Varianten für 10.000 EW und 50.000 EW berechnet, da dort i. d. R. auch eine Klärschlammmentwässerung durchgeführt wird.

„**Branntkalk 10000**“: Kläranlage mit einer Kapazität von 10.000 EW; mindestens dreimonatige Nachlagerung

„**Branntkalk 50000**“: Kläranlage mit einer Kapazität von 50.000 EW; mindestens dreimonatige Nachlagerung

9.5.3 Betriebskostenberechnung

In die Betriebskostenberechnung fließt der Strombedarf ein sowie der Kalkbedarf zur erforderlichen pH-Wert-Erhöhung im abgepressten Klärschlamm. Die Literaturwerte hierfür sind sehr divergierend (vgl. Kap. 3.9). Für die vorliegenden Berechnungen wurde eine Menge von 500 kg CaO/t Klärschlamm-TM gewählt. Damit ergeben sich Einsatzmengen von

- 125 kg/t Filterkuchen bei 25 % TM im entwässerten Schlamm und
- 150 kg/t Filterkuchen bei 30 % TM im entwässerten Schlamm.

Insgesamt errechnen sich für die Klärschlammbehandlung von abgepresstem Klärschlamm bei Anlagengrößen von 10.000 EW und 50.000 EW die folgenden Kosten (Tab. 35).

Tab. 35: Kosten für die Branntkalkbehandlung von entwässertem Schlamm

Verfahrensbezeichnung		Branntkalk 10000	Branntkalk 50000
Parameter	Einheit		
Einwohner		10.000	50.000
Abwasserbehandlung		aerobe Stabilisierung	anaerobe Stabilisierung
TM-Gehalt vor Hygienisierung	%	25	30
Klärschlammmenge FM	m³/a	880	3.700
Klärschlammmenge TM	t/a	220	1.110
TM-Gehalt nach Kalkzugabe	%	37,5	45
Klärschlammmenge FM	m³/a	990	4255
Klärschlammmenge TM	t/a	330	1655
Kostenarten			
Fixe Kosten	€/Jahr	20.733	22.603
Abschreibung	€/Jahr	11.359	12.380
Zinsansatz	€/Jahr	4.516	4.927
Versicherungen	€/Jahr	1.369	1.492
Variable Kosten		15.981	70.545
Reparatur/Instandhaltung	€/Jahr	3.490	3.804
Energie	€/Jahr	1.056	2.220
Betriebsstoffe	€/Jahr	13.200	66.600
Arbeit	€/Jahr	1.725	1.725
Summe jährliche Kosten	€	36.714	93.148
Kosten je Einwohner/Jahr	€	4	2
Kosten je Tonne KS-TM	€	167	84
Kosten je Tonne KS-FM	€	42	25

9.6 Kompostierung in Mieten

Aufgrund ihres niedrigen Gehaltes an organischer Substanz und der geringen Strukturstabilität sind stabilisierte Schlämme für eine Kompostierung nur bedingt geeignet. Die Zugabe von

leicht zersetzbaren N- und C-Quellen sowie Strukturmaterial, z. B. als Bioabfall ist erforderlich, um eine ausreichende Selbsterhitzung des Materials zu erzielen.

Um einen mittleren Wassergehalt im Ausgangssubstrat von 55 % herzustellen, ist bei Annahme eines Wassergehaltes von 50 % im Zugabematerial je t Filterkuchen folgende Zusatzmaterialmenge erforderlich:

- aerob stabilisierter Schlamm mit 25 % TM: 2 t Zusatzmaterial/t Filterkuchen
- anaerob stabilisierter Schlamm mit 30 % TM: 1,7 t Zusatzmaterial/t Filterkuchen

Als Hygienisierungsanforderung gilt, dass eine Temperatur $> 55^{\circ}\text{C}$ für eine Dauer von 3 Wochen im Rottegut gehalten werden muss.

Zur Protokollierung der Prozessbedingungen ist für jede Kompostmiete prüffähig festzuhalten:

- der Anfangswassergehalt des Mischgutes
- die Temperatur mindestens täglich an drei Messstellen in unterschiedlichem Abstand von der Mietenoberfläche, davon je eine Messstelle in der Außenzone und im Kernbereich der Miete
- die Lagerzeit und erfolgte Mietenumsetzung.

9.6.1 Anlagenauslegung

Es wird von folgenden Mietendimensionierungen und Verfahrensparametern ausgegangen:

- Hauptrotte: offene Mietenkompostierung auf befestigter Fläche, Rottedauer 3 Wochen, mittlere Mietenhöhe 1,50 m, Schüttdichte $0,7 \text{ t/m}^3$, Zuschlag für Fahrwege: 1,25 m
- Nachrotte: offene Mietenkompostierung auf befestigter Fläche, Rottedauer 3 Wochen, mittlere Mietenhöhe 1,50 m, Schüttdichte $0,7 \text{ t/m}^3$, Zuschlag für Fahrwege: 1,25 m
- Lagerzeit: überdachte, befestigte Lagerfläche, Lagerdauer ca. 6 Wochen, mittlere Schütthöhe 2,50 m, Schüttdichte $0,7 \text{ t/m}^3$.

9.6.2 Investitionskostenberechnung

Für die Berechnung der Investitionskosten wird davon ausgegangen, dass keine neue Anlage mit separatem Eingangsbereich einschließlich Waage und Betriebsgebäude errichtet werden muss, sondern dass eine Erweiterungsfläche auf der Kläranlage für den Betrieb der Kompostierung genutzt werden kann. Die Rotte- und Lagerfläche ist dafür mit einer wasserdichten Abdichtung zu versehen (z. B. Asphalt, Beton, Folien). Die Flächenbefestigung muss für die eingesetzten Fahrzeuge (Radlader, Umsetzgerät) geeignet sein. Das Oberflächenwasser ist zu fassen und einer Behandlung zuzuführen.

Die Ermittlung der Investitionskosten der Klärschlammkompostierung wird für die Kläranlagen-Varianten für 1.000 EW, 10.000 EW und 50.000 EW vorgenommen.

Dabei wird unterstellt, dass in der kleinen Anlage für 1.000 EW der Klärschlamm mit mobilen Pressen entwässert wird. Außerdem wird in dieser Variante davon ausgegangen, dass Klärschlamm aus insgesamt zehn 1.000 EW-Kläranlagen in einer zentralen Kompostierungsanlage kompostiert und anschließend an den Entstehungsort zurück transportiert wird. Die Transportkosten für den abgepressten und kompostierten Klärschlamm aus zehn 1.000 EW-Anlagen ($10 \cdot 88 \text{ t FM}$) zu einer zentralen Anlage hin und zurück zu transportieren ($10 \cdot 156 \text{ t FM}$), jeweils 25 km, belaufen sich insgesamt auf 4582,38 € für 2438 t, bzw. 1,88 €/t. Für die einzelne Kläranlage sind dann 10 % dieser Transportkosten anzusetzen.

„Kompostierung 1000 in 10000“: Kläranlage mit einer Kapazität von 1.000 EW; mobile Entwässerung; zentrale Kompostierung in einer 10.000-EW-Anlage und Rücktransport zum Anfallort. Dauer der Klärschlammkompostierung inklusive Nachrotte ca. 3 Monate

„Kompostierung 10000“: Kläranlage mit einer Kapazität von 10.000 EW; Dauer der Klärschlammkompostierung inklusive Nachrotte ca. 3 Monate

„Kompostierung 50000“: Kläranlage mit einer Kapazität von 50.000 EW; Dauer der Klärschlammkompostierung inklusive Nachrotte ca. 3 Monate

9.6.3 Betriebskostenberechnung

Für die weiteren Betrachtungen wird angenommen, dass das Strukturmaterial bereits zerkleinert angeliefert wird. Hierfür muss ggf. eine separate Lagerfläche vorhanden sein. Eine Absiebung nach der Kompostierung wird hier nicht vorgesehen. Somit sind an Maschinenteknik lediglich

- ein Dungstreuer zum Mischen der Ausgangsmaterialien und zum Aufschichten der Mieten sowie
- ein Radlader zum Umsetzen und Abbau der Kompostmieten erforderlich.

Insgesamt errechnen sich für die Klärschlammkompostierung von abgepresstem Klärschlamm bei Anlagengrößen von 10000 EW und 50000 EW sowie dem kombinierten Verfahren die folgenden Kosten (Tab. 36). Marktpreise für die Klärschlammkompostierung in externen Behandlungsanlagen einschließlich anschließender Verwertung variieren in Abhängigkeit von der Transportentfernung zu der Behandlungsanlage und belaufen sich derzeit auf 50-70 €/t Filterkuchen (netto).

Tab. 36: Kosten für die Klärschlammkompostierung

Verfahrensbezeichnung		Kompostierung 1000 in 10000	Kompostierung 10000	Kompostierung 50000
Parameter	Einheit			
Einwohner		1.000	10.000	50.000
Abwasserbehandlung		aerobe Stabilisierung	aerobe Stabilisierung	anaerobe Stabilisierung
TM-Gehalt vor Kompostierung	%	25	25	30
Klärschlammmenge TM	t/a	22	220	1.110
Menge Häckselgut	t/a	176	1.760	6.290
Häckselgutmenge TM	t/a	123	1.232	4.403
TM-Gehalt Kompost nach Kompostierung	%	60	60	60
Kompostmenge FM	t/a	223	2.226	8.621
Kompostmenge FM (600 kg/m³)	m³/a	371	3.710	14.368
Kompostmenge TM	t/a	1.56	1.558	6.035
Kostenarten				
Fixe Kosten		4.273	42.726	61.810
Abschreibung	€/Jahr	2.640	26.395	33.080
Zinsansatz	€/Jahr	811	8.106	15.306
Versicherungen	€/Jahr	229	2.291	3.624
Reparatur/Instandhaltung	€/Jahr	593	5.934	9.799
Variable Kosten		1.115	8.287	21.152
Reparatur/Instandhaltung	€/Jahr	0	0	0
Energie	€/Jahr	53	527	1.752
Betriebsstoffe	€/Jahr	176	1.760	7.400

Arbeit	€/Jahr	600	6.000	12.000
Transport	€/Jahr	459	0	0
mobile Entwässerung	€/Jahr	4.400	0	0
Summe jährliche Kosten	€	9.960	51.013	82.963
Kosten je Einwohner/Jahr	€	10	5	2
Kosten je Tonne KS-TM	€	453	232	75
Kosten je Tonne KS-FM	€	113	58	22

9.7 Langzeitlagerung von entwässertem Klärschlamm

Der entwässerte Schlamm wird auf einem Schlammlagerplatz für einen Zeitraum von mindestens 1 Jahr gelagert. Es ist empfehlenswert, den Lagerplatz zu überdachen, um die Verschmutzung von Niederschlagswasser zu vermeiden und die Sickerwassermenge zu minimieren. Es ist eine Unterteilung der Lagerbereiche vorzusehen, so dass eine Mindestverweilzeit von einem Jahr auf dem Lagerplatz chargenweise vorgenommen werden kann.

9.7.1 Anlagenauslegung

Folgende Randbedingungen werden für den Schlammlagerplatz zugrunde gelegt:

- Beschickungshöhe Lagerbereich: in Mittel 1,50 m
- Auslegung Lagerbereich: 1 Jahr Lagerzeit

Im Verlauf der Langzeitlagerung ist mit einem weiteren TM-Abbau (ca. 20 %) zu rechnen. Bei Überdachung ist außerdem eine Trockensubstanzzunahme zu berücksichtigen, da eine Verwässerung durch Regenwasser weitgehend vermieden werden kann.

9.7.2 Grundlagen für die Investitionskostenberechnung

Die Ermittlung der Investitionskosten wird für die Kläranlagen-Varianten für 1.000 EW und 10.000 EW berechnet.

- Für die Anlage mit einer Anschlussgröße von 1.000 EW wird eine mobile Entwässerung durch Lohnunternehmer oder mit einer Gemeinschaftspresse (Klärschlammverband) vorgeschlagen. Die mobile Entwässerung erfolgt dann ein- bis zweimal jährlich. Die erforderliche Lagerfläche für diese Anlagengröße beträgt $(2 \cdot 88 / 1,5)$ ca. 120 m².
- Für die Anlage mit einer Ausbaugröße von 10.000 EW wird in einer Variante die mobile Entwässerung gerechnet und in einer zweiten Variante vorausgesetzt, dass eine Anlage zur maschinellen Entwässerung des Klärschlammes installiert ist. Die erforderliche Lagerfläche liegt bei $(2 \cdot 880 / 1,5)$ ca. 1.200 m².

Es werden also die folgenden Varianten für die Kostenkalkulation definiert:

„Langzeitlagerung 1000 mobil ES“: Kläranlage mit einer Kapazität von 1.000 EW; vorab mobile Entwässerung, einjährige Lagerdauer

„Langzeitlagerung 10000 mobil ES“: Kläranlage mit einer Kapazität von 10.000 EW; vorab mobile Entwässerung, einjährige Lagerdauer

„Langzeitlagerung 10000 ES“: Kläranlage mit einer Kapazität von 10.000 EW; vorab stationäre Entwässerung, einjährige Lagerdauer

9.7.3 Betriebskostenberechnung

Insgesamt errechnen sich für die Langzeitlagerung von abgepresstem Klärschlamm bei Anlagengrößen von 1.000 EW und 10.000 EW die folgenden Kosten (Tab. 37).

Tab. 37: Kosten für die Langzeitlagerung von abgepresstem Klärschlamm

Verfahrensbezeichnung		Langzeitlagerung 1000 mobil ES	Langzeitlagerung 10000 mobil ES	Langzeitlagerung 10000 ES
Parameter	Einheit			
Einwohner		1.000	10.000	10.000
Abwasserbehandlung		aerobe Stabilisierung		
TM-Gehalt vor Entwässerung	%	4	4	4
Klärschlammmenge FM	m³/a	550	5.500	5.500
Klärschlammmenge TM	t/a	22	220	220
TM-Gehalt nach Entwässerung	%	28	28	28
Klärschlammmenge FM (Schüttdichte = 1 t/m³)	m³/a	78	780	780
TM-Gehalt nach Entwässerung	%	35	35	35
Klärschlammmenge TM (TM-Abbau 20 %)	t/a	17,6	176	176
Klärschlammmenge FM	m³/a	50	500	500
Kostenarten				
Zinsansatz	€/Jahr	1.642	7.390	7.390
Versicherungen	€/Jahr	274	1.232	1.232
Reparatur/Instandhaltung	€/Jahr	821	3.695	3.695
Variable Kosten		5.300	44.900	900
Reparatur/Instandhaltung	€/Jahr	0	0	0
Energie	€/Jahr	4.400	44.000	0
Betriebsstoffe	€/Jahr	0	0	0
Arbeit	€/Jahr	900	900	900
Summe jährliche Kosten	€	10.227	67.070	23.070
Kosten je Einwohner/Jahr	€	10	7	2
Kosten je Tonne KS-TM	€	465	305	105
Kosten je Tonne KS-FM	€	19	12	4

9.8 Solare Trocknung

Die solare Trocknung ist vornehmlich für die weitergehende Klärschlammbehandlung nach vorhergehender Entwässerung geeignet. Bei bestehenden solaren Anlagen zur Nassschlammtrocknung werden häufig Probleme mit den Drainageböden gemeldet, da die Drainagekapazität aufgrund des hohen Feinstoffanteils im Klärschlamm sehr schnell zurückgeht. Deshalb wird für die Kläranlagengröße von 1.000 EW eine vorhergehende mobile Entwässerung vorausgesetzt.

Wichtig ist eine gute Umwälzung des Schlammes mit gleichzeitiger Zerkleinerung größerer Schlammbrocken während des Trocknungsvorgangs. Es kommen unterschiedliche Umsetzgeräte zum Einsatz (Längsumsetzer, „elektrisches Schwein“).

9.8.1 Anlagenauslegung

Der Platzbedarf für die solare Trocknung von entwässertem Klärschlamm, ohne Zufuhr von Fremdenergie, beträgt ca. 1 m²/t Filterkuchen.

Kann Abwärme – beispielsweise von Blockheizkraftwerken – für die Schlammtrocknung genutzt werden (i. d. R. Einsatz von Heizgebläsen), kann aufgrund der effizienteren Trocknung der Platzbedarf reduziert werden:

- Auf Kläranlagen, auf denen Faultürme betrieben werden, steht üblicherweise nur im Sommer überschüssige Energie zur Verfügung. Auf Anlagen mit aerober Stabilisierung ist keine Abwärmenutzung möglich.
- Neuere Konzepte für solare Trocknungsanlagen berücksichtigen die Einbindung von Abwärme aus z. B. landwirtschaftlichen Biogasanlagen.

9.8.2 Investitionskostenberechnung

Die Ermittlung der Investitionskosten wird für die Kläranlagen-Varianten für 1.000 EW und 10.000 EW berechnet.

- Für die Anlage mit einer Anschlussgröße von 1.000 EW wird eine mobile Entwässerung durch Lohnunternehmen oder mit einer Gemeinschaftspresse (Klärschlammverband) vorgeschlagen. Die mobile Entwässerung erfolgt dann ein- bis zweimal jährlich.
- Für die Anlage mit einer Ausbaugröße von 10.000 EW wird vorausgesetzt, dass eine Anlage zur maschinellen Entwässerung des Klärschlammes auf der Kläranlage installiert ist.

Eine Hygienisierung durch solare Trocknung ist nicht gewährleistet. Es müssten weitere Behandlungsschritte nachgeschaltet werden, z. B. die

- Hochtemperaturpelletierung (HTP, PHILIPP et al. 2006): noch im Versuchsstadium oder die
- Langzeitlagerung: 1 Jahr, Haufwerk mit 1,5 m Lagerhöhe; Schüttdichte: 0,7 t/m³.

Eine Anlage zur Hochtemperaturpelletierung kann bei Investitionskosten von 100.000 € eine Durchsatzleistung von 3.000 bis 4.000 t/a erbringen (PHILIPP et al. 2006). Damit ist die für den Betrieb auf einer 1.000 EW- bzw. 10.000 EW-Kläranlage überdimensioniert. Die Kapazität der Pelletierungsanlagen beträgt allerdings nur ca. 500 kg/h, sodass ein überbetrieblicher Einsatz (Lohnunternehmen) unwirtschaftlich ist, da auf Bedienungspersonal nicht verzichtet werden kann. Der Kosteneinfluss der Hochtemperaturpelletierung wird durch den Vergleich mit/ohne HTP für die Kostenkalkulation verdeutlicht:

„solare Trocknung 1000“: Kläranlage mit einer Kapazität von 1.000 EW; vorab mobile Entwässerung

„solare Trocknung 1000 mit HTP“: Kläranlage mit einer Kapazität von 1.000 EW; vorab mobile Entwässerung, Hochtemperaturpelletierung

„solare Trocknung 10000“: Kläranlage mit einer Kapazität von 10.000 EW; vorab stationäre Entwässerung

„solare Trocknung 10000 mit HTP“: Kläranlage mit einer Kapazität von 10.000 EW; vorab stationäre Entwässerung, Hochtemperaturpelletierung

9.8.3 Betriebskostenberechnung

Der Strombedarf der solaren Trocknung liegt bei ca. 35 kWh/t H₂O. Bei einer Klärschlamm-trocknung auf 75 % TM und einer Anschlussgröße von 10.000 EW werden 590 t H₂O freigesetzt. Der Strombedarf beträgt in diesem Fall 17.700 kWh/a.

Der Energiebedarf zu Antrieb von Aggregaten für die Hochtemperaturpelletierung beträgt ca. 5 bis 10 kWh/t Klärschlamm.

Insgesamt errechnen sich für die Langzeitlagerung von abgepresstem Klärschlamm bei Anlagengrößen von 1.000 EW und 10.000 EW die folgenden Kosten (Tab. 38).

Tab. 38: Kosten für die solare Trocknung von abgepresstem Klärschlamm

Verfahrensbezeichnung		Solare Trocknung 1000	Solare Trocknung 1000 mit HTP	Solare Trocknung 10000	Solare Trocknung 10000 mit HTP
Parameter	Einheit				
Einwohner		1.000	1.000	10.000	10.000
Abwasserbehandlung		aerobe Stabilisierung			
Klärschlamm-TM vor Trocknung	%	4, danach mobile Entwässerung	4, danach mobile Entwässerung	25	25
Klärschlammmenge FM	m³/a	550	550	880	880
Klärschlammmenge TM	t/a	22	22	220	220
Klärschlamm-TM nach Trocknung	%	75	90	75	90
Klärschlammmenge FM (0,6 t/m³, mit HTP 0,75 t/m³)	m³/a	49	32	490	320
Klärschlammmenge FM	t/a	29,3	24	293	240
Klärschlammmenge TM	t/a	22	22	220	220
Kostenarten					
Fixe Kosten	€/Jahr	29.320	49.141	61.366	78.358
Abschreibung	€/Jahr	14.711	24.747	32.525	41.648
Zinsansatz	€/Jahr	6.979	11.495	12.009	15.088
Versicherungen	€/Jahr	2.155	3.661	4.721	6.090
Reparatur/Instandhaltung	€/Jahr	5.474	9.237	12.111	15.532
Variable Kosten	€/Jahr	10.016	10.122	13.428	14.490
Reparatur/Instandhaltung	€/Jahr	0	0	0	0
Energie	€/Jahr	366	472	2.478	3.540
Betriebsstoffe	€/Jahr	4.400	4.400	0	0
Arbeit	€/Jahr	5.250	5.250	10.950	10.950
Summe jährliche Kosten	€	39.337	59.263	74.794	92.848
Kosten je Einwohner/Jahr	€	39	59	7	9
Kosten je Tonne KS-TM	€	1.788	2.694	340	422
Kosten je Tonne KS-FM	€	72	108	85	106

9.9 Thermische Trocknung

Die Verfahrensbeschreibung der thermischen Trocknung im Vergleich zur Niedertemperatur- und solaren Trocknung von Klärschlamm ist Kapitel 3.13 zu entnehmen. Für die thermische Trocknung von Klärschlamm kommen direkte und indirekte Trocknungsverfahren zum Einsatz.

Bei der **Direkttrocknung** wird das Heizmedium (Rauchgas) in direkten Kontakt mit dem Schlamm gebracht. Entsprechend der gewählten Technik unterscheidet man dabei

- Trommeltrockner
- Stromtrockner (Sonderbauform = Drallrohtrockner)
- Mahltrockner
- Fließbettrockner (= Wirbelschichtrockner)
- Bandtrockner.

Bei der **indirekten Trocknung** wird die Wärme durch beheizte Kontaktflächen auf den Schlamm übertragen, so dass kein direkter Kontakt zwischen dem Heizmedium (Dampf, Thermoöl oder Rauchgas) und den Brüden zustande kommt. Kontakttrockner können ausgeführt sein als

- Scheibentrockner
- Dünnschichttrockner
- Wirbelschichttrockner
- Knetrockner.

Neue Trocknungsverfahren kombinieren oft verschiedene Elemente beider Trocknungsarten, so dass bei diesen Verfahren eine eindeutige Zuordnung zu einer der beiden Grundtrockenarten (direkt/indirekt) nicht mehr möglich ist.

9.9.1 Investitionskostenberechnung

Wegen der i. d. R. hohen Investitionskosten wird eine thermische Trocknung nur in größeren Kläranlagen installiert.

9.9.2 Betriebskostenberechnung

Zur Erwärmung von 1 kg Wasser von 10°C auf 100°C und anschließende Verdampfung werden theoretisch $(4,19 \text{ kJ/(K*kg)} \cdot 90 \text{ K} + 2.261 \text{ kJ/kg}) = 2.638 \text{ kJ/kg}$ bzw. ca. 0,73 kWh benötigt. Der tatsächliche Energiebedarf liegt infolge von verfahrensbedingten Energieverlusten um 15 bis 25 % höher.

Daneben weisen thermische Trocknungsanlagen einen elektrischen Energiebedarf für Förder- und Mischaggregate, Gebläse etc. zwischen 50 und 150 kWh/t H₂O auf.

Für die Betriebskostenberechnung werden folgende Ansätze gewählt:

- thermischer Energiebedarf: 850 kWh/t H₂O
- elektrischer Energiebedarf: 70 kWh/t H₂O

Bei der Anlage mit einer Ausbaugröße von 300.000 EW beträgt die erforderliche jährliche Verdampfungsleistung für eine Trocknung auf eine durchschnittliche Trockensubstanzkonzentration von 85 % ca. 14.000 t H₂O/a (Tab. 39).

Dabei kann die Abwärme aus Blockheizkraftwerken nicht genutzt werden, da diese auf einem deutlich niedrigeren Temperaturniveau vorliegt, als für die Trocknung benötigt wird.

Folgende Betriebsmittel werden berücksichtigt:

- Heizöl/Erdgas
- Strom

Tab. 39: Kosten für die Thermische Trocknung

	300.000 EW
Schlamm-mengen nach Hygienisierung	7.800 t/a FM TM = 85 % Schüttdichte = 0,5 t/m ³ 15.600 m ³ /a
Energiebedarf	Wasserverdampfung: ca. 14.000 t H ₂ O/a Wärmebedarf: 850 kWh/t H ₂ O 12,1 GWh/a Strombedarf: 70 kWh/t H ₂ O ca. 1 GWh/a
Flächenbedarf	ca. 500 m ² + Verkehrsflächen
Investitionskosten	4.500.000 €
Betriebskosten	€/EW*a: 5 €/t TM: 225 €/t FM: 67

10 Kosten für Transport und Ausbringung

Im Folgenden soll – ergänzend zu den Kosten der Hygienisierungsverfahren für Klärschlamm – ermittelt werden, wie sich die Kosten der stofflichen Verwertung von Klärschlamm in der Landwirtschaft durch die getroffenen Hygienisierungsmaßnahmen verändern. Tabelle 40 zeigt die nach den jeweiligen Hygienisierungsverfahren zu applizierenden Klärschlamm-mengen. Zusätzlicher Kostenaufwand oder Einsparung ergibt sich durch einen Vergleich zu den ohne Klärschlammhygienisierung anfallenden Mengen (Tab. 29) sowie eine an den jeweiligen Aggregatzustand angepasste Applikationstechnik. Die Ausbringungskosten für folgende Klärschlämme wurden miteinander verglichen:

- mit Kalkhydrat behandelter Klärschlamm vs. Nassschlamm
- mobil entwässerter und mit Kalkhydrat behandelter Klärschlamm vs. Nassschlamm
- pasteurisierter und anaerob stabilisierter Klärschlamm vs. anaerob stabilisierter Klärschlamm
- vererdeter Klärschlamm vs. Nassschlamm
- langzeitgelagerter Nassschlamm (offener Rundbehälter) vs. Nassschlamm
- langzeitgelagerter Klärschlamm (Trockenbeet) vs. Nassschlamm
- mit Branntkalk behandelter entwässerter Klärschlamm vs. entwässerter Klärschlamm
- kompostierter Klärschlamm vs. entwässerter Klärschlamm
- langzeitgelagerter entwässerter Klärschlamm vs. Nassschlamm (bei mobiler Entwässerung)
- langzeitgelagerter entwässerter Klärschlamm vs. entwässerter Klärschlamm (bei stationärer Entwässerung)
- solar getrockneter Klärschlamm vs. entwässerter Klärschlamm
- solar getrockneter und pelletierter Klärschlamm – entwässerter Klärschlamm
- thermisch getrockneter Klärschlamm vs. entwässerter Klärschlamm

Tab. 40: Kenndaten für hygienisierte Klärschlämme

	aerobe Stabilisierung		anaerobe Stabilisierung	
	1.000 EW	10.000 EW	50.000 EW	300.000 EW
Kalkhydrat- behandlung (0,25 kg Ca(OH ₂)/kg TM)	Nassschlamm : 27,5 t/a TM TM ca. 5 % spez. Gew.= 1 t/m ³ 550 m ³ /a mobil entwässert: 27,5 t/a TM TM = 28 % 98 m ³ /a	Nassschlamm: 275 t/a TM TM ca. 5 % spez. Gew.= 1 t/m ³ 5.500 m ³ /a	-	-
Pasteurisierung (70°C, 1 h)	Einsatz nur vor Faulung empfohlen		Keine Auswirkung auf Schlammmenge nach Faulung	
			Schlammmenge vor Faulung: 45.000 m ³ /a entw. Faulschlamm: 3.000 t/a FM TM = 30 % 900 t/a TM Schüttdichte = 1 t/m ³ 3.000 m ³ /a	Schlammmenge vor Faulung: 260.000 m ³ /a entw. Faulschlamm: 17.340 t/a FM TM = 30 % 5.200 t/a TM Schüttdichte = 1 t/m ³ 17.340 m ³ /a
Vererdung	12,9 t/a TM TM = 50 % spez. Gew.= 0,8 t/m ³ 32 m ³ /a	129 t/a TM TM = 50 % spez. Gew. = 0,8 t/m ³ 323 m ³ /a	-	-
Langzeitlage-rung Nass-schlamm	Rundbehälter : 19,8 t/a TM TM = 7 % spez. Gew.= 1 t/m ³ 283 m ³ /a Trockenbeet: 17,6 t/a TM TM= 25 % 79,2 m ³ /a	-	-	-
Brantkalkzuga- be entwässertem Schlamm (0,5 kg CaO/kg TM)	-	330 t/a TM TM ca. 37,5 % Schüttdichte = 1 t/m ³ 990 m ³ /a	1.650 t/a TM TM ca. 39 % Schüttdichte = 1 t/m ³ 4.255 m ³ /a	-
Kompostierung	-	vor Komp.: Klärschlamm: 880 t/a FM Häckselgut: 1.760 t/a FM TM = 55 % Schüttdichte = 0,7 t/m ³ 3.770 m ³ /a nach Komp.: 2.226 t/a FM TM = 60 % Schüttdichte = 0,6 t/m ³ 3.710 m ³ /a	vor Komp.: Klärschlamm: 3.700 t/a FM Häckselgut: 6.290 t/a FM TM = 55 % Schüttdichte = 0,7 t/m ³ 14.300 m ³ /a nach Komp.: 8.621 t/a FM TM = 60 % Schüttdichte = 0, t/m ³ 14.370 m ³ /a	-
Langzeitlagerung entwässerter Klärschlamm	mobile Entwässe- rung; 28 t/a FM	mobile/stationäre Entwässerung; 280 t/a FM		

	TM = 28 % Schüttdichte = 1 t/m ³ 78 m ³ /a FM nach Langzeitlege- rung: TM = 35 % TM-Abbau 20 % 50 m ³ /a	TM = 28 % Schüttdichte = 1 t/m ³ 780 m ³ /a FM nach Langzeitlege- rung: TM = 35 % TM-Abbau 20 % 500 m ³ /a		
solare Trocknung mit http	mobile Entwässe- rung; 29 t/a FM TM = 75 % Schüttdichte = 0,6 t/m ³ 49 m ³ /a Pelletierung: TM = 90 % Schüttdichte = 0,6 t/m ³ 40 m ³ /a	290 t/a FM TM = 75 % Schüttdichte = 0,6 t/m ³ 490 m ³ /a Pelletierung: TM = 90 % Schüttdichte = 0,6 t/m ³ 400 m ³ /a	-	-
thermische Trock- nung	-	-	-	6.630 t/a TM TM = 85 % Schüttdichte = 0,5 t/m ³ 15.600 m ³ /a

In den Tabellen 41 und 42 sind die Differenzen der Transport- und Ausbringungskosten von nicht hygienisiertem und hygienisiertem Schlamm aufgeführt. Bezugsgröße ist jeweils die bei gegebenen Einwohnerzahlen (1.000 EW, 10.000 EW, 50.000 EW und 300.000 EW) anfallende Klärschlammmenge in m³ FM bzw. t FM bzw. t TM. Diese Differenz der Ausbringungskosten ist für die verschiedenen Verfahren ebenfalls pro Einwohner und Jahr dargestellt.

Für die Ausbringungsmenge wurden Nährstoff- und Schadstoffbegrenzungen aus Düngemittel- und Abfallrecht (DüV 2007, AbfKlärV 1992) zugrunde gelegt. Es wurde mit folgenden Aufbringungsmengen und Transportentfernungen kalkuliert:

- Nassschlamm: Schlaggröße 5 ha, Aufbringungsmenge/ha 30 m³, 5 km Feldentfernung
- entwässerter Klärschlamm: Schlaggröße 5 ha, Aufbringungsmenge/ha 14 t FM, 5 km Feldentfernung
- entwässerter Kalkschlamm: Schlaggröße 5 ha, Ausbringungsmengen 13 t FM, 5 km Feldentfernung
- kompostierter bzw. vererdeter Klärschlamm: Schlaggröße 5 ha, Ausbringungsmengen 10 t FM, 5 km Feldentfernung
- getrockneter (und pelletierter) Klärschlamm: Schlaggröße 5 ha, Ausbringungsmenge 6,7 t FM, 5 km Feldentfernung

Es zeigt sich, dass unter günstigen Rahmenbedingungen in Bezug auf den in der jeweiligen Kläranlage anfallenden Klärschlamm Einsparungen an Ausbringungskosten bis ca. 18.000 € möglich sind. Dies ist insbesondere bei Verfahren der Fall, bei denen es im Rahmen der Hygienisierung eine Mengenreduzierung zu verzeichnen ist.

Mehrkosten bei der Ausbringung treten immer dann auf, wenn zur Hygienisierung Hilfsstoffe eingesetzt werden, wie bei der Kalkung oder Kompostierung.

Insgesamt fallen die Veränderungen der Ausbringungskosten durch die Klärschlammhygienisierung nicht sehr stark ins Gewicht, wie bei Bezugnahme auf die angeschlossenen Einwohner der jeweiligen Kläranlage in Tabelle 42 deutlich wird. Die stärkste Veränderung der

Tab. 41: Veränderung der Ausbringungskosten durch die Klärschlammhygienisierung in € je Kläranlage und Jahr

	Kläranlagengröße			
Verfahren	1.000 EW	10.000 EW	50.000 EW	300.000 EW
Kalkhydrat mobile Entw.	-1.837			
Kalkhydrat mit Speicher	0	0		
Kalkhydrat ohne Speicher	0	0		
Pasteurisierung			-1.249	-8.313
Vererdung	-1.935	-19.353		
Langzeitlagerung Nassschlamm	-958			
Langzeitlagerung entw. Klärschlamm (Vergleich zu Nassschlamm)	-1.904	-19.353		
Langzeitlagerung entw. Klärschlamm (Vergleich zu entw. Schlamm)		-328		
Brannkalk		166	1.074	
Kompostierung		2.028	9.665	
solare Trocknung	-33	-328		
solare Trocknung/HTP	-47			
Hochtemperaturtrocknung				-17.720

Minuswerte = Kostenersparnis

Tab. 42: Veränderung der Ausbringungskosten durch die Klärschlammhygienisierung in € je angeschlossenem EW

	Kläranlagengröße			
Verfahren	1.000 EW	10.000 EW	50.000 EW	300.000 EW
Kalkhydrat mobile Entw.	-1,84			
Kalkhydrat mit Speicher	0,00	0,00		
Kalkhydrat ohne Speicher	0,00	0,00		
Pasteurisierung			-0,02	-0,03
Vererdung	-1,94	-1,94		
Langzeitlagerung Nassschlamm	-0,96			
Langzeitlagerung entw. Klärschlamm (Vergleich zu Nassschlamm)	-1,90	-1,85		
Langzeitlagerung entw. Klärschlamm (Vergleich zu entw. Schlamm)		-0,05		
Brannkalk		0,02	0,02	
Kompostierung		0,20	0,19	
solare Trocknung	-0,03	-0,03		
solare Trocknung/HTP	-0,05			
Hochtemperaturtrocknung				-0,06

Ausbringungskosten tritt bei den Varianten Kalkhydratbehandlung nach mobiler Entwässerung („Kalkhydrat mobil 1.000 ohne KS-Speicher“), der Vererdung von Nassschlamm („Vererdung 1.000“ sowie „Vererdung 10000“) sowie der Landzeitlagerung von mobil entwässer-

tem Klärschlamm („Langzeitlagerung 1.000 mobil ES“ sowie „Langzeitlagerung 10.000 mobil ES“) auf und beträgt weniger als 2 € Einsparung je Einwohner und Jahr.

11 Diskussion

Tabelle 43 gruppiert die betrachteten Hygienisierungsverfahren nach dem voraussichtlich erzielbaren Hygieneniveau des Klärschlammes und den jährlichen Verfahrenskosten, bezogen auf die behandelte Klärschlamm-Trockenmasse. Tabelle 44 zeigt die Hygienisierungskosten, bezogen auf die an der Kläranlage angeschlossenen Einwohner.

Tab. 43: Jährliche Hygienisierungskosten [€/t Klärschlamm-TS]¹⁾

Hygieneni- veau ¹⁾	Hygienisie- rungs- verfahren	Verfahrensspezifizierung	Jährliche Hygienisierungskosten, bezogen auf die Klärschlamm-TS [€/TS]			
			1.000 EW	10.000 EW	50.000 EW	300.000 EW
			aerobe Stabilisierung		anaerobe Stabilisierung	
für flüssige Klärschlämme/zur Klärschlammkonditionierung						
3 hoch	Pasteurisie- rung	Transport des KS in 50.000 EW-KA	340	340	anerobe Stabilisierung im Anschluss	
					125	69
2-3 mittelho- ch	anaerob- thermophile Behandlung		hohe Investitionskosten/ ungeeignet für o. g. Größenklassen		n. b. ²⁾	n. b. ²⁾
2-3 mittel- hoch	aerob- thermophile Behandlung		hohe Investitionskosten/ ungeeignet für o. g. Größenklassen		n. b. ²⁾	n. b. ²⁾
2 mittel	Kalkung (Kalkhydrat)	mobile KS-Entwässerung, KS-Speicher vorhanden	341		zu hoher Materialeinsatz	
		KS-Speicher zu errichten	1.100	207		
		KS-Speicher vorhanden	709	305		
1 niedrig	Langzeit- lagerung	KS-Speicher: Rundbehälter	1.571	erforderliches Behältervolumen zu groß		
		KS-Speicher: Trockenbeet	1.291			
1 niedrig	Klärschlamm- vererdung		853	592	erforderlicher Flächenbedarf zu hoch	
für entwässerte Klärschlämme						
3 hoch	Thermische (Voll-) Trocknung		hohe Investitionskosten/ ungeeignet für o. g. Größenklassen			225
3 hoch	Kompostie- rung	Transport des KS in 10.000 EW- Kompostierungsanlage	453			erforder- licher Flächen bedarf zu hoch
				232	75	
2 mittel	Kalkung (Brannkalk)			167	84	zu hoher Material einsatz
2 niedrig- mittel	Solare Trocknung	mit anschließender Hoch- temperaturpelletierung	2.694	422	erforderlicher Flächenbedarf zu hoch	
1 niedrig	Solare Trocknung		1.788	340	erforderlicher Flächenbedarf zu hoch	
1 niedrig	Langzeit- lagerung	mobile KS-Entwässerung	465	305	erforderliches Behältervolumen zu groß	
				105		

1) Definition der Hygieneneiveaus gemäß CEN 2007 (vgl. Tab. 14): hellgrau: niedriges Hygieneniveau, mittelgrau: mittleres Hygieneniveau, dunkelgrau: hohes Hygieneniveau

2) nicht berechnet, vgl. Kap. 8: Auswahlkriterien

Tab. 44: Jährliche Hygienisierungskosten, bezogen auf die an der Kläranlage angeschlossenen Einwohner [€]¹⁾

Hygieneni- veau ¹⁾	Hygienisie- rungs- verfahren	Verfahrensspezifizierung	Jährliche Hygienisierungskosten, bezogen auf die an der Kläranlage angeschlossenen Einwohner [€/EW]			
			1.000 EW	10.000 EW	50.000 EW	300.000 EW
			aerobe Stabilisierung		anaerobe Stabilisierung	
für flüssige Klärschlämme/zur Klärschlammkonditionierung						
3 hoch	Pasteurisie- rung	Transport des KS in 50.000 EW-KA	7	7	anerobe Stabilisierung im Anschluss	
					3	2
2-3 mittel- hoch	anaerob- thermophile Behandlung		hohe Investitionskosten/ ungeeignet für o. g. Größenklassen		n. b. ²⁾	n. b. ²⁾
2-3 mittel- hoch	aerob- thermophile Behandlung		hohe Investitionskosten/ ungeeignet für o. g. Größenklassen		n. b. ²⁾	n. b. ²⁾
2 mittel	Kalkung (Kalkhydrat)	mobile KS-Entwässerung, KS-Speicher vorhanden	8		zu hoher Materialeinsatz	
		KS-Speicher zu errichten	24	7		
		KS-Speicher vorhanden	16	5		
1 niedrig	Langzeit- lagerung	KS-Speicher: Rundbehälter	35	erforderliches Behältervolumen zu groß		
		KS-Speicher: Trockenbeet	28			
1 niedrig	Klärschlamm- vererdung		19	13	erforderlicher Flächenbedarf zu hoch	
für entwässerte Klärschlämme						
3 hoch	Thermische (Voll-) Trocknung		hohe Investitionskosten/ ungeeignet für o. g. Größenklassen			5
3 hoch	Kompostie- rung	Transport des KS in 10.000 EW- Kompostierungsanlage	10			erforder- licher Flächen bedarf zu hoch
				5	2	
2 mittel	Kalkung (Brannkalk)			4	2	zu hoher Material einsatz
2 niedrig- mittel	Solare Trocknung	mit anschließender Hoch- temperaturpelletierung	59	9	erforderlicher Flächenbedarf zu hoch	
1 niedrig	Solare Trocknung		39	7	erforderlicher Flächenbedarf zu hoch	
1 niedrig	Langzeit- lagerung	mobile KS-Entwässerung	10	7	erforderliches Behältervolumen zu groß	
				2		

¹⁾ Definition der Hygieneniveaus gemäß CEN 2007 (vgl. Tab. 14): hellgrau: niedriges Hygieneniveau, mittelgrau: mittleres Hygieneni-
veau, dunkelgrau: hohes Hygieneniveau

²⁾ nicht berechnet, vgl. Kap. 8: Auswahlkriterien

11.1 Hygienisierungsverfahren, die zu einem hohen Hygieneniveau führen

Es existieren nur wenige Hygienisierungsverfahren, mit welchen nach Expertenaussage ein hohes Hygieneniveau erzielbar ist. Diese sind

die **Kompostierung** und

thermische Verfahren, wie

- die Pasteurisierung, die
- die thermische Klärschlamm Trocknung und
- die aerobe oder anaerobe thermophile Behandlung sowie kombinierte aerob/anaerobe Verfahren (s. g. duale Stabilisierung).

Die aerob-thermophile und die anaerob-thermophile Behandlung wurde nicht in die Kostenbetrachtung aufgenommen, da diese Verfahren eher für höhere Durchsätze geeignet sind (Tab. 10) und unter den in der Bundesrepublik vorhandenen Rahmenbedingungen – weitgehend vollzogener Ausbau größerer Kläranlagen - wenige Kläranlagen z. Z. hierfür in Frage kommen (vgl. Kap. 8). Es wird aber davon ausgegangen, dass bei den entsprechenden Rahmenbedingungen und hohen Anlagendurchsätzen die beiden o. g. thermophilen Verfahren wirtschaftlich sind. Es ist darauf hinzuweisen, dass bei diesen thermophilen Verfahren die jeweilige Anlage entweder einem Baumuster entsprechen sollte oder die im Betrieb gefahrene Temperatur-/Zeitkombination im Rahmen einer Prozessprüfung zu validieren ist (Kap. 5.3).

Sowohl die Pasteurisierung und auch die thermische Trocknung sind aus verfahrenstechnischen Gründen und/oder Kostenerwägungen nur für größere (50.000 EW) bis sehr große Kläranlagen (300.000 EW) geeignet.

Die **Pasteurisierung** ist aus verfahrenstechnischen Gründen nur für Kläranlagen geeignet, die über eine an die Pasteurisierung anschließende Stabilisierung, i. d. R. durch Faulung, verfügen. Für diese Anlagengrößen belaufen sich die Kosten der Pasteurisierung mit 2 bis 3 € je angeschlossenem Einwohner auf niedrigem Niveau. Durch den mit der Pasteurisierung verbundenen Zellaufschluss kann darüber hinaus mit einem vermehrten Gasertrag gerechnet werden, was die Kosten der Hygienisierungsmaßnahme weiter reduziert (in der vorliegenden Studie nicht berücksichtigt).

Für Klärschlamm aus 1.000 EW- und 10.000 EW-Kläranlagen wurden die Kosten für eine Restausnutzung von Verarbeitungskapazitäten auf größeren Anlagen, inklusive Transport, berechnet. Dies ist eine kostengünstige und wirksame Variante, die allerdings nur in Ausnahmefällen Anwendung finden kann, da die Rahmenbedingungen, unter der eine Pasteurisierung und Kofermentation in größeren Kläranlagen funktionieren kann, sich äußerst komplex gestalten (vgl. Kap. 9.2): wird entwässertem Klärschlamm in der größeren Kläranlage mitbehandelt, ist der TM-Gehalt für Transportvorgänge sowie der oTM-Gehalt für die biologische Umsetzung limitierend. Wird Nassschlamm mitbehandelt, sind hohe Transport- Behandlungs- und Ausbringungskosten zu berücksichtigen. Wird nach der Pasteurisierung und Faulung entwässert, kommt es bei einem hohen Anteil an standortfremdem Klärschlamm zu einer Rückbelastung der Kläranlage auf dem Standort der Pasteurisierungsanlage in einem nicht vertretbaren Ausmaß.

Die **thermische Trocknung** ist aufgrund der hohen Investitionskosten nur auf großen Kläranlagen wirtschaftlich. In Abhängigkeit von den anzusetzenden Transportkosten kann es wirtschaftlich sein, Restkapazitäten von Klärschlamm-Trocknungsanlagen für die Trocknung von entwässertem Klärschlamm zu nutzen. Dies gilt umso mehr, als thermisch getrockneter Klärschlamm hohe Lagerstabilität und geringes Lager- und Transportvolumen besitzt.

Auch die **Kompostierung** wird als Klärschlammbehandlungsverfahren mit hohem Hygienisierungsniveau eingeordnet. In Kläranlagen für 10.000 bzw. 50.000 EW lässt sich der anfal-

lende entwässerte Klärschlamm in einfachen Kompostierungsanlagen mit einem Kostenaufwand von 5 bzw. 2 € je Einwohner und Jahr kompostieren. Durch die erhöhte Masse aufgrund des zugesetzten Strukturmaterials erhöhen sich die Transport- und Ausbringungskosten um ca. 0,2 € je Einwohner und Jahr.

Für die kleinen 1.000 EW-Kläranlagen besteht die Möglichkeit, den abgepressten Klärschlamm gemeinsam mit anderen Kläranlagen zu kompostieren. Im vorliegenden kalkulierten Beispiel bewegen sich die Kosten hierfür im mittleren Bereich von 10 €/EW und Jahr.

11.2 Hygienisierungsverfahren, die zu einem mittleren Hygieneniveau führen

Als Hygienisierungsverfahren mit mittlerem Niveau sind alle Klärschlammbehandlungsverfahren einzuordnen, die Kalk einsetzen, außerdem die solare Trocknung mit nachgeschalteter Hochtemperatur-Pelletierung.

Der Einsatz von **Kalkhydrat** ist insbesondere auf den kleinen 1.000 EW-Kläranlagen mit hohen Kosten von bis zu 24 € je angeschlossenem Einwohner verbunden. Dieser Betrag kann sich dann etwas reduzieren, wenn Speicherkapazitäten für den kalkbehandelten Nassschlamm vorhanden sind. Sofern die Möglichkeit einer mobilen Entwässerung und Lagerung vor Ort besteht, belaufen sich die Kosten auf 8 €/EW. Auch bei den höheren Anlagendurchsätzen von 10.000 EW belaufen sich die Hygienisierungskosten bei Kalkhydratanwendung auf 7 € je angeschlossenem Einwohner inklusive Bau eines Speichers und 5 € bei Nutzung von vorhandenem Speichervolumen.

Die Kosten der **Branntkalkbehandlung** liegen mit 4 € (10.000 EW-Anlage) und 2 € (50.000 EW-Anlage) auf moderatem Niveau.

Generell ist bei der Kalkbehandlung zu berücksichtigen, dass kalkbehandelter Klärschlamm nicht für alle Böden geeignet ist. Als ungünstige Umweltwirkung ist zudem die NH_3 -Ausgasung durch pH-Wert-Erhöhung zu berücksichtigen. Letztendlich reduziert sich dadurch auch der Nährstoffwert des behandelten Klärschlammes.

Erst durch die noch im Versuchsstadium befindliche **Hochtemperatur-Pelletierung** kann **solar getrockneter Klärschlamm** mit einem gewissen Hygieneniveau erzeugt werden, auf kleinen Kläranlagen allerdings zu sehr hohen Kosten von 59 €/angeschlossenem Einwohner. Erst im Bereich der 10.000 EW-Kläranlagen kann die solare Trocknung unter dem Kostenaspekt mit anderen Verfahren konkurrieren: 7 €/EW, mit Hochtemperatur-Pelletierung 9 €/EW.

11.3 Hygienisierungsverfahren, die zu einem niedrigen Hygieneniveau führen

Als Hygienisierungsverfahren mit niedrigem Niveau werden die Langzeitlagerung und die Vererdung in die Betrachtung aufgenommen.

Insbesondere die **Langzeitlagerung** von Nassschlamm führt aufgrund des hohen Flächenbedarfs zu Kosten von 35 €/EW (1.000 EW-Anlage) bzw. 28 €/EW (10.000 EW-Anlage). Da der erzielbare Hygienestatus der Maßnahme von niedrigem Niveau ist, sind diese Kosten nicht gerechtfertigt. Die Langzeitlagerung von entwässertem Klärschlamm ist aufgrund des geringeren Flächenbedarfs mit 19 €/EW (1.000 EW-Anlage) bzw. 12 €/EW (10.000 EW-Anlage) schon wesentlich kostengünstiger, selbst bei Nutzung der mobilen Klärschlammmentwässerung. Ist vor Ort ein Entwässerungsaggregat nutzbar, sind die jährlichen Kosten für die Langzeitlagerung von Klärschlamm mit 4 €/EW im günstige Bereich angesiedelt.

Bei der **Klärschlammvererdung** sind mit 19 €/EW (1.000 EW-Anlage) bzw. 13 €/EW (10.000 EW-Anlage) Kosten zu verzeichnen, die auf dem Niveau der Kalkhydrat-Behandlung liegen, wobei der vererdete Klärschlamm ein anderes Anwendungsspektrum besitzt als der

Kalk-Klärschlamm. Das erzielbare Hygienisierungsniveau mit diesem Behandlungsverfahren ist u. a. abhängig von der Einhaltung einer ausreichenden Nachlagerfrist.

Die **solare Trocknung** führt i. d. R. nicht zu einem hygienisierten Endprodukt, gleichwohl wird das Verfahren vermehrt zur Klärschlammbehandlung in kleineren Anlagen eingesetzt. Sehr hohe Kosten verursacht die solare Trocknung bei den kleinen Kläranlagen: 39 €/Einwohner.

11.4 Anlagengröße und Kostendegression

Insgesamt ergibt sich für die Gruppe der sehr kleinen Kläranlagen (ca. 1.000 EW) die Situation, dass Hygienisierungsmethoden mit hohem Hygieneniveau für diese Anlagen aus verfahrenstechnischen/logistischen Gründen nicht zur Verfügung stehen.

Hygienisierungsmethoden, mit denen mittleres oder niedriges Hygieneniveau erreichbar ist, sind für diese Anlagengröße mit Kosten zwischen 6 und 59 €/EW und Jahr realisierbar.

Eine Alternative für die o. g. Anlagengröße ist die gemeinsame Hygienisierung von Klärschlamm aus mehreren Anlagen, sofern die Kosten des Klärschlammtransports sich in vertretbarem Rahmen bewegen. Nicht geprüft wurde in diesem Zusammenhang, wie sich bei einer weitergehenden Klärschlammbehandlung auf größeren, zentralen Kläranlagen der Transportaufwand auf den Energiebedarf und die Klimawirksamkeit von Verfahren auswirkt.

Für kleine Anlagen (ca. 10.000 EW) stehen Hygienisierungsverfahren zur Verfügung, die Kosten zwischen 4 und 9 €/EW und Jahr verursachen. Ab einer Anlagengröße von 50.000 EW kann Klärschlamm für 2 €/EW und Jahr hygienisiert werden.

11.5 Ergänzende hygienisierende Maßnahmen

Alternativ bzw. ergänzend zu einer Klärschlammhygienisierung werden Maßnahmen diskutiert, mit denen für nicht hygienisierte Klärschlamm das Risiko einer Krankheitsübertragung verringert werden kann. Dies betrifft

- Aufbringungsverbote und -beschränkungen
- Wartefristen
- Einarbeitungsgebote (Tab. 21).

Der aktuelle Entwurf der Düngemittelverordnung sieht vor, dass Düngemittel hygienisch unbedenklich sind. Kann dies nicht gewährleistet werden, ist nach Düngemittelrecht künftig auch eine direkte Einbringung oder Einarbeitung zulässig (E-DüMV 2007, Tab. 21).

Zusätzlich werden im Rahmen der Europäischen Normung (CEN 2007, Tab. 13 bis 15) sowie im Bereich der nationalen Gütesicherung (QLA 2006, Tab. 18) in Abhängigkeit vom erreichten Hygieneniveau Anwendungsbereiche zugelassen. Beide Systeme sind nicht kongruent:

- Für konventionell stabilisierte Klärschlämme sieht das System QLA eine Anwendung auf Ackerland bei unverzüglicher Einarbeitung oder direkter Einarbeitung vor. Rekultivierungsflächen dürfen bei Einhaltung einer 10-monatigen Wartezeit beaufschlagt werden. Ein niedriges Hygieneniveau (1) nach CEN TC 308 wird dieser Kategorie zugeordnet.
- Keimreduzierte Klärschlämme dürfen auch im Feldfutterbau vor Aussaat und im Ackerbau als Kopfdüngung genutzt werden. Dies entspricht etwa dem mittleren Hygieniveau (2) nach CEN TC 308.

- Keiminaktivierte Klärschlämme dürfen zudem auf Grünland und im Obst- und Gemüsebau sowie in Rekultivierungsflächen und Parks eingesetzt werden. Diese Klärschlämme entsprechen in etwa dem hohen Hygienenniveau (3) nach CEN TC 308.

Hierbei gilt allerdings zu beachten, dass nach derzeit geltendem deutschem Recht eine Klärschlammausbringung im Obst- und Gemüsebau nicht zulässig ist (AbfKlärV 1992).

Die aufgeführten ergänzenden Maßnahmen können bei nicht/nicht vollständig hygienisiertem Klärschlamm zur Risikominimierung beitragen. Allerdings beschreiben die Hygienenniveaus einen Zustand, in welchem einzelne Organismen abgetötet sind, andere allerdings nicht. Sind nicht abgetötete Organismen in großer Konzentration vorhanden, ist ein hohes Infektionspotenzial für diesen speziellen Erreger vorhanden. Von Experten wird außerdem betont, dass es im Bereich der Krankheitsübertragung keine so eindeutige Dosis-Wirkungs-Beziehung gibt, wie z. B. bei Schadstoffen. So können auch geringere Konzentrationen von Erregern unter ungünstigen Bedingungen zu einer Erkrankung führen.

11.6 Prüfmethoden für die Hygienisierungsverfahren

11.6.1 Routinebetrieb

Zur Kontrolle der Hygienisierungsleistung der auf Kläranlagen eingesetzten Verfahren eignet sich im Routinebetrieb eine **Prozessüberwachung** und **Produktprüfung** vorzuschreiben. Mehrere Faktoren sprechen für die Prozessüberwachung:

- flexibel, ausbaubar und kann an lokale Gegebenheiten angepasst werden,
- kontinuierlich können anfallende, unterschiedliche Informationen über den hygienisierenden Prozess auf der Kläranlage verarbeitet werden (z. B. Temperatur, pH-Wert, Verweilzeiten, etc.),
- ggf. können vorhandene Prozessüberwachungssysteme eingesetzt werden,
- Ansatz des s. g. HACCP(Hazards analysis critical control point)-Konzepts entspricht EU-Vorgaben.

Die Auswahl der Prüforganismen für die Produktprüfung kann sich an der Verordnung (EG) Nr. 1774/2002 (Tab. 23) mit den folgenden Spezies orientieren:

- *Salmonella ssp.*
- *Escherichia coli*
- *Enterococcaceae*

Für den Bereich Phytohygiene kann vorbehaltlich neuerer wissenschaftlicher Erkenntnisse der unspezifische Parameter „keimfähige Samen und austriebsfähige Pflanzenteile“ übernommen werden.

11.6.2 Neue Baumuster/Verfahren

Bei neuen Verfahren bzw. der Abweichung von einem Baumuster - auch in Bezug auf den Anlagenbetrieb - empfiehlt sich zudem eine **Prozessprüfung** mit dem Ziel der Validierung dieser Verfahren.

Umfangreiche Untersuchungen zur Anpassung der Prozessprüfung für Biogasanlagen nach dem Inkrafttreten der BioAbfV (1998) haben gezeigt, dass diese Prüfung in der Praxis – möglicherweise aufgrund ihrer Komplexizität – von den Anlagenbetreibern meist nicht/bzw. nur fehlerhaft durchgeführt wird. Die Ergebnisse der Untersuchung stellen außerdem eine

Momentaufnahme dar und sind nur bei konstanter Betriebsweise der Anlage längere Zeit gültig. Als Indikatororganismen für die Seuchenhygiene können

- *Salmonella senftenberg*, *Enterococcus faecalis* (niedriges und mittleres Hygieneniveau)
- Bovine parvovirus und Coliphage T1 (hohes Hygieneniveau)

eingesetzt werden (Entwurf CEN TC 308/2007; Keimträgermethode).

Für hygienisierten Klärschlamm wurde bislang keine Nachweismethode zur Charakterisierung seiner phytohygienischen Unbedenklichkeit erarbeitet. Eine Übertragung von Vorgaben der BioAbfV, insbesondere die Prüfung auf keimfähige Samen und austriebsfähige Pflanzenteile bei der Prüfung der hygienisierten Bioabfälle wie auch die Heranziehung des TMV als Prüfparameter im Rahmen der Prozessprüfung ist in Anbetracht der mit den Prüfparametern der BioAbfV bislang gemachten Erfahrungen kritisch zu hinterfragen. Als Indikatoren im Bereich Phytohygiene können - vorbehaltlich neuerer wissenschaftlicher Erkenntnisse – Verwendung finden:

- Kohlhernie-Erreger und
- Tomatensamen

12 Forschungsbedarf

Forschungsaktivitäten zur Klärschlammhygienisierung wurden mit der Novellierung der AbfKlärV (1992) weitgehend eingestellt, sodass sich der Stand des Wissens in den letzten Jahren wenig verändert hat.

Nachdem in der geltenden Fassung der AbfKlärV auf ein Hygienisierungsgebot verzichtet wurde, bestand in der Bundesrepublik Deutschland weder der Anlass für die Aufrechterhaltung des Betriebs bestehender Hygienisierungseinheiten auf kommunalen Kläranlagen, noch für deren Neuerrichtung. Es gab auch kein Grund, neue, an bestimmte Rahmenbedingungen angepasste Hygienisierungsverfahren zu entwickeln. Vermutlich besitzen sogar einige neuere Verfahren zur Behandlung von Klärschlamm, wie z. B. die Klärschlammintegration, auch eine keimabtötende Wirkung. Bei der Verfahrensentwicklung und -bewertung wird allerdings i. d. R. darauf verzichtet, dies nachzuweisen.

Einige Erkenntnisse zur hygienisierenden Wirkung von Behandlungsmaßnahmen können aus den Vorhaben abgeleitet werden, die in Zusammenhang mit der Evaluierung und Anpassung der Vorgaben der BioAbfV vergeben wurden (z. B. UFOPLAN-FKZ 903 33 397; KLAGES und SCHWAB 2004). Allerdings beziehen sich diese Forschungsvorhaben auf die Behandlung von Bioabfall. Für Klärschlämme sind Herkunft, Stoffeigenschaften und Hygienisierungsrisiken als Einflussfaktoren auf die Wirkung der Hygienisierungsverfahren nicht evaluiert. Gleiches gilt auch für eine Übertragbarkeit von Hygienisierungsvorgaben aus dem Bereich des Hygienerechts (Vorgaben der Verordnung (EG) Nr. 1774/2002 und der TierNebV 2006).

Nicht zuletzt im Hinblick auf die Klimaschutzdiskussion sollten Verfahrensbewertungen nach anderen Kriterien durchgeführt werden als vor zwei bis drei Jahrzehnten.

Im Einzelnen ergibt sich folgender Forschungsbedarf:

- 1) Mit dem vorliegenden Gutachten konnte gezeigt werden, dass für kleine Kläranlagen der GK 1 und 2 praktisch keine Methode zur Klärschlammhygienisierung auf hohem Hygieniveau vorliegen, die verfahrenstechnisch umsetzbar und auch wirtschaftlich tragbar ist. Es stellt sich demnach der Bedarf - speziell für kleinere Kläranlagen - neue Methoden der Klärschlammhygienisierung weiter zu entwickeln.
- 2) Als Lösungsweg für eine wirkungsvolle und kostengünstige Hygienisierung der Klärschlämme aus Anlagen der GK 1 bis 3 wird vielfach diskutiert, den Klärschlamm zu einer zentralen Einrichtung zu transportieren und dort mit anderen Klärschlämmen eine ge-

meinsame Behandlung durchzuführen. Auch wird die Kofermentation von Klärschlämmen in benachbarten Biogasanlagen diskutiert.

Forschungsbedarf ergibt sich in diesem Zusammenhang hinsichtlich der Umwelteffekte aufgrund des zusätzlichen Transportaufwandes des Klärschlammes, des zusätzlichen Behandlungsaufwandes des Schlammes, sowohl in der zentralen Hygienisierungseinheit als auch auf der jeweiligen Kläranlage (z. B. Beeinflussung der Reinigungsleistung durch die s. g. „Rückbelastung“). Insbesondere die Klimawirkung (Emission von CO₂-Äquivalenten) der verschiedenen Maßnahmen bedarf einer eingehenden Bewertung.

Im Hinblick auf die Kofermentation in Biogasanlagen gilt es herauszustellen, welchen Anforderungen die Biogasanlagen genügen sollten (z. B. in Hinblick auf die Hygienisierungseinrichtungen) und unter welchen Bedingungen die Kofermentation wirksam und wirtschaftlich durchgeführt werden kann (Klärschlammereigenschaften: aerob oder anaerob stabilisiert, entwässert, etc.). In diesem Zusammenhang sollte auch die Möglichkeit untersucht und bewertet werden, Abwärme von Biogas-BHKWs zur Klärschlammhygienisierung einzusetzen.

In jedem Fall ist bei einer gemeinsamen Behandlung verschiedener Klärschlämme oder von Klärschlämmen und Kosubstraten der sich ergebende Änderungsbedarf in der Rechtsetzung zu identifizieren und die Konsequenzen zu bewerten.

- 3) Außerdem sollten alle neue bzw. in der Entwicklung begriffene Abwasser- und Klärschlammbehandlungsverfahren hinsichtlich ihrer hygienisierenden Wirkung überprüft werden (vgl. auch Tab.12, Kap. 3.14). Dies betrifft Anlagenkonzepte für alle Kläranlagen-größen.
- 4) Das von der CEN empfohlene System der Prozessüberwachung nach dem HACCP (Hazards analysis critical control point)-Konzept sollte hinsichtlich seiner Praktikabilität für den Kläranlagenbetrieb geprüft werden.
- 5) Die für die Prüfung neuer Hygienisierungsverfahren bzw. Hygiene-Baumuster im Grundsatz geeignete Methode der Prozessprüfung (Keimträgermethode) sollte im Hinblick auf den Kläranlagenbetrieb getestet werden. Dies gilt für die grundsätzliche Methodik (Einsatz von Keimträgern) als auch die Auswahl der jeweils zum Einsatz kommenden Indikatororganismen der Phyto- und Seuchenhygiene (vgl. Tab. 23 sowie Kap. 5.4 und 5.5).
- 6) Insgesamt ist eine Bewertung der Wirksamkeit von Hygienisierungsverfahren für Klärschlämme und auch von diese ergänzenden Maßnahmen wie Aufbringungsverbote und –beschränkungen, Wartefristen und Einarbeitungsgebote derzeit allenfalls befriedigend durchführbar, da im Bereich der Hygiene Risiken zwar entsprechend dem Übertragungsmodus differenziert werden können (vgl. Tab. 4, Kap. 2.2.1), jedoch bislang keine Methode vorliegt, diese Risiken aufgrund der jeweils gegebenen Rahmenbedingungen zu quantifizieren (BÖHM 2007). Es besteht infolgedessen Bedarf für eine solche Methode zur Quantifizierung von Hygienierisiken.
- 7) Im Rahmen einer SRU-Studie zur Umweltwirkung von Arzneimitteln wurde vorgeschlagen, Quellen hoher Belastung mit Krankheitserregern von einer Direkteinleitung in kommunale Kläranlagen auszuschließen (SRU 2007). Dies wäre ein parallel zu prüfender Weg, vom Klärschlamm und den Indirekteinleitungen der Kläranlage ausgehenden Hygienierisiken in Bezug auf die Seuchen- und Phytohygiene - insbesondere auch in Bezug auf die Ausbreitung von Antibiotikaresistenzen - zu reduzieren.
- 8) Bislang wurde davon ausgegangen, dass die Pflanzenwurzel für viele organische Schadstoffe, insbesondere aber für seuchenhygienisch relevante Pathogene eine schwer zu überwindende Barriere darstellt. Anknüpfend an die Arbeit von KLERKS et al. (2007) stellt sich die Frage nach dem Umfang der Aufnahme von Pathogenen durch Nutzpflanzen und des Infektionsrisikos für Nutztiere und den Menschen.

- 9) Schließlich bedarf die Rolle des Abwasserpfades und insbesondere des Klärschlammes bei der Verbreitung von Pflanzenkrankheiten und auch Neophyten einer gründlichen und umfassenden Analyse.

13 Zusammenfassung

Klärschlamm, der keinem Hygienisierungsprozess unterworfen wurde, kann eine Vielzahl an Krankheitserregern enthalten. Das Vorkommen von seuchenhygienisch relevanten Erregern im Klärschlamm, deren Tenazität und die Wirksamkeit von Hygienisierungsmaßnahmen wurde im Vorfeld der Novellierung der AbfKlärV (1992) intensiv untersucht, für den Bereich der Phytohygiene bestehen jedoch diesbezüglich noch viele Kenntnislücken.

Ziel des vorliegenden Gutachtens ist es, in Bezug auf Hygienisierungsvorschriften für die Novelle der AbfKlärV eine Entscheidungshilfe zu bieten. Derzeit enthält die AbfKlärV keine Vorgaben zum Hygienestatus von Klärschlamm. Demgegenüber weist die BioAbfV als weitere bundesweit gültige abfallrechtliche Regelung umfangreiche Hygienevorgaben für die Bereiche Seuchen- und Phytohygiene auf. Auch das Düngemittelrecht implementiert mit der derzeit als Entwurf vorliegenden Novelle der DüMV produktbezogene Hygienevorgaben. Auf europäischer Ebene wird für Klärschlämme im Rahmen des CEN vorgeschlagen, durch verschiedene Hygienisierungsverfahren erreichbare Hygieneniveaus unterschiedlichen Anwendungsbereichen innerhalb und außerhalb der Landwirtschaft zuzuordnen.

Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten zur Klärschlammhygienisierung wurden mit der Novellierung der AbfKlärV (1992) weitgehend eingestellt, sodass sich der Stand der Technik in den letzten Jahrzehnten wenig verändert hat. Vermutlich weisen einige neue Abwasser- und Klärschlammbehandlungsverfahren – wie die Klärschlammintegration – auch eine hygienisierende Wirkung auf, dies ist jedoch nur unzureichend belegt.

Eine Situationsanalyse ergibt heute insgesamt folgendes Bild:

Bei den ca. 10.000 in der Bundesrepublik Deutschland betriebenen Kläranlagen handelt es sich zu mehr als 1/3 um sehr kleine Anlagen der GK 1 mit einer Ausbaugröße von rund 1.000 angeschlossenen Einwohnern. Ein weiteres Drittel der Anlagen besitzt eine Ausbaugröße von ca. 10.000 Einwohnern (GK 2-3). In diesen beiden Größenklassen ist die simultane aerobe Stabilisierung vorherrschend. Der überwiegende Anteil des Klärschlammes aus diesen Anlagen wird landwirtschaftlich verwertet, vornehmlich als Nassschlamm.

In den verbleibenden ca. 20 % der Kläranlagen ist die nachgeschaltete anaerobe Stabilisierung im Faulturm (einstufig, mesophil, alkalisch) dominierend. In der Regel wird der Klärschlamm dieser größeren und großen Kläranlagen auch weiter aufbereitet, teilweise landwirtschaftlich verwertet und teilweise verbrannt.

Aus Kostengründen wird derzeit eine Klärschlammhygienisierung praktisch nicht eingesetzt, auch dort nicht, wo Aggregate bereits installiert sind.

Im Hinblick auf eine Gleichbehandlung von Düngemitteln sollte jedoch der Klärschlamm vor einer landbaulichen Verwertung grundsätzlich einer hygienisierenden Behandlung unterworfen werden.

Ein Screening der bekannten und dem Stand der Technik zuzuordnenden Klärschlammhygienisierungsverfahren zeigt jedoch, dass diese aus verfahrenstechnischen Erwägungen für die verschiedenen Abwasserbehandlungsverfahren unterschiedliche Eignung besitzen. Die vorliegende Studie offenbart, dass für sehr kleine Kläranlagen (1.000 EW) keine Hygienisierungsverfahren mit hohem Hygienisierungsniveau zur Verfügung stehen. Für Kläranlagen mit einer Ausbaugröße von ca. 10.000 EW existieren nur wenige geeignete Hygienisierungsverfahren mit hohem Hygienisierungsniveau. Eine Berechnung von Investitions- und Betriebskosten der betrachteten Verfahren ergibt für alle kleinen Anlagen (1.000 EW) Hygienisierungskosten von 7 bis 59 €/EW und Jahr, für die 10.000 EW-Anlagen ist von Kosten zwischen 2 und 13 €/EW und Jahr auszugehen. Niedrige Kosten lassen sich für diese Kläranla-

gen-Größenklassen insbesondere durch eine gemeinsame Klärschlammbehandlung auf größeren Anlagen erreichen, durch den Einsatz von Lohnunternehmen (mobile Klärschlammmentwässerung) oder durch die Nutzung vorhandener Aggregate (Speichervolumen).

Hinsichtlich einer Weiterführung der landwirtschaftlichen Klärschlammverwertung und als Konsequenz aus dem Ergebnis der vorliegenden Studie sollte für kleinere Kläranlagen bis ca. 10.000 Ausbaugröße die direkte Einbringung oder Einarbeitung von nicht hygienisiertem Klärschlamm parallel zur Anwendung von hygienisiertem Klärschlamm zugelassen werden. Dies sollte – in Abstimmung mit geplanten europäischen und auch nationalen düngemittelrechtlichen Vorgaben – an Aufbringungs- oder Anbaubeschränkungen gekoppelt werden.

Zur Überwachung der Wirksamkeit der Hygienisierungsverfahren bietet sich eine Kombination aus einer Umsetzung des HACCP(Hazards analysis critical control point)-Konzeptes mit online-Überwachung von Prozesskennwerten und der Produktüberwachung (CEN TC 308 2007, Verordnung (EU) Nr. 1774/2002) an. Als Indikatororganismen für die Produktprüfung können dabei für die Seuchenhygiene *Salmonella ssp.*, *Escherichia coli* und *Enterococaceae* (Verordnung (EU) Nr. 1774/2002) eingesetzt werden. Für den Bereich Phytohygiene kann, vorbehaltlich neuerer wissenschaftlicher Erkenntnisse, der unspezifische Parameter „keimfähige Samen und austriebsfähige Pflanzenteile“ übernommen werden (BioAbV 1998).

Zur Validierung neuer Verfahren/Baumuster ist eine Prozessprüfung (Keimträgermethode) mit für das jeweilige Hygienisierungsniveau geeigneten Indikatororganismen möglich. Als seuchenhygienisch aussagekräftige Prüforganismen können *Salmonella senftenberg*, *Enterococcus faecalis* (niedriges und mittleres Hygieneniveau), *Bovine parvovirus* und *Coliphage T1* (hohes Hygieneniveau), eingesetzt werden (Entwurf CEN TC 308/2007; Keimträgermethode). Als Prüforganismen für den Bereich Phytohygiene können – vorbehaltlich neuerer wissenschaftlicher Erkenntnisse – Kohlhernie-Erreger und Tomatensamen Verwendung finden (KLAGES und SCHWAB 2004).

14 Literaturverzeichnis

1774/2002 (2002): Verordnung (EG) Nr. 1774/2002 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 3. Oktober 2002 mit Hygienevorschriften für nicht für den menschlichen Verzehr bestimmte tierische Nebenprodukte (Abl. L 273 vom 10.10.2002, S. 1)

AbfKlärV (1992): Klärschlammverordnung vom 15. April 1992. BGBl. I, S. 912-934 (zuletzt geändert durch Erste Verordnung zur Änderung der Klärschlammverordnung vom 6. März 1997. BGBl. I, S. 446)

Arbeitspapier (2007a): Verordnung zur Änderung der Bioabfallverordnung und der tierische Nebenprodukte-Beseitigungsverordnung, Stand 22.02.2007

Arbeitspapier (2007b): Begründung zur Verordnung zur Änderung der Bioabfallverordnung und der tierische Nebenprodukte-Beseitigungsverordnung, Stand 22.02.2007

ATV, Abwassertechnische Vereinigung e.V. (1986): Erster Arbeitsbericht der ATV/VKS-Arbeitsgruppe 3.2.2 „Entseuchung von Klärschlamm“. Korrespondenz Abwasser 11: 1141-1142

ATV, Abwassertechnische Vereinigung e.V. (1988a): 2. Arbeitsbericht der ATV/VKS-Arbeitsgruppe 3.2.2 „Entseuchung von Klärschlamm“. Korrespondenz Abwasser 1: 71-74

ATV, Abwassertechnische Vereinigung e.V. (1988b): 3. Arbeitsbericht der ATV/VKS-Arbeitsgruppe 3.2.2 „Entseuchung von Klärschlamm“. Korrespondenz Abwasser 12: 1325-1333

Bergs, C.-G. (2007): Eckpunkte für eine Novelle der Klärschlammverordnung. In: Perspektiven der Klärschlammverwertung, Ziele und Inhalte einer Novelle der Klärschlammverordnung. KTBL-Schrift 453: 193-200, KTBL, Darmstadt

BioAbfV (1998): Verordnung über die Verwertung von Bioabfällen auf landwirtschaftlich, forstwirtschaftlich und gärtnerisch genutzten Böden (Bioabfallverordnung - BioAbfV) vom 21. September 1998. BGBl. I: 2955

BioStoffV (1999): Verordnung zur Umsetzung von EG-Richtlinien über den Schutz der Beschäftigten gegen Gefährdung durch biologische Arbeitsstoffe bei der Arbeit; Artikel 1: Verordnung über Sicherheit und Gesundheitsschutz bei Tätigkeiten mit biologischen Arbeitsstoffen vom 27. Januar 1999. BGBl: 50

Böhm, R., Niederwöhrmeier, B. (1988): Die Möglichkeiten der Entseuchung von Klärschlamm mit anderen Desinfektionsmitteln als Kalk. In: Deutsche Veterinärmedizinische Gesellschaft e. V. (Hrsg.), Bericht des 2. Hohenheimer Seminars "Entseuchung von Klärschlamm", Erfahrungsberichte aus der Praxis: 205-219

Böhm, R., Frank-Fink, A., Martens, W., Philipp, W., Winter, D. (1997): Veterinär- und seuchenhygienische Untersuchungen zur Überprüfung von Gülleaufbereitungsverfahren und der erzeugten Gülleaufbereitungsprodukte. Institut für Umwelt- und Tierhygiene der Universität Hohenheim

Böhm, R. (1999a): Begründung der Hygieneregeln und vergleichbare Regelungen in anderen Ländern. In: Biologische Abfallbehandlung –Erste Erfahrungen mit der Bioabfallverordnung in Deutschland. 7. Hohenheimer Seminar, Hohenheim, Giesen: 31-47

Böhm, R. (1999b): Die Bedeutung hygienischer Belange für die Qualität von Produkten der aeroben und anaeroben Bioabfallbehandlung. In: Eikmann, Th., Hofmann, R. (Hrsg.), Stand von Wissenschaft, Forschung und Technik zu siedlungshygienischen Aspekten der Abfallentsorgung und -verwertung. Schriftenreihe des Vereins für Wasser-, Boden- und Lufthygiene, Bd. 30: 3-23

Böhm, R. (2007): Seuchenhygienische Anforderungen an organische Düngemittel – Schwerpunkt kommunale Klärschlämme. In: Perspektiven der Klärschlammverwertung, Ziele und Inhalte einer Novelle der Klärschlammverordnung. KTBL-Schrift 453: 41-55, KTBL, Darmstadt

Bolanz, K., Ostertag, S., Peschen, N., Strauch, D., Zehendner, H. (1988): Klärschlammmentseuchung durch Rohschlammaufkalkung mit nachfolgender mesophiler Faulung. gwf-Wasser/Abwasser 129, H. 10: 627-631

Botner, A. (1990): Modelstudier vedrorende overlevelse af virus i gylle under traditional opbevaring og under udradning i biogasanlaeg. State Veterinary Institute for Virus Research

- Britzius, E., Böhm, R. (1981): Experimentelle Untersuchungen über den Einsatz von Peressigsäure zur Desinfektion von Schweinegülle. Wien. tierärztl. Mschr. 68: 200-207
- Bundesverband der Dt. Kalkindustrie e.V. (2007): Internet-Information "Klärschlamm: Die Dosierung macht's".
- CEN, European Committee for Standardization (Hrsg.) (2007): Characterisation of sludges – Good practice for utilisation in agriculture (CEN TC 308 WG 2 Guide 4, Entwurf)
- CEN, European Committee for Standardization (Hrsg.) (2007): Characterization of sludges – Guidelines of good practice (CEN TC 308 WG 2 Guide 10, Entwurf)
- Chytil, K (1996): Untersuchungen zur Verschleppung von Ackerunkräutern, insbesondere durch Müllkompost und Klärschlämme. Veröffentlichung der Bundesanstalt für alpenländische Landwirtschaft, Heft 6, Gumpenstein, Wien
- Dedie, K., Bockemühl, J., Kühn, H., Volkmer, K.-J., Weinke, T. (1993): Bakterielle Zoonosen bei Tier und Mensch. Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart, ISBN 3-432-25061-4
- Deutsche Veterinärmedizinische Gesellschaft e.V. (Hrsg.) (1988): Bericht des 2. Hohenheimer Seminars „Entseuchung von Klärschlamm“, Erfahrungsberichte aus der Praxis, 331 S.
- Dichtl, N., Müller, J., Engelmann, E., Günthert, F.W., Osswald, M. (1997): Desintegration von Klärschlamm – ein aktueller Überblick. Korrespondenz Abwasser Jahrg. 44, Nr. 10: 1726-1739
- Dickens, J.S.W., Wright, A.J., Reed, P.J. (1995): Survival of Polymyxa Betae during processing of vegetables and sugarbeets. Bulletin OEP/EPPO Bulletin 25: 673-679
- Dittrich, B. (2005): Ergebnisse der Düngemittelverkehrskontrolle in Sachsen. Infodienst 05: 42-50
- DüMG (1977): Düngemittelgesetz BGBl I 1977, 2134. zuletzt geändert durch Art. 183 V vom 29.10.2001 BGBl I, 2785
- DüMV (2003): Verordnung über das Inverkehrbringen von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln (Düngemittelverordnung – DüMV) vom 26. November 2003. BGBl I, 2373
- DüV (2007): Verordnung über die Anwendung von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln nach den Grundsätzen der guten fachlichen Praxis beim Düngen. Neufassung der Düngeverordnung (27.02.2007); BGBl I, 221
- DüMV-Entwurf (2007): Verordnung über das Inverkehrbringen von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln (Düngemittelverordnung), Stand April 2007
- EFSA (2005a): Opinion of the Scientific Panel on Biological Hazards of the European Food Safety Authority on the safety vis-à-vis biological risks of biogas and compost treatment standards of animal by-products (ABP). (Question N° EFSA-Q-2003-097). www.efsa.europa.eu
- EFSA (2005b): Opinion of the Scientific Panel on Biological Hazards of the European Food Safety Authority on the biological safety of heat treatment of manure (Question N° EFSA-Q-2004-104). www.efsa.europa.eu
- EFSA (2007): Opinion of the Scientific Panel on Biological Hazards on the safety vis-à-vis biological risk of the mesophilic process of biogas and compost treatment of Animal By-Products (ABPs) (Question N° EFSA-Q-2006-126). www.efsa.europa.eu
- Eko-Plant (2000): Steigerung der Verwertung von Klärschlämmen durch verbesserte Produkte, Qualitätsnormungen und erweiterte Märkte. Pauly, U., v. Borcke, P., Peitzmeier, M., Querengässer, S.; DBU-Forschungsprojekt Az. 07491 (unveröffentlicht)
- European Commission (2000): Working Document on Sludge. 3rd Draft. Brussels, 27. April 2000, ENV:E3/LM
- Evans, T. (2007): Dr. Tim Evans, Tim Evans Environment, Stonecroft, Park Lane, Ashted, Surrey KT21 1 EU England
- Fraser, J.A.L., Godfree, A.F., Jones, F. (1984): Use of peracetic acid in operational sewage sludge disposal to pasture. Wat. Sci. Tech. 17: 451-466
- Fuchs, L., Schwinning, H.G. (1997): Zum Stand der aerob-thermophilen Stabilisierung und Entseuchung von Klärschlamm. Korrespondenz Abwasser Jahrg. 44, Nr. 10: 1834-1841

- Gözzalan, F. (2004): Untersuchungen zum Vorkommen antibiotikaresistenter Isolate von *Escherichia coli*; *Enterococcus faecalis* und *Staphylococcus aureus* aus Kommunal- und Schlachthofabwasser. Diss. Universität Hohenheim
- Haible, C. (1988): Langzeitlagerung. In: Deutsche Veterinärmedizinische Gesellschaft e. V. (Hrsg.), Bericht des 2. Hohenheimer Seminars "Entseuchung von Klärschlamm", Erfahrungsberichte aus der Praxis: 249-260
- Heinicke, D. (1998): Verbreitung von Nematoden mit Klärschlamm und Abwasser. Der Kartoffelbau, 40. Jg. (6): 221-224
- Hoferer, M. (2001): Seuchenhygienische Untersuchungen zur Inaktivierung ausgewählter Bakterien und Viren bei der mesophilen und thermophilen anaeroben alkalischen Faulung von Bio- und Küchenabfällen sowie anderen Rest- und Abfallstoffen tierischer Herkunft. Vet.-med.-Diss., Uni Berlin
- Hurst, C.J. (1989): Fate of viruses during wastewater sludge treatment processes. CRC Crit. Rev. Environ. Control 18: 317-343
- Idelmann, M., Marciniszyn, E., Waldow, F., Schuler, C., Bruns, C., Gottschall, R., Wolf, G.A. (1998): Phytohygiene der Bioabfallkompostierung. In: Deutsche Bundesstiftung Umwelt (Hrsg.) Förderungsschwerpunkt Bioabfallverwertung: Hygiene der Bioabfallkompostierung, Initiativen zum Umweltschutz 1-59. Zeller Verlag, Osnabrück
- Idelmann, M. (2005): Hygienisierung von Kompost. Schriftenreihe des Fachgebietes Abfalltechnik Dissertationen Band 6. Hrsg.: A.I.Urban, Kassel
- Jefremenko, T.S., Jakovleva, V.A. (1981): Destruction of *Synchytrium endobioticum* (Schulb.) Perx. In: waste products of potato processing industry. Mikologia i Fitopatologija, 6, Band 16: 501-504
- Kassner, W. (1986): "Verfahrenstechnische Möglichkeiten der Klärschlamm-Entseuchung"; Deutsche Veterinärmedizinische Gesellschaft e.V.(Hrsg.).Bericht des 1. Hohenheimer Seminars "Entseuchung von Klärschlamm", Stuttgart-Hohenheim, 8. April 1986
- Kassner, W., Schmuker, A. (1990): Alternative Verfahren der Klärschlamm-Sorgung. UBA-Texte 29, 261 S.
- Kegler, H., Kleinhempel, H., Stanarius, A. (1984): Evidence of infectious plant viruses after passage through the rodents alimentary tract. Archiv für Phytopathologie und Pflanzenschutz 20: 189-193
- Kern, M., Lutz, W., Bluhm, H., Bumiller, W., Kusche, I. (1999): Abtöten und Aufschließen von Mikroorganismen (Bakterien) durch gepulste elektrische Felder. In: Verfahrenstechnik der Abwasser und Schlammbehandlung -additive und prozeßintegrative Maßnahmen. 6-8. September 1999, Bremen: 857-861
- Klages, S., Schwab, M. (2004): Koordinierung und Abstimmung von Forschungsergebnissen und wissenschaftlichen Erkenntnissen zur Novellierung des Anhanges 2 der Bioabfallverordnung“ (Laufzeit: 01.11.2003 bis 31.10.2004; UFOPLAN-FKZ 903 33 397) Abschlußbericht
- Klerks, M.M., Eelco, F., van Gent-Pelzer, M., Zijlstra, C., van Bruggen, A. (2007): Differential interaction on *Salmonella enterica* serovars with lettuce cultivars and plant-microbe factors influencing the colonization efficiency. The ISME Journal: 1-12
- Klingler, B. (1996): Hygienisierung von Gülle in Biogasanlagen. In: Biogas-Praxis Grundlagen-Planung-Anlagenbau-Beispiele. Ökobuch Stautfen bei Freiburg: 141
- Koch, K., Strauch, D. (1981): Inaktivierung von Polio- und Parvovirus im Klärschlamm durch Kalkbehandlung. Zbl. Bakt. Hyg., I. Abt. Orig. B 174: 335-347
- Konwiki (2003): [http://commons.wikimedia.org/wiki/Image:Kläranlage Ablaufschema_-_anaerobe_Schlammbehandlung.jpg](http://commons.wikimedia.org/wiki/Image:Kläranlage_Ablaufschema_-_anaerobe_Schlammbehandlung.jpg)
- Köppke, K.-E. (1999): Zielsetzungen, Verfahren und Anwendungsmöglichkeiten des Klärschlamm-aufschlusses. Korrespondenz Abwasser 46, 7: 1094-1100
- KTBL (2000): Auswirkungen rechtlicher Regelungen auf die landbauliche Verwertung von Klärschlamm. KTBL-Sonderveröffentlichung 027, KTBL, Darmstadt
- KTBL (2007): Perspektiven der Klärschlammverwertung, Ziele und Inhalte einer Novelle der Klärschlammverordnung. KTBL-Schrift 453, KTBL, Darmstadt

- Kudava, I.T., Blanch, K., Hovde, C.J. (1988): Analysis of *Escherichia coli* O157:H7: Survival in ovine or bovine manure and manure slurry. *Appl. Environ. Microbiol.* 64 (9): 3166-3174
- Lang, A. (1987): Mikrobiologische Untersuchungen über die Eignung verschiedener Indikatororganismen zur seuchenhygienischen Beurteilung von Klärschlamm. Diss. Hohenheim, 149 S.
- Lang, A. (1988a): Thermische Konditionierung. In: Deutsche Veterinärmedizinische Gesellschaft e. V. (Hrsg.), Bericht des 2. Hohenheimer Seminars "Entseuchung von Klärschlamm", Erfahrungsberichte aus der Praxis: 220-230
- Lang, A. (1988b): Schlammmentwässerung in Schilfbeeten. In: Deutsche Veterinärmedizinische Gesellschaft e. V. (Hrsg.), Bericht des 2. Hohenheimer Seminars "Entseuchung von Klärschlamm", Erfahrungsberichte aus der Praxis: 261-274
- Langerfeld (1984): *Synchytrium endobioticum* (Schilb.) Perc., Zusammenfassende Darstellung des Erregers des Kartoffelkrebses anhand von Literaturberichten. Mitteilungen der Biologischen Bundesanstalt für Land- u. Forstwirtschaft: 219
- Leist, N., Gießler, S. (1998): Über Samen in Klärschlämmen und ihr Absterbeverhalten bei verschiedenen Schlammbehandlungen. *VDLUFA-Schriftenreihe* 49, Kongreßband: 67-70
- LUFA, Landwirtschaftliche Untersuchungs- und Forschungsanstalt Hameln (1998): Seuchenhygiene beim Klärschlamm. Literaturarbeit, 186 S.
- Lund, B., Jensen, V. F., Have, P., Ahring, B., (1996): Inactivation of virus during anaerobic digestion of manure in laboratory scale biogas reactors. *Antonie van Leeuwenhoek*, 69: 25-31
- Martens, M., Fink, A., Philipp, W., Weber, A., Winter, D., Böhm, R. (1999): Seuchenhygienische Bewertung von Anaerobverfahren. Tagungsband zum 7. Hohenheimer Seminar: Biologische Abfallbehandlung - Erste Erfahrungen mit der Bioabfallverwertung in Deutschland, 29-31. März 1999, Universität Hohenheim: 125-133
- Mascher, F., Feierl, G., Haas, D., Marth, F., Reinthaler, F., Köck, M., Pichler-Semmelrock, F. P. (1995): Salmonellen im Klärschlamm in Abwasserreinigungsanlagen in der Steiermark/Österreich – Seuchenhygienische Aspekte. 3. Kongreß der GHU in Dresden, Poster: S. 305
- Mc Kain, N., Hobson, P. N. (1987): A note on the destruction of porcine enteroviruses in anaerobic digestions. *Biological Wastes*, 22: 147-155
- Metzler, A., Pesaro, F. (1992): Human-, tier- und pflanzenpathogene Keime in der Feststoffvergärung. Bundesamt für Energiewirtschaft, Schweiz
- Möller, U., Zingler, E. (1996): Entseuchung von Klärschlamm. In: *ATV-Handbuch Klärschlamm*, 4. Auflage, Ernst & Sohn Verlag: 247-257
- Monteith, H. D., Shannon, E. E., Derbyshire, J. B. (1986): The inactivation of a bovine enterovirus and a bovine parvovirus in cattle manure by anaerobic digestion, heat treatment, gamma irradiation, ensilage and composting. *J. Hyg.*, 97: 175-184
- Müller, J. (1998): Stand der Forschung im Bereich der Klärschlammdeintegration. *Korrespondenz Abwasser Jahrg.* 45, Nr. 2: 301-306
- Nees, C. (1988): Vergleichende seuchenhygienische Untersuchungen bei verschiedenen Kombinationen aerober und anaerober Klärschlammbehandlungsverfahren. Diss. Gießen, 140 S.
- Niederwöhrmeier, B., Butz, U., Böhm, R. (1988): Mikrowellenanwendung. In: Deutsche Veterinärmedizinische Gesellschaft e. V. (Hrsg.), Bericht des 2. Hohenheimer Seminars "Entseuchung von Klärschlamm", Erfahrungsberichte aus der Praxis: 231-248
- Noble, Roberts (2004): Eradication of plant pathogens and nematodes during composting: a review. *Plant Pathology* 53: 548-568
- Olsen, J. E., Larsen, H. E. (1987): Bacterial decimation times in anaerobic digestions of animal slurries. *Biological Wastes*, 21: 17-26
- Ostertag, S. (1987): Mikrobiologisch-hygienische Untersuchungen über die Anwendung von Brannt- und Löschkalk zur Klärschlammdeintegration. Diss. Hohenheim, 140 S.
- Ostertag, S. (1988): Hygienische Bewertung der Schlammbehandlung mit Kalk. In: Deutsche Veterinärmedizinische Gesellschaft e. V. (Hrsg.), Bericht des 2. Hohenheimer Seminars "Entseuchung von Klärschlamm", Erfahrungsberichte aus der Praxis: 194-204

- Pendinger, T. (1990): Seuchenhygienische Untersuchungen bei der großtechnischen Optimierung einer anaerob-thermophil-mesophilen Klärschlammstabilisierungsanlage. Diss. Hohenheim, 163 S.
- Pfeilstetter, E. (1999): Der Einfluß von Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschädlingen auf die phytohygienische Unbedenklichkeit von Komposten. In: Eikmann, Th., Hofmann, R. (Hrsg.), Stand von Wissenschaft, Forschung und Technik zu siedlungshygienischen Aspekten der Abfallentsorgung und –verwertung. Schriftenreihe des Vereins für Wasser-, Boden- und Lufthygiene, Bd. 30: 25-36
- Pfuderer, G. (1985): Desinfektionswirkung von Kalk bei verschiedenen Verfahren der Klärschlammbehandlung. Stuttgarter Berichte zur Siedlungswasserwirtschaft. Bd. 89, 237 S.
- Philipp, W., Lang, A., Strauch, D. (1987): Zur Frage der Wirkung von Schilf auf die Entseuchung von Klärschlamm in Entwässerungsbeeten. Forum Städte-Hygiene 38: 325-328
- Phillipp, W. (1981): Vergleichende hygienische Untersuchungen über die Wirkung der Klärschlammpasteurisierung vor und nach der mesophilen, anaeroben, alkalischen Schlammfäulung. Diss. Gießen
- Philipp, W., Strauch, D. (1988): Untersuchung über den Einsatz von Pflanzen zur Klärschlamm-Entwässerung. Forschungsbericht Umweltbundesamt 10301227, Teilvorhaben 2
- Philipp, W. (1988a): Schlammpasteurisierung - Hygiene. In: Deutsche Veterinärmedizinische Gesellschaft e. V. (Hrsg.), Bericht des 2. Hohenheimer Seminars "Entseuchung von Klärschlamm", Erfahrungsberichte aus der Praxis: 60-87
- Philipp, W. (1988b): Aerob-thermophile Schlammstabilisierung mit anschließender Fäulung - Hygiene. In: Deutsche Veterinärmedizinische Gesellschaft e. V. (Hrsg.), Bericht des 2. Hohenheimer Seminars "Entseuchung von Klärschlamm", Erfahrungsberichte aus der Praxis: 134-146
- Philipp, W., Böhm, R. (1997): Hygieneanforderungen an Verfahren der Bioabfallvergärung. In: Bio- und Restabfallbehandlung –biologisch-mechanisch-thermisch. K. Wiemer, M. Kern (Hrsg.). Witzenhäuser-Institut. Neues aus Forschung und Praxis, 313-346
- Philipp, W., Bux, M., Baumann, R., Hertwig, K., Böhm, R. (2006): Solare Trocknung und Hochtemperaturpelletierung zur Hygienisierung von Klärschlamm. Nr. 5026, MuA Lfg 4/06
- Plym-Forshell, L. (1995): Survival of Salmonellas and Ascaris suum eggs in a thermophilic biogas plant. Acta vet. scand., 36: 79-85
- Saier, M. (1987): Untersuchungen zum Verhalten human- und tierpathogener thermostabiler Viren bei der Pasteurisierung von Klärschlamm. Diss. Hohenheim, 120 S.
- Schirm, V. (2005): "Entwicklung einer sicheren Methode zur Bioabfallhygienisierung mit Kalk"; Institut für Hygiene und Infektionskrankheiten der Tiere der Justus-Liebig-Universität Gießen
- Schlegel, S. (1996): Schlammkonditionierung. In: ATV (Hrsg.), ATV-Handbuch Klärschlamm, 4. Aufl., Ernst & Sohn Verlag: 270-290
- Schmitt, F. (2007): Ruhrverband, Abt. Technische Entwicklung, Kronprinzenstr. 37, 45128 Essen
- Seyler, F. (2008): Kleinkläranlagen – Stand, Anforderungen, technische Konzepte und Umsetzung in Bayern. Wasser und Abfall 5: 20-23
- Soldierer, W., Strauch, D. (1991): Kinetik der Inaktivierung von Salmonellen bei der thermischen Desinfektion von Flüssigmist. J. vet. Med. B., 38: 561-574
- Spaull, A.M., McCormack, D.M. (1998): The incidence and survival of potato cyst nematodes (Globoder spp.) in various sewage sludge treatment processes. Nematologica, 34: 452-461
- Spillmann, S. K., Traub, F., Schwyzer, M., Wyler, R. (1987): Inactivation of animal viruses during sewage sludge treatment. Appl. Environ. Microbiol. 53, (9): 2077-2081
- SRU Der Rat von Sachverständigen für Umweltfragen (2007): Arzneimittel in der Umwelt, Stellungnahme Nr. 12
- SRU, Der Rat von Sachverständigen für Umweltfragen (1998): Flächendeckend wirksamer Grundwasserschutz. Ein Schritt zur dauerhaft umweltgerechten Entwicklung. Sondergutachten. Verl. Metzler-Poeschel Stuttgart, 207 S.
- Stachewicz (2002): Auftreten von Kartoffelkrebs in Deutschland und Möglichkeiten seiner Bekämpfung einschließlich Durchführung der Resistenzprüfung. Wintertagung AG Kartoffelzüchtung, 20./21. November 2002, Göttingen

- Starfinger, U. (2007): Schriftliche Mitteilung. Julius Kühn-Institut, Bundesforschungsinstitut für Kulturpflanzen, Institut für nationale und internationale Angelegenheiten der Pflanzengesundheit, Braunschweig
- Steinmüller, S., Müller, P., Pietsch, M. (2007): Phytohygienische Anforderungen an Klärschlämme – Regelungsnotwendigkeiten und -möglichkeiten. In: Perspektiven der Klärschlammverwertung, Ziele und Inhalte einer Novelle der Klärschlammverordnung. KTBL-Schrift 453, KTBL, Darmstadt
- Strauch, D., Berg, T., Fleischle, W. (1980a): Mikrobiologische Untersuchungen zur Hygienisierung von Klärschlamm. 3. Mitteilung: Versuche bei der Mietenkompostierung von Stroh mit Faulschlamm. gwf-wasser/abwasser Jahrg. 121, 6: 298-301
- Strauch, D., Berg, T., Fleischle, W. (1980b): Mikrobiologische Untersuchungen zur Hygienisierung von Klärschlamm. 4. Mitteilung: Untersuchungen an Bioreaktoren. gwf-wasser/abwasser Jahrg. 121, 7: 331-334
- Strauch, D. (1991): Survival of pathogenic micro-organisms and parasites in excreta, manure and sewage sludge, Rev. sci. techn. Off. Int. Epiz. 10: 813-846
- TierNebV (2006): Verordnung zur Durchführung des Tierische Nebenprodukte-Beseitigungsgesetzes (Tierische Nebenprodukte-Beseitigungsverordnung- TierNebV)
- Tomlinson, J.A., Faithfull, E., Flewett, T.H., Beards, G. (1982): Isolation of infective tomato bushy stunt virus after passage through the human alivary tract. Nature 300: 637-638
- Traub, F., Spillmann, S. K., Schwyzer, M., Wyler, R. (1988): Inaktivierung von Viren bei der Klärschlammbehandlung. Schr.-Reihe Verein WaBoLu, 78: 107-119
- Tronecker, D. (1987): Untersuchungen über den Einfluß von Kalkhydrat auf Spulwurmeier und Tomatensamen im Klärschlamm. Diplomarbeit Inst. f. Tierhygiene, Univ. Hohenheim
- Turner, J., Stafford, D.A., Hughes, D.E., Clarkson, J. (1983): The Reduction of Three Plant Pathogens (Fusarium, Corynebacterium and Globodera) in Anaerobic Digesters. Agricultural Wastes (6): 1-11
- Unger, J.-G., Pietsch, M. (2002): Pflanzengesundheitliche Risiken von Klärschlamm, Kompost und anderen organischen Düngern. In: Landwirtschaftliche Verwertung von Klärschlamm, Gülle und anderen Düngern unter Berücksichtigung des Umwelt- und Verbraucherschutzes, KTBL-Schrift 404: 323-333

15 Anhangtabellen

Anhangtab. 1 : Gegenüberstellung US-amerikanischer Vorschriften und britischer Vorgaben der praktischen Behandlungsgegebenheiten (CEN TC 308 WG 2 GUIDE 4, 2007)

Verfahren	Britische Vorgaben zur guten fachlichen Praxis	US-amerikanische Vorschriften	
	Beispiele für eine wirkungsvolle Klärschlammbehandlung	Prozesse, welche Krankheitserreger signifikant dezimieren	Prozesse zur weitergehenden Reduzierung der Krankheitserreger
aerobe Behandlung	nicht anerkannt	von 40 Tagen bei 20 °C bis 60 Tagen bei 15 °C	
Trockenbeete, Entwässerung und Lagerung	• 3 Monate; • bei anaerober Behandlung 14 Tage	3 Monate, währenddessen 2 Monate mit Temperaturen > 0 °C	
anaerobe Behandlung	Hydraulische Verweilzeit, erste Stufe: • 12 Tage bei 35 ± 3°C oder • 20 Tage bei 25 ± 3°C, Hydraulische Verweilzeit, zweite Stufe: 14 Tage	Hydraulische Verweilzeit: • 15 Tage bei 35 bis 55°C oder • 60 Tage bei 20°C	
Flüssiglagerung	3 Monate	nicht anerkannt	
Kompostierung	5 Tage ≥ 40 °C, dabei 4 h ≥ 55 °C, anschließend: Lagerung	5 Tage ≥ 40 °C, dabei 4 h ≥ 55 °C	Reaktor- oder statische Mietenkompostierung: 3 Tage ≥ 55 °C Mietenkompostierung: 15 Tage ≥ 55 °C bei 5-maligem Umsetzen
Trocknung	nicht anerkannt		TM-Gehalt des Trockenschlammes > 90 % sowie > 80 °C Schlammtemperatur oder Abgastemperatur > 80 °C
Erhitzung	nicht anerkannt		Flüssigschlammernhitzung 30 min auf 180 °C
thermophil-aerobe Stabilisierung	Hydraulische Verweilzeit: 7 Tage dabei 4 h ≥ 55 °C		Hydraulische Verweilzeit: 10 Tage bei 55 bis 60°C unter aeroben Bedingungen
Pasteurisierung	• 30 min ≥ 70 °C oder • 4 h ≥ 55 °C		30 min ≥ 70 °C
Kalkstabilisierung	72 h > pH 12 und 12 h > 52°C	2 h bei pH 12	2 h bei pH 12

Anhangtab. 2: Beispiele für Hygieneregeln (CEN TC 308 WG 2 GUIDE 4, 2007) verschiedener europäischer Staaten

Land	Ausbringungsverbot	Einschränkungen der Ausbringung und der Ausbringungszeiten	Qualitätskontrolle vor der Ausbringung	Methode der Ausbringung
Österreich (Niederösterreich)	keine Verwertung • im Gemüsebau • für Kartoffeln • für Heilkräuter oder • für Beerenobst	nur im Herbst nach der letzten Ernte des Jahres Ausbringung auf: • Weideflächen und • Futterbauflächen	In 1 g Klärschlamm: • keine Salmonellen; • keine infektiösen Parasiteneier • $\leq 10^3$ KBE <i>Enterobacteriaceae</i>	
Österreich (Burgenland)	keine Verwertung • im Gemüsebau • für Kartoffeln • für Heilkräuter oder • für Beerenobst	nur im Herbst nach der letzten Ernte des Jahres Ausbringung auf: • Weideflächen und • Futterbauflächen	In 1 g Klärschlamm: • keine Salmonellen; • keine infektiösen Parasiteneier • $\leq 10^3$ KBE <i>Enterobacteriaceae</i>	
Österreich (Vorarlberg)		• 10-monatige Wartezeit für Obst- und Gemüseproduktion auf beschlammten Flächen; nur im Herbst nach der letzten Ernte des Jahres bis zum Vegetationsbeginn des Folgejahres Ausbringung auf: • Weideflächen und • Futterbauflächen	Nur kompostierter oder getrockneter Klärschlamm darf verwendet werden; In 50 g kompostiertem Klärschlamm: • keine Salmonellen; • bei Nachweis von <i>Enterobacteriaceae</i> „sichere Ausbringung“	
Finnland	5-jährige Wartezeit für Kartoffeln und Gemüse nach der Klärschlammabgabe	Anwendung nur zu Mais, Zuckerrüben oder Ölraps nur, wenn diese nicht zu Nahrungszwecken bestimmt sind	• anaerobe Stabilisierung (33 - 35 °C, 2 - 3 Wo) • Kalkung (pH-Wert ≥ 12)	
Spanien			Anforderungen an Düngemittel und ähnliche Produkte, die aus Tiermaterial hergestellt werden: • in 25 g keine Salmonellen • $< 10^3$ KBE <i>Enterobacteriaceae</i>	
Schweden	keine Verwertung für • für Grünland • im Gemüsebau • für Kartoffeln oder • für Beerenobst	• 10-monatige Wartezeit für • Futterbauflächen, • Kartoffeln oder • Obst- und Gemüseflächen	keine	Einarbeitung von unbehandeltem Klärschlamm innerhalb von 24 Stunden nach der Ausbringung
UK (Vereinigtes Königreich, Großbritannien und Nordirland)	keine Verwertung unbehandelter Schlämme • auf Weidestellen innerhalb eines 10-monatigen Zeitraums • auf Rasenflächen	Keine Ernte oder Futtermutzung innerhalb von drei Wochen nach der Ausbringung von behandeltem Klärschlamm	behandelte Schlämme sollten den Kriterien der 1989 definierten guten fachlichen Praxis entsprechen.	direkte Einbringung oder Einarbeitung unbehandelter Klärschlämme

Anhangtab. 3 : Verarbeitungsmethoden (Verordnung (EG) Nr. 1774/2002)

Methode	Zerkleinerung	Zeit, Temperatur und Druck	Sonstiges
1	bei einer Kantenlänge von über 50 mm, Zerkleinerung auf höchstens 50 mm	über 133 °C/3bar/20min	
2	bei einer Kantenlänge von über 150 mm, Zerkleinerung auf höchstens 150 mm	über 100 °C/125 min über 110 °C/120 min und über 120 °C/50 min	
3	bei einer Kantenlänge von über 30 mm, Zerkleinerung auf höchstens 30 mm	über 100 °C/95 min über 110 °C/55 min und über 120 °C/13 min	
4	bei einer Kantenlänge von über 30 mm, Zerkleinerung auf höchstens 30 mm	In einem Kessel unter Zugabe von Fett über 100 °C/16 min über 110 °C/13 min über 120 °C/ 8 min und über 130 °C/ 3 min	
5	bei einer Kantenlänge von über 20 mm, Zerkleinerung auf höchstens 20 mm	Erhitzung bis zum Zerfall, Fett und Wasser werden ausgetrieben Verbleibendes Material: mind. 120 min/80 °C und mind. 60 min/100 °C	
6	Zerkleinerung auf mindestens 50 mm oder 30 mm	Mischung ist zu erhitzen auf: 90 °C/60 min oder 70 °C/60 min	nur für aus Fischen gewonnenen Nebenprodukte der Kategorie 3
7			jede von der zuständigen Behörde zugelassene Methode über einen Zeitraum von einem Monat tägliche Enderzeugnisstichproben Nachweisorganismen: <i>Clostridium perfringens</i> , <i>Salmonella</i> , <i>Enterobacteriaceae</i>

Anhangtab. 4 : Prüfungsumfang zum Nachweis der seuchen- und phytohygienischen Unbedenklichkeit bei Kompostierungs- und Vergärungsanlage (BÖHM 1999, VERÄNDERT NACH ARBEITSPAPIER BIOABFV, Stand Feb. 2007)

Qualitätsparameter	Prozessprüfung	Prozessüberwachung	Prüfungen der hygienisierten Bioabfälle
Seuchen- und phytohygienische Unbedenklichkeit	Kontrolle des Wirkungsgrades des Verfahrens	fortlaufende Temperaturkontrolle	Endkontrolle ^{3,4)}
Seuchen- und Phytohygiene	• neu errichtete Kompostierungs- und Vergärungsanlagen (innerhalb von 12 Monaten nach Inbetriebnahme) • bereits geprüfte Anlagen bei Einsatz neuer Verfahren oder wesentlicher Änderung der Verfahren/Prozessführung (innerhalb von 12 Monaten nach Einsatz/Änderung),	• kontinuierliche Temperaturmessung in repräsentativen Zonen im relevanten Hygienisierungsbereich (teil), • prüffähige Aufzeichnung von Daten (u. a. Temperatur, Umsetztermine bzw. Befüllung/Entleerung)	regelmäßige Untersuchungen des hygienisierten Materials
Anzahl der Untersuchungsgänge	• Kompostierungsanlagen: 2 Untersuchungsgänge, davon einer im Winter • thermophile Vergärungs-/Biogasanlagen: 2 Untersuchungsgänge, Mindestabstand 3 Monate • Anlagen zur anderweitigen Hygienisierung gemäß Sachverständigengutachten	permanente, nachprüfbare Aufzeichnung (3 Jahre Aufbewahrung)	je angefangener 2000 t (Frischmasse) mindestens alle drei Monate Probenahme am abgabefertigen Material
Anzahl der Prüforganismen	Seuchenhygiene Phytohygiene	-	Salmonellen (in 50 g Kompost oder Gäruckstand nicht nachweisbar)
	Anlagen der aeroben Behandlung: 3 Testorganismen (<i>Plasmiodophora brassicae</i> , Tomatensamen, Tabak-Mosaik-Virus) Anlagen der anaeroben Behandlung: 2 Testorganismen (<i>Plasmiodophora brassicae</i> , Tomatensamen)	-	keimfähige Samen und austreibsfähige Pflanzenteile; weniger als 2 pro Liter Prüfsubstrat
Probenzahl (je Testdurchgang):	Anlagen zur aeroben Behandlung	-	• jeweils eine Probe in der Seuchenhygiene und in der Phytohygiene • Proben sind Sammelmischproben (ca. 3 kg) aus je fünf Teilproben einer Charge des hygienisierten Materials
Seuchenhygiene	24 ^{1,2)}		
Phytohygiene	36 ^{1,2)}		
Gesamtsumme	60		
	Anlagen zur anaeroben Behandlung		
	8 ^{1,2)}		
	16 ^{1,2)}		
	24		

¹⁾ halbe Probenzahl bei kleinen Anlagen (Mengendurchsatz ≤3000t/a)

²⁾ die direkte Prozessprüfung in Vergärungsanlagen kann auch in mehreren Durchgängen hintereinander erfolgen. So kann z. B. der für die thermische Inaktivierung relevante Anlagenteil in drei Chargen an drei aufeinander folgenden Tagen untersucht werden

³⁾ die Aussagen zur seuchenhygienischen Unbedenklichkeit von behandelten Materialien gelten nur, wenn sowohl die Endproduktprüfungen als auch die Prozessprüfungen bestanden wurden.

⁴⁾ die Proben sind Sammelmischproben (ca. 3 kg) aus je fünf Teilproben des abgabefertigen Produktes.