

Schlussbericht zum BMBF-Vorhaben

Klärschlammbehandlung und -verwertung unter anderen klimatischen und sonstigen Randbedingungen

Verbundprojekt Exportorientierte Forschung und Entwicklung auf
dem Gebiet Abwasser, Teilprojekt B4

Förderkennzeichen: 02WA0733

Dipl.-Geoökol. Katrin Bauerfeld

PD Dr.-Ing. Thomas Dockhorn

Prof. Dr.-Ing. Norbert Dichtl

Institut für Siedlungswasserwirtschaft, TU Braunschweig



Oktober 2009

Inhalt

Berichtsblatt Deutsch	I
Berichtsblatt Englisch	II
A Fachlicher Schlussbericht	1
B Erfolgskontrollbericht	108

Schlussbericht Teil A - Fachlicher Schlussbericht

1	Kurzdarstellung	4
1.1	Aufgabenstellung.....	4
1.2	Kompetenz und Vorarbeiten des Antragstellers	5
1.3	Planung und Ablauf des Projektes	7
1.3.1	Theoretische Vorarbeiten und Literaturrecherche	7
1.3.2	Untersuchungen zur Klärschlammbehandlung und -verwertung unter verschiedenen Bedingungen	7
1.3.3	Auswertung und Beurteilung der Versuchsergebnisse.....	8
1.3.4	Arbeiten zum Scale-Up	8
1.3.5	Berichterstattung und Beitrag zum Handbuch.....	8
1.3.6	Abweichungen gegenüber der Antragsplanung	9
1.4	Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde	10
1.4.1	Getrennt aerobe Schlammstabilisierung	11
1.4.2	Anaerobe Schlammstabilisierung.....	12
1.4.3	Behandlung mit Kalkhydrat	13
1.4.4	Behandlung mit Branntkalk	13
1.4.5	Mietenkompostierung.....	14
1.4.6	Klärschlammvererdung	14
1.4.7	Solare Klärschlamm Trocknung	15
1.4.8	Langzeitlagerung.....	17
1.4.9	Literatur.....	17
1.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	19
2	Eingehende Darstellung	21
2.1	Zuwendungsverwertung und erzielte Ergebnisse mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele	21
2.1.1	Untersuchungsprogramm.....	21
2.1.1.1	Durchführung der Literatur- und Länderstudien	21
2.1.1.2	Beschreibung der Versuchsanlagen und des Versuchsprogramm der praktischen Untersuchungen in Klimakammern	22

2.1.1.3	Auswertungsmethodik.....	29
2.1.2	Ergebnisse und Empfehlungen zu einzelnen Behandlungsverfahren .	31
2.1.2.1	Internationale und nationale Richtlinien	31
2.1.2.2	Stand der Klärschlammbehandlung	32
2.1.2.3	Klärschlammengen und -qualitäten.....	33
2.1.2.4	Getrennt aerobe Klärschlammstabilisierung	34
2.1.2.5	Anaerobe Klärschlammstabilisierung	37
2.1.2.6	Klärschlammkompostierung.....	42
2.1.2.7	Behandlung mit Kalk	45
2.1.2.8	Natürliche Entwässerungs- und Trocknungsverfahren	49
2.1.2.9	Verfahrensbewertung.....	51
2.1.2.10	Literatur.....	53
2.1.3	Länderberichte	56
2.1.3.1	Ägypten.....	56
2.1.3.2	Vietnam.....	67
2.1.3.3	Thailand	73
2.1.3.4	China.....	81
2.1.3.5	Baltikum und Skandinavische Länder	90
2.1.4	Gegenüberstellung der vorgegebenen und erreichten Ziele	100
2.2	Notwendigkeit und Angemessenheit der Arbeit.....	100
2.3	Verwertungsplan	101
2.3.1	Wirtschaftliche Erfolgsaussichten.....	102
2.3.2	Wissenschaftliche Erfolgsaussichten	102
2.3.3	Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit	103
2.3.4	Verwertungsliste.....	103
2.3.5	Anlage zur Verwertungsliste.....	104
2.3.5.1	Vorträge	104
2.3.5.2	Publikationen	104
2.3.5.3	Messebeitrag	105

2.3.5.4	Studentische Arbeiten.....	105
2.4	Arbeiten, die zu keiner Lösung führten.....	105
2.5	Während des Vorhabens bekannt gewordener Fortschritt bei anderen Stellen.....	105
2.6	Veröffentlichungen	107

1 Kurzdarstellung

Projekttitel: „Klärschlammbehandlung und -verwertung unter anderen klimatischen und sonstigen Randbedingungen“ im Rahmen des Verbundvorhabens „Exportorientierte Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet der Wasserver- und -entsorgung, Teil II: Abwasserbehandlung und Wasserwiederverwendung“

Förderkennzeichen: 02WA0733

Projektlaufzeit: 01.05.2006 bis 30.04.2009

Antragsteller: Prof. Dr.-Ing. N. Dichtl, PD Dr.-Ing. T. Dockhorn

Technische Universität Braunschweig, Institut für Siedlungswasserwirtschaft
Pockelsstr. 2a, 38106 Braunschweig, Tel: 0531-391-7936, Fax: 0531-391-7947
Email: isww@tu-bs.de; www.tu-braunschweig.de/isww

1.1 Aufgabenstellung

In Deutschland und Mitteleuropa bewährte Technologien zur Stabilisierung, Desinfektion und natürlichen Entwässerung kommunaler Rohschlämme sind sachbedingt nur auf die hier vorherrschenden klimatischen und sonstigen Randbedingungen ausgerichtet. Damit diese Verfahren erfolgreich in Länder mit anderen Klimaten sowie soziokulturellen Gegebenheiten exportiert werden können, ist eine Anpassung dieser Verfahren an geänderte Verhältnisse unabdingbar. Vor diesem Hintergrund wurden im Rahmen dieses Teilprojektes

- Literatur- und Länderstudien zur Klärschlammbehandlungs- und Verwertungspraxis in Europa und im außereuropäischen Ausland durchgeführt,
- Zusammenhänge zwischen klimatischen Randbedingungen, Behandlungsdauer und Stabilisierungs-, Desinfektionserfolg untersucht,
- systematische ergänzende praktische Untersuchungen zu einzelnen Behandlungsverfahren unter im Projektverbund abgestimmten Untersuchungsbedingungen (Temperaturen von 5 bis 30 (35) °C) in Klimakammern vorgenommen,
- Hinweise zur Bemessung und zum Betrieb von Klärschlammbehandlungsanlagen unter geänderten Randbedingungen ausgearbeitet, sowie
- eine Entscheidungsmatrix zu Vor- und Nachteilen verschiedener Behandlungsverfahren aufgestellt.

Die Ergebnisse zur Bemessung und zur Verfahrensführung der untersuchten Verfahrenstechniken (vgl. Bild 1) wurden im Sinne des Gesamtzieles des Projektverbundes für einen Leitfaden zusammengestellt, der der Fachwelt als Entscheidungshilfe für die Auswahl angepasster Behandlungstechnologien für abwasserrelevante Frage-

stellungen im Ausland dienen soll. Im Kontext des Projektverbundes werden somit über die Empfehlungen zur Abwasserreinigung unter geänderten Rahmen- und Randbedingungen hinaus Lösungswege für die gesamte Behandlungsschiene inklusive der anfallenden Rückstände aufgezeigt.

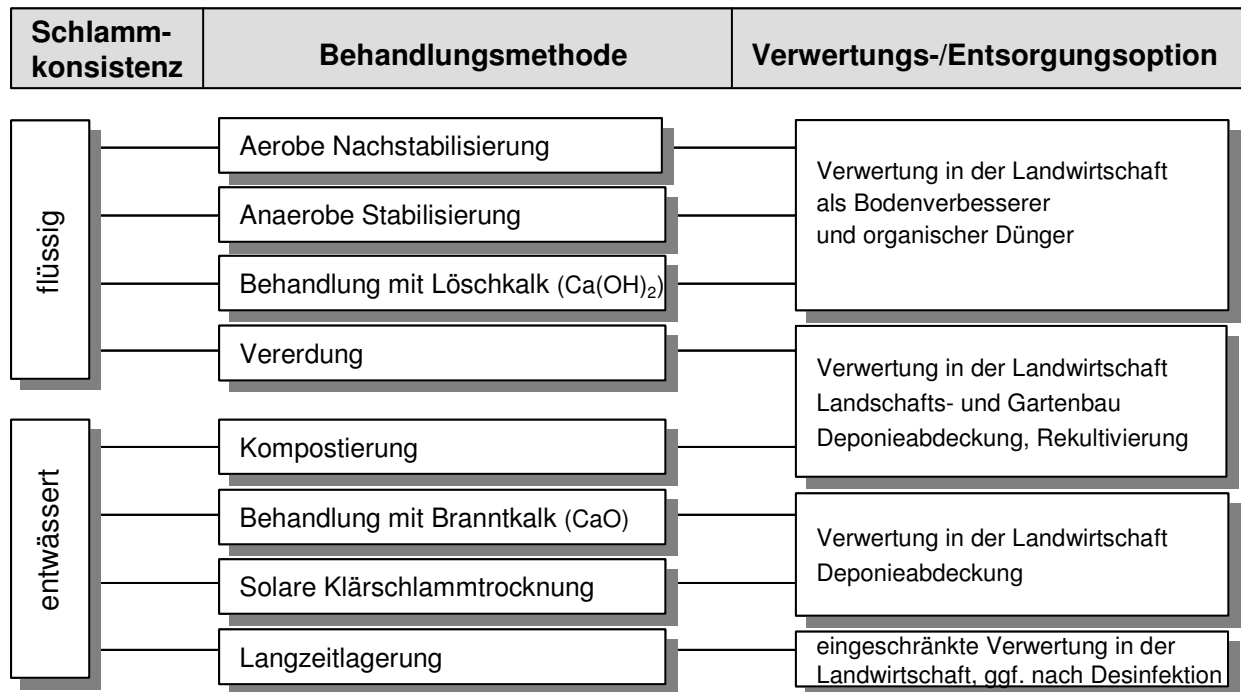


Bild 1: Betrachtete Klärschlammbehandlungsverfahren nach 86/278/EWG

1.2 Kompetenz und Vorarbeiten des Antragstellers

Das Institut für Siedlungswasserwirtschaft der TU Braunschweig beschäftigt sich im Rahmen seiner Forschung und Entwicklung sowie Gutachtertätigkeiten vornehmlich mit den Kernkompetenzen Abwasserreinigung und Schlammbehandlung in ihren vielfältigen fachlichen Fassetten. Als besondere Arbeitsschwerpunkte sind neben Verfahren zur weitergehenden Reinigung kommunaler und industrieller Abwässer vor allem die komplexen Arbeitsbereiche zu unterschiedlichen Verfahren der Klärschlamm-minderung, -stabilisierung, -desinfektion sowie -entwässerung zu nennen.

Die wissenschaftliche Ausrichtung in Lehre und Forschung folgt dem Grundsatz „Vermeiden vor Verwerten vor Entsorgen“ und damit in besonderem Maße den Zielen eines integrierten und nachhaltigen Umweltschutzes, wobei insbesondere auch Aufgabenstellungen, wie sie vor allem in Entwicklungs- und Schwellenländern anstehen, in die fachliche Diskussion sowie in mögliche Lösungsansätze einbezogen werden.

Im Kontext des vorliegenden Projektberichtes sind die folgend genannten abgeschlossenen bzw. in Bearbeitung befindlichen Aktivitäten stellvertretend hervorzuheben:

- Interdisziplinäre Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet der Abwasserreinigung und Klärschlammbehandlung im Hinblick auf die Verfahrensadaptation und -optimierung unter geänderten Randbedingungen, sowie die stoffliche Wiederverwertung, einschließlich der landwirtschaftlichen Nutzung von (vor)behandeltem Abwasser und Klärschlamm (z.B. „Realisierung eines stoffstromorientierten Abwasser- und Reststoffentsorgungskonzeptes in exponierter Lage“, DBU, 2008-2009; „Landwirtschaftliche Verwertung von Wasser und Nährstoffen aus der Abwasserbehandlung in der Türkei“, Internationales Büro des BMBF, 2009-2011).
- Forschungsschwerpunkt nachhaltige Technologien zur anaeroben Abwasser- und Klärschlammbehandlung (z.B. DFG-Forschergruppe „biologische Prozesse mit dispersen Feststoffen“, 1995-2000), sowie Schlammfäulung zur weitestgehenden Elimination organischer Masse und Biogaserzeugung (Oswald Schulze Stiftung, 1997, 1998), Kostenreduzierung durch effiziente Erzeugung und Verwertung von Faulgas als Primärenergie (BMBF, 2000-2003) und gesamtheitliche Prozessführung zur Energieoptimierung von Abwasserreinigung und Schlammbehandlung mit Hilfe der Simulation (DBU, 2002-2004).
- Gutachterliche Tätigkeiten zur angepassten Abwasserreinigung und nachhaltigen Klärschlammbehandlung im Zuge von EZ-Projekten und im Auftrag der KfW (z. B. für die Städte Addis Abeba und Beirut).
- Durchführung von Lehr- und Fortbildungsveranstaltungen für ausländische Abwasserfachkräfte und Führungskräfte, u.a. im Auftrag der Carl Duisberg Gesellschaft, der GTZ, der DWA und der KfW.
- Akteur der jüngst eingeworbenen DAAD-Exzellenzinitiative zum Thema „Nachhaltiges Wassermanagement“ an der TU Braunschweig für den Bereich Abwasser- und Klärschlammbehandlung mit geplanten Satellitenzentren an ausländischen Partneruniversitäten in Vietnam, Mexiko und Jordanien.

Der Leiter des Institutes, Prof. Dr.-Ing. Dichtl, ist Obmann im DWA-Fachausschuss AK 8 („Biogas“) und im Fachausschuss BIZ 7 („Fort- und Weiterbildung von Führungskräften“), sowie Mitglied im Hauptausschuss AK „Abfall und Klärschlamm“, im Fachausschuss BIZ 11 „Internationale Zusammenarbeit“ sowie im Fachausschuss BIZ 6 „Aus- und Weiterbildung von ausländischen Führungskräften“. Darüber hinaus ist er Vorsitzender im DIN-Ausschuss für abwassertechnische Fragestellungen (DIN NA 119-05), Mitglied im Beirat des Klärschlammmentschädigungsfonds der Bundesregierung sowie Mitglied in vielen nationalen und internationalen berufsständigen Organisationen.

1.3 Planung und Ablauf des Projektes

Das Arbeitsprogramm des Projektes „Klärschlammbehandlung und -verwertung“ gliederte sich in die in Bild 2 dargestellten Arbeitsschwerpunkte, die im folgenden kurz erläutert werden.

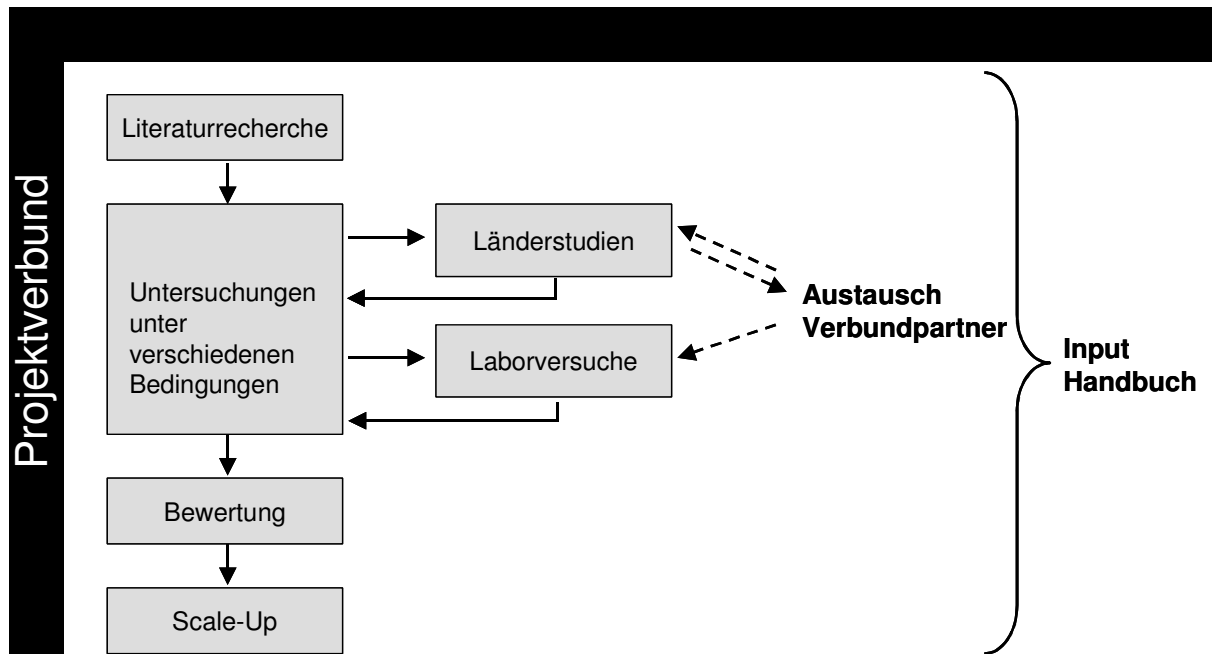


Bild 2: Arbeitsschwerpunkte des Teilprojektes „Klärschlammbehandlung und -verwertung“

1.3.1 Theoretische Vorarbeiten und Literaturrecherche

Die theoretischen Vorarbeiten umfassten im Einzelnen

- die Erarbeitung und Zusammenstellung der theoretischen Grundlagen der einzelnen Prozessschritte der Schlammbehandlung (Eindickung, Stabilisierung, Konditionierung, Entwässerung, Trocknung, Verwertung/Entsorgung, Desinfektion, Düngepotenzial) sowie
- eine Systematisierung der möglichen beeinflussenden Randbedingungen (wie Handhabung und Betriebssicherheit, Investitions- und Betriebskosten, klimatische Bedingungen, soziokulturelle Randbedingungen).

1.3.2 Untersuchungen zur Klärschlammbehandlung und -verwertung unter verschiedenen Bedingungen

Die Untersuchungen zur Klärschlammbehandlung und -verwertung beinhalten

- praktische Untersuchungen zu einzelnen Verfahrenstechniken, sowie
- Länderstudien zur Behandlungs- und Verwertungspraxis

unter anderen (klimatischen) Randbedingungen. Von den insgesamt acht in Bild 1 aufgezeigten Behandlungsverfahren wurden bei einem Temperaturspektrum zwischen 5 °C und 30 (35) °C und einer Varianz von jeweils drei verschiedenen Klärschlammqualitäten zusätzliche Untersuchungen im Labor- und halbtechnischen Maßstab zur Bewertung des Behandlungserfolges durchgeführt. Die ermittelten Versuchsdaten dienen zur Vervollständigung der theoretischen Vorarbeiten und der Untersuchungsmatrix für den Leitfaden. Darüber hinaus wurden gezielt Informationen zum Klärschlammmanagement in Zielländern des Gesamtverbundes recherchiert und in die Bewertung der Verfahrenstechniken einbezogen.

1.3.3 Auswertung und Beurteilung der Versuchsergebnisse

Die aus den Untersuchungen erhobenen Daten und spezifischen Prozessparameter wurden unter Berücksichtigung der maßgebenden Randbedingungen ausgewertet und zusammengetragen. Dabei wurden insbesondere die jeweiligen Verhältnisse und Randbedingungen (z.B. kalte, gemäßigte, warme Klimate, europäische bzw. außereuropäische Bedingungen) im Vergleich berücksichtigt.

Die wissenschaftlich-technische Bewertung der Behandlungserfolge der einzelnen Verfahren erfolgte vornehmlich anhand der erreichten Stabilisierungs- und Desinfektionsgrade sowie des vorhandenen Düngepotenzials und der Pflanzenverträglichkeit für die weitergehende landwirtschaftliche Verwertung.

1.3.4 Arbeiten zum Scale-Up

Die gewonnenen Ergebnisse der praktischen Untersuchungen wurden auf großtechnische Skalen transformiert. Dabei erfolgte ein Abgleich der eigenen Untersuchungsergebnisse mit Empfehlungen aus der Literatur (insbesondere dem technischen Regelwerk der DWA) und bestehenden großtechnischen Pilotanlagen zu unterschiedlichen Klärschlammbehandlungsverfahren im außereuropäischen Ausland.

1.3.5 Berichterstattung und Beitrag zum Handbuch.

Die Ergebnisse aus den vorgenannten Arbeiten wurden mit den anderen Partnern im Verbundvorhaben abgestimmt und die Schnittstellen weitestgehend verzahnt.

Die Verbreitung der Ergebnisse erfolgte Projekt begleitend einerseits durch die Berichterstattung im Rahmen des Vorhabens selbst und andererseits durch wissenschaftliche Publikationen in Fachzeitschriften und auf Kongressen. Darüber hinaus werden die wesentlichen Ergebnisse und abzuleitenden Empfehlungen in dem von allen Projektpartnern gemeinsam zu erstellenden Handbuch veröffentlicht.

1.3.6 Abweichungen gegenüber der Antragsplanung

Das gesamte Projekt konnte inhaltlich im Wesentlichen wie beantragt durchgeführt werden. Änderungen ergaben sich in den folgenden Punkten:

- Kostenneutrale Laufzeitverlängerung des Projektes um 12 Monate

Aufgrund der spezifischen Anforderungen an die Untersuchungsbedingungen, die für einzelne Verfahrenstechniken realisiert werden mussten, wurde eine kostenneutrale Laufzeitverlängerung des Teilprojektes um 12 Monate beantragt (Antrag vom 13.11.2007) und bewilligt (Änderungsbescheid vom 07.02.2008). Die Gründe für die Laufzeitverlängerung lassen sich im Einzelnen wie folgt zusammenfassen:

Für eine ausreichende Adaption der Klärschlämme an die Versuchsbedingungen insbesondere zur anaeroben Stabilisierung mussten Adaptionenzeiten von zwei bis drei Schlammaltern eingehalten werden um optimale Voraussetzungen für den Stabilisierungsprozess zu garantieren. Für die Untersuchungen bei niedrigen Temperaturen ergab sich somit eine mehrmonatige Vorlaufzeit als Grundvoraussetzung für eine stabile Prozessführung und damit eine entsprechende Verlängerung der Laufzeit.

Darüber hinaus waren Versuche zur Klärschlammvererdung und zur Pflanzenverträglichkeit behandelter Klärschlämme auf die Durchführung in der Vegetationsperiode angewiesen. Mit Hilfe der Qualitätstests zur Pflanzenverträglichkeit konnte eine umfassende Bewertung der stofflichen Verwertbarkeit der behandelten Klärschlämme über die „klassischen“ Parameter zur Charakterisierung der Stabilisierung und Desinfektion hinaus erfolgen.

Die Laufzeitverlängerung ermöglichte die Durchführung der Stabilisierungsversuche in drei statt der ursprünglich vorgesehenen vier Klimakammern und damit einen reduzierten apparativen Aufwand.

Der sich durch die Änderungen in der Laufzeit ergebende Ablauf des gesamten Arbeitsprogramms ist in Tabelle 1 als Balkenplan dargestellt. Aufgrund der kostenneutralen Laufzeitverlängerung ergab sich naturgemäß eine Mittelverschiebung in einzelnen Positionen. Die Umwidmung der Mittel wurde am 25.02.2008 beantragt und vom Projektträger am 20.03.2008 bewilligt.

Tabelle 1: Zeitablauf des Teilprojektes „Klärschlammbehandlung und -verwertung“

	2006			2007				2008				2009	
	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II
theoretische Vorarbeiten	■	■	■	■	■	■	■						
Länderstudien				■	■	■	■						
Versuche Schlammbehandlung			■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Auswertung/ Beurteilung				■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Scale-Up							■	■	■	■	■	■	■
Berichterstattung/ Handbuch				■	■	■	■	■	■	■	■	■	■

- Anzahl der Auslandsaufenthalte für Länderstudien

Zur Erhebung von Informationen zum Klärschlammaufkommen, zur -behandlung und zum -verbleib waren für ausgewählte Zielländer im Gesamtverbund vier jeweils zweiwöchige Auslandsaufenthalte in warmen Klimaten und zwei für kältere Zonen vorgesehen, deren Auswahl nach Möglichkeit an die Zielländer anderer Teilprojekte mit Versuchsanlagen zur Abwasserreinigung vor Ort angelehnt werden sollte.

Im Rahmen der theoretischen Vorarbeiten kristallisierte sich schnell heraus, dass das Potential zur Anwendung von Klärschlammbehandlungstechnologien vor allem in den Entwicklungs- und Schwellenländern in den warmen Klimaregionen liegt. Überdies ist die Datengrundlage zur Einschätzung der Situation in diesen Ländern eher gering, während in Ländern kalter Klimate (v. a. in Skandinavien und Kanada) umfangreiche Publikationen zum Thema Klärschlamm und vorhandenen bzw. möglichen Behandlungs- und Verwertungsszenarien existieren. Daher wurden im Rahmen des Teilprojektes keine Auslandsreisen in kalte Klimate durchgeführt. Studien zu Zielländern bzw. -regionen warmer Klimate wurden in Ägypten und Vietnam (mit Auslandsaufenthalten) sowie für Thailand und China vorgenommen. Für alle vier Zielländer konnten detaillierte Informationen zur Klärschlammsituation erhoben und ausgewertet werden.

1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

In den vergangenen 25 Jahren wurde in der Bundesrepublik Deutschland eine Reihe von Forschungsvorhaben ausgeführt, die sich gerade mit den Problemen der Klärschlammstabilisierung, der Klärschlammmentseuchung, der Klärschlammmentwässe-

rung sowie -entsorgung befasst haben. Die Arbeiten des Teilprojektes bauen auf diesen Erkenntnissen auf und beziehen über die vorliegenden Erfahrungen hinausgehend den Einsatz verschiedener Behandlungstechnologien unter anderen Randbedingungen mit ein.

Nachfolgend wird kurz der Stand von Wissenschaft und Technik für die Verfahren zur Klärschlammbehandlung wiedergegeben, an den im Rahmen des Teilprojektes angeknüpft wurde.

1.4.1 Getrennt aerobe Schlammstabilisierung

Die aerobe Stabilisierung flüssigen Klärschlammes wird in Deutschland gewöhnlich in Kläranlagen mit einer Anschlussgröße von bis zu 25.000 EW praktiziert, indem der Klärschlamm bis zum Eintritt in die endogene Phase belüftet wird. Die Mikroorganismen bauen die komplexen organischen Substanzen stufenweise in niedermolekulare Verbindungen ab um neue Zellsubstanz aufzubauen und Energie für die Stoffwechselprozesse zu gewinnen. Bei abnehmendem Nährstoffangebot greifen die Organismen schließlich auf gespeicherte Reservestoffe und körpereigene, endogene Substrate zur Energiegewinnung zurück. Die getrennte aerobe Stabilisation kann dabei verfahrenstechnisch unter Umgebungstemperaturen oder unter thermophilen Temperaturbedingungen realisiert werden.

Der erreichbare Stabilisierungsgrad ist entscheidend von der Stabilisierungszeit und der Temperatur abhängig. Im Allgemeinen gilt: Je geringer die Umgebungs- bzw. Schlammtemperatur desto geringer die biologische Aktivität. Darüber hinaus verändert sich die Organismenvielfalt der aktiven Biozönose im psychrophilen Bereich über den mesophilen bis hin zum thermophilen Bereich mit abnehmender Artenvielfalt und zunehmender Spezialisierung (ATV-DVWK, 2003). Insbesondere unter hohen Umgebungstemperaturen erfolgt eine Selbstserwärmung des Schlammes, so dass neben der Stabilisierung auch eine Desinfektion erfolgen kann. Daher wurden in Deutschland seit den 60er Jahren zahlreiche Untersuchungen zur thermophilen Prozessführung durchgeführt (ATV-Handbuch, 1996). Loll (1974) und Strauch (1986) haben in umfangreichen Forschungsarbeiten sowohl verfahrenstechnische Optimierungsmöglichkeiten der Stabilisierung sowie die Wirkung des aerob-thermophilen Prozesses auf die Desinfektion untersucht. Aufgrund der im Zuge der landwirtschaftlichen Klärschlammverwertung geforderten Entseuchung des Klärschlammes durch die Klärschlammverordnung von 25. Juni 1982 wurden schließlich Ende der 80er Jahre im deutschsprachigen Raum, vorrangig auf Klärwerken bis 50.000 EW, mehrere 100 großtechnische Anlagen zur aerob-thermophilen Behandlung beziehungsweise Stufen in Kombination mit anaeroben Stabilisierungsanlagen gebaut (ATV-Handbuch, 1996). Die Entwicklung dieses Verfahrens ist seitdem auch im englischsprachigen Raum entsprechend fortgeschritten, wobei der Stand der Untersuchun-

gen aus Deutschland sowie verfahrenstechnische Ausrüstungen zum Teil exportiert worden sind (ATV-Handbuch, 1996).

Nachdem in Folge der Wiedervereinigung mit Rücksicht auf die Kostensituation die letzte Novellierung der Klärschlammaufbringungsverordnung eine Nutzung der Klärschlämme zur Düngung von Weiden nicht mehr erlaubte, ging die Bedeutung von unterschiedlichen Stabilisierungstechniken zur simultanen Entseuchung von Klärschlamm in Deutschland drastisch zurück. In anderen Regionen jedoch (z.B. USA) nimmt sie stetig zu. Es ist zu erwarten, dass gegebenenfalls im Zuge der europaweiten Diskussion eine Entseuchung von Klärschlamm verlangt werden wird, sofern auch in Zukunft eine landwirtschaftliche Klärschlamm Entsorgung in Deutschland möglich sein sollte.

Wie sich eine aerobe Schlammstabilisierung insbesondere im Hinblick auf eine Desinfektion des Rohschlammes, unter anderen klimatischen Verhältnissen darstellt, ist bis dato praktisch nicht erforscht.

1.4.2 Anaerobe Schlammstabilisierung

Die anaerobe Behandlung von Klärschlamm ist das in Deutschland am weitesten verbreitete Stabilisierungsverfahren. Dieses Verfahren erfolgt sowohl in mesophilen als auch thermophilen Temperaturbereichen und wird vor allem aus wirtschaftlichen Gründen (hoher technischer Aufwand) in Kläranlagen größer 15.000 EW eingesetzt (Thome-Kozmiensky, 1998).

Während des anaeroben Abbaus organischer Substanzen wird im Gegensatz zur aeroben Stabilisierung wenig Wärmeenergie frei, die somit nicht für eine Selbsterhitzung ausreicht. Umfassende Untersuchungen zur Stabilisierung von Klärschlamm im letzten Jahrhundert befassten sich mit der Ermittlung optimaler Temperaturbedingungen. Hierbei wurden für den Optima von 35 bis 37 °C und 50 bis 53 °C ermittelt (Pinnekamp, 1987). Aufgrund von Nachteilen der thermophilen Behandlung im Gegensatz zur mesophilen Stabilisierung (höherer Wärmebedarf, größere Temperaturempfindlichkeit) wurde dieses Verfahren jahrzehntelang gemieden. Erst nach Versuchsergebnissen aus den USA, die belegten, dass bei einer Temperatur von 49 °C und einer Aufenthaltszeit von 20 Tagen weniger Keime im Schlamm enthalten waren als im Schlamm der mesophilen Stufe (ATV-Handbuch, 1996), wurden auch in Deutschland erneut Anlagen nach dieser Technik (oftmals zweistufig thermophil/mesophil (z.B. Kläranlage Osterode, Kläranlage Geseke, Kläranlage Köln-Stammheim) errichtet.

Eine weite Verbreitung dieser Technik Klärschlamm zu stabilisieren und gleichzeitig zu desinfizieren ist in gemäßigten Klimaten bis dato trotz positiver Untersuchungsergebnisse nicht zu verzeichnen. Daher sind bisher auch keine konkreten vergleichba-

ren Aussagen zum Einfluss anderer klimatischer Verhältnisse auf den Prozess der anaeroben thermophilen Stabilisierung und Desinfektion, wie sie z.B. in warmen Klimaten auch unter Umgebungsbedingungen erfolgen könnte, bekannt.

1.4.3 Behandlung mit Kalkhydrat

Die Dosierung von Kalkhydrat ($\text{Ca}(\text{OH})_2$, Löschkalk) kann sowohl zur chemischen Stabilisierung als auch zur simultanen Entseuchung von flüssigen Klärschlämmen eingesetzt werden. Die desinfizierende Wirkung von Kalkhydrat beruht auf der Anhebung des pH-Wertes ($>12,5$).

Die Kalkhydratbehandlung ist auf Grund des sehr geringen technischen Aufwandes vorwiegend für kleine bis mittlere Kläranlagen empfehlenswert. Ein weiterer Vorteil dieses Behandlungsverfahrens ist in der Tatsache zu sehen, dass viele landwirtschaftliche Nutzflächen eine jährliche Kalkgabe benötigen, um den Ertrag sicher zu stellen. Diese erforderliche Aufkalkung erfolgt dann indirekt über die Verwendung aufgekalkten Klärschlammes.

Untersuchungen im halbtechnischen sowie großtechnischen Maßstab bewiesen, dass eine sichere Klärschlammmentseuchung mit Kalk möglich ist (Kassner, 1987). Gemäß Thome-Kozmiensky (1998) ist dafür eine Kalkhydrat-Dosierung von 7 bis 15 kg Kalk pro m^3 Klärschlamm erforderlich. Problematisch bei dieser Verfahrenstechnik ist jedoch das Verhalten von Wurmeiern, die gegebenenfalls auch in hochaufgekalktem Klärschlamm überleben und somit insbesondere unter entsprechend kritischen klimatischen Randbedingungen Probleme bereiten könnten.

Welchen Einfluss die klimatischen Randbedingungen auf die Prozesse der chemischen Stabilisierung und Desinfektion im Einzelnen haben, ist bislang nicht genau untersucht worden.

1.4.4 Behandlung mit Branntkalk

Stabilisierter, entwässerter Klärschlamm kann durch die Zugabe von Branntkalk (CaO , ungelöschter Kalk) nachträglich desinfiziert werden. Dazu trägt neben der pH-Wert-Anhebung (>12) insbesondere die durch die chemische Löschreaktion freiwerdende Wärmeenergie bei.

Gemäß ATV (ATV-Handbuch, 1996) ist dazu in Abhängigkeit der Schlammeigenschaften eine Dosiermenge von 25 bis 35 % der Klärschlamm-trockenmasse erforderlich. Dieses kostengünstige Verfahren setzt sachbedingt eine Klärschlamm-entwässerung voraus, womit sich der Anwendungskreis auf entsprechend ausgerüstete Kläranlagen beschränkt.

Dass die Temperatur einen entscheidenden Einfluss auf die Desinfektionsleistung hat, zeigten schon die Untersuchungen von Strauch und Berg (1980). Ihre Ergebnis-

se zeigten, dass durch die ausschließliche Anhebung des pH-Wertes ohne diesen Temperaturanstieg nur eine unzureichende Desinfektion erreicht werden kann, da beispielsweise Spulwurmeier nicht vernichtet wurden.

Bezug nehmend auf andere klimatische Gegebenheiten könnte dies bedeuten, dass sich bei entsprechenden Außentemperaturen folglich höhere Desinfektionsleistungen realisieren ließen bzw. die Dosiermenge an Branntkalk reduziert werden kann.

1.4.5 Mietenkompostierung

Bei der Mietenkompostierung wird entwässerter Klärschlamm mit Strukturmaterial (z.B. Grünabfall) vermischt und in Mieten aufgeschüttet. Dabei entstehen im Inneren der Miete Temperaturen von z. T. über 60 °C, die prinzipiell eine Desinfektion der Klärschlammgemische ermöglichen. Verfahrenstechnisch ist, in Abhängigkeit der Klärschlammbeschaffenheit sowie des zugemischten Strukturmaterials, diesbezüglich in der Regel eine Rottedauer von wenigen Wochen sicherzustellen.

Erste großtechnische Kompostierungsanlagen wurden bereits Mitte der 70er Jahre realisiert. Bis dato wurden in Deutschland ca. mehr als 30 Anlagen zur Klärschlammkompostierung errichtet, wobei es sich vorwiegend um kleine Anlagen (Anschlussgrößen bis 25.000 EW) im ländlichen Raum handelt.

Strauch und Berg (1980) haben bei ihren wissenschaftlichen Untersuchungen festgestellt, dass selbst bei Außentemperaturen bis -10 °C in den Hausmüll-Klärschlammmieten Temperaturen in den Mieten gemessen wurden, die eine Desinfektion des Klärschlammgemisches ermöglichen. Der Einfluss der Umgebungstemperatur auf den Rotteverlauf von Klärschlammgemischen unter Wahrung der Desinfektionsleistung, ist bis dato nicht bekannt.

1.4.6 Klärschlammvererdung

Eine ökologisch sinnvolle Alternative zur Behandlung und Rückführung des Klärschlammes in den natürlichen Stoffkreislauf stellt die Klärschlammvererdung dar. Dieses naturnahe Verfahren ist eine kostengünstige Form der Stabilisierung, Entwässerung und Desinfektion des Klärschlammes mit Hilfe von Schilfpflanzen.

Basierend auf den ersten Untersuchungen zur Klärschlammvererdung von Bittmann und Seidel (1967) und Scholl et al. (1985) hat das Umweltbundesamt Berlin in den 80iger Jahren einen Langzeitversuch zur Behandlung verschiedener Klärschlammarten mit Schilf auf einer Pilotanlage in Dornstadt durchgeführt. Die Ergebnisse belegen, dass die angestrebte Verbesserung der natürlichen Entwässerung nicht uneingeschränkt für diverse Klärschlammarten zu erzielen ist (Hanisch und Zacher, 1988). Klee und Hoffmann (1988) wiesen im Rahmen ihres Teilprojektes nach, dass sich die

Rückhaltewirkung des Beetes für Enterobakterien und Coliforme durch den Einsatz von Schilfpflanzen erhöht.

Weitere halb- und großtechnische Untersuchungen im In- und Ausland bestätigen die allgemein positiven Erkenntnisse bzgl. Entwässerung, weitergehender Mineralisierung und Desinfektion des Schlammes (z.B. Pauly et al. 1997, Reinhofer 1998, Hruschka et al. 1999, Nielsen 2003, Obarska-Pempkowiak et al. 2003, Götze und Mauer 2004). Derzeit sind in Deutschland mehr als 65 großtechnische Schlammvererdungsanlagen realisiert worden, wobei sich der Anwendungskreis mehrheitlich auf die Behandlung aerob stabilisierter Klärschlämme beschränkt. Darüber hinaus gibt es aber auch Ausnahmen, wie z.B. die Vererdungsanlage in Kolding (Dänemark) mit bis zu 125.000 EW (Nielsen, 2003).

Grundlegender Parameter bei der Planung und Dimensionierung der Schlammvererdungsanlagen ist die jährlich aufzubringende Feststofffracht bezogen auf die mit Schilf bepflanzte Beetfläche. Anhand der Angaben der einschlägigen Fachliteratur zeigt sich diesbezüglich jedoch ein sehr uneinheitliches Bild. Während einige Autoren von einer maximalen Belastung von 20-40 kg/(m²·a) ausgehen, geben andere jährliche Frachten von 60-80 kg Feststoff pro m² an. Zudem plädieren beispielsweise Reinhofer (1998) und Hruschka et al. (1999) für eine auf die Vegetationszeit beschränkte Beschlämmung der Beete, während z.B. Nielsen (2003), Obarska-Pempkowiak et al. (2003) sowie Götze und Mauer (2004) ihre Beete ganzjährig beschicken. Es bleibt anzumerken, dass diese Erkenntnisse vorrangig auf Vererdungsanlagen in der gemäßigten Klimazone beruhen.

Unter anderen klimatisch Randbedingungen ändern sich auch die Wachstumsbedingungen der Schilfpflanzen. So verlängert sich beispielsweise die Vegetationszeit und die Verdunstungsleistung des Schilfes bei höheren Temperaturen. Erste Untersuchungen von Pilotanlagen in Ägypten (GTZ, 2002) zeigten, dass in diesen Klimaten Feststoffbelastungen von 90-110 kg/(m²·a) realisiert werden können. In den Tropen waren sogar Feststoffbelastungen von bis zu 250 kg/(m²·a) möglich, wie eine Pilotstudie mit Fäkalschlamm in Bangkok bewies (Heinß et al., 2003). Gezielte Untersuchungen zur maximalen Feststoffflächenbelastung insbesondere unter warmen Klimabedingungen sind allerdings bisher nicht durchgeführt worden.

1.4.7 Solare Klärschlamm-trocknung

Bereits Mitte des vergangenen Jahrhunderts wurde Solarenergie zur Trocknung und Entwässerung von Klärschlämmen in so genannten Schlamm-trockenbeeten genutzt (Bux und Baumann, 2003). Durch die Einhausung der Schlamm-trockenbeete (Gewächshauskonstruktion mit hochtransparenten Folien bzw. Glasabdeckungen) konnten die klimatischen Bedingungen (Aufheizung der Raumtemperatur und Luftzirkula-

tion) verbessert und somit die Entwässerungs- bzw. Trocknungsleistung erheblich gesteigert werden.

Die solare Klärschlamm-trocknung ist hinsichtlich ihrer Verfahrenstechnik eine Kombination aus Strahlungs- und Konvektionstrocknung (ATV-DVWK-M 379, 2004). Entscheidend für eine möglichst weitgehende Trocknung ist das ständige Wenden und Mischen des Schlammes. Der dafür benötigte maschinentechnische Aufwand ist das vorrangige Unterscheidungsmerkmal der eingesetzten solaren Trocknungsverfahren. Heute konnten sich im wesentlichen das Thermo-System Verfahren sowie das Ist-Verfahren am Markt durchsetzen konnten (Kassner, 2003). Neuere Verfahren, wie das Kraus/Huber- oder das EDZ-Verfahren, befinden sich derzeit in der Versuchsphase, sodass für beide Systeme noch keine wissenschaftlichen Erkenntnisse vorliegen (Kassner, 2005).

Die grundlegenden Vorteile der solaren Klärschlamm-trocknung gegenüber konventionellen Trocknungsverfahren liegen in den geringen Primärenergiekosten sowie der einfachen und robusten Technik. Darüber hinaus ist der für die zukünftige Verwertung erforderliche Endfeststoffgehalt beliebig einstellbar. Den genannten Vorteilen steht aber ein sehr hoher Flächenbedarf gegenüber. Der größte Nachteil ergibt sich jedoch aus der Witterungsabhängigkeit. Je geringer die erreichbare Raumtemperatur (resultierend aus der einfallenden Globalstrahlung), desto geringer ist der erzielbare Feststoffgehalt bzw. desto länger sind die Trocknungszeiten, was wiederum einen größeren Flächenbedarf induziert.

In gemäßigten Klimaten werden durchschnittliche Verdunstungsleistungen von 700-750 L/(m²·a) (Kassner, 2005) erreicht. In Abhängigkeit der zur Verfügung stehenden Fläche, der einfallenden Solarenergie sowie der Trocknungsdauer ist sowohl eine Teil- (< 85 % TR) als auch eine Volltrocknung (> 85 % TR) der Schlämme möglich. Die Untersuchungsergebnisse von Riedel et al. (2004) belegen, dass die solare Klärschlamm-trocknung unter hiesigen klimatischen Bedingungen ökologisch und ökonomisch sinnvoll einsetzbar ist. Die Autoren machen aber ebenfalls deutlich, dass im Winter aufgrund der geringeren Globalstrahlung sowie der höheren Luftfeuchtigkeit deutlich geringere Entwässerungs- bzw. Trocknungsleistungen zu verzeichnen sind, so dass im Winterzeitraum ggf. Schlamm-lagerplätze auf dem Klärwerksgelände vorzuhalten sind. Vor diesem Hintergrund scheint die solare Klärschlamm-trocknung insbesondere für wärmere Klimate mit hoher Globalstrahlung ein sinnvolles und adaptiertes Verfahren darzustellen.

1.4.8 Langzeitlagerung

Bezüglich der Eignung einer Langzeitlagerung von Klärschlamm in Schlammfeldern zur Stabilisierung und Desinfektion fehlen bis dato wissenschaftlich fundierte Erkenntnisse (Thome-Kozmiensky, 1998).

Im Allgemeinen kann davon ausgegangen werden, dass bei hohen Aufenthaltszeiten der Schlämme (ohne erneute Frischschlammzugabe) deutlich geringere Temperaturen (<55 °C) im Inneren des Schlammfelders für eine sichere Desinfektion ausreichend sind. Inwieweit eine simultane Stabilisierung des Schlammes in den Feldern realisiert werden kann, entzieht sich bis dato der wissenschaftlichen Erkenntnis. Darüber hinaus sind keine Angaben bekannt, welchen Einfluss die klimatischen Randbedingungen auf diese Prozesse haben.

1.4.9 Literatur

- AbfKlärV - Klärschlammverordnung, 15. April 1992 BGBl. I, p. 912; zuletzt geändert 25. April 2002, BGBl. I (2002) p. 1488
- ATV/VKS-Arbeitsgruppe 3.2.2 (Entseuchung von Klärschlamm). 1988. 3. Arbeitsbericht. KA, 12/88, 35. Jg., pp. 1325ff
- ATV-DVWK-M 379. 2004. Klärschlamm-trocknung; Merkblatt der ATV-DVWK, Hennef.
- ATV-Handbuch. 1996. Klärschlamm. 4. Auflage, Ernst & Sohn Verlag, Berlin.
- Bittmann, M., Seidel, K. 1967. Entwässerung und Aufbereitung von Chemieschlamm mit Hilfe von Pflanzen, GWF 108, pp. 488-491.
- Bux, M., Baumann, R. 2003. Solare Trocknung von Klärschlamm, Korrespondenz Abwasser 50. Jg., Nr. 6, pp. 732-739.
- EPA. 1992. Environmental Regulations and Technology: Control of Pathogens and Vector Attraction in Sewage Sludge, December 1992, EPA No. 625/R-92-013.
- EPA, 1989. Environmental Regulations and Technology: Use and Disposal of Municipal Wastewater Sludge, March 1989, EPA No. 625/10-90-007.
- EPA, 1994. Land Application of Sewage Sludge: A Guide for Land Appliers on the Requirements of the Federal Standards for the Use or Disposal of Sewage Sludge, 40 CFR Part 503, December 1994, EPA No. 831/B-93-002b.
- EPA. 1979. Process Design Manual: Sludge Treatment and Disposal, September 1979, EPA No. 625/1-79-011.
- Geiler, N. 2000. EU-Kommission legt Entwurf für die Neufassung der EG-Klärschlammrichtlinie vor. WLB, 9/2000, pp.29-34.
- Götze, T., Mauer, G. 2004. Praktische Erfahrungen mit der Vererdung von Klärschlamm, Informationsveranstaltung der ATV-DVWK Nord: Klärschlamm – aktuelle Entwicklungen; Bremen.
- GTZ 2002. Sewage Sludge Conversion in Egypt, Abschlussbericht, GTZ (Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit) – IPP Consult, <http://www2.gtz.de/ecosan/download/IPP-Aegypten.pdf>, Stand 2002

- Hanisch, B., Zacher, B. 1988. Abwassertechnische Untersuchungen, Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen, in: BUNDESUMWELTAMT BERLIN, Untersuchungen über den Einsatz von Pflanzen zur Klärschlammmentwässerung, Teilvorhaben 1 des 6teiligen Forschungsberichtes (10301227), Berlin.
- Heinß, U, Montangero, A. Strauss, M. Kootatep, T. 2003. Fäkalschlammbehandlung in den Tropen am Beispiel von Vererdungsbeeten, Korrespondenz Abwasser 50. Jhrg., Nr. 9, pp. 1162-1167.
- Hosang,, W., Bischof, W. 1998. Abwassertechnik. B.G. Teubner Verlag Stuttgart/Leipzig.
- Hruschka, H., Gschöbl, T., Siewert, H. 1999. Die Vererdung von kommunalem Klärschlamm in Schilfbeeten, gwf Wasser Abwasser 140, Nr. 11, pp. 769-773.
- Ist-Anlagenbau GmbH. <http://www.ist-anlagenbau.de/klsreferenz.php?lang=de>.
- Kassner, W. 2003. Solartrocknung als Technik zur Klärschlammbehandlung etabliert, GWF 144, Nr. 7-8, pp. 490-494.
- Kassner, W. 2005. Solare Trocknung von Klärschlamm, 4. Klärschlammstage in Würzburg, DWA.
- Klee, O., Hofmann, K. 1988. Biologisch-bakteriologische Untersuchungen, in: BUNDESUMWELTAMT BERLIN, Untersuchungen über den Einsatz von Pflanzen zur Klärschlammmentwässerung, Teilvorhaben 3 des 6teiligen Forschungsberichtes (10301227), Berlin.
- Loll, U. 2000. Gibt es ein Comeback der Klärschlammhygienisierung. In: 61. Darmstädter Seminar-Abwassertechnik-Kommunale Klärschlammbehandlung vor dem Hintergrund der neuen europäischen Klärschlammrichtlinien, Schriftenreihe der TU Darmstadt, Band 128.
- Metcalf, Eddy, 2003. Wastewater Engineering. 4th Edition, Mc. Graw-Hill, New York.
- Nielsen, S. 2003. Sludge drying Reed Beds, Water Science and Technology, Vol. 48, No. 5, pp 101-109, IWA Publishing.
- Obarska-Pempkowiak, H., Tuszyńska, A., Sobocinski, Z. 2003. Polish Experience with Sewage Sludge Dewatering in Reed Systems, Water Science and Technology, Vol. 48, No. 5, pp. 111-117, IWA Publishing.
- Pauly, U., Blau, S., v. Borke, P., v. Sydnow, R. Haider, R. 1997. Zehn Jahre Klärschlammvererdung in Schilfbeeten – Neue Wege der Klärschlammverarbeitung und –verwertung –, Korrespondenz Abwasser, 44. Jhrg., Nr. 10, pp. 1812-1822.
- Pinnekamp, J. 1987. Steigerung der Leistungsfähigkeit der anaeroben Klärschlammstabilisierung durch eine thermische Vorbehandlung des Schlammes. Dissertation an der TH Aachen.
- Reinhofer, M. 1998. Klärschlammvererdung mit Schilf, Heft 32 der Schriftenreihe zur Wasserwirtschaft. Dissertation an der Naturwissenschaftlichen Fakultät der Technischen Universität Graz.
- Riedel, H., Bogner, T., Marb, C., Siewert, H., Hruschka, H., Atzenbeck, K. 2004. Solare Klärschlamm-trocknung – Ergebnisse zweier Untersuchungskampagnen, Korrespondenz Abwasser, 51. Jhrg., Nr. 6, pp. 643-649.

- Scholl, W., Wurster, H., Thalmann, A., Möller, J. 1985. Klärschlammvererdung in Schilfbecken – Ergebnisse und Erkenntnisse eines praxisbezogenen Pilotprojektes, Korrespondenz Abwasser, 32. Jhrg., Nr. 5, pp. 386 – 395.
- Strauch, D., Berg, T. 1980. Mikrobiologische Untersuchungen an einem Verfahren zur Verfestigung mit Branntkalk, Das Gas- und Wasserfach No. 121, p. 493.
- Streffeler, F. 2001. Potentials of urban and periurban agriculture in Africa by the valorization of domestic waste in DESAR. In: Decentralised sanitation and reuse, pp.429-445.
- Salgot, M. 2001. Hygienic aspects of DESAR: water circuits. In: Decentralised sanitation and reuse, pp. 469-484.
- Stachowske, M. 1987. Verfahrenstechnische Möglichkeiten zur Klärschlammmentseuchung. In: 5. Bochumer Workshop: Entseuchung von Klärschlamm; Schriftenreihe Siedlungswasserwirtschaft Bochum, Band 10.
- Strauch, D. 1986. Entseuchungsverfahren mit thermischer Wirkung - Hygiene. In Bericht des 1.Hohenheimer Seminars „Entseuchung von Klärschlamm“.
- Stubsgaard, A.E. 2001. Hygienic aspects of solid fractions of waste water. In: Decentralised sanitation and reuse, pp.485-500.
- Thome-Kozmiensky, K. 1998. Klärschlammmentsorgung. TK Verlag Thome-Kozmiensky, Neuruppin.

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Das Verbundvorhaben ist in drei Kernprojekte strukturiert innerhalb derer das Teilprojekt Klärschlammbehandlung dem Kernprojekt B, „Hygienisierung und Wasserwiederverwendung“ zugeordnet ist. Im Kernprojekt B erfolgte eine enge Kooperation der beteiligten Partner, den Universitäten Hannover, Bochum und Darmstadt (Kernprojektkoordination) sowie übergreifend mit der Gesamtkoordination der Universität Bochum. Teilprojektübergreifende Fragestellungen, insbesondere hinsichtlich des methodischen Vorgehens, der Absprache von Leitparametern, des Austauschs und der Aufbereitung von Ergebnissen vor allem für die Erstellung des Leitfadens, wurden innerhalb der Kernprojekte in regelmäßigen Workshops bearbeitet und schließlich im Gesamtverbund diskutiert und abgestimmt. Die Gesamtstruktur des Verbundvorhabens ist in Bild 3 dargestellt.

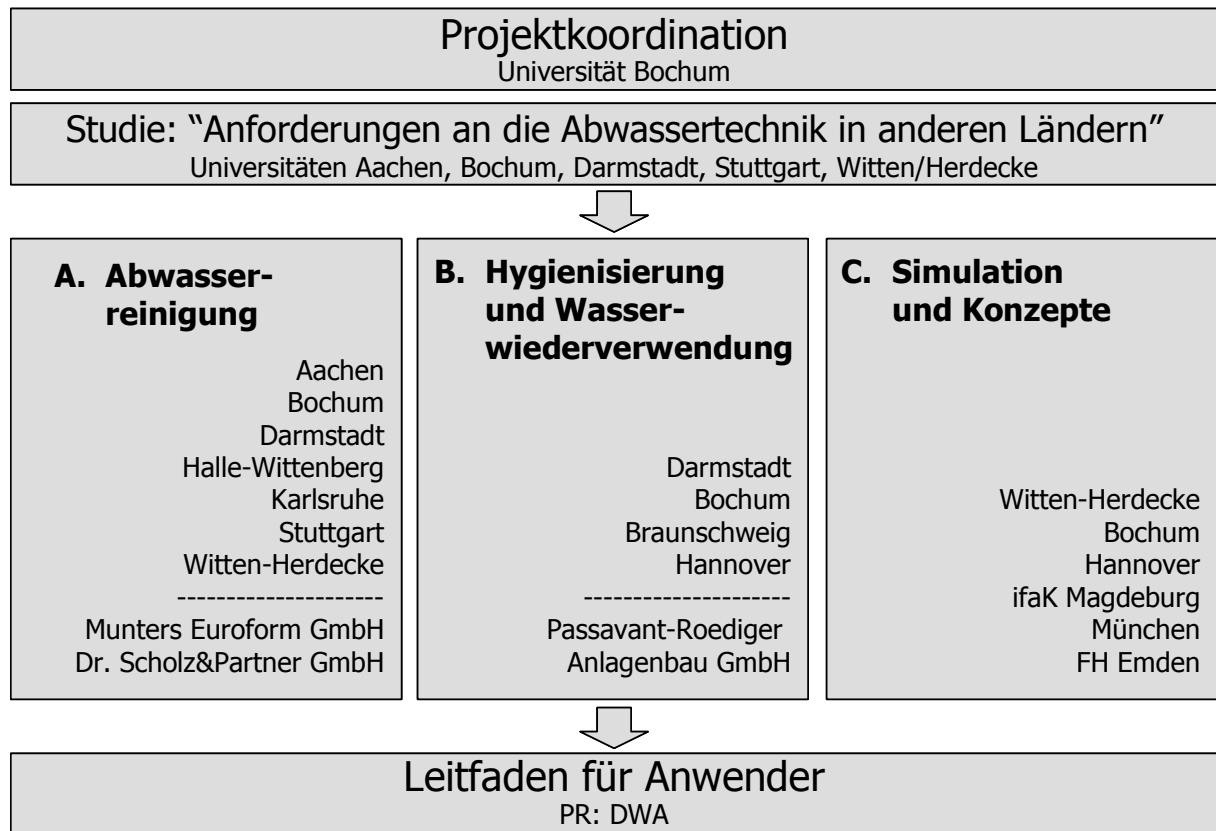


Bild 3: Struktur des Projektverbundes „Abwasserbehandlung und Wasserwiederverwendung“

2 Eingehende Darstellung

2.1 Zuwendungsverwertung und erzielte Ergebnisse mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Die folgenden Kapiteln umfassen das Untersuchungsprogramm, die Ergebnisse und Empfehlungen zu den einzelnen Klärschlammbehandlungsverfahren sowie die wichtigsten Informationen zur Abwasser- und Klärschlammssituation in den einzelnen Zielländern.

2.1.1 Untersuchungsprogramm

Das Untersuchungsprogramm gliedert sich gemäß der Zielsetzungen im Teilprojekt in Literatur- und Länderstudien sowie praktische Untersuchungen zu einzelnen Klärschlammbehandlungsverfahren und wird im folgenden detailliert vorgestellt.

2.1.1.1 Durchführung der Literatur- und Länderstudien

Vorhandene Kenntnisse auf dem Gebiet der Klärschlammbehandlung und -verwertung unter anderen klimatischen und sonstigen Randbedingungen wurden in umfangreichen Recherchen zusammengestellt. Die in der Literatur beschriebenen Ergebnisse (vor allem Grundlagenforschung zur Temperaturabhängigkeit biologischer Schlammbehandlung) sowie Studien zu Pilotprojekten zur Klärschlammbehandlung im (außer)europäischen Ausland wurden vergleichend ausgewertet.

Für die Erhebung der Länderstudien wurde u.a. ein Fragebogen entwickelt, der in unterschiedlicher Detailtiefe der systematischen Abfrage von Informationen zu den folgenden Themen diente:

- Vorhandene Verfahrenstechnik zur Abwasserbehandlung
- Produzierte Klärschlammengen und -qualitäten
- Eigensetzte Technologien zur Klärschlammbehandlung
- Betriebserfahrungen
- Qualität behandelten Klärschlamm
- Klärschlammverbleib
- Kosten der Abwasser- und Klärschlammbehandlung inkl. Entsorgung
- Gegenwärtige Forschung/Entwicklung vor Ort und zukünftige Herausforderungen

2.1.1.2 Beschreibung der Versuchsanlagen und des Versuchsprogramm der praktischen Untersuchungen in Klimakammern

Praktische Versuche zu den Behandlungsverfahren wurden mit Überschussschlamm (ÜS) und Primärschlamm (PS) kommunaler Herkunft in den Mischungsverhältnissen der Trockensubstanz von 1:1, 3:2 und 2:1 in Mehrfachansätzen durchgeführt. Die Auswahl der in den Versuchen einzustellenden Randbedingungen ergab sich zum Einen aus den Vorstudien zu geeigneten Klärschlammbehandlungstechnologien in anderen Ländern und zum Anderen aus der Kenntnis von Erfahrungs- und Datenlücken z. B. für die Prozessführung in warmen Klimaten. In den folgenden Abschnitten werden die Versuchsanlagen beschrieben und das Analyseprogramm vorgestellt.

Versuchsanlagen

Die Versuchsanlagen zu den einzelnen Klärschlammbehandlungstechnologie wurden am Institut für Siedlungswasserwirtschaft der TU Braunschweig errichtet und in temperatur- und feuchtekontrollierten Klimakammern aufgestellt. Tabelle 2 gibt einen Überblick über die Versuchsanlagen und die untersuchten Temperaturen. Die Versuche zur Klärschlammvererdung und zur solaren Klärschlamm-trocknung wurden in Gewächshäusern durchgeführt.

Tabelle 2: Versuchsansätze zur Untersuchung verschiedener Klärschlammbehandlungsverfahren

Verfahren	Untersuchte Temperaturen [°C]	Details
Aerobe Nachstabilisierung	5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 55	In Klimakammer, Batchverfahren, Ansatz à 23 und 7 l
Anaerobe Stabilisierung	5, 10, 25, 30, 35	In Klimakammer und in Laboranlage (Wasserbad), Batchverfahren, Ansatz à 23 und 0,7 l
Behandlung mit Löschkalk	5, 10, 25, 30	In Klimakammer, Batchverfahren, Ansatz à 30 l Schlamm
Behandlung mit Branntkalk	5, 10, 25, 30	In Klimakammer, Batchverfahren, Ansatz à 30 l Schlamm
Kompostierung	25 – 35	In Klimakammer als Intensivrotte in Rottebox und offene Miete unter Zugabe von Strukturmitteln (Holzhäcksels, Papier, Stroh), Batchverfahren, Ansatz à 100 l Schlamm + Strukturmaterial
Langzeitlagerung	5, 10, 25, 30	In Klimakammer, Batchverfahren, Ansatz 30 l
Solare und konventionelle Klärschlamm-trocknung im Trockenbeet	-2 – 22	In Außenversuchen über die Wintermonate von Januar bis Mai
Vererdung	25 – 35	Während Vegetationsperiode nach Adaption in klimakontrolliertem Gewächshaus, vier verschiedenen Feststoffflächenbelastungen $B_{TS} = 40 - 150 \text{ kg TR/m}^2\text{-a}$, Beschickung 1 – 2 Mal wöchentlich

- Aerobe Nachstabilisierung

Die Versuche zur aeroben Nachstabilisierung kommunaler Klärschlämme wurden im Batchbetrieb in Kunststoffzylindern mit einem Nutzvolumen von 7 L (vgl. Bild 4) und in Reaktoren mit einem Nutzvolumen von 23 L durchgeführt. Die Belüftung erfolgte mit Keramikbelüftern mit temperierter Umgebungsluft bei einem Durchfluss von 0,625 m³/h. Die Sauerstoffkonzentration lag in jedem Versuchsansatz bei über 2 mg/L. Zusätzliche Umwälzeinheiten wurden nicht installiert. Alle Versuchsreaktoren wurden in Klimakammern betrieben, ausgenommen der Versuche bei 10 °C und 55 °C, bei denen der Schlamm in der Säule über eine außen anliegende Kupferspirale temperiert wurde.

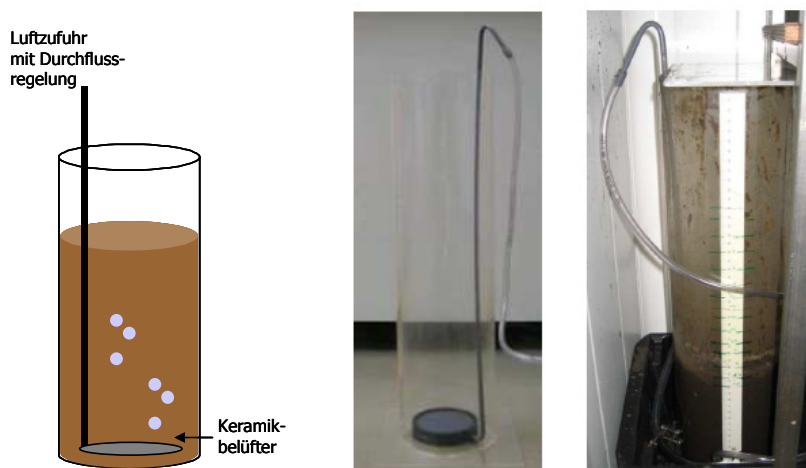


Bild 4: Versuchsreaktoren zur aeroben Nachstabilisierung in der Klimakammer

- Anaerobe Stabilisierung

Für die Versuche zur Klärschlammfäulung bei unterschiedlichen Temperaturen wurden Faulbehälter mit 23 L Nutzvolumen, automatisch gesteuerter Umwälzvorrichtung, Gasvolumenmessung (Ritter-Gasuhren) und Gasfassung (Gasbeutel) sowie Probennahme- und Zulaufstutzen in den Klimakammern aufgestellt (vgl. Bild 5). Zur Ermittlung optimaler Mischungsverhältnisse von Roh- und Impfschlämmen und zur Bestimmung des Restgaspotentials wurden zusätzlich Laborbatchanlagen mit einem Nutzvolumen von 0,7 L eingerichtet (vgl. Bild 6). Hierbei erfolgte die Einstellung der gewünschten Faultemperatur über ein temperierbares Wasserbad, die Gasmengenfassung über Wasserverdrängung in zwei ineinander liegenden Kunststoffzylindern in einem Behälter mit Sperrflüssigkeit (Salzwasser). Die Gasvolumenerfassung erfolgt täglich bei beiden Versuchseinrichtungen und wurde unter Berücksichtigung der aktuellen Raumtemperatur und des Luftdruckes auf Normbedingungen nach Abzug der Gasproduktion des zugesetzten Impfmateri als berechnet. Für die Versuche bei

den verschiedenen Temperaturen wurden mehrwöchige Adaptionszeiten zur Anzucht geeigneten Impfmateri als für die Versuche eingehalten.

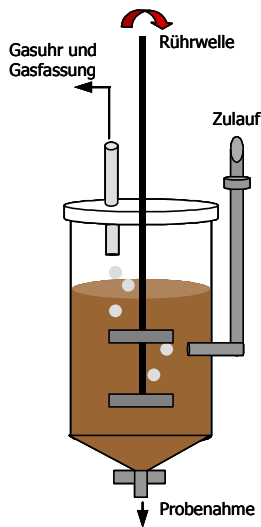


Bild 5: Versuchsreaktoren zur Klärschlammfäulung in der Klimakammer

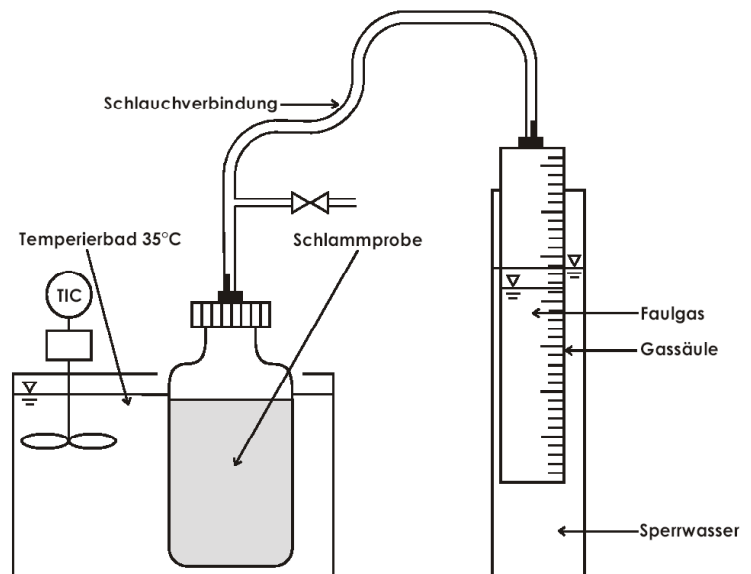
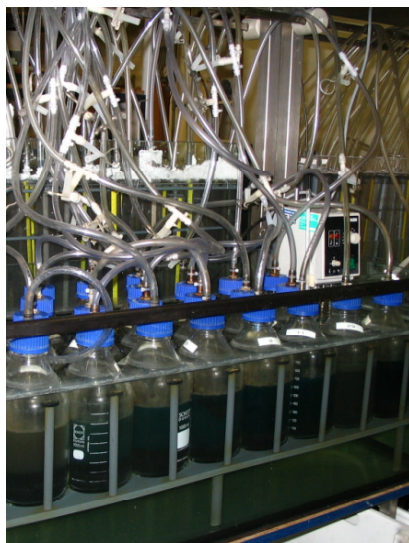


Bild 6: Versuchsaufbau der Batchtests zur Ermittlung von optimalen Mischungsverhältnissen von Roh- und Impfschlamm und des Restgaspotentials

- Kompostierung

Für die Untersuchungen zur Kompostierung von Klärschlämmen mit organischen Strukturmitteln wurden zunächst geeignete Strukturmittel in Vorversuchen ausgewählt (Papier, Holzhäcksel, Stroh) und nur die Ansätze (Materialien und Mischungsverhältnisse) mit der höchsten Eigenerwärmung für die Versuche in der Klimakam-

mer verwendet. Die Hauptrotte wurde in Rotteboxen mit 100 L Nutzvolumen, ausgestattet mit Drainageboden, Sohlenbelüftung mit einer Intensität von 300 L/h, Ablufffassung und Temperaturmesstechnik, durchgeführt. Nach der zwei- bis dreiwöchigen Intensivrotte wurde das Material über ca. sechs Wochen offen nachgerottet und dabei regelmäßig gewendet und befeuchtet (vgl. Bild 7).

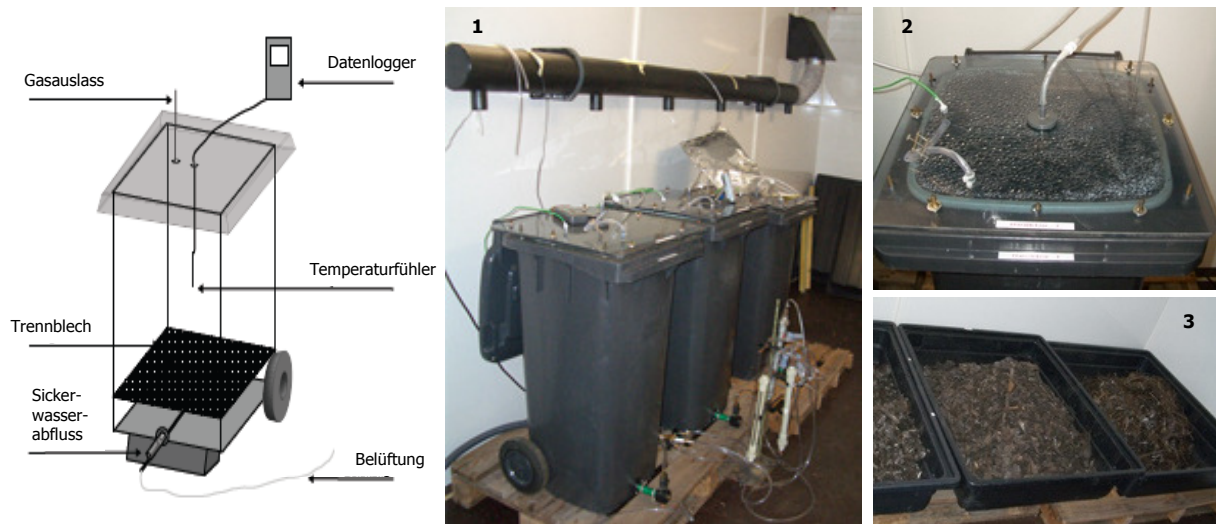


Bild 7: **Reaktoren für die Intensivrotte mit Zwangsbelüftung und Ablufffassung (1+2) und Lagerflächen für die offene Nachrotte (3) in der Klimakammer**

- Klärschlammbehandlung mit Brannt- und Löschkalk

Zur Ermittlung einer sachgerechten Kalkdosierung wurden Vorversuche mit Branntkalk (Kalkqualität: Ca, MgO = 90 %) und Löschkalk (als 10 %-ige Kalkmilch, Kalkqualität: Ca, Mg(OH)₂ = 85 %) und unterschiedlichen Klärschlammqualitäten durchgeführt. Hierbei wurde ein pH-Wert > 12,5 über eine Woche in den Ansätzen eingestellt. Für die Hauptversuche wurden 30 kg entwässerter Klärschlamm entsprechend der Vorversuche mit Branntkalk, und 30 L flüssiger Klärschlamm mit Kalkmilch in abluftgefassten Behältern in den Klimakammern über drei Monate eingelagert (vgl. Bild 8).

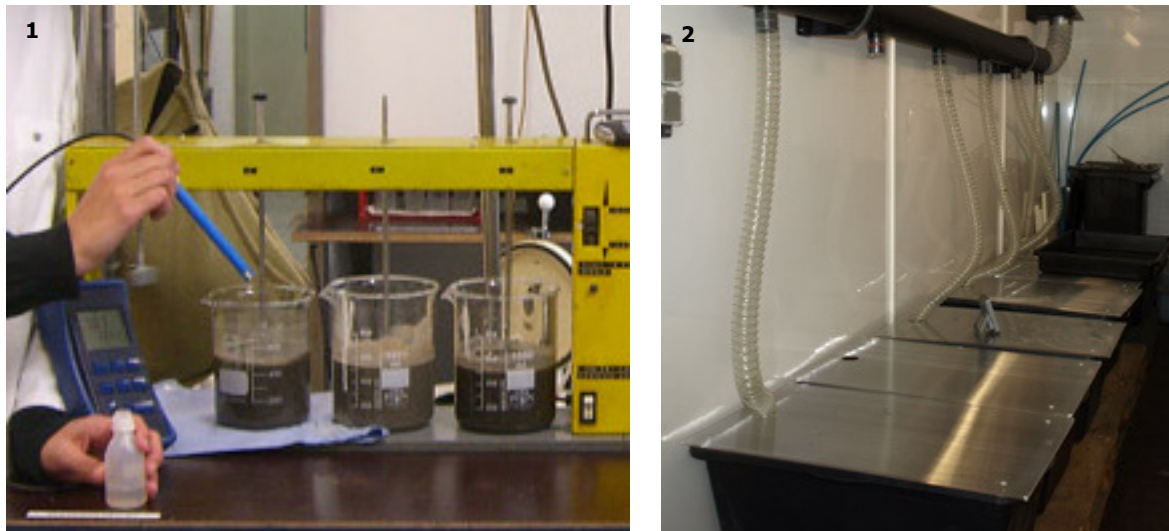


Bild 8: Vorversuche zur Kalkdosierung (1) und Lagerung des gekalkten Klärschlammes in der Klimakammer mit Ablufffassung (2)

- Klärschlammvererdung und Trockenbeetentwässerung

Die vergleichenden Untersuchungen zur Klärschlammvererdung und Trockenbeetentwässerung wurden im klimatisierten Gewächshaus in Versuchsbeeten mit Drainageschicht (vgl. Bild 9) während der Vegetationsperiode durchgeführt. Im Gegensatz zu den Untersuchungen zu allen anderen Behandlungstechnologien wurden hierbei anstelle von Rohschlämmen aerob vorstabilisierte Schlämme verwendet. Das Schilf wurde vor Versuchsbeginn über mehrere Wochen zunächst an Abwasser dann an Klärschlamm adaptiert. Die Pflanzdichte des Schilfs in den Vererdungsbeeten betrug 19 Pflanzenstöcke/m². Alle Versuchsbecken waren mit einer Sickerwasserfassung ausgestattet. Die Beschickung der Beete erfolgte zweimal wöchentlich mit 6 Feststoffflächenbelastungen von 40, 55, 70, 80, 120 und 150 kg TR/m²·a.

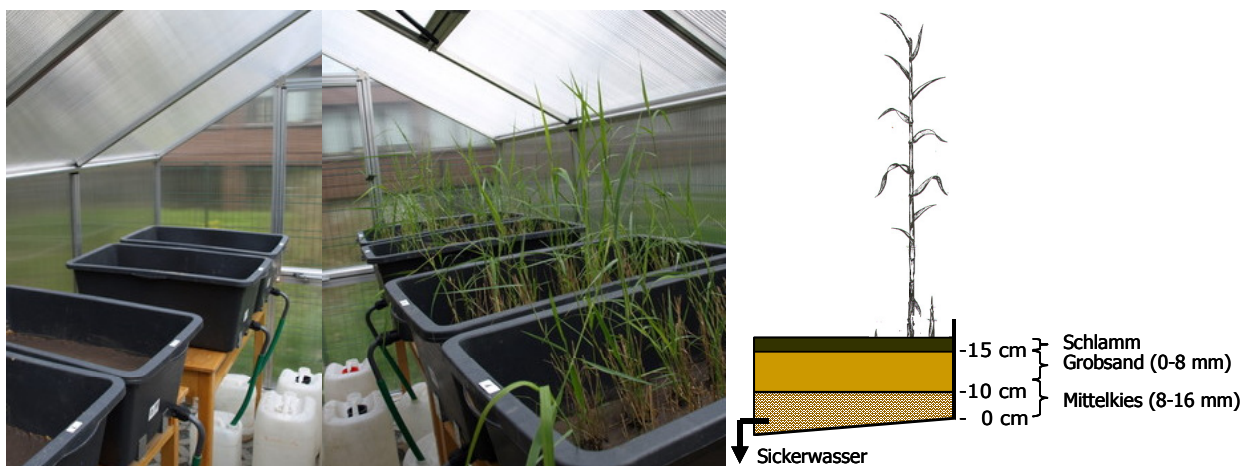


Bild 9: Unbepflanzte und mit Schilf bepflanzte Trockenbeete im beheizbaren Gewächshaus

- Solare Klärschlamm-trocknung und Trockenbeetentwässerung

Die vergleichenden Untersuchungen zur solaren Trocknung und konventionellen Trockenbeetentwässerung wurden über die Wintermonate in Außenanlagen durchgeführt. Für die Versuche zur konventionellen Trocknung wurden Versuchsbeete ausgestattet mit Drainagevlies (Terrafix 813, Durchlässigkeitsbeiwert $k_{10} = 3,82 \cdot 10^{-3}$ m/s), Sickerwasserfassung und Regenschutz errichtet, die Trocknungsflächen betragen $0,27 - 0,44 \text{ m}^2$. Die Versuche zur solaren Trocknung wurden parallel in Gewächshauskonstruktionen mit vergleichbarem Versuchs-Setup durchgeführt (Bild 10).



Bild 10: Versuchsaufbauten zur solaren Klärschlamm-trocknung mit Ventilation (Außenversuche)

- Langzeitlagerung

Zur Untersuchung des Langzeitlagerungsverhaltens wurde entwässertes Rohschlamm in den Klimakammern auf Drainagevliesen (Terrafix 813, Durchlässigkeitsbeiwert $k_{10} = 3,82 \cdot 10^{-3}$ m/s) bis zu neun Monate gelagert.

Analytikprogramm

Die Ansätze der Hauptversuche zu den acht Klärschlammbehandlungsverfahren wurden zu Beginn, zum Ende und während der Versuchslaufzeit auf die folgenden Parameter zur Beurteilung des

- erreichbaren Stabilisierungsgrades,
- erreichbaren Desinfektionsgrades, sowie
- der Nährstoffkonzentrationen im Endprodukt

untersucht (vgl. Tabelle 3).

Tabelle 3: Liste untersuchter Parameter für die verschiedenen Behandlungsverfahren

	t ₀	t _{1-x}	t _{end}	Bemerkung
TR, GV, η _o TR	x	x	x	
pH, LF	x	x	x	
CSB, CSB _f	x	x	x	
BSB ₅	x	x	x	
Organ. Säuren	x	x	x	Nur bei anaerober Stabilisierung
TKN, NH ₄ -N	x	(x)	x	Unregelmäßig während des Verlaufs, NH ₄ -N als Kontrollparameter
P _{ges} , PO ₄ -P	x	(x)	x	Unregelmäßig während des Verlaufs
E.Coli, Enterobacteriaceae	x	(x)	x	Bei aerober Stabilisierung 25-35 °C wöchentlich
Restgaspotenzial			x	Nur bei aerober und anaerober Stabilisierung
K ⁺ , Ca ²⁺ , Mg ²⁺			x	
Pflanzenverträglichkeit (Kresse, Sommergerste)			x	

Die physikalischen und chemischen Analysemethoden sind in Tabelle 4 angegeben. Die Bestimmungsmethoden beziehen sich dabei sowohl auf die Laborversuche als auch auf die Versuchsansätze in den Klimakammern. Mit Ausnahme der Bestimmung der Parameter K⁺, Ca²⁺ und Mg²⁺ im Labor der Stadtentwässerung Braunschweig und der Bestimmung pathogener Mikroorganismen im Limnologischen Institut Dr. Nowak, Ottersberg, wurden sämtliche Analysen in Eigenarbeit im institutseigenen Labor durchgeführt.

Tabelle 4: Physikalische und chemische Bestimmungsmethoden

Parameter		Einheit	Methode
Trockenrückstand	TR	[g/L]	DIN EN 12880, 2001-02
Glühverlust, Glührückstand	GV, GR	%	DIN EN 12879, 2001-02
Abfiltrierbare Stoffe	AFS	[mg/L]	DIN 38409-2, 1987-03
Elektrische Leitfähigkeit	Elektr. LF	[mS/cm]	DIN EN 27888, 1993-11
pH-Wert	pH	[-]	DIN EN 12176, 1998-06
Chemischer Sauerstoffbedarf	CSB	[mg/L]	Küvettentest Dr. Lange
Biologischer Sauerstoffbedarf	BSB ₅	[mg/L]	DIN EN 1899-1, 1998-05
Total Kjeldahl Nitrogen	TKN	[mg/L]	Verschiebung pH-Wert > 12, ; Messung von NH ₃ mit ionenselektiver Sonde (Digital Ionanalyser,

			Orion Model 801 A)
Ammonium-Stickstoff	NH ₄ -N	[mg/L]	DIN 38406-5, 1983-10
Nitrit-Stickstoff	NO ₂ -N	[mg/L]	Küvettest Dr. Lange
Nitrat-Stickstoff	NO ₃ -N	[mg/L]	Küvettest Dr. Lange
Gesamtphosphor	P _{ges}	[mg/L]	Küvettest Dr. Lange
Orthophosphat-Phosphor	PO ₄ -P	[mg/L]	Küvettest Dr. Lange
Gaszusammensetzung	CH ₄ , CO ₂	[%]	Gaschromatisch mit FID (HP 5890 Series II)
Organische Säuren (Essigsäure-äquivalent)	HAc	[mg/L]	Gaschromatisch mit FID (HP 5890 Series II)
Pflanzenverträglichkeit (Kresse, Sommergerste)		[-]	Nach BGK, 1998
E.Coli		[MPN/g]	DIN 10164-1; ASU 06.00-24
Enterobacteriaceae		[MPN/g]	ISO 9308-3, 1998-11
Kalium, Kalzium, Magnesium	K ⁺ , Ca ²⁺ , Mg ²⁺	[mg/kg]	DIN EN ISO 11885, 1998-04

2.1.1.3 Auswertungsmethodik

Datenaufbereitung

Zur Ermittlung von Abbaukurven und Stabilisierungsendpunkten wurden die ermittelten und statistisch aufbereiteten Versuchsdaten unter Anwendung geeigneter mathematischer Modelle gefittet. (TableCurve 2D, v5.01). Passende Modelle für den Abbau der Kohlenstoffverbindungen wurden in Anlehnung an Braha und Groza (2006) ermittelt und ermöglichten somit die Definition von Stabilisierungsendpunkten.

Definition von Stabilisierungszielen

Anhand der aufbereiteten Versuchsergebnisse und mit Hilfe der Literatur wurden die in Tabelle 5 zusammengestellten Kriterien zur Charakterisierung der Vollstabilisierung für die einzelnen Behandlungsverfahren festgelegt und die mittlere Stabilisierungszeit ermittelt. Eine Einschätzung der landwirtschaftlichen Verwertbarkeit erfolgte anhand der Reduktion des Indikators *E. Coli* nach US EPA Kriterien (40 CFR Part 503, 1993).

Tabelle 5: Kriterien zur Bestimmung des Stabilisierungsendpunktes

Verfahren	Stabilisierungskriterien
Getrennt aerobe und anaerobe Stabilisierung	<ul style="list-style-type: none"> • BSB₅/CSB-Verhältnis ≤ 0,15, • η₀TR ≥ 40 %, • Restgaspotential bei 35 °C Faultemperatur RGP_{35°C} ≤ 100 NI/kg oTR₀, • HAc ≤ 200 mg/l; im Langzeitbetrieb HAc ≤ 100 mg/l (nur bei der anaeroben Stabilisierung)

Kompostierung	<ul style="list-style-type: none">• $T > 55 \text{ °C}$ über 2 Wochen oder• $T > 65 \text{ °C}$ über 1 Woche im gesamten Mischgut, sowie• $\eta_{\text{TR}} \geq 50 \text{ \%}$.
Kalkbehandlung	<ul style="list-style-type: none">• $\text{pH } 12,5 \pm 0,3$ und Lagerung über mindestens drei Monate bei Löschkalk oder Branntkalkdosierung (pH-Kriterium), bzw.• $\text{pH } 12,5 \pm 0,3$ und $T > 55 \text{ °C}$ für mindestens zwei Stunden bei Branntkalkdosierung (Temperaturkriterium)
Natürliche Klärschlamm- wässerung und -trocknung	<ul style="list-style-type: none">• $\text{TR}_e \geq 300 \text{ kg/m}^3$ für die Entwässerung flüssigen/eingedickten Klärschlammes ($\text{TR}_0 = 50 \text{ kg/m}^3$) im unbepflanzten und Schilf bepflanzten Trockenbeet,• $\text{TR}_e \geq 700 \text{ kg/m}^3$ für die solare Klärschlamm-trocknung entwässerten Klärschlammes ($\text{TR}_0 = 200 \text{ kg/m}^3$)

2.1.2 Ergebnisse und Empfehlungen zu einzelnen Behandlungsverfahren

Primäres Ziel einer jeden Klärschlammbehandlung ist es, das biologisch reaktive Material zu stabilisieren, indem die im Klärschlamm enthaltene organische Substanz weitestgehend reduziert wird und/oder Bedingungen geschaffen werden, unter denen ein weiterer Abbau gehemmt ist. Erwünschte Nebeneffekte sind dabei in Abhängigkeit der Verfahrenswahl eine Verringerung der Konzentration pathogener Mikroorganismen sowie der Schlammmasse, eine Verbesserung der Entwässerbarkeit und ggf. die Gewinnung von Biogas.

Grundsätzlich sind die Behandlungsziele an die Möglichkeiten der Verwertung oder Beseitigung des Klärschlammes anzupassen. Prinzipiell sollte dabei eine Rückführung vorhandener Wertstoffe in den Stoffkreislauf einer Beseitigung vorgezogen werden, vorausgesetzt, die Konzentrationen organischer und anorganischer Schadstoffe sowie pathogener Mikroorganismen im Material sind vertretbar niedrig. Im Rahmen des Teilprojektes stand daher die Erzeugung eines qualitativ hochwertigen Endproduktes aus kommunalen Klärschlämmen, das weitestgehend landwirtschaftliche verwertet werden kann, im Vordergrund.

In den folgenden Kapiteln werden zunächst die wesentlichen nationalen und internationalen rechtlichen Rahmenbedingungen sowie der Stand der Klärschlammbehandlung in Deutschland beschrieben. Es folgen die Ergebnisse der Untersuchungen zu den einzelnen Klärschlammbehandlungsverfahren sowie die daraus abzuleitenden Empfehlungen für die Bemessung und den Betrieb, die auch im Leitfaden des Gesamtverbundes berücksichtigt wurden. Es ist zu beachten, dass sich die Stabilisierungskriterien und damit die Empfehlungen zur Behandlungszeit auf die Erzeugung eines vollstabilisierten Endproduktes mit der Möglichkeit zur landwirtschaftlichen Verwertung beziehen. Andere Verwertungs- und Beseitigungsziele erfordern unter Umständen eine Anpassung der Stabilisierungskriterien und resultieren damit ggf. auch in abweichenden Bemessungsempfehlungen.

2.1.2.1 Internationale und nationale Richtlinien

Die für eine stoffliche Verwertung von Klärschlämmen relevanten internationalen Richtlinien sind in erster Linie

- die EU Klärschlammrichtlinie (86/278/EWG, Stand 1986),
- die Richtlinien der US Environmental Protection Agency (US EPA) (40 CFR Part 503, Stand 1993) für die landwirtschaftliche Wiederverwertung (Teil I), Deponierung (Teil II), Entseuchung (Teil III) sowie Verbrennung (Teil IV)) und
- die WHO Guidelines on Safe Use of Wastewater, Excreta and Greywater, insbesondere Vol. 4: Excreta and Greywater use in Agriculture, Stand 2006.

Die rechtlichen Rahmenbedingungen für eine landwirtschaftliche und landschaftsbauliche Verwertung von Klärschlämmen in Europa sind in der EU Klärschlammrichtlinie 86/278/EWG vorgegeben und in den Mitgliedsstaaten in entsprechende nationale Gesetzgebung umgesetzt.

In Deutschland sind nähr- und schadstoffbezogene Vorgaben zur Aufbringung von Klärschlämmen auf landwirtschaftlich genutzten Flächen im Düngemittel- und Abfallrecht geregelt. Grenzwerte für organische und anorganische Schadstoffe, sowie Vorschriften zur Desinfektion, zur Klärschlammaufbringung und Qualitätssicherung sind in der Klärschlammverordnung (AbfKlärV, 1992, derzeit novelliert) und der Düngemittelverordnung (DüMV, 2008) festgelegt. Die Qualitätsanforderungen gelten dabei ebenfalls für die bei der Klärschlammbehandlung verwendeten Betriebsmittel, z. B. für Kalkprodukte.

In vielen außereuropäischen Staaten ist die nationale Gesetzgebung zur Klärschlammbehandlung und -verwertung vor allem an die Empfehlungen der EU oder der US EPA angelehnt (vgl. Kapitel 2.1.3). Nach letzteren erfolgt eine Klassifizierung der Schlämme in Class A und Class B biosolids gemäß der verwendeten Verfahrenstechnik zur Klärschlammstabilisierung und eine Zuordnung entsprechender Auflagen für die Behandlung und Verwertung des Materials. Maßgebend für die Klassifizierung ist die in den jeweiligen Verfahren erreichbare Reduktion pathogener Mikroorganismen.

In Ländern, in denen keine gesetzlichen Vorgaben existieren, sind die oben genannten Richtlinien der EU, der US EPA, und insbesondere der WHO als Maßstab heranzuziehen.

2.1.2.2 Stand der Klärschlammbehandlung

Einheitliche technische Regeln zur Wasser-, Abwasser- und Abfallbehandlung in Deutschland werden im Regelwerk der DWA herausgegeben. Wesentliche Hinweise für die Planung, den Bau und den Betrieb von Anlagen zur Behandlung kommunaler Klärschlämme enthalten insbesondere die Merkblätter

- ATV-DVWK-M 368: Biologische Stabilisierung von Klärschlamm, Stand 04/03 und
- ATV-DVWK-M 379: Klärschlamm Trocknung, Stand 02/04

sowie im weiteren Sinne die Merkblätter zur Biogasaufbereitung, Eindickung und Entwässerung von Klärschlämmen

- ATV-DVWK-M 363: Herkunft, Aufbereitung und Verwertung von Biogas, Stand 08/02,

- ATV-DVWK-M 366: maschinelle Schlammwässerung, Stand 10/00,
- ATV-DVWK-M 376: Sicherheitsregeln für Biogasbehälter 10/06,
- DWA-M 381: Eindickung von Klärschlamm, Stand 10/07,
- DWA-M 383: Kennwerte der Klärschlammwässerung, Stand 10/08.

Die im Rahmen des Teilprojektes „Klärschlammbehandlung und -verwertung“ erarbeiteten Empfehlungen bieten eine Ergänzung der entsprechenden DWA-Regeln für andere klimatische und sonstige Randbedingungen und können als Grundlage für einen Vergleich verschiedener Verfahrenstechniken herangezogen werden.

2.1.2.3 Klärschlammengen und -qualitäten

Wichtigste Einflussgröße für die Dimensionierung von Klärschlammbehandlungsanlagen ist die zu stabilisierende Klärschlammmenge, die in Abhängigkeit des gewählten Abwasserreinigungsverfahrens überschlägig gemäß Tabelle 6 angesetzt werden kann. Eine sachgerechte Bemessung sollte allerdings möglichst nach dem gleitenden Mittel des Schlammanfalls und nicht auf Basis von Mittelwerten erfolgen.

Tabelle 6: Primär- (PS), Beleb- (BS) und Anaerobschlamm (AS)-Anfall für verschiedene Abwasserbehandlungsverfahren¹⁾

Art der Abwasserbehandlung		Schlammvolumen [l/E-d]	TR-Gehalt [kg/m ³]	Schlamm-masse [kg TR/E-d]	oTR/TR [-]
Vorklärung					
$t_{VK} = 0,5 \text{ h}$	PS	1	20-80	0,02-0,08	0,7-0,85
$t_{VK} = 1,0 \text{ h}$		1,2	20-80	0,02-0,1	0,7-0,85
$t_{VK} = 2,0 \text{ h}$		1,4	20-80	0,03-0,11	0,7-0,85
Belebtschlammverfahren, C und N-Elimination					
$t_{TS} = 10 \text{ d}, t_{VK} = 0,5 \text{ h}$	BS	6	5-8	0,03-0,05	0,65-0,75
$t_{TS} = 10 \text{ d}, t_{VK} = 2 \text{ h}$		4,8	5-8	0,02-0,04	0,65-0,75
Belebtschlammverfahren, simultane Schlammstabilisierung					
$t_{TS} = 25 \text{ d}$	BS	5	8-12	0,04-0,06	0,6-0,7
Tropfkörper					
$t_{VK} = 1 \text{ h}$	BS	0,8 - 3	10-25	0,01-0,08	0,65-0,75
Faulgrube					
	AS	0,3 - 1	30-60	0,01-0,06	0,7-0,85
UASB					
$t_{TS} > 40 \text{ d}, t_{VK} = 1 \text{ h}$	AS	0,2 - 0,6	30-60	0,01-0,04	0,55-0,6
Teiche mit/(ohne) vorgeschaltetem Absetzteich					
Absetzteich	AS	0,35	k.A.	k.A.	k.A.
belüftet	BS	0,2 (ohne 0,55)	50-100	0,01-0,02 (ohne <0,05)	< 0,5

unbelüftet	BS	0,2 (ohne 0,55)	50-100	0,01-0,02 (ohne <0,05)	< 0,5
------------	----	--------------------	--------	---------------------------	-------

1) Angaben gelten für eine Abwasserbelastung von 0,12 kgCSB/E·d bzw. 0,06 kgBSB₅/E·d und Temperaturen von 12 – 15 °C. Quellen: Imhoff (1984); DWA (2005), v. Sperling et al. (2007)

Zuschläge aufgrund von Niederschlagsabflüssen und saisonalen Spitzenbelastungen sowie aus betrieblichen Gründen sind ggf. zu berücksichtigen.

2.1.2.4 Getrennt aerobe Klärschlammstabilisierung

Das Verfahrensprinzip der aeroben Schlammstabilisation beruht darauf, dass die im Klärschlamm enthaltenen Mikroorganismen unter Anwesenheit von Sauerstoff bei Erschöpfen des externen Nährstoffangebots körpereigene, endogene Substrate zur Energiegewinnung veratmen und sich somit selbst verzehren. Bei der getrennten aeroben Stabilisierung wird der anfallende Rohschlamm getrennt von der biologischen Abwasserreinigung in separaten Becken nachbelüftet. Die verfahrenstechnische Gestaltung kann analog zu derjenigen des Belebtschlammverfahrens erfolgen (ATV, 1996). Die vorzuhaltenden Behandlungsvolumina werden über die zum Erreichen eines bestimmten Stabilisierungsziels erforderliche Belüftungszeit bemessen.

Die getrennte aerobe Stabilisierung ist prinzipiell in kalten und warmen Klimaten unter Umgebungsbedingungen möglich. Die mikrobielle Aktivität und damit auch der Abbau der organischen Schlamminhaltsstoffe wird allerdings wesentlich vom Temperatureniveau beeinflusst. Bild 11 zeigt die prinzipielle Abhängigkeit der erforderlichen Stabilisierungszeit von der Temperatur, wie sie aus Literaturergebnissen (Tabelle 7) und den eigenen Versuchsreihen zusammengestellt wurde. Die Datenpunkte für die einzelnen Temperaturen schwanken je nach Rohschlammqualität, Betriebsführung und Stabilisierungsziel um den Faktor 1,5 bis 2.

In den eigenen Untersuchungen stellte sich bei fehlender Wärmeisolierung auch unter mesophilen Umgebungstemperaturen bis 35 °C keine messbare Selbsterwärmung durch die exothermen Stoffwechselprozesse der Mikroorganismen ein. Daher müssen insbesondere bei niedrigen Umgebungstemperaturen sehr lange Belüftungszeiten vorgehalten werden um die Stabilisierungskriterien (vgl. Tabelle 5) einzuhalten. Durch weitere Eindickung des Rohschlammes und entsprechende Wärmeisolierung der Reaktoren können Reaktionstemperaturen im thermophilen Bereich > 45 °C ohne Fremdenergieeinsatz erreicht werden. Aufgrund der deutlich erhöhten Stoffwechselraten kann die Behandlungsdauer dann deutlich reduziert werden

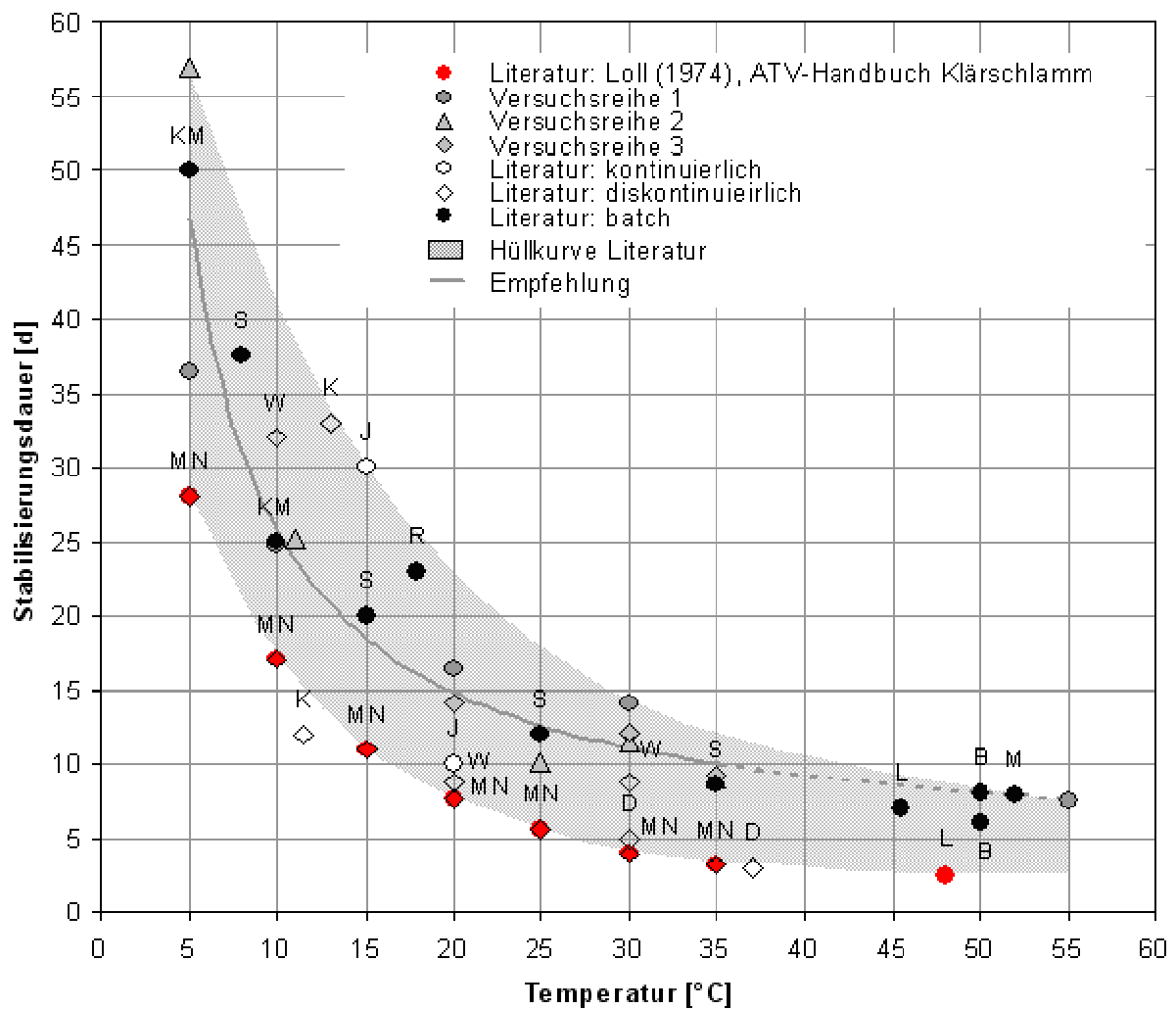


Bild 11: Abhängigkeit der Stabilisierungszeit vom Temperaturniveau bei der getrennten aeroben Stabilisierung von Rohschlamm

Tabelle 7: Literaturergebnisse zur getrennt aeroben Stabilisierung

Autor	Jahr	Kürzel	Temperatur [°C]	Stabilisierungsdauer [d]	Verfahrensführung ¹⁾
Müller-Neuhaus	1971	MN	5	28	d
Koers u. Mavinic	1977	KM	5	50	b
Soliman	2004	S	8	37,5	b
Müller-Neuhaus	1971	MN	10	17	d
Koers u. Mavinic	1977	KM	10	25	b
Weisbrodt	1974	W	10	32	d
Kempa	1969	K	11,5	12	d
Kempa	1969	K	13	33	d
Müller-Neuhaus	1971	MN	15	11	d
Soliman	2004	S	15	20	b

Rüffer	1966	R	18	23	b
Weisbrodt	1974	W	20	8,8	d
Müller-Neuhaus	1971	MN	20	7,7	d
Müller-Neuhaus	1971	MN	25	5,5	d
Soliman	2004	S	25	12	b
Müller-Neuhaus	1971	MN	30	4	d
Weisbrodt	1974	W	30	8,8	d
Demharter	1987	D	30	5	d
Müller-Neuhaus	1971	MN	35	3,2	d
Soliman	2004	S	35	8,6	b
Demharter	1987	D	37	3	d
Loll	1974	L	45,5	7	b
Loll	1974	L	48	2,5	k
Breitenbücher	1983	B	50	6	b
Breitenbücher	1983	B	50	8	b
Morgan et al.	1984	M	52	7,9	b
Jaworski et al.	1961	J	15	30	k
Jaworski et al.	1961	J	20	10	k

1) k = kontinuierlich, d = diskontinuierlich, b = batch

Resultierend aus den o. g. Ergebnissen werden die in Bild 11 dargestellten und in Tabelle 8 aufgeführten Stabilisierungszeiten für die Vollstabilisation empfohlen.

Tabelle 8: Zur Vollstabilisierung empfohlene Belüftungszeiten bei Temperaturen von 5 bis 55 °C (vgl. Modell Bild 11)

Temperatur	[°C]	5	10	15	20	25	30	35	55
Stabilisierungsdauer	[d]	46,6	25,7	18,6	14,8	12,6	11,1	10,0	7,6

Bei der Verfahrensführung der getrennt aeroben Stabilisierung sind die folgenden Aspekte zu beachten zu beachten:

- Voreindickung des Rohschlammes auf $TR < 40 \text{ kg/m}^3$ zur Gewährleistung eines ausreichenden Luftaustausches und einer ausreichenden Umwälzung (Ludovice, 2007); bei aerob-thermophiler Stabilisierung höhere Feststoffgehalte zur selbstgängigen Erwärmung zwischen 50 und 70 kg/m^3 (ATV-DVWK-M 368) nötig;
- Belüftung mit Kreisbelüftern oder grobblasigen Druckbelüftungssystemen (ATV-DVWK-M 368); bei der aerob-thermophilen Stabilisierung mit höheren Feststoffgehalten ev. zusätzliche Mischeinrichtungen vorsehen;

- Diskontinuierlicher Betrieb zur weitestgehenden Reduzierung pathogener Mikroorganismen insbesondere bei thermophilen Temperaturen;
- Geeignete Parameter zur Prozesskontrolle: Temperatur, pH-Wert und Sauerstoffgehalt im Reaktor.

Während des aeroben Abbaus kann unter Einhaltung der empfohlenen Behandlungszeiten bei Temperaturen bis 20 °C eine Reduktion pathogener Mikroorganismen (Indikator: *E. Coli*) um max. 1, bei Temperaturen bis 35 °C um max. 1,6, bei Temperaturen um 55 °C um max. 3 log-Einheiten erfolgen. Allein bei der aerob-thermophilen Behandlung können somit ausreichend hohe Reduktionsraten erreicht werden, die eine uneingeschränkte landwirtschaftliche Verwertung des Materials gemäß US EPA Kriterien ermöglichen.

Tabelle 9 fasst die Kennwerte für die getrennte aerobe Stabilisierung zusammen.

Tabelle 9: Kennwerte für die getrennte aerobe Stabilisierung von Rohschlamm bei Temperaturen von 5 bis 35 °C

Parameter	Dimension	Bereich
Stabilisierungsdauer	[d]	vgl. Tabelle 8
TR ₀	[kg/m ³]	20 - 40
oTR ₀	[kg/m ³]	12 - 30
η _{oTR}	[%]	> 40
TR _e	[kg/m ³]	8 - 18
oTR _e	[kg/m ³]	5 - 12
Effekt. Sauerstoffbedarf	[kg O ₂ /kg oTR ₀]	0,55 - 0,82
O ₂ -Konzentration im Becken	[mg O ₂ /L]	> 1
pH-Wert im Reaktor	[-]	7 - 8,5
Reduktion E.Coli	[Log ₁₀ -Red. MPN/gTR]	< 2, thermophil < 3

2.1.2.5 Anaerobe Klärschlammstabilisierung

Bei der anaeroben Schlammstabilisierung wird das organische Material in einem biologisch vierphasigen Prozess unter Sauerstoffabschluss zu Methan und Kohlenstoffdioxid abgebaut. Nach Fair und Moore (1937) werden für den anaeroben Abbau optimale Betriebsbedingungen bei mesophilen (35-37 °C) und thermophilen Temperaturen (ca. 55 °C), ausgewiesen. Praxiserfahrungen zeigen jedoch, dass die Reaktionstemperatur, abweichend von den engen Aktivitätsmaxima der beteiligten Mikroorganismen, an den Wärmehaushalt des Gesamtsystems der Schlammbehandlung angepasst werden kann (ATV-DVWK-M 368). In Deutschland und Mitteleuropa wird die Klärschlammfaulung daher überwiegend in beheizten Faulbehältern in den Temperaturbereichen 30-40 °C und (seltener) 50-60 °C betrieben. Bei ausreichend hohen

Umgebungstemperaturen kann eine Schlammfäulung jedoch prinzipiell auch in unbeheizten Faulräumen erfolgen. Das Faulraumvolumen wird über die zum Erreichen eines bestimmten Stabilisierungsziels erforderliche Aufenthaltszeit im Reaktor bemessen.

Der mikrobielle Abbau unter anaeroben Bedingungen ist ebenso wie im aeroben Milieu wesentlich von der Temperatur beeinflusst. Bild 12 stellt den prinzipiellen Zusammenhang zwischen Klärschlammtemperatur und Stabilisierungszeit anhand von Literatur- (Tabelle 10) und eigenen Versuchsergebnissen (Tabelle 11) dar, wobei sich die anzusetzende Behandlungsdauer, wie bei der aeroben Stabilisierung, auch hier nach dem Stabilisierungsziel und der Rohschlammqualität richtet. Ein anaerober Abbau der organischen Schlamminhaltsstoffe erfolgt auch unter psychrophilen Temperaturbedingungen, jedoch können die Stabilisierungsziele gemäß Tabelle 5 nur bei Faultemperaturen $> 25\text{ °C}$ erreicht werden. In warmen Klimaten mit hohen Umgebungstemperaturen (25 °C bis 35 °C) kann eine anaerobe Klärschlammstabilisierung jedoch auch ohne zusätzliche Schlammaufheizung erfolgen. Soll die Behandlungszeit reduziert werden, so ist eine Aufheizung des Klärschlammes notwendig.

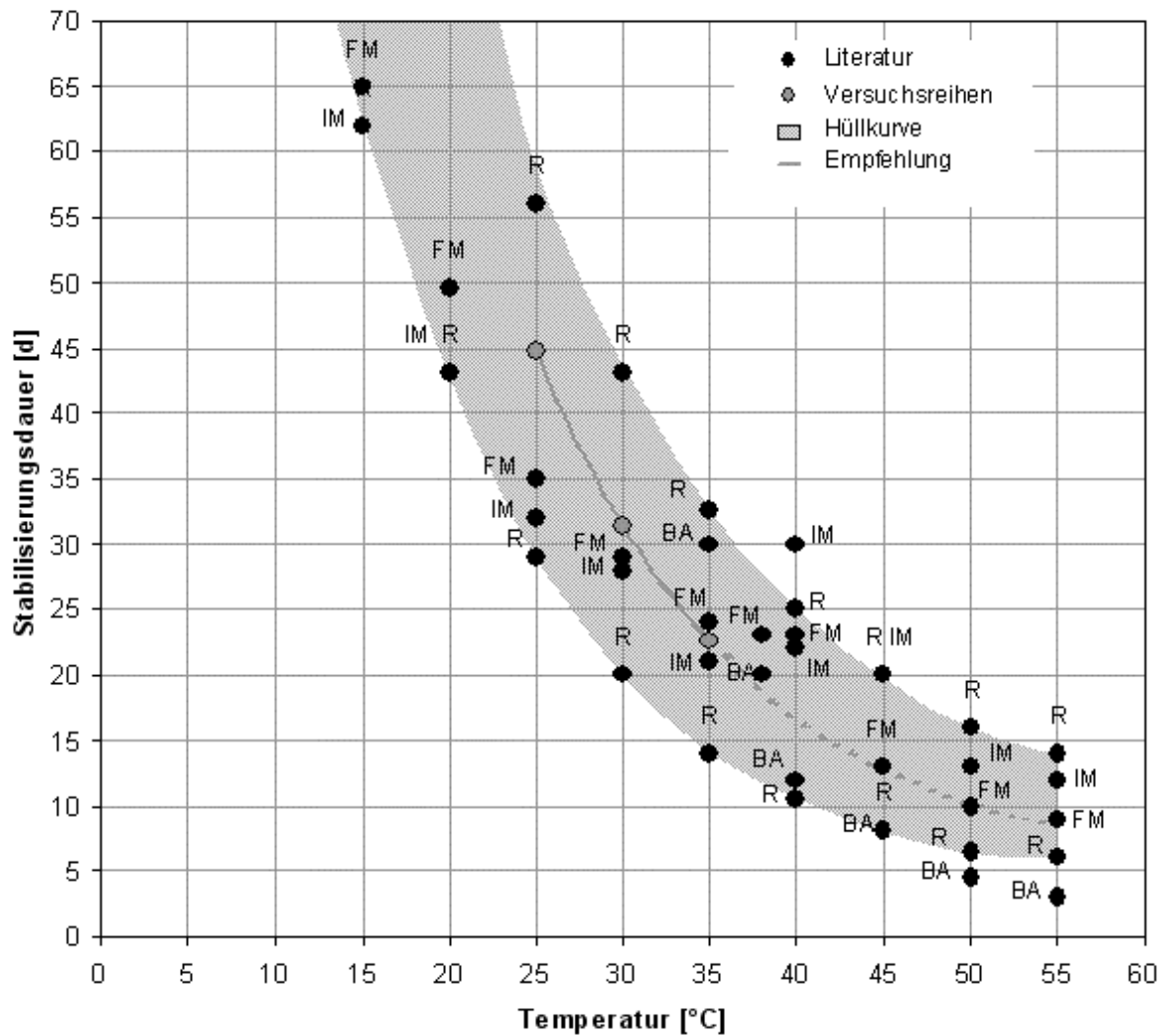


Bild 12: Abhängigkeit der Stabilisierungszeit vom Temperaturniveau bei der anaeroben Stabilisierung von Rohschlamm

Tabelle 10: Literaturergebnisse zur anaeroben Stabilisierung

Autor	Jahr	Kürzel	Temperatur [°C]	Stabilisierungsdauer [d]
Imhoff	1979	IM	15	62
Fair/Moore	1937	FM	15	65
Rödiger et al.	1967	R	15	62
Imhoff	1979	IM	20	43
Fair/Moore	1937	FM	20	49,5
Rödiger et al.	1967	R	20	43
Imhoff	1979	IM	25	32
Fair/Moore	1937	FM	25	35
Rödiger et al.	1967	R	25	29
Rödiger et al.	1967	R	25	56

Imhoff	1979	IM	30	28
Fair/Moore	1937	FM	30	29
Rödiger et al .	1967	R	30	20
Rödiger et al.	1967	R	30	43
Imhoff	1979	IM	35	21
Buhr/Andrews	1977	BA	35	30
Fair/Moore	1937	FM	35	24
Rödiger et al.	1967	R	35	14
Rödiger et al.	1967	R	35	32,5
Buhr/Andrews	1977	BA	38	20
Fair/Moore	1937	FM	38	23
Imhoff	1979	IM	40	30
Imhoff	1979	IM	40	22
Buhr/Andrews	1977	BA	40	12
Fair/Moore	1937	FM	40	23
Rödiger et al.	1967	R	40	10,5
Rödiger et al.	1967	R	40	25
Imhoff	1979	IM	45	20
Buhr/Andrews	1977	BA	45	8
Fair/Moore	1937	FM	45	13
Rödiger et al.	1967	R	45	8
Rödiger et al.	1967	R	45	20
Imhoff	1979	IM	50	13
Buhr/Andrews	1977	BA	50	4,5
Fair/Moore	1937	FM	50	10
Rödiger et al .	1967	R	50	6,5
Rödiger et al.	1967	R	50	16
Imhoff	1979	IM	55	12
Buhr/Andrews	1977	BA	55	3
Fair/Moore	1937	FM	55	9
Rödiger et al.	1967	R	55	6
Rödiger et al.	1967	R	55	14

Tabelle 11: Zur Vollstabilisierung empfohlene Faulzeiten (vgl. Bild 12) bei hohen Umgebungstemperaturen, $TR_0 = 20 - 30 \text{ kg/m}^3$

Faultemperatur	[°C]	25	30	35
Stabilisierungsdauer	[d]	44,8	31,4	22,6

Werden die empfohlenen Behandlungszeiten bei Temperaturen von 25 °C bis 35 °C eingehalten, so kann eine Reduktion des Indikatororganismus *E. Coli* um 1,5 log-

Einheiten erfolgen. Das Material entspricht den Class B-Kriterien der US EPA zur eingeschränkten landwirtschaftlichen Verwertung.

Folgende Hinweise sind bei der Verfahrensführung zu beachten:

- Voreindickung des Rohschlammes auf $TR < 80 \text{ kg/m}^3$ zur Gewährleistung eines ausreichenden Gasaustausches und einer ausreichenden Umwälzung (ATV-DVWK-M 368);
- Gewährleistung einer konstanten Faultemperatur, ggf. Fremdheizung;
- Animpfung des Rohschlammes im Verhältnis Rohschlamm:Impfschlamm = 1:1 bis 1:3; empfohlene Adaptionszeit bei Inbetriebnahme: dreifache Behandlungssdauer gemäß Tabelle 11;
- Ausreichende mechanische oder hydraulische Durchmischung des Reaktorinhaltes;
- Kontinuierliche bzw. quasi-kontinuierliche Beschickung für optimalen Betrieb;
- Geeignete Parameter zur Prozesskontrolle: Temperatur, Gehalt an organischen Säuren, pH-Wert, Faulgasmenge und -zusammensetzung.

Tabelle 12 fasst die Verfahrenskennwerte für die Klärschlammfäulung zusammen.

Tabelle 12: Kennwerte für die anaerobe Stabilisierung von Rohschlamm bei Temperaturen von 25 bis 35 °C

Parameter	Dimension	Bereich
Stabilisierungsdauer	[d]	vgl. Tabelle 11
TR_0	$[\text{kg/m}^3]$	30 - 80
oTR_0	$[\text{kg/m}^3]$	18 - 64
η_{oTR}	[%]	> 40
TR_e	$[\text{kg/m}^3]$	12 - 40
oTR_e	$[\text{kg/m}^3]$	7 - 26
pH	[-]	7,0 - 7,5
Konzentration organischer Säuren	[mg HAC/l]	< 500
Gasproduktion ($\eta_{oTR} > 40 \%$)	$[\text{Nl/kg } oTR_0]$	> 350
Methangehalt	[%]	60 - 65
Heizwert des Faulgases	$[\text{MJ/m}^3]$	23 ¹⁾
Heizwert des Faulschlammes	$[\text{MJ/kg TR}]$	8 – 15 ²⁾
Reduktion E.Coli	$[\text{Log}_{10}\text{-Red. MPN/gTR}]$	< 2

1) Heizwert bei 60 % CH_4 im Faulgas; 2) CIWEM, 1996

2.1.2.6 Klärschlammkompostierung

Bei der Klärschlammkompostierung werden Klärschlämme (Rohschlämme und ggf. nicht vollstabilisierte Schlämme) gemeinsam mit organischen Strukturmitteln unter aeroben Bedingungen zu Wasser, Kohlenstoffdioxid und einem humusähnlichen Reststoff abgebaut. Exotherme Stoffwechselprozesse der Mikroorganismen führen zu einer Selbsterhitzung des Materials, die wie bei der aerob thermophilen Stabilisierung flüssigen Klärschlamm eine Desinfektion bewirkt. Mit der Kompostierung findet eine weitergehende Entwässerung und damit eine Massereduzierung des Ausgangsmaterials statt (biologische Trocknung).

Für die verfahrenstechnische Ausführung stehen verschiedenartige Systeme in geschlossenen Reaktoren (wärmeisolierte Bioreaktoren, Rotteboxen und -trommeln) oder als offene Mieten mit und ohne Zwangsbelüftung zur Verfügung. Der Kompostierungsprozess wird nach Anlaufen der Abbauprozesse in zwei Phasen, Intensiv- und Nachrotte, unterteilt, wobei sich die unterschiedlichen verfahrenstechnischen Ausführungen der Rottesysteme hauptsächlich in ihrem Intensivrottesystem unterscheiden. Die Nachrotte erfolgt in den meisten Fällen als offene Mietenkompostierung.

Im Rahmen des Teilprojektes wurde die gemeinsame Kompostierung von entwässerten Rohschlämmen mit organischen Strukturmitteln in offenen Mieten mit folgenden Ergebnissen untersucht:

Bei der offenen Kompostierung ist die Zugabe organischer Strukturmittel sinnvoll um eine ausreichende Belüftung der Miete zu gewährleisten. Umstritten ist die Frage, ob die Zugabe von Zuschlagstoffen zur Manipulation des C/N-Verhältnisses erforderlich ist oder in erster Linie abbaufördernd durch die Durchlüftung des Haufwerks wirkt (ATV, 1996). Als Strukturmittel eignen sich Abfälle aus der Landwirtschaft und aus dem Gartenbau (Tabelle 13). Die Verwendung von Altpapieren ist nicht zu empfehlen.

Tabelle 13: Nährstoffgehalte im Klärschlamm und organischen Strukturmitteln

Substrat	TS bzw. TR [kg/m ³]	N [%]	C [%]
Baumschnitt	600 - 750	0,8 - 1,3	45 - 60
Sägespäne	600 - 800	0,1 - 0,2	45 - 60
Reisstroh	800 - 900	0,8 - 1,3	35 - 45
Getreidestroh	800 - 900	0,3 - 0,5	40 - 50
Rohschlamm	20 - 80	1 - 5	30 - 35
Faulschlamm	15 - 50	1 - 6	20 - 30

Getrockneter Schlamm (Trockenbeet) 1)	450 - 700	1 - 4	22 - 30
Entwässerter Schlamm (Siebbandpresse) 1)	150 - 200	1 - 4	22 - 30
Entwässerter Schlamm (Zentrifuge) 1)	180 - 280	1 - 4	22 - 30
Klärschlammkompost (Nachrotte)	700 - 850	2 - 4	30 - 45

1) Pinto, 2007

Für eine optimale Sauerstoffversorgung ist ein Feuchtegehalt von 40 bis 65 % im Material einzustellen. Die erforderliche Strukturmaterialzugabe in Abhängigkeit der Eigenfeuchte und des Klärschlammfeststoffgehalts ist Bild 13 zu entnehmen.

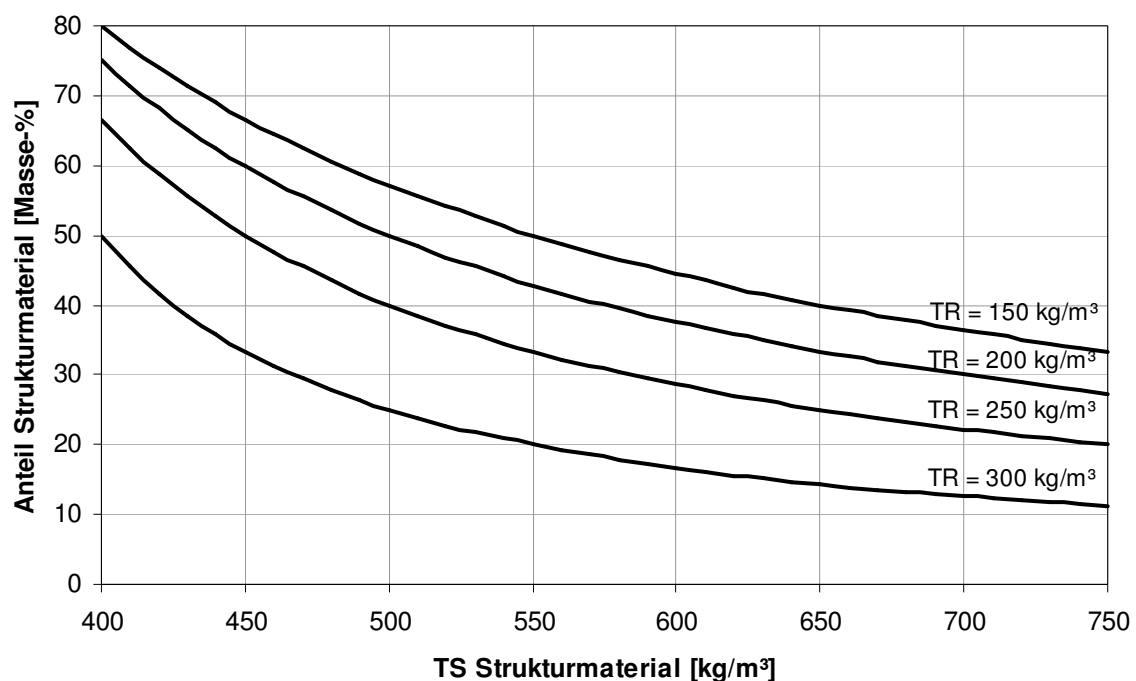


Bild 13: Anteil Strukturmaterial im Klärschlammgemisch in Abhängigkeit des Feuchtegehaltes für verschieden entwässerte Klärschlämme (TR 150 - 300 kg/m³)

Eine Abhängigkeit des Rottefortschritts von den Umgebungstemperaturen ist hauptsächlich während der Anwärmphase des Materials zu beobachten. Wärmeverluste über die Mietenoberfläche können durch Folienabdeckung vermieden werden. Dauer und Intensität der Intensivrotte werden nur unwesentlich von der Außentemperatur beeinflusst (Huang et al., 2005) Das Maß der Selbsterhitzung kann außerdem über den Wassergehalt und die Sauerstoffversorgung gesteuert werden.

Die für eine Desinfektion des Kompostmaterials nötigen Temperaturen von > 55 °C im gesamten Mischgut lassen sich durch regelmäßiges Umsetzen erreichen. Werden die Desinfektionskriterien gemäß Tabelle 5 eingehalten, so erfolgt eine weitestgehende Desinfektion des Materials mit einer Reduktion des Indikators *E. Coli* um bis zu 5 log-Einheiten.

Wird der Kompost landwirtschaftlich verwertet, so ist zu beachten, dass die im Kompost enthaltenen Nährstoffe im Gegensatz zu mineralischen Düngemitteln nicht sofort pflanzenverfügbar sind. Es wird davon ausgegangen, dass 8-15 % des Stickstoffes und 70-90 % des Phosphors für die Düngung anrechenbar sind (Kassner, 1980; BKG, 2007). Es ist daher ggf. erforderlich, Düngepläne unter Beachtung möglicher Auflagen zum Grundwasserschutz anzupassen. Die Kennwerte und Empfehlungen zur Verfahrensführung der Klärschlammkompostierung sind Tabelle 14 zu entnehmen.

Tabelle 14: Kennwerte und Empfehlungen zur Bemessung von Anlagen zur Mietenkompostierung von Klärschlamm aus mechanisch-biologischer Abwasserreinigung

Parameter	Dimension	Bereich
Dauer der Intensivrotte	[d]	21 - 28
Dauer der Nachrotte	[d]	> 30
Dauer der Rottezeit gesamt	[d]	50 - 90
Mietenabmessung (Dreiecksmiete)	[m]	h = 2 - 2,5; b = 2 - 4,5
Mietenumsetzung		Intensivrotte: 1-2 mal wöchentlich Reifephase: 1 mal wöchentlich
Nährstoffverhältnis C:N zu Beginn des Prozesses	[Masse-%]	20 - 35 : 1
TR ₀ Rohschlamm	[kg/m ³]	150 - 350
oTR ₀ Rohschlamm	[kg/m ³]	90 - 280
η _{oTR}	[%]	> 50
TR _e Kompost	[kg/m ³]	700 - 850
oTR _e Kompost	[kg/m ³]	40 - 120
Optimaler Feuchtegehalt	[%]	40 - 65
Optimales Luftporenvolumen	[%]	25 - 40
pH	[-]	6,5 - 8
Stöchiometr. Sauerstoffbedarf 1)	[kg O ₂ /kg oTR]	2
Reduktion E. Coli	[Log-Red. MPN/gTR]	< 5
Flächenbedarf (Rotte+Verkehrsfläche) 2)	[m ² /Mg TR Inputmaterial]	2,5 (Großanlage) bis 5 (Kleinanlage)

1) Pinto, 2007; 2) Meyer, 1995

Folgende Hinweise sind darüber hinaus zu berücksichtigen:

- Geruchsemissionen und Keimbelastung minimieren (anaerobe Zonen im Haufwerk vermeiden, Einstellung optimaler Wassergehalte, Abdeckung der Mieten, ggf. Zwangsbelüftung des Mietenbodens, Abstand zur Wohnbebauung von min. 600 m einhalten (ATV, 1996)),
- Quasidynamische Verfahrensführung mit regelmäßigem Umsetzen,

- Sohlabdichtung der Rottefläche mit Sickerwassersammler, ggf. Verwendung der Sickerwässer zur Bewässerung der Mieten,
- Prozesssteuerung über Wassergehalt, Sauerstoffversorgung, Temperatur,
- Während der Abwassereinigung keine Phosphatfällung mit Eisensalzen: Phosphor wird fixiert und ist nicht mehr pflanzenverfügbar.

2.1.2.7 Behandlung mit Kalk

Bei der Klärschlammbehandlung mit Kalk werden die organischen Schlamminhaltsstoffe nicht tatsächlich abgebaut, sondern es wird durch die Zugabe von Kalkprodukten lediglich ein abbauhemmendes Milieu geschaffen. Wird das pH-Milieu verändert, so setzen die Abbauprozesse erneut ein. Vorteil der Kalkbehandlung ist allerdings, dass bei ausreichender Dosierung eine weitestgehende Desinfektion des Klärschlammes erfolgt.

Grundsätzlich kann eine Kalkbehandlung mit Rohschlamm, aber auch mit aerob und anaerob stabilisierten Schlämmen erfolgen, insbesondere wenn eine weitergehende Desinfektion des Materials erfolgen soll, als allein aufgrund einer biologischen Schlammstabilisierung möglich wäre (vgl. Kapitel 2.1.2.4 und 2.1.2.5). Eine zusätzliche Kalk(nach)behandlung ist auch dann sinnvoll, wenn die Böden der aufnehmenden Landwirtschaft besonders kalkbedürftig sind.

Die Kalkbehandlung kann mit flüssigem bzw. eingedicktem Klärschlamm unter Zugabe von Löschkalk (Kalkhydrat, $\text{Ca}(\text{OH})_2$) oder aber mit entwässertem Schlamm unter Zugabe von ungelöschtem Kalk (Brantkalk, CaO) erfolgen. Brantkalk reagiert mit dem im Schlamm enthaltenen Wasser und kann in ausreichender Dosierung eine Temperatursteigerung im Gemisch auf bis zu 70 °C hervorrufen (Löschreaktion). In Abhängigkeit der Reaktionszeit kann somit ein zusätzlicher Effekt auf die Klärschlamm-Desinfektion ausgeübt werden.

Die empfohlene Kalkdosierung ist von der Qualität des Schlammes, in erster Linie von dessen Pufferkapazität und Feststoffgehalt abhängig. Die Umgebungsbedingungen haben lediglich Einfluss auf die weitergehende Trocknung, wenn das Material nach der Behandlung gelagert wird. Zu berücksichtigen ist, dass die Schlammbehandlung mit Kalkprodukten, im flüssigen oder entwässerten Zustand, eine deutliche Erhöhung der Klärschlamm-massen bzw. -volumina verursacht und damit ggf. erhöhte Transport-, Verwertungs- oder Entsorgungskosten anfallen

Brantkalkbehandlung

Für die Behandlung von entwässertem Rohschlamm mit Brantkalk beträgt die notwendige Dosierung zur Einhaltung des pH-Kriteriums 20 bis 50 % der Klärschlamm-trockenmasse und kann gemäß Bild 14 anhand des Schlammfeststoffgehaltes abge-

schätzt werden. Soll das Temperaturkriterium eingehalten werden, so ist die anzu-
setzende Brantkalkmenge um den Faktor 1,5 bis 2,5 zu erhöhen (vgl. Bild 15).

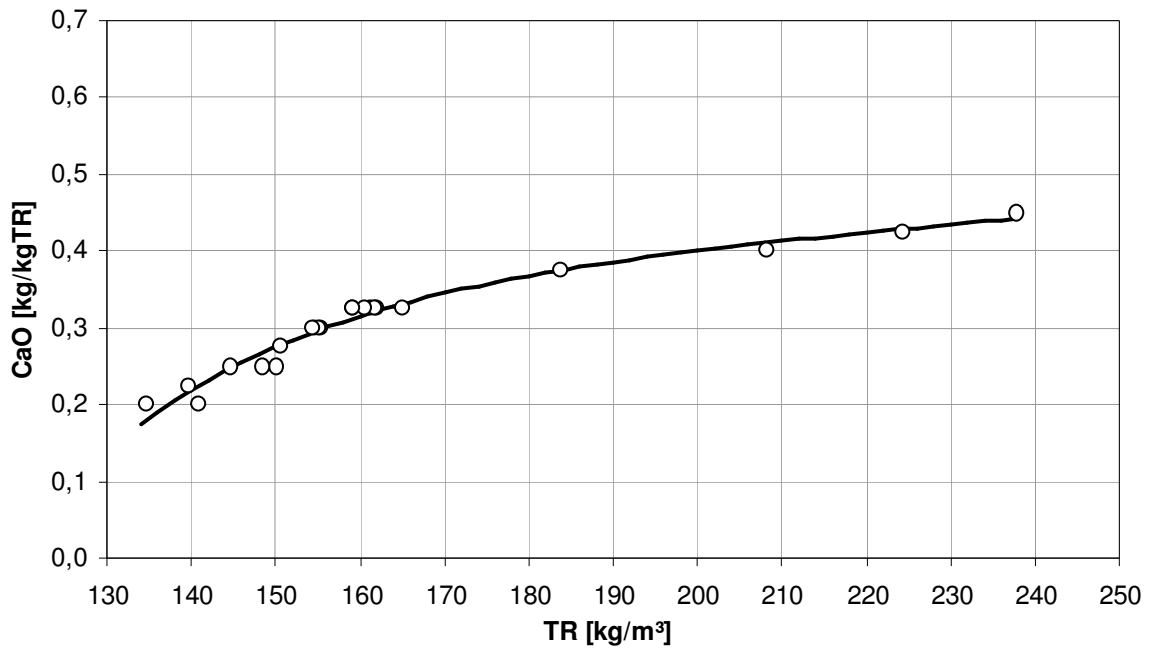


Bild 14: Brantkalkdosierung in Abhängigkeit des Feststoffgehaltes im Rohschlamm, Kriterium: pH 12,5 über dreimonatige Lagerzeit. Kalkqualität: Ca, MgO = 90 %

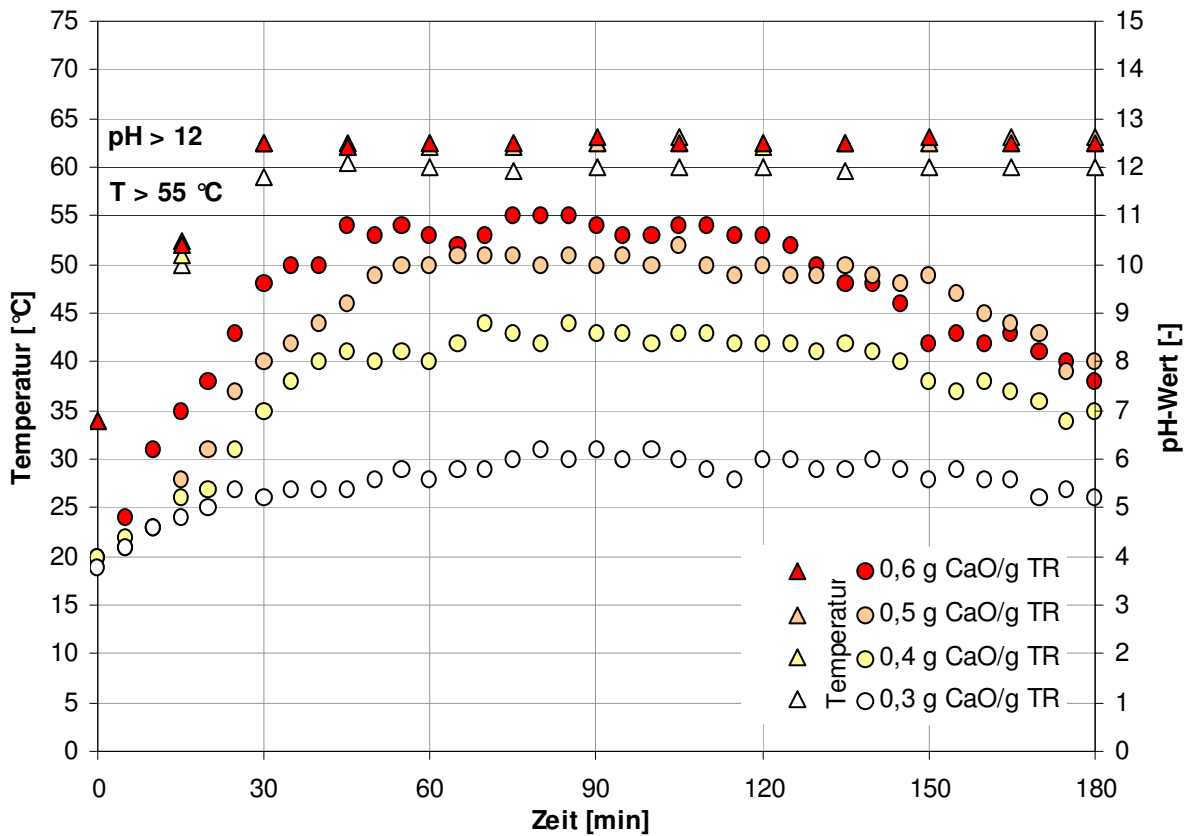


Bild 15: Temperatursteigerung im Brantkalk-Klärschlamm-Gemisch in Abhängigkeit der Dosierung

Der Massezuschlag für das Klärschlammgemisch ergibt sich direkt aus der Addition der dosierten Branntkalkmenge. Das Klärschlammvolumen erhöht sich in Abhängigkeit der verwendeten Mischtechnik um bis zu 20 % (ATV, 1996).

Über eine Einwirkzeit von drei Monaten bei $\text{pH} > 12,5$ kann die Konzentration des Indikatororganismus *E. Coli* um bis zu 5 log-Einheiten reduziert werden. Literaturangaben zur Folge reicht eine Einhaltung des pH-Kriteriums ebenfalls aus, um Salmonellen abzutöten. Ascarideneier können allerdings nur unter gleichzeitiger Temperatursteigerung inaktiviert werden (Schreiber-Rothschild, 1980; Wecker et al, 2003).

Folgende Punkte sind bei der Verfahrensführung zu beachten:

- Kalkbeschaffung unter Berücksichtigung wirtschaftlicher und betrieblicher Gesichtspunkte;
- Verwendung qualitativ hochwertigen Kalks (hohe Reaktivität und hoher Anteil Ca, MgO);
- Sachgerechte Dosierung und Lagerung des Branntkalks (konstante Temperatur, geringe Luftfeuchte)
- Ausrichtung der Förder- und Mischtechnik (Dauer und Geschwindigkeit) auf die Schlammeigenschaften und den Verwendungszweck des Endproduktes;
- Bereitstellung von Lagerflächen für die Gewährleistung einer ausreichenden Einwirkzeit zur weitestgehenden Desinfektion des Klärschlammes vor der Ausbringung;
- Emissionsmindernde Maßnahmen: Vermeidung von Stäuben beim Austrag und der Dosierung, ggf Einsatz von Entstaubungsanlagen; Absaugen und behandeln geruchsintensiver ammoniakhaltiger Brüden, ggf. Wiedereinleitung in Belebungsanlage;
- Maßnahmen zum Arbeitsschutz;
- Ermittlung exakter Dosierungen für vorliegende Schlämme im Labortest.

Detaillierte Hinweise zur Lagerung, Dosierung, Mischtechnik und Handhabung des Mischgutes sind den Mitteilungen der Deutschen Kalkindustrie zu entnehmen (Strauch et al., 1980; Peschen et al., 1985).

Behandlung mit Löschkalk

Eine Kalknachbehandlung flüssigen oder eingedickten Klärschlammes erfolgt mit Löschkalk und richtet sich ebenfalls überschlägig nach dem Schlammfeststoffgehalt (vgl. Bild 16). Die Dosierungsempfehlung für statisch eingedickte Rohschlämme liegt bei 5 bis 8 kg $\text{Ca}(\text{OH})_2/\text{m}^3$.

Wird der Löschkalk in Form von Kalkmilch dosiert, so entspricht der Volumenzuschlag für das Klärschlamm-Kalkgemisch der zugegebenen Kalkmilchmenge.

Bei Einhaltung des pH-Kriteriums wird auch bei der Löschkalkdosierung eine Reduktion des Indikators *E. Coli* um bis zu 5 log-Einheiten sowie ein Abtöten von Salmonellen erreicht, so dass das Material nach seuchenhygienischen Kriterien uneingeschränkt landwirtschaftlich verwertbar ist.

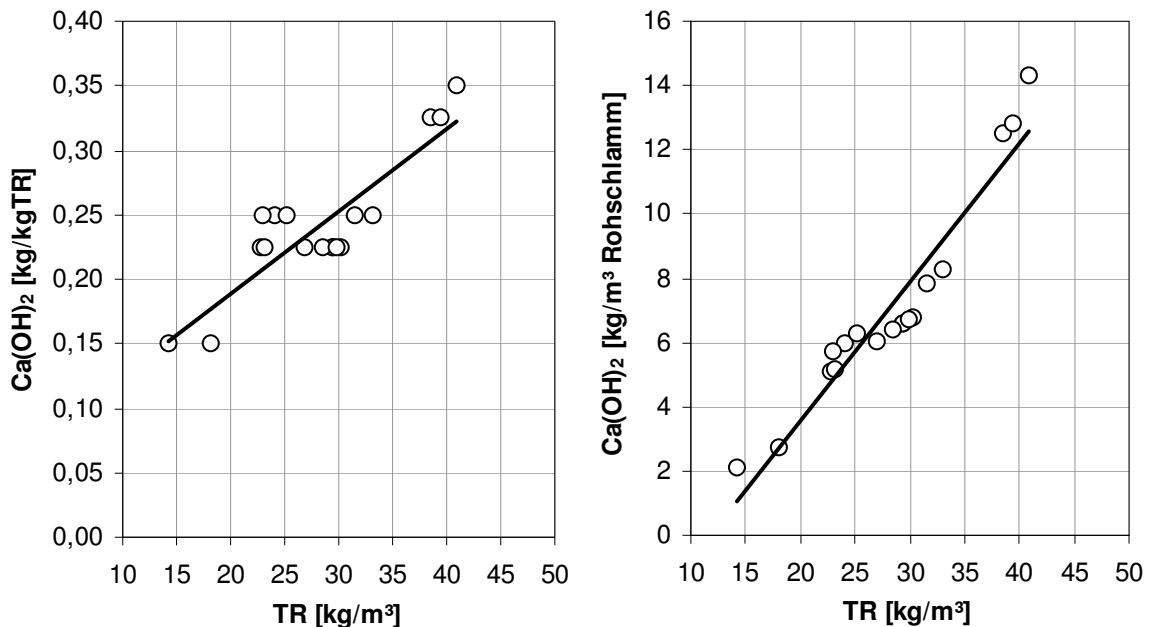


Bild 16: Löschkalkdosierung in Abhängigkeit des Feststoffgehaltes im Rohschlamm

Bei der Kalkhydratbehandlung sind insbesondere die folgenden Aspekte zu berücksichtigen:

- Verwendung qualitativ hochwertigen Kalks (hoher Anteil Ca, Mg(OH)₂);
- Zugabe des Löschkalks in Form von Kalkmilch zur Gewährleistung einer einfachen und guten Vermischung mit dem Klärschlamm;
- Kalkbeschaffung unter wirtschaftlichen und betrieblichen Gesichtspunkten, bei kleinen Anschlussgrößen ggf. Aufbereitung zu Kalkmilch vor Ort aus Brannt- oder Löschkalk;
- Vorhaltung von Reaktionsbehältern für eine chargenweise Beschickung mit wirksamem Mischaggregat sowie ausreichende Beckenvolumina für die Zwischenlagerung des Klärschlamm-Kalk-Gemisches zur Einhaltung der notwendigen Einwirkzeit
- Ermittlung exakter Dosierung für vorliegenden Schlamm im Labortest.

Weiterführende Hinweise zur Herstellung, Lagerung und Dosierung von Kalkmilch sind den Veröffentlichungen der deutschen Kalkindustrie (BV Kalk, 1986 und 1987) zu entnehmen.

2.1.2.8 Natürliche Entwässerungs- und Trocknungsverfahren

Die im Rahmen dieses Leitfadens betrachteten Verfahrenstechniken zur natürlichen Klärschlammvererdung und -trocknung umfassen die folgenden verfahrenstechnischen Ausführungen:

- Entwässerung im Trockenbeet mit Sand-Kies-Drainage, überdacht,
- Entwässerung im Schilf bepflanzten Trockenbeet (Klärschlammvererdung), offen, und
- solare Klärschlamm-trocknung in transparenten Leichtbauhallen mit 100 % solarer Trocknung ohne Fremdwärmezusatz.

Zielsetzung aller drei Verfahrenstechniken ist eine weitestgehende Reduzierung des Wassergehalts in vorentwässerten bzw. flüssigen Schlämmen durch Evaporation und Perkolation auf entsprechenden Trocknungsflächen. Sowohl unbehandelte als auch stabilisierte Klärschlämme sind geeignet, wobei mögliche Belastungen durch Geruchsemissionen und Insekten bei der Verwendung von Rohschlämmen zu berücksichtigen sind.

Die relevanten Größen für die Dimensionierung der Entwässerungs- und Trocknungsanlagen sind die Klärschlammmenge sowie die Feststoffflächenbelastung. Letztere gibt die jährliche Feststoffmasse an, die bis zum Erreichen eines vorgegebenen Trocknungsgrades auf eine Fläche aufgetragen werden kann. Entscheidend für den Wasseraustrag aus dem Schlamm ist die spezifische Verdunstungsleistung in Abhängigkeit der klimatischen Randbedingungen.

Unter Berücksichtigung der Entwässerungsziele gemäß Tabelle 5, der klimatischen Randbedingungen sowie anhand von in der Literatur beschriebenen Anlagen können die in Tabelle 15 zusammengefassten Empfehlungen zur Dimensionierung ausgesprochen werden. Der spezifische Wasseraustrag für die verschiedenen klimatischen Verhältnisse errechnet sich für die solare Trocknung aus der zu verdunstenden Wassermenge, für die unbepflanzten und Schilf bepflanzten Trockenbeete aus dem Wasseraustrag über Verdunstung und Drainage. Bei der Entwässerung im Schilfbeet wird zusätzlich noch der Transpirationsverlust der Pflanzen einbezogen, der bis zu 30% der insgesamt zu entziehenden Wassermenge ausmachen kann.

Tabelle 15: Empfohlene Feststoffflächenbelastung und zugehörige spezifische Verdunstungsleistung für natürliche Entwässerungsverfahren

		Einfaches Trockenbeet	Schilf be- pflanztes Beet	Solare Trocknung ³⁾
kaltes Klima				
G = 8.400 J/(cm ² ·a), T _{aM} = -2 °C				
B _{TR,aM}	[kg/(m ² ·a)]	15-20	Nicht empfohlen	70-90
Wasseraustrag	[Mg _{H₂O} /(m ² ·a)]	0,25-0,3		0,25-0,35
gemäßigtes Klima				
G = 12.300 J/(cm ² ·a), T _{aM} = +8 °C				
B _{TR,aM}	[kg/(m ² ·a)]	20-50	20-60 ¹⁾	130-160
Wasseraustrag	[Mg _{H₂O} /(m ² ·a)]	0,45-0,7	0,4-0,9	0,45-0,64
tropisches Klima				
G = 17.500 J/(cm ² ·a), T _{aM} = +25 °C				
B _{TR,aM}	[kg/(m ² ·a)]	50-80	60-120 (-250 ²⁾)	230-300
Wasseraustrag	[Mg _{H₂O} /(m ² ·a)]	0,8-1,2	1,1-1,9	0,8-1,2

1) Beschickung während Vegetationsperiode; 2) für die Verwendung von Fäkalschlamm; 3) bei 100% Solarenergie ohne Fremdwärmeeinsatz

Die Feststoffflächenbelastung wird bei der Vererdung durch die Gewährleistung eines vitalen Schilfbestandes limitiert und ist stark von der Schlammart abhängig. Zu berücksichtigen ist insbesondere die Stickstofffracht, die in das Beet eingetragen wird. Nach Untersuchungen von Jordan (2005) sollte die jährliche Stickstofffracht B_{N,aM} 0,5 kg/(m²·a) und die Stickstoffkonzentration S_{N,Z} 50-200 mg/l nicht überschreiten. Zu hohe Stickstofffrachten haben eine Herabsetzung der Standfestigkeit des Schilfes zur Folge und begünstigen den Befall von Parasiten (Läusen). Damit sind die einzubringenden Frachten insbesondere für anaerob stabilisierte Schlämme bedeutend geringer als für andere Schlammarten.

Die Feststoffflächenbelastung bei der solaren Klärschlamm-trocknung kann insbesondere in kalten und gemäßigten Klimaten durch den Einsatz von Fremdenergie (z.B. durch Abwärmenutzung) entscheidend verbessert werden. Setzt man einen Fremdwärmeanteil von 50 bis 60 % fest, so verdoppelt sich die spezifische Verdunstungsleistung und somit auch die in Tabelle 15 dargelegte Feststoffflächenbelastung.

Bei natürlichen Trocknungsvorgängen nicht stabilisierter Schlämme können im Zuge aerober und anaerober Abbauprozesse während der Behandlungszeit organische Schlamminhaltsstoffe um 10 bis 15 % reduziert werden. Insbesondere in Klimaten mit hoher Solarstrahlung und hoher UV-Intensität des Sonnenlichts findet eine natürliche Desinfektion des Materials mit Reduktionsraten des Indikators *E.Coli* um 1-2 log₁₀-Einheiten statt. Eine uneingeschränkte landwirtschaftliche Verwertung des getrockneten Klärschlammes ist nach seuchenhygienischen Kriterien allerdings nicht

möglich. Eine weitergehende Desinfektion bei der Trocknung biologisch stabilisierter Schlämme ist im Einzelfall zu prüfen.

Zu berücksichtigen ist, dass insbesondere warme Temperaturen die Entwicklung im Schlamm schlüpfender Fliegen begünstigen, wenn die Anlagen zur natürlichen Klärschlammmentwässerung offen betrieben werden. Eine vorhergehende Stabilisierung, sowie eine Abdeckung der Trocknungsflächen gegen Niederschläge und somit Wiederbefeuchtung des Klärschlammes können dazu beitragen, Insektenplagen zu verhindern.

Bei der Langzeitlagerung unbehandelter entwässerter Schlämme, ist zu beachten, dass eine Trocknung auch langfristig nur in oberflächennahen Schichten stattfinden kann. Im Inneren des Materials können weiterhin vor allem anaerobe Abbauprozesse stattfinden, die zum einen zur Herabsetzung der Standsicherheit im Haufwerk führen können, zum anderen zur Freisetzung klimaschädlichen Methans beitragen. Eine Langzeitlagerung unbehandelter entwässerter Klärschlämme ist daher nicht zu empfehlen.

2.1.2.9 Verfahrensbewertung

Die Auswahl geeigneter Klärschlammbehandlungsverfahren richtet sich insbesondere aus wirtschaftlichen Gründen nach der Anschlussgröße der Kläranlage. In Bild 17 sind die Einsatzbereiche der betrachteten Verfahrenstechniken existierender Anlagen sowie eigene Empfehlungen dargestellt.

Eine qualitative Abwägung der Vor- und Nachteile der einzelnen Verfahren unter Berücksichtigung der übergeordneten Stabilisierungsziele, der landwirtschaftlichen Verwertbarkeit des Produktes und der Behandlungskosten ist der folgenden Matrix (Bild 18) zu entnehmen.

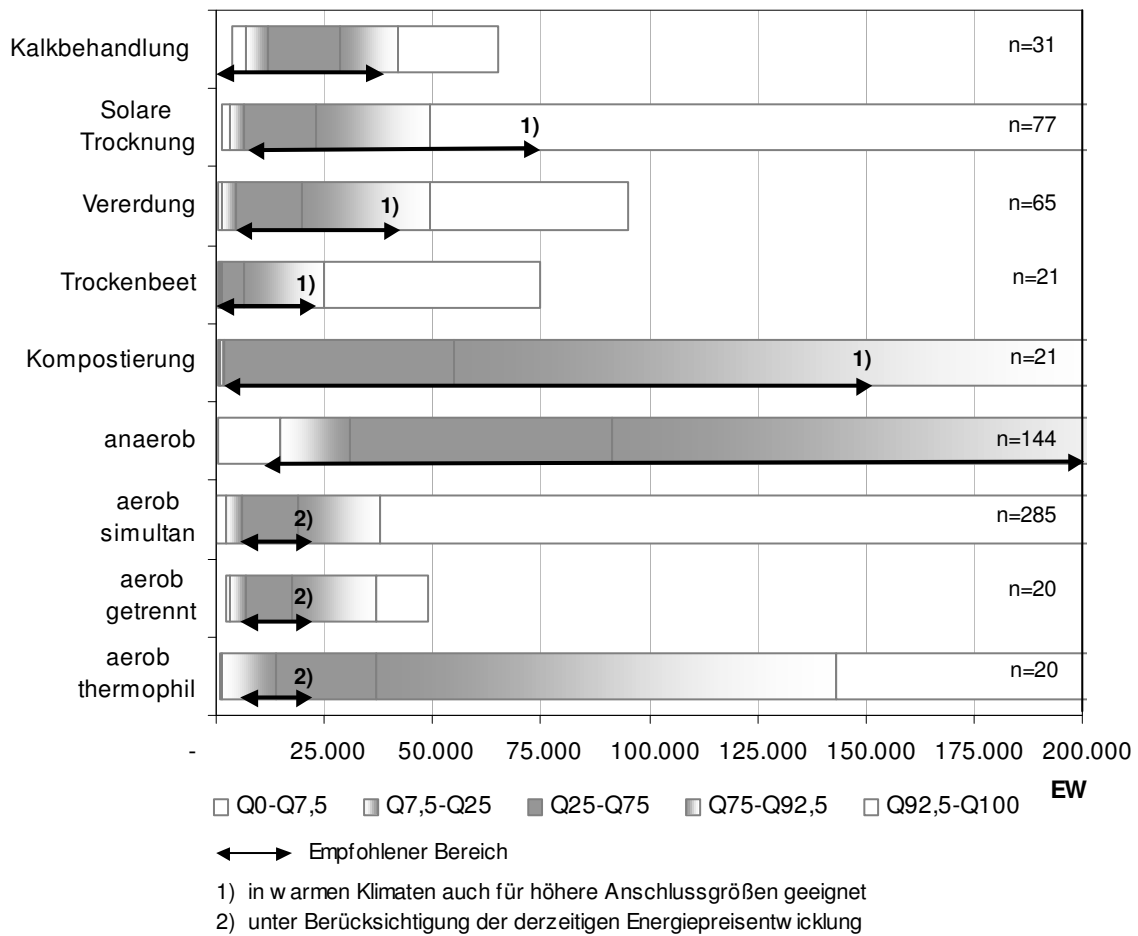


Bild 17: Einsatzbereiche der Klärschlammbehandlungsverfahren in Deutschland (nach Quartilen) und empfohlene Anschlussgrößen

Bewertung		Reduktion von Masse und Volumen	Reduktion pathogener Mikroorganismen	Reduktion von Gerüchen	Pflanzenverträglichkeit nach BGK-Kriterien 1)	Verbesserung der Entwässerbarkeit	Energieproduktion	Belastung des Schlammswassers	Anspruch an das Betriebspersonal	Investitionen	Betriebskosten incl. Energie
flüssig	getrennt aerob	o	o	o	o	-		o	o	o	+
	aerob thermophil	o	+	o	+	-		o	o	+	+
	anaerob	o	o	+	o	+	+	+	+	+	o
	Löschkalkbehandlung	--	+	-	+	+		o	-	-	-
	Vererdung	o	-	o	o			o	-	o	-
	Trockenbeetentwässerung	+	o	o	o			+	-	-	-
entwässert	Kompostierung	+	+	-	+				o	o	o
	Branntkalkbehandlung	--	+	--	+				-	o	-
	Solare Trocknung	+	o	o	o				o	o	o
	Langzeitlagerung	o	-	-	-				-	-	-

1) BGK, 1998

Bild 18: Matrix zur Abwägung der Vor- und Nachteile einzelner Behandlungsverfahren

2.1.2.10 Literatur

- ATV. 1996. ATV-Handbuch Klärschlamm, 4. Auflage Ernst und Sohn Verlag, Berlin.
- BGK (Bundesgütegemeinschaft Kompost). 1998. Methodenbuch zur Analyse von Kompost, 4. Auflage Eigenverlag Köln.
- BGK (Bundesgütegemeinschaft Kompost). 2007. Düngewirkung von Stickstoff aus Kompost. Humuswirtschaft und Kompost aktuell – Informationsdienst der Bundesgütegemeinschaft Kompost, 05/2007.
- Braha, A., Groza, G. 2006. Moderne Abwassertechnik – Erhebung, Modellabsicherung, Scale-Up, Planung. Wiley-VCH, Weinheim.
- Breitenbücher, K. 1983. Aerob-thermophile Stabilisierung von Abwasserschlämmen. Ergebnisse verfahrenstechnischer Untersuchungen zur umweltfreundlichen Aufbereitung und Verwertung.
- Buhr, H.O., Andrews, J.F. 1977. The thermophilic anaerobic digestion process. Wat. Res. Vol. 11, pp. 129-143.
- BV Kalk. 1986 Herstellung und Dosierung von Kalkmilch. 2. Auflage, Bundesverband der Deutschen Kalkindustrie, Köln.
- BV Kalk. 1987. Technik der Nassschlammmentseuchung mit Kalkmilch. Bundesverband der Deutschen Kalkindustrie, Köln.
- CIWEM. 1996. Sewage Sludge – Conditioning, dewatering, thermal drying and incineration. Handbook of UK Wastewater Practice. Lavenham Press, Sudbury.
- Demharter, W. 1987. Zur aeroben Abwasser- und Schlammbehandlung bei meso- und thermophilen Temperaturen – Temperaturabhängigkeit der Abbauleistung und Zusammensetzung der thermophilen Mikroflora.
- Fair, G.M., Moore, E.W. 1937. Sewage Research – Observations on the digestion of a sewage sludge over a wide range of temperatures. Sewage Works Journal, Vol. 9, No. 1, pp. 3-5.
- Huang, Q., Chen, T., Huang, Z. 2005. Ambient air temperature effects on the temperature of sewage sludge composting process. Journal of Environmental Sciences, Vol. 17, 6 pp 1004-1007.
- Imhoff, K-R. 1979. Taschenbuch der Stadtentwässerung. 30. Auflage, Oldenbourg Verlag, München.
- Imhoff, K.-R. 1984. Die neue Schlammliste, Dokumentation und Schriftenreihe der ATV aus Wissenschaft und Praxis, Band 11: Schlammbehandlung und Schlambeseitigung, pp. 29-33.
- Jaworski, N., Lawton, G.W., Rohlich, G.A. 1961. Aerobic Sludge Digestion. International Journal of Water Pollution, No. 4, pp.106-114.
- Jordan, R. 2005. Vegetative Behandlung anaerob stabilisierter Klärschlämme. Dissertation TU Braunschweig.
- Kassner, W. 1980. Kosten der weitergehenden Klärschlammaufbereitung zu Verwertungsprodukten. Landwirtschaftliche Verwertung Documentation EAS-Seminar Basel, Kap. 4.5, pp 1-12.

- Kempa, E.S. 1969. Beitrag zur Frage der aeroben Schlammstabilisierung. In: Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Universität Dresden 16, Heft 4, pp. 1055-1060.
- Koers, D.A., Mavinic, D.S. 1977. Aerobic digestion of waste activated sludge at low temperatures, in: Research Journal of the Water Pollution Control Federation, 1977, Vol. 49, pp. 460-468.
- LAGA. 1995. Merkblatt M 10: Qualitätskriterien und Anwendungsempfehlungen für Kompost, Müllhandbuch Kennziffer A6856, Lfg. 3/95.
- Loll, U. 1974. Neue Aspekte zur getrennten aeroben Schlammstabilisation. In: Korrespondenz Abwasser, No. 6, pp. 135-140.
- Ludovice, M. 2007. Sludge Stabilization. In: C.V. Andreoli, M. von Sperling, F. Fernandes (Hrsg.) Biological Wastewater Treatment Series, Vol. 6, Sludge Treatment and Disposal. IWA Publishing London, pp 48-75.
- Meyer, U. 1995. Vergleich der zentralen und dezentralen Kompostierung von Bioabfall, Müllhandbuch Kennziffer A5740, Lfg. 8/95.
- Morgan, S.F., Gunson, H.G., Littlewood, M.H., Winstanley, R. 1994. Aerobic thermophilic digestion of sludge using air. In: A.M. Bruce, Editor, Sewage Sludge Stabilization and Disinfection, Ellis Horwood Limited, Chichester, pp. 278-292.
- Müller-Neuhaus, G. 1971. Untersuchungen über die getrennte Schlammstabilisierung und Folgerungen für die Praxis. In: 2. Abwassertechnisches Seminar – Ausgewählte Kapitel zur Technik der Abwasserreinigung, Berichte aus dem Institut für Wasserwirtschaft und Gesundheitsingenieurwesen, Technische Universität München, Nr. 5, , pp. 183-214.
- Peschen, N., Matthes, B. Schuster, G., Wolf, P. 1985. Hinweise zur Technik der Nachbehandlung von Klärschlamm mit Feinkalk. Bundesverband der Deutschen Kalkindustrie, Köln.
- Pinto, M.T. 2007. Pathogen removal from sludge. In: C.V. Andreoli, M. von Sperling, F. Fernandes (Hrsg.) Biological Wastewater Treatment Series, Vol. 6, Sludge Treatment and Disposal. IWA Publishing London, pp 120-148.
- Rödiger, H. Rödiger, M., Kapp, H. 1967. Anaerobe alkalische Schlammfäulung. 4. Auflage, Oldenbourg, München.
- Rüffer, H. 1966. Untersuchungen zur Charakterisierung aerob biologisch stabilisierter Schlamme. In: Vom Wasser, 1966, pp.254 – 282.
- Schreiber-Rothschild, R. 1980. Hygienische Untersuchungen bei der Kalkkonditionierung von Klärschlamm. Dissertation Universität Hohenheim.
- Soliman, M.F.A.M. 2004 Studies on aerobic sewage sludge stabilisation processes – influence of temperature and feeding mode. In: Hot climate bioconversions, IUT Mitteilungen, Band 3.
- Strauch, D., Schreiber-Rothschild, R. 1980. Mikrobiologische Untersuchungen zur Hygienisierung von Klärschlamm. 8. Mitteilung Bundesverband der Deutschen Kalkindustrie, Köln.
- v. Sperling, M., Goncalves, R.F. 2007. Sludge Characteristics and Production. In: C.V. Andreoli, M. von Sperling, F. Fernandes (Hrsg.) Biological Wastewater

Treatment Series, Vol. 6, Sludge Treatment and Disposal. IWA Publishing London, pp 4-30.

Wecker, A. Weber, N., Schirm, V. Philipp, W. Böhm, R. 2003. Entwicklung einer sicheren Methode zur Biobfallhygienisierung mit Kalk. WLB Wasser Luft Boden, 04/2003 pp. 49-52.

Weisbrodt, W. 1974. Aerobe Behandlung von Primärschlamm. Kommissionsverlag R. Oldenbourg, München.

Richtlinien und Technisches Regelwerk:

AbfKlärV (1992) Klärschlammverordnung. BGB1 I, S. 2298. Stand 20.10.2006.

DüMV (2008) Verordnung über das Inverkehrbringen von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln. BGB1 I, S. 153, Stand 06.02.2009.

86/278/EWG (1986) Richtlinie des Europäischen Rates vom 12.06.1986 über den Schutz der Umwelt und insbesondere der Böden bei der Verwendung von Klärschlamm in der Landwirtschaft.

40 CFR Part 503 (1993) Part 1: Use or Disposal of Sewage Sludge Biosolids, Part II: Land Application of Biosolids, Part III: Surface Disposal of Biosolids, Part IV: Incineration of Biosolids. US EPA, Washington D.C.

WHO (2006) Guidelines on Safe Use of Wastewater, Excreta and Greywater, Vol. 4: Excreta and Greywater use in Agriculture. WHO Press, Genf.

DWA-A 201 (2005) Grundsätze für Bemessung Bau und Betrieb von Abwasserteichen. Arbeitsblatt, Stand 08/05. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall, Hennef.

ATV-DVWK-M 363 (2002) Herkunft, Aufbereitung und Verwertung von Biogasen, Stand 08/02. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall, Hennef.

ATV-DVWK-M 366 (2000) Maschinelle Schlammmentwässerung, Stand 10/00. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall, Hennef.

ATV-DVWK-M 368 (2003) Biologische Stabilisierung von Klärschlamm, 04/03.

ATV-DVWK-M 376 (2006) Sicherheitsregeln für Biogasbehälter Stand 10/06. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall, Hennef.

ATV-DVWK-M 379 (2004) Klärschlamm-trocknung, Stand 02/04. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall, Hennef.

DWA-M-381 (2007) Eindickung von Klärschlamm, Stand 10/07. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall, Hennef.

DWA-M-383 (2008) Kennwerte der Klärschlammmentwässerung, Stand 10/08. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall, Hennef

2.1.3 Länderberichte

In den folgenden Kapiteln werden die wichtigsten Ergebnisse der Länderstudien zur Abwasser- und Klärschlammbehandlungs- und Verwertungssituation in Ländern warmer und kalter Regionen vorgestellt.

2.1.3.1 Ägypten

Klimageographische Randbedingungen

Ägypten nimmt mit rund 1 Mio. km² eine Fläche fast dreimal so groß wie Deutschland bei einer vergleichbaren Einwohnerzahl von 81 Mio. ein und grenzt im Norden an das Mittelmeer, im Osten an das Rote Meer, den Gazastreifen und Israel, im Westen an Libyen und im Süden an den Sudan. Die Lebensader Ägyptens ist der Nil, der auf 1.550 km Länge das Land von Süden nach Norden durchfließt, bevor er durch das 24.000 km² große Nildelta in das Mittelmeer mündet. Abgesehen von wenigen Oasen und kleinen Häfen an den Küsten konzentriert sich die Besiedlung und auch die Landwirtschaft am fruchtbaren Nilufer. Westlich des Nils schließt sich die Lybische Wüste, östlich die Arabische Wüste an.

Ägypten liegt im nordafrikanischen Trockengürtel mit sehr wenigen Niederschlägen und hohen saisonalen und täglichen Temperaturunterscheiden. Die Tagesmitteltemperatur beträgt im Januar 20 bis 24 °C, im Juli 31 bis 35 °C. Nur der nördliche Küstenstreifen und das Nildelta sind mit Winterniederschlägen zwischen 100 und 200 mm mediterran beeinflusst (vgl. Bild 19).

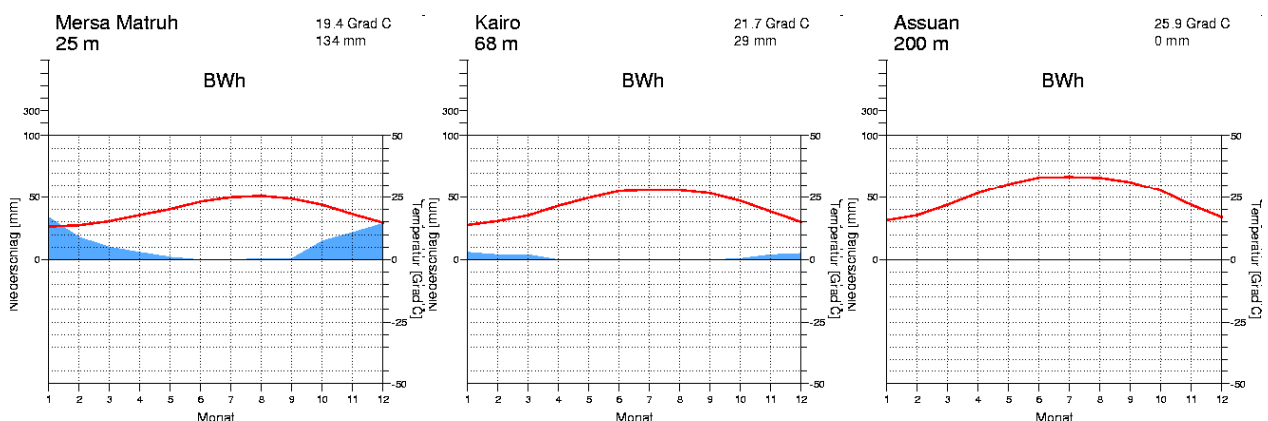


Bild 19: Klima in Mersa Matuh (Nordägypten), Kairo (Zentralägypten) und Assuan (Südägypten), Trockenklima arid (Mühr, 2007)

Landwirtschaftlich nutzbare Fläche beschränkt sich auf die Oasen und das Niltal mit z. T. Jahrtausende alten Anbau- und Bewässerungsmethoden, die insgesamt 3 % der Staatsfläche ausmacht. Typische Anbauprodukte sind Hirse, Kohl und Saubohnen, die im Zuge der Umorientierung von Subsistenz- zu Exportwirtschaft den Ge-

treideanbau verdrängten. Problematisch für die Landwirtschaft im Niltal ist die seit Bau des Assuan-Staudamms ausbleibende Nilschwemme, die den Boden unfruchtbarer werden lässt, dafür aber mehrere Ernten im Jahr zulässt. In der Ägyptischen Wüste werden hauptsächlich Baumwolle, Obst und Gemüse angebaut. Viehhaltung ist durch den Mangel an Weideflächen auf Futtermittelbau beschränkt.

Rechtliche Rahmenbedingungen

Die im folgenden genannten vier Hauptorganisationen sind für das Abwasser- und Klärschlammmanagement in Ägypten verantwortlich:

- National Organization for Potable Water & Sanitary Drainage (NOPWASD), verantwortlich für die Finanzierung, die Planung und Bemessung sowie die Ausführung von Projekten im Wasser- und Abwassersektor in ganz Ägypten außer der Städte Alexandria und Kairo,
- Executive Organization of Greater Cairo and Alexandria Water & Sewage (CAPWO), verantwortlich für Maßnahmen im Wasser-/Abwassersektor der Städte Kairo und Alexandria,
- Holding Company for Water and Wastewater (HCWW) und die untergeordneten Firmen, gegründet nach dem Presidential Decree No. 135, 2004, verantwortlich für private Wasser- und Abwasserbehandlungsanlagen und die
- Egyptian Water Regulatory Agency (EWRA), verantwortlich für die Qualitätskontrolle im Wasser-/Abwasserbereich.

Ägyptens gesetzlicher Rahmen für abwasserrelevante Fragestellungen ist das Law No. 93 von 1962 mit seinen zugehörigen Verordnungen (u.a. auch Festlegung von Einleiterstandards), sowie das 1994 verabschiedete Umweltschutzgesetz. Für die Verwendung von Klärschlämmen insbesondere in der Landwirtschaft wurde seit 1995 an einer Verordnung über eine sachgerechte Behandlung und eine umweltgerechte Klärschlammverwertung mit Schadstoffgrenzwerten (für Schwermetalle und pathogene Mikroorganismen) und Aufbringungsvorschriften gearbeitet, die 2001 (mit Änderungen in 2003) entsprechend verabschiedet werden konnte (Directive 254/2003). Nachfolgend sind in Tabelle 16 die Schwermetallgrenzwerte der Ägyptischen Standards, die an die strengen Vorschriften zur uneingeschränkten Verwertung der US EPA angelehnt sind, im Vergleich zu den Regelungen der EU dargestellt.

Tabelle 16: Schwermetallgrenzwerte [mg/kg TS] für die landwirtschaftliche Klärschlammverwertung in Ägypten und in der EU

Parameter	EU (86/278/EEC)	Ägypten (254/2003)
As	-	41
Cd	20-40	39
Cr	-	1200
Cu	1000-1750	1500
Pb	750-1200	300
Hg	16-25	17
Mo	-	18
Ni	300-400	420
Se	-	36
Zn	2500-4000	2800

Für eine ausreichende Desinfektion müssen die folgenden Kriterien eingehalten werden:

Tabelle 17: Seuchenhygienische Anforderungen an die Klärschlammqualität in Ägypten

Parameter	Grenzwert
Fäkalcoliforme	[MPN/g TS] < 1000
Salmonellen	[MPN/100 mL mit TS 4%] < 3
Wurmeier (Ascaris)	[n/100 mL mit TS 5 %] 1

Die nationalen Auflagen zur Klärschlammverwertung richten sich demnach primär an den z.T. sehr hohen Qualitätsanforderungen anderer Länder, ohne dass die lokalen Gegebenheiten und die reale Situation der Abwasser- und Klärschlammbehandlung in Ägypten berücksichtigt wurde. Infolgedessen sind hohe Investitionen nötig um die Kläranlagen in Ägypten derart aufzurüsten, dass sie gesetzlichen Ansprüchen genügen. Allerdings gibt es in Ägypten (bisher) noch kein etabliertes Qualitätsmanagement mit regelmäßigen Kontrollen und entsprechendem Vollzug, so dass, wie in vielen Entwicklungs- und Schwellenländern, eine große Diskrepanz zwischen den gesetzlichen Auflagen und der Realität herrscht.

Stand der Abwasserreinigung

Die Bevölkerung Ägyptens hat sich innerhalb der letzten 50 Jahre verdreifacht und wächst weiterhin jedes Jahr um ungefähr 1,5 Millionen Menschen. Die Gesamtbevölkerung wuchs von 22 Millionen im Jahr 1950 auf 80 Millionen im Jahr 2008 und wird wahrscheinlich bis 2026 auf über 96 Millionen ansteigen (Khalifa et al., 2008). Mit der

rapide wachsenden Bevölkerung und der industriellen Entwicklung ist auch das Schmutzwasseraufkommen gestiegen und es wird erwartet, dass es in der Zukunft weiter zunehmen wird. In den letzten 20 Jahren hat die ägyptische Regierung mehr als 24 Billionen US\$ in die Entwicklung von Wasserver- und Schmutzwasserentsorgung investiert und plant für die nächsten 10 Jahre Investitionen in Höhe von 20 Billionen US\$ (Soliman, 2005).

Mehr als 56 % der ägyptischen Bevölkerung (45 Millionen im Jahr 2007) lebt in ländlichen Regionen, in 4600 Dörfern, die hauptsächlich im Niltal und Nildelta liegen (Chemonics, 2006). Weniger als 10 % von ihnen sind an Abwassersammelsysteme und -aufbereitungsanlagen angeschlossen. Das Schmutzwasser der Haushalte in diesen ländlichen Gebieten wird hauptsächlich primär in Septic Tanks behandelt (Emitwallie et al., 2004). 44 % der ägyptischen Bevölkerung (35 Millionen im Jahr 2007) leben in 217 städtischen Agglomerationen. Bis 2004 waren nur 57% davon an Abwassersammelsysteme und -aufbereitungsanlagen angeschlossen.

Während einer Besichtigung und Feldstudie von Ägyptens Kläranlagen im Jahre 2008 wurde eine Datenerhebung auf Grundlage einiger Quellen, wie z.B. der Holding Company for Water and Wastewater (HCWW), der National Organization for Potable Water & Sanitary Drainage (NOPWSD) und den Kläranlagen in Kairo und Alexandria durchgeführt. Insgesamt behandeln die 303 Kläranlagen in Ägypten täglich 11,85 Mio. m³ Abwasser. Die Ausbaugrößen der Kläranlagen sind proportional zu den Größen der entsprechenden Städte. Allgemein sind mehr als 78 % der Kläranlagen relativ klein (< 30.000 m³/d) und stellen 21,5 % der gesamten Abwasserbehandlungskapazität. Konventionelle Belebtschlammssysteme repräsentieren ca. 63 % der gesamten Behandlungskapazität, während aerobe Abwasserteiche 11,5 % der Kläranlagen ausmachen und 2,24 % der gesamten Abwasserbehandlungskapazität darstellen.

Die Eigenschaften des Abwassers variieren, abhängig von den Gewohnheiten der Bevölkerung, dem Klima, der sozialen und wirtschaftlichen Situation. Generell weisen die häuslichen Abwässer in den ländlichen Gebieten Ägyptens höhere Nährstoffkonzentrationen auf als die der städtischen Gebiete (Tabelle 18).

Tabelle 18: Charakterisierung des Schmutzwassers in urbanen und ländlichen Kläranlagen in Ägypten (Emitwallie et al. 2004)

Parameter		Ländliche KA (Durchschnitt)	Urbane KA (Durchschnitt)
BOD ₅	[mg/L]	508	309
COD	[mg/L]	1.113	567
NH ₄ ⁺	[mg/L]	61	40
PO ₄ ³⁻	[mg/L]	13,4	7,14
SO ₄ ²⁻	[mg/L]	75,7	65
Cl ⁻	[mg/L]	412	237

pH	[-]	7,8	7,4
----	-----	-----	-----

Kosten der Abwasserbehandlung

Tabelle 19 zeigt beispielhaft die monatlichen Betriebs- und Instandhaltungsbedingungen sowie die Kosten für vier Kläranlagen in Kairo. Die Kosten wurden gemäß den am ägyptischen Markt geltenden Preisen kalkuliert, die immer noch geringer sind als die international üblichen Preise, besonders, was die Kosten für Energie und Arbeitskräfte betrifft.

Tabelle 19: Monatliche Betriebs- und Instandhaltungsbedingungen und Kosten in Kairos Kläranlagen in 2008 (NOPWSD und HCWW, 2008)

Kläranlage	Kapazität [10 ³ m ³ /d]	Betriebs- und Instandhaltungsbedingungen			Betriebs- und Instandhaltungskosten		
		Arbeitskraft [h/d]	Elek. Energie [10 ³ kWh/d]	Diesel [L/d]	Arbeitskraft [US\$/Monat]	Elek. Energie [US\$/Monat]	Material [US\$/Monat]
Helwan	440	1.760	59,8	1000	15.789	49.298	3.474
Zenien	300	2.048	84,2	200	54.886	67.281	3.658
Shobera	580	2.244	65,0	84	41.494	70.175	7.596
Al Gabel Asfer	1.200	4.624	342,7	4.300	285.965	91.228	193.697

Der durchschnittliche elektrische Energiebedarf für die Abwasserbehandlung in den Kläranlagen Kairos betrug 0,2 kWh/10³ m³ behandelten Abwassers während die durchschnittlich benötigte Arbeitskraft 4,64 h/10³ m³ betrug. Gemäß den im Jahr 2008 gültigen Marktpreisen in Ägypten betrug die durchschnittlichen Kosten für eine Einheit elektrischer Energie 0,02 US\$/kWh, für Arbeitskräfte 0,97 US\$/h und die gesamten Aufbereitungskosten 0,01 US\$/m³. Diese Werte sind abhängig von den monatlichen Betriebs- und Instandhaltungskosten. Kapitalkosten wurden nicht berücksichtigt.

Stand der Klärschlammbehandlung

Die in den gegenwärtig vorhandenen 303 Kläranlagen produzierte Klärschlammmenge wird auf 5.800 Mg TS/d geschätzt (NOPWSD und HCWW, 2008), bzw. 0,48 kg/m³ behandelten Abwassers. Verglichen mit typischen Werten aus der Literatur erscheint die Klärschlammproduktion überdurchschnittlich hoch (Spinosa et al., 2001; Lee et al., 2006; Ahn und Chol, 2005). Anhand von Ergebnissen vorausgegangener Studien zur Klärschlammmenge (JBICO, 2007; AFESD, 2007; METAP, 1995) und die sich gemäß deutschen und amerikanischen Standards (ATV-DVWK A131, 2000; Metcalf und Eddy, 2003) ergebenden spezifischen Produktionsraten, wird davon ausgegangen, dass die Klärschlammproduktion aus Belebtschlammanlagen 0,225 kg TS/m³

behandelten Abwassers liegt. Die Produktionsrate anderer Behandlungstechnologien wird laut der Literatur mit 0,05-0,22 kg/m³ angenommen (ATV-DVWK A131, 2000). Tabelle 20 bildet die geschätzte Menge des im Jahr 2008 in allen ägyptischen Kläranlagen produzierten Klärschlamm ab.

Tabelle 20: Geschätztes Aufkommen von getrocknetem Klärschlamm aller Kläranlagen in Ägypten im Jahr 2008

Art der Kläranlage	Anzahl der Kläranlagen	Schlammproduktion [kg/m ³]	Kapazität [10 ³ m ³ /d]	Geschätzte Klärschlammmenge (50 % TS) ¹⁾	
				[Mg/d]	[m ³ /d]
Belebtschlammverfahren	97	0,225	6.703	1.508	2.793
Oxidationsgraben	47	0,225	833	187	347
Tropfkörper	9	0,22	291	64	119
Langzeitbelegung	17	0,1	170	17	31
Unbelüfteter Abwasserteich	35	0,05	266	13	25
Belüftete Teichanlage	4	0,1	197	20	36
Vorklärung	22	0,15	2.021	303	561
Andere ²⁾	72	0,2	1.372	274	508
Total	303		11.853	2.387	4.421

1) Annahme: die durchschnittliche Dichte des trockenen Schlammes beträgt 1,08 t/ m³.

2) Andere: Typen von Kläranlagen, von denen Daten über die Behandlungssysteme fehlen

Für die Zukunft wurde die Schlammproduktion der Kläranlagen in Ägypten bis ins Jahr 2020 auf Grundlage der Entwässerungspläne ägyptischer Gemeinden und der in Tabelle 20 dargestellten Klärschlammaufkommen geschätzt (vgl. Tabelle 21).

Tabelle 21: Produzierte und prognostizierte Menge Klärschlamm in Ägypten von 2004 bis 2020

Jahr	Kapazität behandelten Schmutzwassers [10 ³ m ³ /d]	Geschätztes Klärschlammaufkommen in Ägypten			
		[Mg/d]	[Mg/a]	[m ³ /d]	[m ³ /a]
2004	11.000	2.211	795.960	4.094	1.474.000
2008	11.853	2.382	857.683	4.412	1.588.302
2020	16.000	3.216	1.157.760	5.956	2.144.000

In der Vergangenheit wurde der produzierte Klärschlamm überwiegend ohne jegliche Behandlung nach einer Eindickung auf 4-6 % TS vor allem in einfachen Trockenbetten auf 40-60 % TS getrocknet. Die Entwässerungszeit beträgt im Sommer norma-

erweise 25 Tage und im Winter 40 Tage. Bevor der Klärschlamm weiterverwendet wird, wird er für einen Zeitraum von 1,5 bis 6 Monaten, je nach Wetterverhältnissen und verfügbarer Lagerfläche, gelagert. Der getrocknete Schlamm wird hauptsächlich in der Landwirtschaft verwendet, seltener auch in Deponien gelagert. Da jedoch der Klärschlamm aufgrund fehlender Behandlung weder den nationalen ägyptischen noch den internationalen Standards für die landwirtschaftliche Verwertung entspricht, werden gegenwärtig vor allem in Kairo und Alexandria, in deren Umfeld die größten Kläranlagen des Landes mit einer Klärschlammproduktion von ca. 50 % des gesamten Schlammanfalls in Ägypten liegen, vermehrt Maßnahmen zur weitergehenden Stabilisierung des Schlammes realisiert. Im folgenden wird exemplarisch die Schlammbehandlung auf ausgewählten Kläranlagen dieser Regionen dargestellt.

Schlammfäulung Kläranlage Al Gabel Asfer

Die Kläranlage Al Gabel Asfer mit einer Behandlungskapazität von gegenwärtig 1,8 Mio. m³/d (bis 2020 von 3 Mio. m³/d) ist die größte Kläranlage Ägyptens. Der anfallende Klärschlamm wird unter mesophilen Bedingungen gefault. Aufgrund der guten Betriebserfahrungen insbesondere zur Energiegewinnung und -verwertung hat die anaerobe Schlammstabilisierung Vorbildcharakter für andere großen Kläranlagen in den Großstädten. Bild 20 zeigt ein Ablaufdiagramm der Klärschlammbehandlung und -verwertung auf der Kläranlage von Al Gabel Asfer.

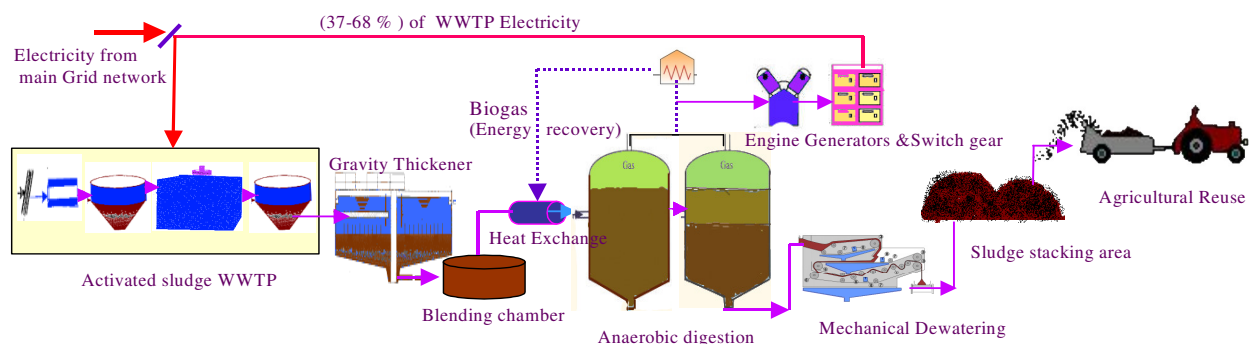


Bild 20: Klärschlammbehandlung auf der KA Gabel Al Asfer

Der Rohschlamm wird in 16 Schwerkrafteindicker mit einem Volumen von jeweils 3.200m³ und 3 Schwerkrafteindicker mit einem Volumen von jeweils 2.500 m³ eingedickt (12.500 m³/Tag, Konzentration 4% TS) und für eine Aufenthaltsdauer von 20 Tagen in einer ersten Stufe behandelt (20 anaerobe Faulbehälter mit einem Volumen von jeweils 11.000 m³ und 8 Faulbehälter mit jeweils 9.750 m³). Anschließend wird der Schlamm für eine Aufenthaltszeit von 7 Tagen in einen zweiten Faulbehälter (10 Faulbehälter mit einem Volumen von jeweils 7.750 m³ und 2 Faulbehälter mit jeweils 8.752 m³) ausgefault. Der Faulschlamm wird mechanisch auf 23-30 % TS entwässert (30 Siebbandpressen mit einer Kapazität von jeweils 23 m³/h und 12 Anlagen mit

einer Kapazität von jeweils 21 m³/h). Der entwässerte Schlamm (450 t/d) wird zum weiteren Trocknen auf 40-60 % TS auf Lagerflächen ausgebracht, bevor er in der Landwirtschaft verwendet wird. Die große Menge an anfallendem Biogas wird augenblicklich für den Betrieb von Warmwasserboilern eingesetzt, die zum Heizen des Klärschlammes in den ersten Faulbehältern verwendet werden. Gleichzeitig wird das Gas zur Stromerzeugung genutzt, so dass 37-68% des Energiebedarfs der Kläranlage gedeckt werden können.

Klärschlammkompostierung Kläranlage Al Berka, Kairo und auf der 9N-Anlage Alexandria

Das Kompostieren von getrocknetem Klärschlamm in Mieten ist ein weiteres Szenario zur Klärschlammbehandlung in Ägypten, das bereits auf der Kläranlage Al Berka in Kairo und der 9N-Anlage in Alexandria verwendet wird (Bild 21). Zur Optimierung des C-N Verhältnis und der Gewährleistung eines ausreichenden Luftporenvolumens in der Miete werden dem Klärschlamm organische Strukturmittel hinzugefügt, z.B. Reisstroh auf der Kläranlage von Al Berka oder bereits fertiger Kompost in der 9N-Anlage. Aufgrund der günstigen klimatischen Bedingungen in Ägypten (trockenes und warmes Klima während des gesamten Jahres) weist der produzierte Kompost eine hohe seuchenhygienische Qualität auf (AFESD, 2007).

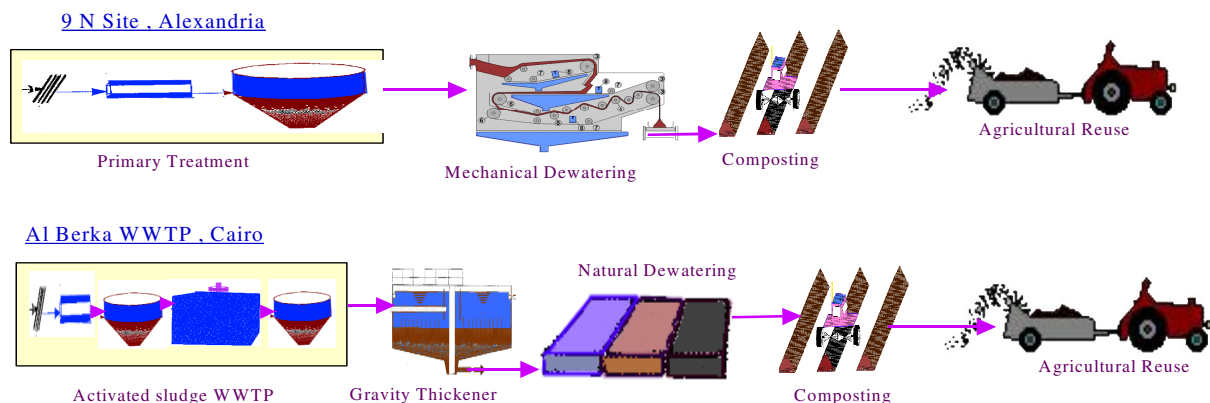


Bild 21: Klärschlammbehandlung in Al Berka und auf der 9N-Anlage

Die Mietenkompostierung in Al Berka wurde 2007 im Rahmen eines Pilotprojektes initialisiert um die 140 m³/d getrockneten Klärschlamm, der auf den Trockenbeeten der Kläranlage anfällt, zu behandeln. In insgesamt 12 Mieten wurde der Klärschlamm zusammen mit Reisstroh in unterschiedlichen Mischungsverhältnissen über drei Monate kompostiert. Das optimale Mischungsverhältnis waren vier Teile Klärschlamm (25% TS), ein Teil bereits fertiger Kompost (60% TS) und ein Teil geschreddertes Reisstroh (85% TS). Für die Zukunft ist geplant, die Mieten zu vergrößern und die Kompostierungsdauer auf vier bis acht Wochen zu verkürzen, der eine Nachlagerungsphase von 30-60 Tagen folgt. Entsprechend den Plänen der ägyptischen Re-

gierung und nach der Auswertung der endgültigen Ergebnisse des Pilotprojektes, soll die Kompostierung in Al Berka erweitert werden, so dass zukünftig 720 Mg/d Kompost aus dem Klärschlamm der Kläranlagen Al Berka, Shobera und Al Gabel Asfer produziert werden können (AFESD, 2007).

Die Hauptkläranlagen von Alexandria sind die Kläranlage Ost, mit einer aktuellen Abwasserbehandlungskapazität von 490.000 m³/d, und die Kläranlage West, mit einer Kapazität von 360.000 m³/d. In beiden Anlagen wird das Abwasser ausschließlich mechanisch gereinigt. Der Primärschlamm der in den beiden Kläranlagen anfällt (3.000 m³/Tag, mit einer Konzentration von 3,8-5,25 % TS), wird mechanisch unter Zugabe von Polymeren (2-4 kg/Mg TS) auf 580 Mg/d mit einer Feststoffkonzentration von 25-30 % entwässert. LKWs bringen den Schlamm über eine Distanz von 45 km zu der zentralen Kompostierungsanlage 9N, wo seit 1997 der gesamte Klärschlamm in Mieten südwestlich der Stadt Alexandria kompostiert wird. Die Mieten werden auf zwei Kompostierungsflächen (jeweils 0,29 km²) aufgehäuft, wo der getrocknete Schlamm mit bereits fertigem Kompost in einem Verhältnis von 1,5:1 in langen parallelen Reihen (jeweils 250 m Länge, 2-4,5 m Sohlbreite, 1-2 m Höhe) über 4-8 Wochen kompostiert wird. Alle 7 Tage wird das Material mit Hilfe einer speziellen Wendemaschine gewendet. Die Temperatur im Zentrum der Miete erreicht 55 bis 70 °C. Gegenwärtig werden dort 112.000 Mg/a Kompost produziert (JBICO, 2007).

Schlammteiche in Abu Rawash

Der Klärschlamm der Kläranlagen Zenin und Abu Rawash wird in Schlammteichen über ein bis vier Jahre gelagert. Während der Lagerung wird die organische Substanz im Klärschlamm unter anaeroben Bedingungen abgebaut und Krankheitserreger werden zerstört (Farrell et al., 2004).

Zenin & Abu Rawash WWTPs , Cairo

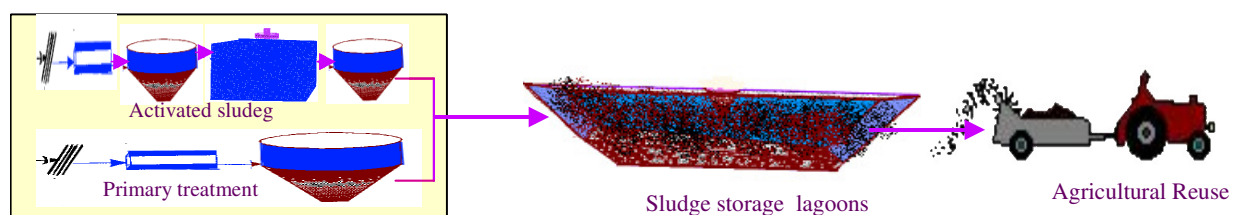


Bild 22: Klärschlammteiche für die Schlammbehandlung der KA Zenin und Abu Rawash

Der Primär- und Sekundärschlamm der Kläranlage Zenin (20.000 m³/d, mit einer Konzentration von 0,5 % TS) wird in die Hauptpumpstation der Kläranlage Abu Rawash gepumpt. Danach wird er mit dem Primärschlamm der ersten Klärstufe der Kläranlage Abu Rawash (1.560 m³/d, mit einer Konzentration von 4,7 % TS) gemischt. Anschließend wird der gemischte Klärschlamm durch eine Druckleitung mit einem Durchmesser von 800 mm über eine Distanz von 33,3 km zu den natürlichen

Schlammteichen (20 Teiche) gepumpt, die in einem 2,32 km² großen Wüstengebiet in der Region um Abu Rawash liegen (vgl. Bild 22).

Klärschlammverwertung in der Landwirtschaft

Statistische Daten zum Klärschlammverbleib aus ägyptischen Kläranlagen sind nicht erhältlich. Prinzipiell ist jedoch das Potential für eine landwirtschaftliche Verwertung vor allem von behandeltem Klärschlamm in Ägypten durchaus als positiv zu beurteilen. Für die Landwirte ist Klärschlamm eine günstige Alternative zu teuren Mineraldüngern. Es werden vermehrt Anstrengungen unternommen, Qualitätsstandards für die landwirtschaftliche Verwertung des Klärschlammes durchzusetzen und auch zu kontrollieren. Zwar ist im Allgemeinen der in den ägyptischen Kläranlagen produzierte Klärschlamm nicht hoch mit Schadstoffen, z.B. Schwermetallen belastet, trotzdem sind in einigen vereinzelt Fällen hohe Schwermetallbelastungswerte nachgewiesen worden. Diese Fälle stehen in Verbindung mit ordnungswidrigen Einleitungen aus Industriegebieten. In Tabelle 22 sind die auf den Kläranlagen in Kairo und Alexandria gemessenen sowie die nach ägyptischen Standards zulässigen Schwermetallkonzentrationen dargestellt. Es wird davon ausgegangen, dass die Konzentration von Schwermetallen in anderen Kläranlagen in Ägypten aufgrund niedrigerer Schadstoffkonzentrationen im Abwasser durch weniger Industrie geringer ist.

Tabelle 22: Schwermetallkonzentrationen im Klärschlamm [mg/kg] in Ägypten

Kläranlage	Referenz	Zn	Cu	Pb	Cd	Cr	As	Hg	Ni
Abu Rawash	Feldstudie	1.810	321	218	-	-	-	-	-
	Andere ¹⁾	113-4.639	83-515	38-509	4,6-50	779	4-25	0,5-15	25-212
Al Berka	Feldstudie	1370	497	15.800	-	-	-	-	-
	Andere ¹⁾	112-6.298	257-2.640	26-1.119	2,5-40	333	0,4-30	3,7	5-645
Al Gabel Asfer	Feldstudie	1640	639	1,320	-	-	-	-	-
	Andere ¹⁾	132-1,176	339-747	51-1.724	0,9-6,21	312-993	0,2-28	0,1-10	43-215
9N-Anlage Alex.	Feldstudie	804	220	384	-	-	-	-	-
	Andere ¹⁾	540-901	234-418	191-310	4-100	89	9	16	57-100
Shobera	Andere ¹⁾	232-604	63-322	195-1213	4,4	130	0,3	7,7	29
Helwan	Andere ¹⁾	155-8.097	119-988	50-302	15-312	172	-	-	23-188
Ägyptische Standards		2.800	1500	300	39	1.200	41	17	420

1) Andere: Ergebnisse von Analysen aus vorangegangenen Studien (METAP, 1999; AFESD, 2007; NOPWASD, HCWW, 2008).

Die Nährstoffgehalte in getrockneten Klärschlämmen der Kläranlagen in Ägypten gemäß den Ergebnissen von Probenanalysen und anderen vorausgegangenen Studien werden in Tabelle 23 gezeigt.

Tabelle 23: Nährstoffkonzentrationen [%] im Klärschlamm in Ägypten

Referenz	Organische Substanz	Stickstoff	Phosphor	Kalium
Feldstudie, 2008	57	3,16	1,13	0,28
AFESD, 2007	61	3,13	0,65	0,19
IIP, 2002	-	2,4	0,55	0,3
NOPWASD, 2000	61	4,11	1,6	0,55
METAP, 1999	45	1,7	0,8	0,3
Durchschnitt	56	2,90	0,95	0,32

Literatur

- AFESD (Arab Fund for Economic and Social Development). 2007. Sludge management project in Greater Cairo. Summary of technical report on composting facility in Al Berka site. Cairo, Egypt (unveröffentlicht).
- Ahn, Y.H., Chol, H.C. 2005. Municipal sludge management and disposal in South Korea: Status and new sustainable approach. *Water Science & Technology*, Vol.50, No 9, pp.245-53.
- Chemonics. 2006. Towards a sanitation strategy for rural Egypt. Concept report, World Bank, Egypt (Mitteilung von Dr. Ahmed Gaber, Chemonics, unveröffentlicht).
- Emitwallie, T.A., Al-Saraway, A., El-Sherbiny, M.F. 2004. Egyptian effluent standards for treated sewage: Evaluation and recommendations. In: *Efficient management of wastewater: Its treatment and reuse in water-scarce countries*, Kapitel 4, Springer- Publishing. Verlag Berlin Heidelberg.
- Farrell, J.B., Merrill, D.M., Schafer P.L. 2004. 'Producing class A biosolids with low cost technology treatment processes. IWA and WEF Publishing, London.
- IPP Consult. 2002. Sewage sludge conversion in Egypt, resume of final report. www.gtz.de/ecosan/download/ipp-Agypten.pdf, Stand 11/2008.
- Janus, T. 2007. Calculation of sludge production from aerobic ASP based on COD and BOD5: Comparison of methods and model validation". In *proc. 21th European Biosolids and Organic Resources Conference*, November 2007, Manchester, UK.
- JBICO (Japan Bank for International Cooperation). 2007. Wastewater projects in Greater Cairo, Egypt. Interim report (unveröffentlicht).
- Khalifa, M., DaVanzo, J., Adamson D.M. 2008. Population growth in Egypt: A continuing policy challenge. Center of Middle East public policy and CIA World Factbook. http://www.rand.org/pubs/issue_papers/IP183.1. Stand 11/2008
- Lee, D.J., Spinosa, L., He, P.J., Chen, T.B. 2006. Sludge production and management processes: Case study in China. *Water Science & Technology*, Vol 54, No 5, pp 189-196.

- METAP (The Mediterranean Environmental Technical Assistance Programme) 1995. Strategic management plan for agricultural use of sewage sludge in Cairo. Final report summary, Cairo, Egypt.
- Metcalf & Eddy. 2003. Wastewater engineering - treatment and reuse. Fourth edition, Mc. Graw-Hill, New York, USA.
- Mühr, B. 2007. Klimadiagramme von Mersa Metuh, Kairo und Assuan. <http://www.klimadiagramme.de/afrika/aegypten.html>, Stand 05/2007.
- Soliman, M.I. 2005. Improving the performance of public utilities. Ministry of housing, utilities and urban communities. The Water Week, World Bank, Washington. USA.
- Spinosa L., Vesilind, P.A. 2001. Sludge into biosolids: processing, disposal, utilization. IWA Publishing, London.

2.1.3.2 Vietnam

Klimageographische Randbedingungen

Vietnam liegt in Südostasien mit den Nachbarländern China, Laos und Kambodscha. Vietnams Fläche entspricht ungefähr derjenigen Deutschlands, die Einwohnerzahl beträgt 85,1 Mio. (Stand 2008). Das Land umfasst zwei fruchtbare Flussdeltas, im Süden das des Roten Flusses, im Norden das des Mekong, sowie die lang gezogene Festlandsküste im Osten mit bewaldeten Gebirgen und Hochebenen im Hinterland.

Das Klima in Nord und Südvietnam ist aufgrund der großen Nord-Süd-Ausdehnung sehr unterschiedlich. Im Norden herrscht warmgemäßigtes Klima mit einer kühleren Jahreszeit von November bis April, während der Süden tropisch mit ganzjährig hohen Temperaturen geprägt ist. Das Wetter wird durch zwei Monsune bestimmt. Der Nordost-Monsun im Winter zwischen Oktober und März bringt nasses und kaltes Wetter nördlich von Nha Trang, während es im Süden trocken und warm bleibt. Ab April/Mai bis Oktober bringt der Südwest-Monsun warme, feuchte Witterung und hohe Niederschläge über das ganze Land (Bild 23).

Die landwirtschaftliche Fläche Vietnams umfasst rund 7 Mio. ha. Reis (bis zu drei Ernten jährlich) ist das mit Abstand wichtigste Grundnahrungsmittel und wird auf rund 80 % der landwirtschaftlichen Nutzfläche, neben Hirse und Gemüse, vor allem im Mekongdelta angebaut. Die Viehhaltung spielt eine große Rolle. Es dominieren Schweine-, Büffel- und Rinderzucht.

Vietnam war bis vor wenigen Jahren ein fast ausschließlich landwirtschaftlich geprägtes Land. Bis heute sind in der Landwirtschaft 65 % der Arbeitskräfte Vietnams tätig, jedoch trägt dieser Sektor nur zu etwa einem Fünftel des BIPs bei. Für 2007 verzeichnete man einen Zuwachs von 3 bis 4 %, trotz zahlreicher Naturkatastrophen (DVG, 2009).

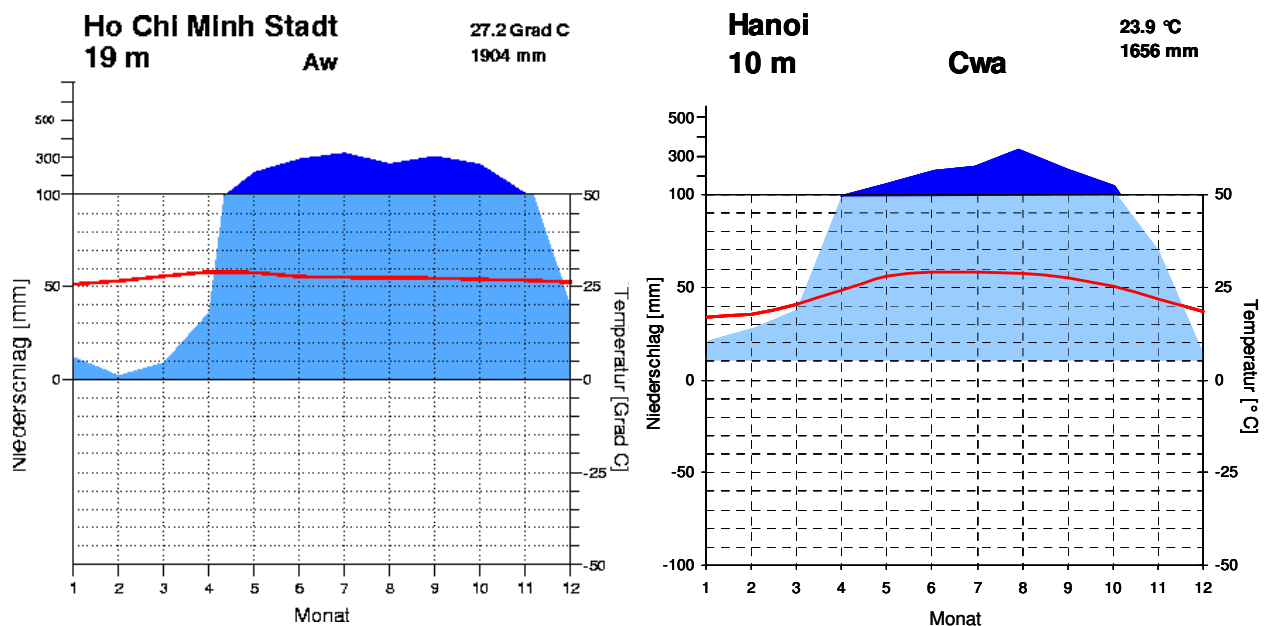


Bild 23: Klima in Südvietnam, tropisch (Ho Chi Minh City) und Nordvietnam, warmgemäßigt (links: Mühr, 2007, Datengrundlage Diagramm rechts: Rettensteiner et. al, 2009)

Rechtliche Rahmenbedingungen

In Vietnam sind mehrere Behörden für die Wasserver- und -entsorgung zuständig. Für die Abwasserentsorgung sind die Ministerien für Gesundheit und für Landwirtschaft und ländliche Entwicklung sowie das Bauministerium verantwortlich. Auf regionaler Ebene wurden Umweltämter eingerichtet, deren Aufgabe die Überwachung von Abwassereinleitungen und auch von Kläranlagen ist.

Umwelt- und Qualitätsstandards für das Wasser- und Abwassermanagement existieren seit Mitte der 90er Jahre (TCVN), werden allerdings nur dort, wo es die finanziellen Möglichkeiten und die technischen Verhältnisse zulassen, tatsächlich eingehalten. In neu geplanten, eigen- und fremdfinanzierten Projekten werden jedoch in der Regel die Standards der jeweiligen Institutionen oder aber diejenigen nach europäischem und amerikanischen Vorbild beachtet und umgesetzt (Rudolph, 2004).

In den TCVN von 1995 und 2000 sind sowohl Immissionsstandards für unterschiedliche Gewässertypen und Qualitätsstandards für Bewässerungswasser festgelegt als auch Emissionsstandards für kommunales und industrielles Abwasser enthalten. Tabelle 24 enthält Einleitergrenzwerte für Abwässer zur Einleitung in Gewässer mit unterschiedlichem Nutzungscharakter.

Tabelle 24: Einleitergrenzwerte nach vietnamesischem Standard TCVN

		Industrieabwasser, eingeleitet in Gewässer mit			Häusliches Abwasser, eingeleitet in Gewässer mit		
		Rohwasser-entnahme	Bade-wasser, Aquakultur	Besond. Genehmigung	Rohwasser-entnahme	Bade-wasser, Aquakultur	Besond. Genehmigung
BSB ₅	[mg/L]	50	40	30	30	30-50	200
CSB	[mg/L]	100	80	50	-	-	-
TS	[mg/L]	-	-	-	50	50-100	100
pH	[mg/L]	5,5-8,5	5,5-8,5	5,5-8,5	5-9	5-9	5-9
N _{ges}	[mg/L]	20	15	10	-	-	-
NO ₃	[mg/L]	-	-	-	30	30-50	-
P _{ges}	[mg/L]	6	5	4	-	-	-
PO ₄	[mg/L]	-	-	-	6	6-10	-
Total Coliforms	[MPN/100 mL]	3.000	3.000	3.000	1.000	5.000	10.000

Stand der Abwasserreinigung

Die fortschreitende Industrialisierung und Verstädterung Vietnams übt einen enormen Druck auf natürliche Ressourcen und die Umwelt aus. Die Ableitung ungeklärten häuslichen und industriellen Abwassers in Gewässer ist mittlerweile ein Hauptproblem für die Wasserversorgung. Die Konzentrationen an BSB₅, CSB, NH₄ und NO₃ in Vietnams Flüssen ist zwei- bis viermal höher (in einigen Fällen sogar bis sieben mal höher) als erlaubt, z. T. reichern sich persistente organische und anorganische Schadstoffe an (Anh, 2002). Überdies unterliegt die Wasserqualität Untersuchungen der SIWRR (2003) zufolge, z. B. in Ho Chi Minh City's Flüssen, starken Schwankungen mit hohen Gehalten an Trübstoffen und pathogenen Mikroorganismen im Gewässer, insbesondere in der Regenzeit. Neben der schlechten Qualität der Wasserreservoirs sind die hohen Wasserverluste in den Versorgungsnetzen und das großzügige Verbrauchsverhalten problematisch. In den Städten Hanoi, Hung Yen, Da Nang and Ca Mau gehen dadurch ca. 50 % des geförderten Wassers verloren, im Landesdurchschnitt 37 %. Gleichzeitig stieg der Frischwasserbedarf von 1,95 Mio. m³/d im Jahr 1990 auf nahezu 3 Mio. m³/d in 2001 an (Anh, 2002), der zu über 90 % aus Oberflächenwasser gedeckt wird (bfai, 2002). Nur 67 % der städtischen, 11 % der ländlichen Bevölkerung haben Zugang zu sauberem Trinkwasser (Ton, 2003).

Eine geregelte Abwasserableitung existiert weder in den Städten noch auf dem Land, vorhandene Kanäle und Sammelsysteme dienen in erster Linie der Abführung von Regenwasser in die Vorfluter. Die Konsequenzen der Wasserverschmutzung für die Entwicklung, die Gesundheit und die Umwelt wurden erkannt und es werden insbesondere in den Städten Anstrengungen genommen, ausreichend Infrastruktur für die Abwasserableitung und Abwasserbehandlung zu schaffen: Die Entwicklungspläne

der vietnamesischen Regierung bis zum Jahr 2020 enthalten sowohl Maßnahmen zur Stadtentwässerung als auch sachgerechten Abwasserbehandlung – für die Millionenstädte eine große finanzielle und planerische Herausforderung. In 10 von 61 Städten werden derzeit Entwässerungsprojekte von der Regierung, europäischen und asiatischen Donorländern sowie der Weltbank und Asian Development Bank mit einem Budget > 1 Mrd. US \$ gefördert (Anh, 2002). Dabei sollen gezielt Trennkanäle erbaut werden, damit es durch die großen Regenwassermengen nicht zu einer Verdünnung und damit ineffizienten Behandlung des kommunalen Schmutzwassers kommt.

Trotz der Maßnahmen zur Abwasserableitung gibt es bisher in Vietnam nur wenige Kläranlagen. Teilweise sind zentrale Behandlungsanlagen, die in der Vergangenheit im Rahmen der Entwicklungszusammenarbeit von verschiedenen Förderern errichtet wurden, bereits wieder außer Betrieb, weil die Kosten für Strom, Betriebsmittel und Ersatzteile nicht getragen werden können. Nach Aussagen der Bundesagentur für Außenwirtschaft gibt es in Vietnam mit Ausnahme von Abwasserteichen in Ho Chi Minh City keine funktionierende öffentliche Kläranlage (bfai, 2002). Die Haushalte entsorgen ihr Abwasser entweder direkt in Gewässer oder aber nach einer Zwischenlagerung in Septic Tanks (z. B. 55 bis 65 % der Haushalte in Ho Chi Minh City (Dan et. al., 2005)). In den Studien zum Masterplan für die Abwasserbehandlung der Städte Hanoi und Ho Chi Minh City werden in erster Linie konventionelle Belebtschlammssysteme und Tropfkörperverfahren diskutiert (JICA, 1999 und 2000).

Lediglich einige Industriezonen, vor allem wenn internationale Unternehmen ansässig sind, unterhalten Kläranlagen, sowie einige Krankenhäuser. Die Einleitung ungeklärten Industrieabwassers in Hanoi wird auf 415.000 bis 550.000 m³/d geschätzt, in Ho Chi Minh City fallen täglich 500.000 m³ Industrieabwasser an, das allerdings zumindest teilweise entsprechend vietnamesischer Standards vorbehandelt wird. Die Verfahrenstechnik die hier angewendet wird, ist in erster Linie die mechanisch-biologische Reinigung mit Belebtschlammverfahren, z. T. als SBR-Variante (z.B. Industriezone Bien Hoa 2, HCMC) und zusätzlicher chemischer Reinigungsstufe (Neutralisation, Chlorung), wenn gefordert.

Einzellösungen und dezentrale Anlagen zur Kommunalabwasserbehandlung existieren z.B. für neue Wohnkomplexe und Hotels in Kompaktbauweise (High-Tech-Membran- oder Mehrkammeranlagen) sowie in Form von Abwasserteichen, die vor allem im Mekong-Delta gleichzeitig zur Fischzucht genutzt werden.

Kosten der Abwasserreinigung

Wassertarife sind in Vietnam nach Abnehmern gestaffelt und variieren innerhalb des Landes sehr stark. Beispielhaft sind in Tabelle 25 die Wassertarife für die Stadt Ho

Chi Minh City aufgeführt. Der Abwasserpreis macht ungefähr ein Zehntel des Wassertarifs aus.

Tabelle 25: Wassertarife in Ho Chi Minh City (BMBF, 2003)

Tarifklasse	Abnahme	Tarif [VND/m ³]	Tarif [EUR/m ³]
Private Haushalte	1-4 m ³ /(E·Monat)	1.700	0,1
	5-6 m ³ /(E·Monat)	2.500	0,14
	7-10 m ³ /(E·Monat)	3.200	0,18
	> 11 m ³ /(E·Monat)	4.000	0,22
Öffentliche Verwaltungen	< 1 m ³ /(E·Monat)	2.200	0,13
	> 1 m ³ /(E·Monat)	3.000	0,17
Dienstleistungsbetriebe		6.500	0,37
Industrie		4.000	0,23

Die unzureichenden Gebühren sowie das mangelnde Gebühreninkasso werden als Hauptursache für die unzureichenden Investitionen im Wassersektor gesehen. Die Bereitschaft, für Wasser zu zahlen, ist äußerst gering, weshalb die Wassertarife in Vietnam zu den niedrigsten in Südostasien zählen (Rudolph, 2004).

Stand der Klärschlammbehandlung und -verwertung

Aufgrund der mangelnden Abwasserbehandlung nimmt die Klärschlammbehandlung in Vietnam nur einen sehr geringen Stellenwert ein und wird selbst in den Studien zur Abwassersituation und Infrastrukturplanung der Städte (JICA 1999 und 2000) nur nebensächlich berücksichtigt. Mögliche Konzepte beziehen eine Klärschlammfäulung in offenen Faulbehältern mit Entsorgung anfallender Faulschlämme oder eine Kompostierung ein (Dan et. al., 2005). Auf den existierenden Kläranlagen der Industriezonen wird der Schlamm lediglich maschinell (in erster Linie mit Zentrifugen oder Bandfilterpressen) oder in Trockenbeeten über 5-7 Tage entwässert, abtransportiert und deponiert. In Industriezonen, in denen haushaltsähnliches, wenig Schadstoff belastetes Abwasser gereinigt wird, wird der Schlamm nach der Entwässerung auch als Sekundärrohstoffdünger in Grünanlagen innerhalb der Industriezone verwendet.

Daten zum derzeitigen Gesamtklärschlammaufkommen industrieller Kläranlagen sind nicht erhältlich.

An den Hochschulen Ho Chi Minh City's (Nong Lam University, University of Technology) wird derzeit intensiv zur anaeroben Klärschlamm- und Bioabfallvergärung geforscht. Unter den im Jahresverlauf gleich bleibend hohen Umgebungstemperaturen wird eine Klärschlammfäulung ohne Fremdwärmeinsatz als sinnvolle Behandlungstechnologie insbesondere für große Kläranlagen angesehen.

Untersuchungen zur dezentralen Klärschlammbehandlung in ländlichen Gebieten, z.B. gegenwärtig im Mekongdelta (Projekt sanced, ebenfalls gefördert durch das BMBF), beziehen Low-Tech Lösungen zur anaeroben Abwasser- und Schlammbehandlung in Schlauchsystemen ein, bei denen das produzierte Biogas direkt in den Haushalten zum Kochen wiederverwertet werden kann. Eine Alternative kann die (Wurm)Kompostierung von Klärschlämmen und tierischen Exkrementen mit organischen Strukturmitteln (Reisstroh) darstellen, deren Endprodukt prinzipiell landwirtschaftlich verwertbar ist (Hedel, 2005).

Literatur

- Anh, Nguyen Viet. 2002. Wastewater Management and Water Environment in Vietnam. ESCAP – IWMI Seminar on Environmental and Public health Risks Due to Contamination of Soils, Crops, Surface and Groundwater from Urban, Industrial and Natural Sources in Southeast Asia. 10.-12.12.2002, Hanoi, Vietnam.
- bfai (Bundesagentur für Außenwirtschaft). 2002. Marktanalysen: Wassermanagement und Wassertechnik Asien/Pazifik. Kapitel Vietnam, pp 315 ff.
- BMBF. 2003. Abschlussbericht zum BMBF-Vorhaben 02WT0207, Exportorientierte F&E auf dem Gebiet der Wasserver- und -entsorgung, Teil 1: Trinkwasser, Band 1: Praxiserfahrungen bei der Trinkwassergewinnung in anderen Ländern.
- Dan, N.P., Thanh, B.X., Khoa, L.V., Truong, B.D. 2005. Surface Water Resource Management in HCMC. Draft Phase Report. International Research Meeting on Sustainable Water Management Policy, 20.-21.10.2005, Tianjin, China.
- DVG (Deutsch-Vietnamesische Gesellschaft). 2009. Wirtschaft Vietnam. <http://www.vietnam-dvg.de/?show=info&id=34>, Stand 09/2009.
- Hedel, S. 2005. Kompostierung von Schweinexkrementen in der Provinz Can Tho, mekong delta, Vietnam. Diplomarbeit am Institut für Bodenkunde und Pflanzenernährung, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg.
- JICA (Japan International Cooperation Agency) 1999. The Study on Urban Drain-age and Sewerage System for Ho Chi Minh City. Final Report, Pacific Consultants International.
- JICA (Japan International Cooperation Agency). 2000. The Study on Environmental Improvement for Hanoi City in the Socialist Republic of Vietnam. Final Report, Summary, Nippon Koei Co., Ltd, EX Corporation.
- Mühr, B. 2007. Klimadiagramm von Ho Chi Minh City. <http://www.klimadiagramme.de/asien/thailand.html>, Stand 05/2007.
- Rettensteiner, E., Fritzsche, U. Vietnam Infothek. Klimadaten Hanoi. <http://www.rettenssteiner.de/img/Klimadaten.pdf>, Stand 10/2009.
- Rudolph, K.-U. 2004. Exportorientierte Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet der Wasserver- und -entsorgung, Teil II: Abwasserbehandlung und Wasserrückverwendung, Band 1, Anforderungen an die Abwassertechnik in anderen Ländern - Vietnam. Institut für Umwelttechnik und Management. Private Universität Witten/Herdecke gGmbH..

- SIWRR (Southern Institute of Water Resources Research). 2003. Messprotokolle zur Flusswasserqualität in Ho Chi Minh City. In: Rudolph, K.-U. 2004. Exportorientierte Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet der Wasserver- und -entsorgung, Teil II: Abwasserbehandlung und Wasserwiederverwendung, Band 1, Anforderungen an die Abwassertechnik in anderen Ländern - Vietnam. Institut für Umwelttechnik und Management. Private Universität Witten/Herdecke gGmbH.
- Ton, Nguyen. 2003. Water & Wastewater Asia Conference and Exhibition (WWA). Ho Chi Minh International Exhibition & Conference Centre, 23.-25-09.2003, HCMC, Vietnam.

2.1.3.3 Thailand

Klimageographische Randbedingungen

Thailand liegt in Südostasien und zählt mit den Nachbarländern Burma und Laos zum Gebiet des Goldenen Dreiecks. Im Südosten grenzt Thailand an Kambodscha und im Süden an Malaysia. Das Land besitzt zwei Hauptküstengebiete. An der Westküste westliche Küste liegt die Andaman See, ein Randmeer des östlichen Indischen Ozeans, das östliche Küstengebiet verläuft entlang des Golfs von Thailand, ein Randmeer des Pazifischen Ozeans. Mit einer Fläche von ungefähr 514.000 km², ist Thailand ca. 1,4 mal größer als die Bundesrepublik Deutschland. Landwirtschaftlich genutzte Flächen für den Anbau von Reis, Kokosnuss, Sojabohnen und Tapioca betragen ca. 40% der gesamten Fläche. Die wichtigsten und größten Flüsse, Chao Phraya und Mekong, tragen in ihrem Einzugsgebiet hauptsächlich zur landwirtschaftlichen Bewässerung bei und bieten Wasserwege für die Schifffahrt.

Thailands Klima ist durch die Nähe zum Äquator überwiegend tropisch mit Jahresdurchschnittstemperaturen von 18 bis 34 °C und einer durchschnittlichen Niederschlagsmenge von 1500 mm. Das Land lässt sich in vier Klimaregionen unterteilen, die sich in erster Linie nach der Lage und Dauer der Jahreszeiten Sommer(Trocken)zeit und Winter(Regen)zeit und der Niederschlagsmenge unterscheiden (Bild 24).

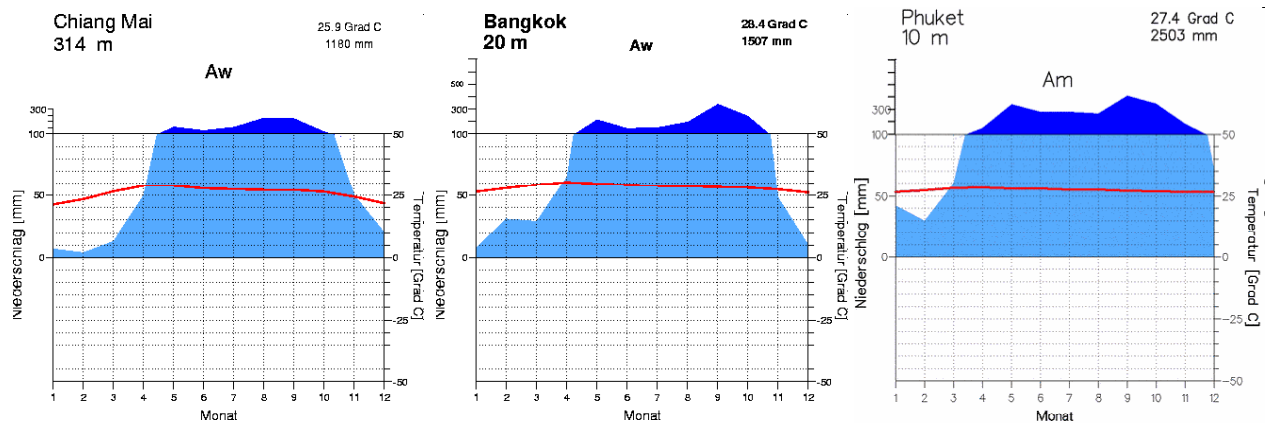


Bild 24: Klimadiagramme der drei Hauptregionen Thailands, Norden (Chiang Mai), Zentrum (Bangkok), Süden (Phuket) (Mühr, 2007).

Rechtliche Rahmenbedingungen

Anfang der 90er Jahre wurden in Thailand der gesetzliche Rahmen für die Umweltschutzgesetzgebung verabschiedet (Enhancement and Conservation of the National Environmental Quality Act, 1992). Im Zuge der Verwaltungsreform 2002 entstand das Ministry of Natural Resources and Environment, dessen Aufgabenbereich den Schutz und die Regenerierung von Wasser, Boden und Luft sowie den nachhaltigen Umgang mit natürlichen Ressourcen umfasst. Die aus dem Ministerium gebildeten Kommissionen, z. B. das Pollution Control Department, erarbeiteten, in aktuellster Fassung von 2005, auch Grenzwerte für die Einleitung behandelten Abwassers. Auflagen für größere öffentliche Gebäude, Hotels und Restaurants, großflächige Wohngebiete, Industrie- und Gewerbegebiete existieren, wobei maßgebliches Unterscheidungsmerkmal die Fläche der Einrichtung ist (MNRE, 2007). Die gesetzliche Forderung an den Schutz der Umwelt betraf somit in erster Linie den industriellen Sektor des Landes. Um die Beeinträchtigung der Umwelt einzudämmen, wurden in Industrie- und Gewerbegebieten Abwasserbehandlungsanlagen, hauptsächlich nach dem Belebtschlammverfahren, geplant.

Für die Bemessung kommunaler und industrieller Kläranlagen wurde von der Environmental Engineering Association of Thailand eine Sammlung von Richtlinien und Bemessungsgrößen publiziert, nach denen allerdings eine weitergehende Nährstoffelimination (N, P) bei der Abwasserbehandlung nicht gefordert ist. Da man in Thailand aber insbesondere in der Umwelttechnologie auf internationale Standards zurückgreift, sind die Methoden der Nährstoffelimination für die weiterführende Abwasserbehandlung bekannt und werden auch für den Einzelfall vorgesehen (PCD, 2002).

Neben der Entsorgung kommunaler Abwässer spielt gegenwärtig insbesondere die Verbesserung des Umweltaudits von Industriestandorten eine bedeutende Rolle. Zwischen 1992 bis 2000 erhöhte sich die Anzahl der Industrien von 100.000 auf 125.500. Mit den steigenden Industriestandorten und zugleich der notwendigen Klär-

anlagen, steigt nun auch die Menge des produzierten Klärschlammes. Nach Angaben des Departments of Industrial Works wurden zwischen 2006 und 2007 62.469 Mg Klärschlamm-trockenmasse aus verschiedenen Industrien abtransportiert und deponiert (DIW, 2008). Im Rahmen der praktischen Umsetzung der Umweltgesetze, beschloss man, Klärschlamm im Sinne des Europäischen Abfallkatalogs bzw. EWC (European Waste Catalogue) als Industrieabfall einzustufen. Man übernahm damit die von der EU ermittelten Analysedaten zur Klärschlammqualität und sparte dadurch den Aufwand für eigene Untersuchungen. Damit gilt Klärschlamm aus einer industriellen Kläranlage als gefährlicher Abfall, der eine besondere Behandlung beansprucht. Für den Schlamm aus (den wenigen) kommunalen Kläranlagen gilt diese Zuordnung nicht. Allerdings sind mögliche negative Umweltauswirkungen bei der Lagerung unbehandelten kommunalen Klärschlammes erkannt und eine Stabilisierung wird zunehmend gefordert. Neben dem Schlamm aus Kläranlagen stellen Schlämme aus Septic Tanks und aus anderen dezentralen Anlagen, eine beachtliche, wenn auch bisher nicht quantifizierte Menge dar, für deren sachgerechte Entsorgung keine Lösungen bestehen.

Stand der Abwasserreinigung

In der Zentralebene Thailands und auch in Bangkok werden nach wie vor die seit dem 16. Jahrhundert bestehenden Transportkanäle zum Abführen von Abwässern und Fäkalien genutzt. Eine Kanalisation entstand erst mit dem Bau von Strassen und in erster Linie für die Ableitung von Regenwasser. Mit wachsender Bevölkerung und Versiegelung ehemaliger Wasserkanäle entwickelte sich dieses historische Netz zu einem Misch-System. Heutzutage werden in Thailand mit seinen knapp 65 Mio. Einwohnern ca. 14 Mio.m³ Abwasser am Tag produziert. Dass dies ein Umweltproblem darstellt, hat man bereits erkannt und zur nationalen Aufgabe gemacht. Seit den 90er Jahren wurden daher 67.290 Mio. Baht bzw. ca. 1.346 Mio. Euro für den Neubau von Kläranlagen (87 geplante Projekte, davon 68 bisher fertig gestellt, vgl. Bild 25) und den Ausbau und die Sanierung des Kanalisationssystems investiert.

Von den 77 Kläranlagen sind 39 als Stabilization Ponds, 13 als Aerated Lagoons und eine als Rotating Biological Contactor Verfahren ausgebaut. In den restlichen 24 Kläranlagen kommen verschiedene Varianten des Belebtschlammverfahren zur Anwendung (z.B. Oxidationsgraben, SBR). Trotz der Vielzahl realisierter Bauprojekte werden insgesamt nur ca. 2,2 Mio. m³ Abwasser am Tag behandelt (PCD, 2003), was im Vergleich zur täglichen Abwasserproduktion einer Behandlungskapazität von 20 % entspricht. Problematisch für einen flächendeckenden Anschluss eines Großteils der Bevölkerung bleibt der mangelnde Ausbau des Kanalnetzes, so dass ein Großteil der gebauten Kläranlagen bisher sogar nur eine Auslastung von 50 % aufweist und diskontinuierlich betrieben wird um Betriebskosten zu sparen (PCD, 2003).

Die Mehrzahl privater Haushalte entsorgt die Abwässer über eigene Septic Tanks und anschließende Versickerung, so dass der Zulauf der Kläranlagen hauptsächlich aus organisch gering belastetem Grauwasser besteht, welches insbesondere in der Regenzeit noch entsprechend verdünnt wird (vgl Tabelle 26).

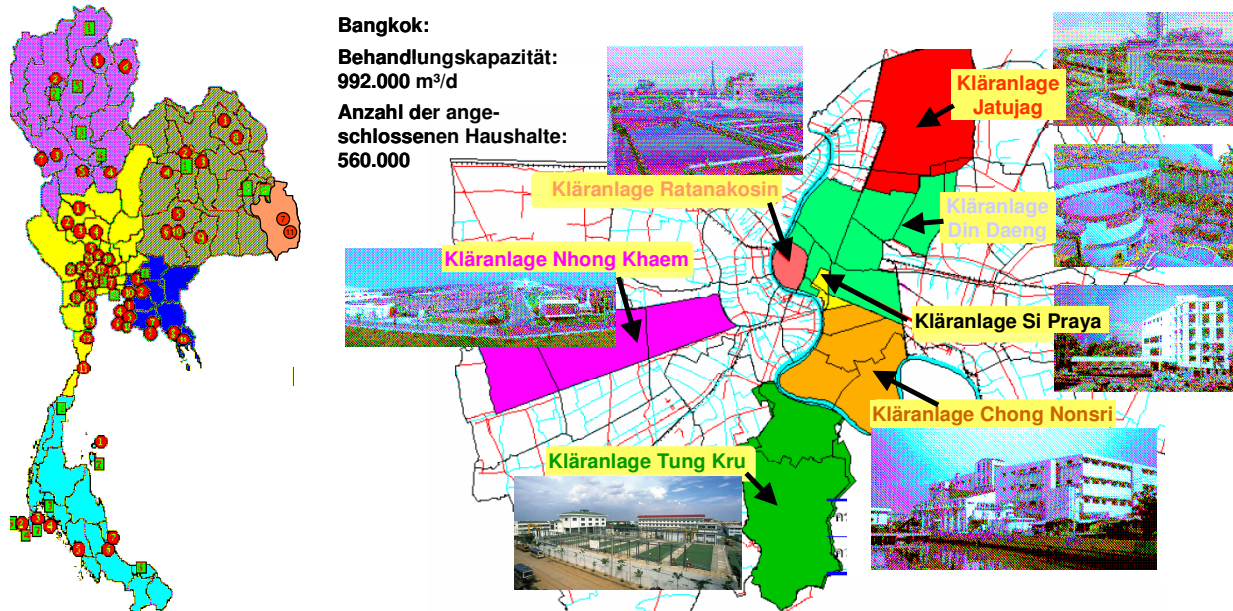


Bild 25: links: Standorte von 77 fertig gestellten (Kreis-Signatur) und noch in der Bau-phase befindlichen (quadratische Signatur) Kläranlagen in Thailand. Nicht berücksichtigt: 14 ältere Kläranlagen innerhalb Bangkoks (PCD, 2003). rechts: Kläranlagen im zentralen Stadtgebiet Bangkoks (DDS, 2007)

Tabelle 26: Auszug aus Laboranalysen von Abwasserproben 2005 (NMT, 2007)

Kläranlage		BSB ₅ Zulauf Kläranlage [mg/L]	BSB ₅ Ablauf Kläranlage [mg/L]
Songkha (Südthailand)	Sommerzeit	105	24
	Regenzeit	30	26
Chaam (Zentralthailand)	Sommerzeit	66	20
	Regenzeit	30	16
Chiang Rai (Nordthailand)	Sommerzeit	14	4
	Regenzeit	4	8

Behandeltes Abwassers städtischer Kläranlagen wird in Thailand zur Bewässerung städtischer Grünanlagen genutzt. Die Wiederverwertung in der Landwirtschaft hat sich allerdings bisher wenig etabliert. Erste Versuche zur Nutzung von geklärtem Abwasser auf Reisfeldern in der Provinz Kamphaeng Phet führten zwar zu einem verstärkten Pflanzenwachstum, aber zu einer Verringerung des Ertrages. Als Gründe werden die sensible Stickstoffdüngung im Reisanbau genannt. Solange keine weiteren Forschungsmaßnahmen auf diesem Gebiet und angepasste Managementkon-

zepte vorliegen, wird der Verwertung von Abwasser keine große Bedeutung zugemessen (NMT, 2007).

Kosten der Abwasserbehandlung

Als kostentreibendster Faktor bei der Abwasserbehandlung wird in Thailand die Entwicklung der Strompreise angesehen. 42 % der Betriebskosten fallen für die Bereitstellung von Energie an (DDS, 2007). Da Kläranlagen gemäß thailändischem Recht der Verwaltungshoheit von Gemeinden unterstehen, müssen diese auch die Betriebskosten für die Abwasserbehandlung alleine tragen. Die finanzielle Deckung durch Abwassergebühren ist nur in wenigen Gemeinden etabliert oder geplant, z.B. für die Stadt Bangkok, die pro Jahr 9 Mio. EUR für die sieben neu gebauten Kläranlagen aufbringen muss. Es ist geplant, zwischen 4-16 ct/m³ Abwassergebühr gemessen am Trinkwasserverbrauch unterschiedlicher Gebäudenutzungstypen zu erheben (vgl. Tabelle 27). Aus politischen Gründen hat sich dieser Vorschlag allerdings noch nicht durchgesetzt.

Tabelle 27: geplante Abwassergebühren nach Gebäudetyp für die Stadt Bangkok (DDS, 2007)

Gebäudetyp	Gebühr [EUR/m ³]
Anwesen mit einem Wasserverbrauch > 10 m ³ /Monat	0,04
Verwaltungsgebäude	0,04
Schulen, Tempel	0,04
Krankenhäuser, Einkaufsmärkte, Marktplätze	0,08
Restaurants	
< 100 m ²	0,04
> 100 m ²	0,08
Gewerbe mit einem Wasserverbrauch von	
< 200 m ³ /Monat	0,08
200 – 400 m ³ /Monat	0,12
> 400 m ³ /Monat	0,16

Aufgrund der finanziell schwierigen Situation treten bei der Planung von Neuanlagen in Thailand vermehrt Verfahrenstechniken zur Abwasser- und Schlammbehandlung in den Vordergrund, die der Gewinnung und Verwertung von Energie dienen um somit zumindest einen Teil Behandlungskosten abdecken zu können.

Stand der Klärschlammbehandlung in Thailand

Eine Schlammbehandlung existiert für größere Kläranlagen, orientiert an europäischen und US-amerikanischen Standrads, zumindest in Form einer Schlammeindickung und eine Schlammentwässerung. Eine großtechnische Entwässerung auf > 20 % TR erfolgt in den meisten Fällen mit Bandfilterpressen unter Zugabe von Polymeren (DDS, 2008). Auf einigen wenigen Kläranlagen wird eine biologische Stabilisie-

rung, in erster Linie als Klärschlammfäulung, allerdings ohne Gasverwertung, durchgeführt (z.B. auf 5 der insgesamt 14 Kläranlagen in Bangkok). Alternativ wird auf Kläranlagen mit ausreichender Fläche eine natürliche Schlamm-trocknung ohne Vorbehandlung betrieben. Auf einigen Anlagen wird eine Kalknachbehandlung zur Reduzierung der Geruchsbelästigung und Entseuchung des Schlamm-s durchgeführt.

Behandelter und unbehandelter Klärschlamm wird bisher hauptsächlich deponiert. Erhöhte gesetzliche Auflagen, eine Verknappung von Deponieflächen und eine sinkende Akzeptanz durch Anwohner insbesondere aufgrund der Geruchsbelästigung führten dazu, dass Ende 1994 das Ministerium für Industrie ein privat und staatlich geführtes Unternehmen, General Environmental Conservation Company Limited (GENCO), gründete, dass landesweit mit der Entsorgung von Industrieabfällen und Klärschlamm beauftragt wurde. Als weiterer Entsorgungsweg wird in Küstennähe auch die Klärschlammverklappung betrieben. Ein geringer Teil des Klärschlamm-s wird gemeinsam mit Abfall verbrannt. Im Sinne einer angepassten Ressourcenwirtschaft, die auch in Thailands Umweltpolitik prioritär behandelt wird, geht man allmählich zu einer landwirtschaftlichen Verwertung qualitativ hochwertiger Klärschlamm-e über (Kosolkamolmas, 2008).

Im folgenden wird der Stand der Klärschlammbehandlung und die zukünftigen Entwicklungen an Fallbeispielen erläutert.

Klärschlammfäulung in Bangkok

Auf einer der Kläranlagen im Stadtzentrum Bangkoks werden täglich 450 m³ Abwasser im Belebtschlammverfahren mit simultan aerober Schlammstabilisierung behandelt. Der stabilisierte Schlamm wird statisch eingedickt und in Betonbecken über eine Woche getrocknet. Das Trockengut wird als Düngemittel oder Bodenverbesserer genutzt.

Im Rahmen von Dissertationen am Asian Institute of Technology wurden Alternativen zur energieintensiven aeroben Schlammstabilisierung untersucht, darunter die Co-Vergärung von Klärschlamm der kommunalen Kläranlage mit Brauereischlamm-e für den Gewinn von Biogas und eines qualitativ hochwertigen Endproduktes für die landwirtschaftliche Verwertung. Es konnte festgestellt werden, dass höhere Gas-erträge mit steigendem Anteil an Brauereischlamm erzielt wurden. Die Abbaurate betrug zwischen 22 % und 35 % des zugeführten CSB. Des Weiteren erreichte man eine Reduktion der pathogenen Keime bei weitestgehender Erhaltung der Nährstoffe und somit eine Steigerung der Schlammqualität. Aufgrund hoher Schwermetallgehalte des Brauereischlamm-s wurden darüber hinaus Untersuchungen zur Schwermetalltoleranz der Mikroorganismen beim anaeroben Abbau durchgeführt (Pecharably, 2007).

Die Ergebnisse der Studien unterstreichen die Tendenz, Stabilisierungsverfahren mit simultaner Energieerzeugung vermehrt in die zukünftigen Planungen von Schlammbehandlungsanlagen einzubeziehen und die Grenzen und Möglichkeiten der Verfahrenstechnik auszuschöpfen.

Klärschlammvererdung in Phuket

Als Alternative zur maschinellen energieintensiven Entwässerung wurde im Rahmen eines BMBF-Forschungsvorhabens von 2000 bis 2004 in Zusammenarbeit mit Prack Consult GmbH für die Kläranlage in Phuket eine Klärschlammvererdungsanlage realisiert. Wichtigstes Ergebnis der Untersuchungen war die Wirtschaftlichkeitsuntersuchung, die eine Kostenreduzierung von 80 % gegenüber der maschinellen Entwässerung ergab (Prack Consult, 2008).

Im Rahmen einer weiteren Forschungsarbeit am Asian Institute of Technology von 1997 wurde die natürliche Entwässerung von Fäkalschlamm mit Hilfe von Rohrkolben betrachtet. Ziel dieser Arbeit war eine Richtlinie für die Bemessung derartiger Anlagen und deren Verfahrensweisen zu entwickeln. Im Rahmen des Projektes konnten Empfehlungen zur Feststoffbelastung, zur Beschickungshäufigkeit und zum periodischen Sickerwassereinstau für eine ausreichende Wasserversorgung der Pflanzen erarbeitet werden. Die Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen (Heinss et al. 1998):

- Maximale Feststoffflächenbelastung 250 kg TS/(m²-a)
- Beschickungsintervall: 1/Woche
- Versickerungsintervall: alle 6 Tage

Klärschlammverwertung in der Landwirtschaft

Einer stofflichen Verwertung von Klärschlamm wird in Thailand bisher nur wenig Beachtung geschenkt. Zusätzliche Mehrkosten für eine sachgerechte Qualitätssicherung oder landwirtschaftliche Maschinen für die Auvbringung, machten diesen Entsorgungsweg bislang wenig attraktiv. Aufgrund der zu erwartenden Einschränkungen in der Deponierung und vor dem Hintergrund politischer Bestrebungen wird die landwirtschaftliche Verwertung allerdings zunehmend diskutiert. Daten zu bisherigen Aufbringungsmengen und Auswirkungen auf den landwirtschaftlichen Ertrag sind nicht vorhanden. In der Wissenschaft wird die landwirtschaftliche Verwertung jedoch schon seit langem untersucht und es existieren verschiedene Studien zum environmental fate des Klärschlammes bei der Bodenaufbringung (z.B. Graikuntos, 2000 und Sripanomtanakorn et al. 2002)

Die Ergebnisse resultierten zum Einen in Empfehlungen zur Klärschlammaufbringung für die Aufwertung nährstoffarmer Böden und zum Anderen für eine angepasste Düngung von Gemüse sowie deren Schwermetallaufnahme.

Aus den vorgestellten Arbeiten ist zu schließen, dass Klärschlamm, wie er in thailändischen kommunalen Kläranlagen anfällt, hinsichtlich seiner Zusammensetzung prinzipiell als Sekundärrohstoffdünger geeignet ist. Eine geregelte und sachgerechte Applikation von Klärschlämmen auf Flächen zur Nahrungsmittelherzeugung verlangt allerdings konsequente Maßnahmen zur Qualitätskontrolle, zur Schulung von Farmern, zur Akzeptanzförderung bei der Bevölkerung und zur Steigerung der Verantwortung von Anlagenbetreibern (Kosolkamolmas, 2008).

Literatur

- DDS. 2007. Water Quality Management in Bangkok. Forschungsbericht des Department of Drainage and Sewerage, Bangkok Metropolitan Administration. Online –Quelle: [http://dds.bma.go.th/News_dds/information/wastewater_management\(ThaiVer\)1.pdf](http://dds.bma.go.th/News_dds/information/wastewater_management(ThaiVer)1.pdf) und [http://dds.bma.go.th/News_dds/information/wastewater_management\(ThaiVer\)2.pdf](http://dds.bma.go.th/News_dds/information/wastewater_management(ThaiVer)2.pdf). (beide auf thai)
- DDS. 2008. Selbstdarstellung des Department of Drainage and Sewerage im Internetauftritt. <http://dds.bma.go.th/indexdds.htm>, Stand 01/2008.
- DIW. 2008. Selbstdarstellung des Department of Industrial Works im Internetauftritt. <http://www2.diw.go.th/PIC/map.html>, Stand 01/2008.
- Graikuntos, C. 2002. Analysen zu Nährstoffgehalten und Mikroorganismen in einem Klärschlamm aus einer Zuckerfabrik. Diplomarbeit am Institute of Environmental Science, Faculty of Science, Khonkean University, Thailand. (auf thai)
- Heinss, U., Koottatep, T. 1998. Use of reed beds for faecal sludge dewatering. Forschungsbericht des Asian Institute of Technology und Swiss Federal Institute for Environmental Science and Technology.
- Kosokamolmas, N. 2008. Fallstudie: Angepasstes Klärschlammmanagement in Thailand mit besonderem Fokus auf die anaerobe Stabilisierung. Studienarbeit im Vertiefungsfach Siedlungswasserwirtschaft an der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig.
- MNRE. 2007. Selbstdarstellung des Ministry of Natural Resources and Environment im Internetauftritt. <http://www.warehouse.mnre.go.th/portal>, Stand 12/2007.
- NMT. 2007. Studie über die heutigen Abwasserbehandlungsverfahren in Thailand der National Municipal League of Thailand. Forschungsbericht. (auf thai)
- Mühr, B. 2007. Klimadiagramme von Chiang Mai, Bangkok und Phuket. <http://www.klimadiagramme.de/asien/thailand.html>, Stand 05/2007.
- PCD. 2002. Domestic wastewater and water treatment system. Studie des Ministry of Natural Resources and Environment. (auf thai)
- PCD. 2003. Rehabilitation Plan for Community Wastewater Collection and Treatment Systems. Forschungsbericht des Pollution Control Department, Ministry of Natural Resources and Environment. (auf thai)

- Pecharaply, A. 2007. Anaerobic co-digestion of sewage and brewery Sludge. Dissertation am Institute of Environmental Engineering and Management, Asian Institute of Technology, Dissertation. (auf thai)
- Prack Consult GmbH. 2008. Projektbeschreibung: Klärschlammvererdung in Thailand. Internetauftritt <http://www.prackconsult.de/german/navigation/projekt.htm>, Stand 02/2008
- Sripanomtanakorn, S., Polprasert, C.. 2002. Plant available nitrogen from anaerobically digested sludge and septic tank sludge applied to crops grown in the tropics. Waste Management & Research 2, Nr. 20, pp. 143–149.

2.1.3.4 China

Klimageographische Randbedingungen

China ist mit 9,5 Mio. m² das viertgrößte und mit 1,3 Mrd. Menschen (Stand 2008) das bevölkerungsstärkste Land der Erde. Das Land lässt sich grob in folgende Landschaftszonen unterteilen (Nemitz, 2009): Im Osten befinden sich die großen und dicht besiedelten Schwemmebenen des Yangtze, des Huang He und des Xi Jiang. Der Küstenbereich des Südostens ist gebirgig mit Hochebenen bis zu 500 Meter. Am Fuß der Tianshan-Berge befindet sich die Turfan-Tiefebene mit dem tiefsten Punkt Chinas (-154 m). Im Westen der Schwemmebenen befinden sich mehrere Gebirgszüge mit Hochebenen sowie ausgedehnten Becken (u.a. das Tarimbecken, die Mongolische Hochebene, das Lössplateau, das Sichuan-Becken oder das Yunnan-Guizhou-Hochland. Westchina wird von den Hochebenen des Himalaya, Pamir, Tianshan, und dem Hochland von Tibet dominiert. Der Westen Chinas ist zusammen mit der Inneren Mongolei (Wüste Gobi und Taklamakan) die niederschlagsärmste Region Landes (Nemitz, 2009).

Entsprechend der Flächenerstreckung des Landes ist das Klima je nach Region sehr unterschiedlich. Gemein ist allen Gebieten, dass der Niederschlag monsunabhängig im Sommer fällt. Dabei nehmen die Jahressummen der Niederschläge von Südosten (< 500 mm) nach Nordwesten (> 1500 mm) hin ab. Während die Küstenabschnitte ein gemäßigtes Klima aufweisen, sind weite Teile des Landes stark kontinental geprägt, mit geringen Niederschlägen und starken Jahres- und Tagesschwankungen der Temperatur. Der Südosten des Landes ist tropisch/suptropisch (vgl. Bild 26).

Für die landwirtschaftliche Nutzung sind etwa 40 % der Landfläche geeignet, davon liegen 90 % im Osten des Landes (DStatis, 2008). Die für die landwirtschaftliche Produktion wichtigen Regionen sind im Osten das Schwemmland des Jangtse und Gelben Fluss mit fruchtbaren Fluvisolen, wie sie auch im Schwemmland des Nils anzutreffen sind. Weiter nördlich sind auf weiten Flächen Luvisole und Cambisole verbreitet. Luvisole sind durch eine Tonverlagerung gekennzeichnete Böden und ebenso

wie die Cambisole sehr fruchtbar und für vielfältige landwirtschaftliche Nutzung gut geeignet. Südlich des Jangtses schließt sich eine Zone mit vorwiegend Alisolen an. Diese Böden sind erosionsanfällig und aufgrund der hohen Aluminium-Gehalte eher weniger als Ackerstandorte geeignet (IIASA, 2007 und IUSS 2006).

Die landwirtschaftlich genutzten Flächen insbesondere an der Ostküste unterliegen einem hohen Siedlungsdruck. Eine besondere Herausforderung für die städtische Infrastrukturplanung aber auch für die ausreichende Versorgung mit Nahrungsmitteln stellt die hohe Urbanisierungsrate dar, die im Jahr 2000 36 % betrug und bis zum 2020 auf 50 % ansteigen soll (Zhang et. al, 2006).

China ist der größte Getreideproduzent der Welt. Neben Weizen wird Mais (21 % des Ackerlandes) und vor allem Reis angebaut (32 % der Ackerfläche) (Handelsblatt, 2005).

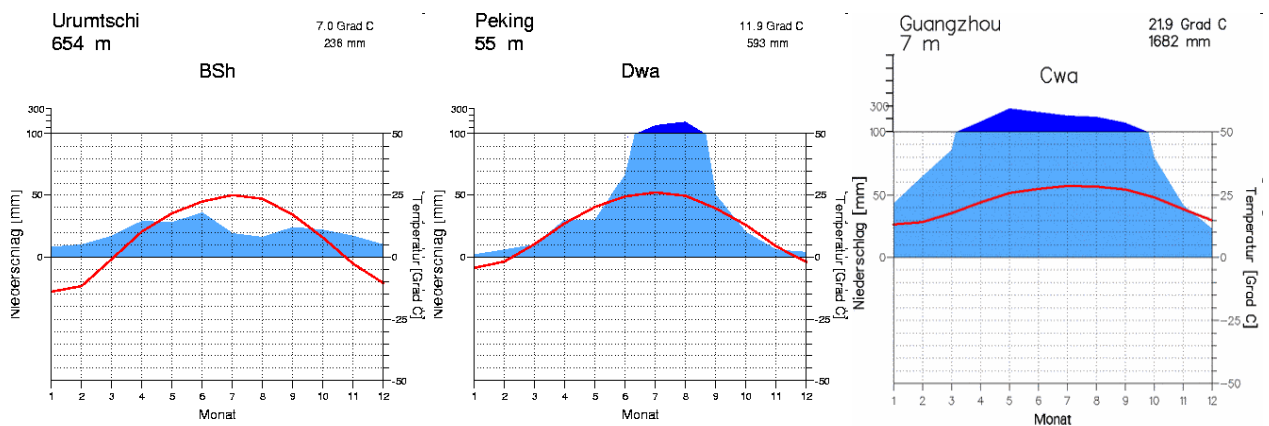


Bild 26: Klima im Nordwesten (Urumtschi, Steppenklima), Osten (Peking, kontinental) und Süden (Guangzhou, subtropische Monsunklima) Chinas (Mühr, 2007).

Rechtliche Rahmenbedingungen

Unter allen Umweltproblemen in China wird mittlerweile der Wassermangel als dringlichstes Problem empfunden. Der Großteil der Oberflächengewässer, die auch zur Trinkwasserversorgung dienen, ist extrem belastet. Chinas Umweltpolitik hat in den vergangenen Jahren von der Bekämpfung vorhandener Schäden auf das Vorsorgeprinzip umgestellt. Das Rahmengesetz für den Umweltschutz in China stellt das Environmental Protection Law of the People's Republic of China mit seinen untergeordneten Richtlinien zur Prävention und Kontrolle der Wasserverschmutzung mit Qualitätsstandards für Oberflächengewässer, Meere und Bewässerungswasser, sowie mit Emissionsstandards für kommunale Kläranlagen dar. In letzteren sind Einleiterbedingungen vorgeschrieben, klassifiziert nach der Funktion und den zugeordneten Schutzziele der jeweiligen Vorfluter (Tabelle 28):

- Klasse 1A und B: Ablaufgrenzwerte zur Einleitung in Oberflächengewässer (1A für die Wiederverwertung als Brauchwasser und zur Einleitung in Gewässer zur Erholung sowie Gewässer mit geringer Selbstreinigungskraft; 1B für Oberflächengewässer der Güteklasse III und in Meere der Güteklasse II)
- Klasse 2: Ablaufgrenzwerte für die Einleitung in Oberflächengewässer der Güteklassen IV und V, in Meere der Güteklassen II und IV
- Klasse 3: Mindestanforderungen für die Einleitung in Gewässer mit untergeordneter Bedeutung

Tabelle 28: Emissionsstandards kommunaler Kläranlagen GB 18918-2002.

Parameter		Klasse 1A	Klasse 1B	Klasse 2	Klasse 3
BSB	[mg/L]	10	20	30	60
TS	[mg/L]	10	20	30	50
P _{ges}	[mg/L]	0,5	1,0	3,0	5
N _{ges}	[mg/L]	15	20	30 (NO ₃ -N)	-

Bei der Abwasserreinigung entstehende Klärschlämme müssen die Immissionsgrenzwerte in Tabelle 29 einhalten, damit sie landwirtschaftlich verwertet werden dürfen. Diese Grenzwerte sind z. T. schärfer, als diejenigen, die in Deutschland gültig sind (vgl. Tabelle 31).

Tabelle 29: Immissionsstandards für die landwirtschaftliche Klärschlammverwertung in mg/kg Trockensubstanz nach GB 18918-2002

	Saure Böden pH < 6,5	Neutrale/basische Böden pH ≥ 6,5
Cd	5	20
Hg	5	15
Pb	300	1000
Cr	600	1000
As	75	75
Ni	100	200
Zn	2000	3000
Cu	800	1500
B	150	150
Benzo(a)Pyrene	3	3
AOX (als Cl)	500	500
PCB	0,2	0,2
PCDD/PCDF	100 ng/kg	100 ng/kg

Stand der Abwasserreinigung

Der Aufbau von Abwasserentsorgungseinrichtungen konnte mit dem wirtschaftlichem Wachstum des Landes nicht Schritt halten. Der Bevölkerungszuwachs der Städte, die wirtschaftliche Entwicklung sowie der weitere Ausbau der Kanalsysteme lässt die gesammelten Abwassermengen auch in Zukunft weiter ansteigen. Statistische Erhebungen zur Anzahl der Abwasseranlagen, der behandelten Abwassermengen und des entstehenden Rohschlammes differieren in verschiedenen Publikationen erheblich. Einen Überblick über die Entwicklungen zur Abwasserbehandlung in China seit 1985 bietet Tabelle 30. So existierten im Jahr 1985 in chinesischen Städten 51 Kläranlagen mit einer Reinigungsleistung von insgesamt ca. 563 Mio. m³/a Abwasser (Yao, 1997). Bis 2005 stieg die Zahl der Klärwerke auf 792 und es wurden über 20 Mrd. m³ Abwasser jährlich gereinigt. Der Anschlussgrad der Bevölkerung betrug 2005 52 % und soll bis 2010 auf über 60 % mit über 1000 Kläranlagen steigen (CAWCUD 2005, He 2007).

Tabelle 30: Überblick über die Entwicklung der Abwasserbehandlung in China (He et al. 2007, Lee et al. 2006, Zheng et al. 2004, Yao 1997)

		1985	1993	2003	2005
Anzahl Kläranlagen	[-]	51	136	> 400	792
Behandlungskapazität	[Mio. m ³ /a]	563	1.973	9.235	k.A.
Tatsächlich behandelte Abwassermenge	[Mio. m ³ /a]	k.A.	1.101	4.700	20.896
Erzeugte Rohschlammmenge	[Mio. m ³ /a]	k.A.	7	25	104

Zentrale kommunalen Kläranlagen gibt es nur in Städten. Überwiegend wird das konventionelle Belebtschlammverfahren in verschiedenen Varianten mit/ohne Stickstoff und Phosphorelimination (z.B. Qingdao, Guangzhou, Peking Gaobeidian, Shanghai) eingesetzt. Zusätzlich existieren auch in einzelnen Stadtteilen der Großstädte noch Kläranlagen, die ausschließlich mit einer mechanischen Reinigungsstufe ausgestattet sind, für die aber eine Aufrüstung mit biologischer Reinigungsstufe geplant ist. Mit den weit reichenden Planungen zum Neubau von Kläranlagen werden auch dezentrale Lösungen und weniger energieintensive Verfahren, z.B. Pflanzenkläranlagen, diskutiert.

Eine Abwasserwiederverwertung nimmt einen wachsenden Stellenwert ein. So wird in den Städten gereinigtes Abwasser zur Grünflächenbewässerung oder auch als Brauchwasser für die Industrie eingesetzt. In den Provinzen wird Abwasser, das zusätzlich einer Desinfektion unterzogen wurde, auch zur landwirtschaftlichen Bewässerung verwendet.

Von Seiten des Bauministerium in Peking existieren Regelwerke für die Planung und die Bemessung von Abwasserentsorgungs- und Schlammbehandlungsanlagen (bei letzteren für Eindicker, Faulbehälter, Trockenbeete und Aggregate zur maschinellen Entwässerung), allerdings ausschließlich in chinesischer Sprache. Die Angaben sind vergleichbar mit denen der DWA (Messmann und Schneider, 2004).

Der innenpolitische Druck in China auf eine schnelle und langfristige Lösung der Abwasserproblematik bewirkte, dass 2008 vom Chinesischen Umweltministerium Kläranlagenbetreiber in Städten mit schlecht funktionierenden Anlagen gedroht wurde, dass vor Ort keine weiteren Projekte öffentlich finanziert werden würden, solange es keine Verbesserungen gäbe (Jing, 2008).

Kosten der Abwasserbehandlung

Pläne des 11. Fünfjahresplanes von 2006 bis 2010 der Regierung umfassen Investitionen auf dem Abwassersektor und auch für das Klärschlammmanagement von umgerechnet etwa 28 Mrd. EUR (vgl. Bild 27).

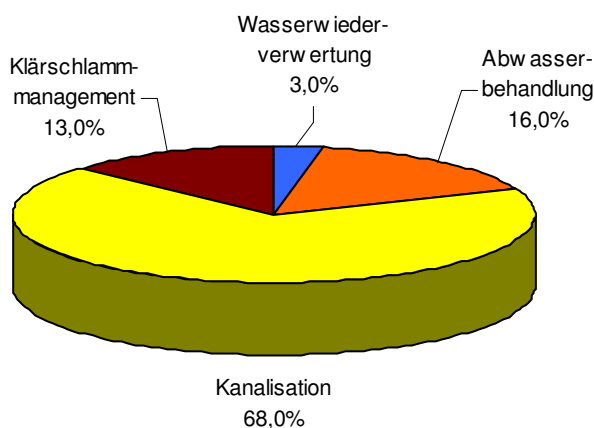


Bild 27: Investitionen gemäß des 11. Fünfjahresplans auf dem Abwassersektor in China (Browder, 2007)

Die Gebührenstruktur für die Wasserversorgung und Abwasserentsorgung in China ist undurchsichtig und die Tarife variieren stark innerhalb des Landes. In Großstädten werden umgerechnet 0,07 EUR/m³ Abwasser erhoben, in den ärmeren Regionen Nordost- und West- und Zentralchinas 0,03 bis 0,04 EUR/m³. Bild 28 stellt die durchschnittlichen Kosten für Trinkwasser und Abwasser aus 128 Städten gegenüber (Browder, 2007). Eine flächendeckende Tarifstruktur fehlt in China und die bisherige Preispolitik deckt nicht die tatsächlichen Kosten der Abwasserreinigung (Zhang, 1999).

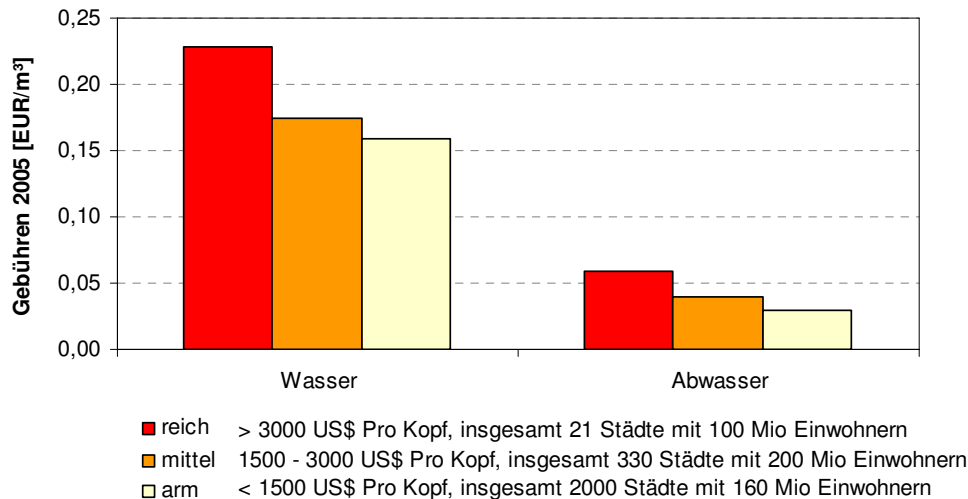


Bild 28: Durchschnittliche Wasser und Abwassertarife in 128 Städten Chinas 2005 (Browder, 2007)

Stand der Klärschlammbehandlung

Trotz der Anstrengungen, die im Bereich der Abwasserreinigung in China vorgenommen werden, wird der Schlammbehandlung bisher nur eine untergeordnete Rolle zugesprochen. Nach Messmann und Schneider (2004) werden gegenwärtig immer noch neue Kläranlagen ohne Schlammbehandlung gebaut. Nur rund 25 % der vorhandenen Kläranlagen besitzen Einheiten zur Schlammstabilisierung. Vor allem kleinere Klärwerke mit einer Reinigungskapazität < 100.000 m³/d führen hauptsächlich eine aerobe Stabilisierung durch. Bei größeren Kläranlagen wird eine (mesophile) Schlammfäulung empfohlen. Wenn die Entwicklungsziele für die Abwasserreinigung (Behandlungsrate in Großstädten > 60 %) eingehalten werden, so muss man ab 2010 mit ca. 6,6 Mio. Mg Klärschlamm-trockenmasse rechnen (Gyßer, 2007).

Nach He et al. 2007 wird der meiste Schlamm nach einer Eindickung oder Entwässerung (maschinell mit Siebband- oder Kammerfilterpressen und Zentrifugen oder in Trockenbeeten) ohne Stabilisierung auf offenen Flächen ausgebracht bzw. zusammen mit Hausmüll deponiert. Eine thermische Klärschlamm-entsorgung hat sich in China noch nicht etabliert (Messmann und Schneider, 2004). Probleme ergeben sich bei der Deponierung allerdings, wenn bei unzureichender Entwässerung der Schlämme die Standfestigkeit der Deponiekörper herabgesetzt wird.

Nach Einschätzung von KfW-Studien sind es vor allem rechtliche Unsicherheiten, fehlendes technisches Know-how und ungeklärte Finanzierungsfragen, die die chinesischen Kläranlagenbetreiber bislang von einer nachhaltigen Klärschlammbehandlung und -entsorgung abgehalten haben (Meyerjohann, 2005)

Klärschlammverwertung in der Landwirtschaft

In den 90er Jahren wurde der produzierte Klärschlamm zu 100 % landwirtschaftlich verwertet, 50 % davon ohne Vorbehandlung (Yao, 1997 vgl. Bild 29).

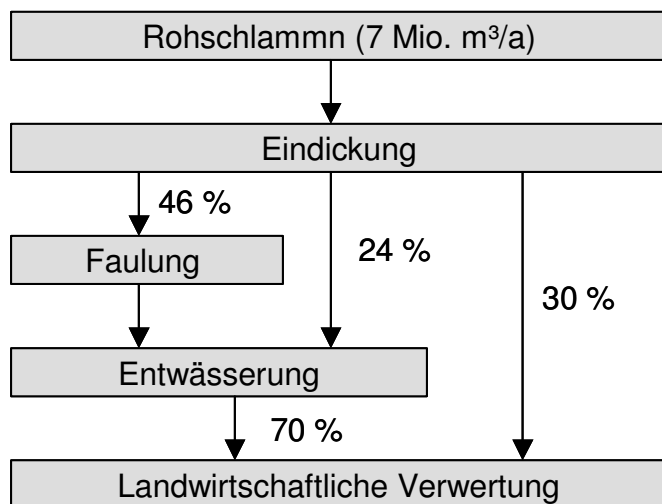


Bild 29: Situation der Klärschlammbehandlung und -entsorgung in China 1993 (Yao, 1997)

Bis 2005 hat sich bei der Behandlung der Klärschlämme wenig verändert. Neuere statistische Erhebungen zeigen jedoch, dass die landwirtschaftliche Verwertung auf 26 % zurückgegangen ist (Bild 30).

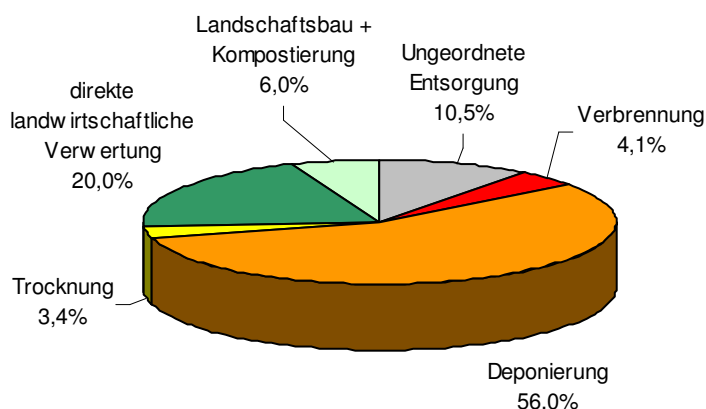


Bild 30: Klärschlammverbleib in China (Gyßer, 2007)

Gründe liegen hauptsächlich in der schlechten Qualität der Klärschlämme, die insbesondere durch Industrieabwässer, die z.T. auch in kommunalen Kläranlagen mitbehandelt werden, hoch belastet sind. Resultat der ungelösten Entsorgungsfrage ist oftmals die Zwischenlagerung oder ungeordnete Ablagerung des Klärschlammes. Es wird berichtet, dass manche Kläranlagenbetreiber, auf deren Kläranlagengelände die

Lagerungskapazitäten erschöpft sind, dazu übergehen den unbehandelten Klärschlamm wieder in die Flüsse einzuleiten oder im Meer zu verklappen (Meyerjohann, 2005). Einen Überblick über die aktuelle regionale Verteilung von Verwertungs- und Entsorgungswegen gibt Bild 31.

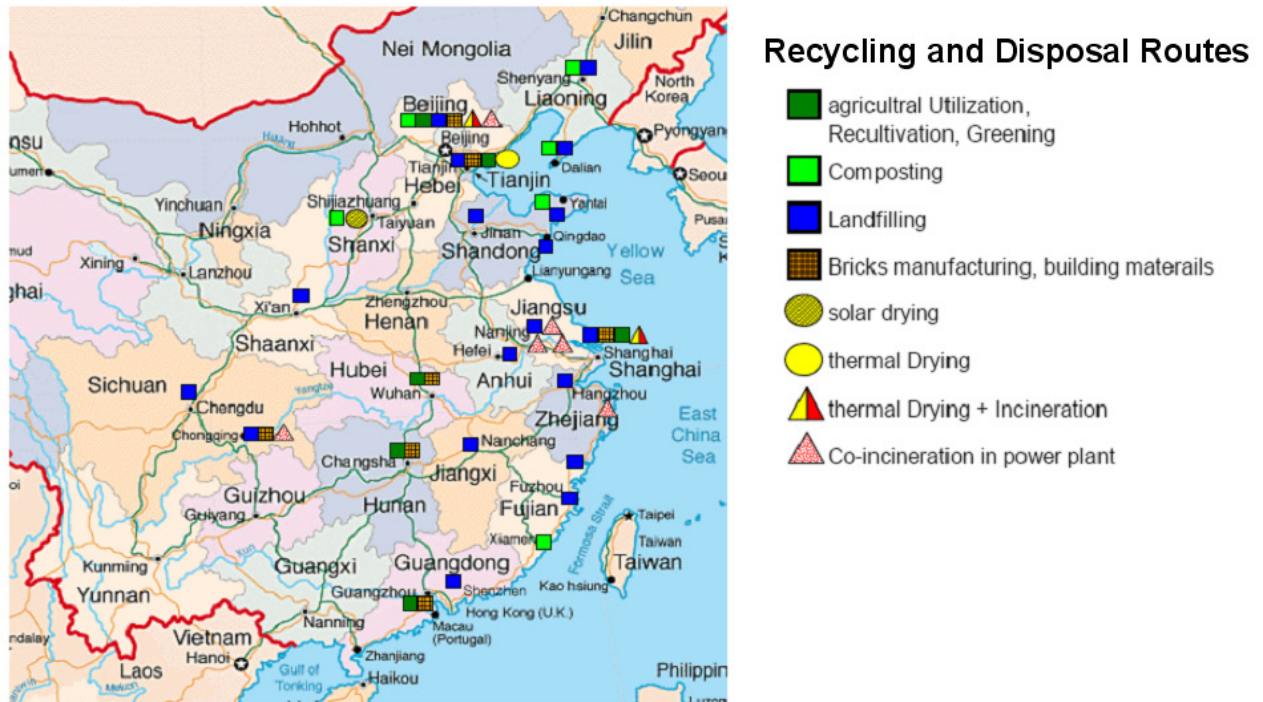


Bild 31: Regionale Verteilung der Verwertungs- und Entsorgungswege von Klärschlämmen in China (GyBer, 2007)

Zukünftige Entwicklungen dürften in die Richtung „Verwertung stabilisierter qualitativ guter Schlämme“, „(thermische) Entsorgung belasteter Schlämme“ gehen, insbesondere, da in China ein großes, bisher ungenutztes Potential an Mitverbrennungskapazitäten in Kohlekraftwerken, in Zementwerken oder in Müllverbrennungsanlagen existiert (He, 2007). Voraussetzung für eine umweltgerechte Mitverbrennung ist allerdings der Einsatz einer leistungsfähigen Rauchgasreinigung.

Literatur

Browder, G. 2007. Municipal Wastewater Cost Recovery in China. Presentation auf der World Bank Water Week, 28.02.2007. http://siteresources.worldbank.org/EXTWAT/Resources/4602122-1213366294492/5106220-1213649450319/2.3.1_Municipal_Wastewater_Cost_Recovery_in_China.pdf

CAWCUD (China Association of Water and Wastewater Professional Committee of Urban Drainage). 2005. China Wastewater Treatment Plants Compilation (auf chinesisches).

GyBer, U. 2007. Sludge Treatment in China - Chances and Challenges. Vortrag auf der International Water Conference Berlin, Workshop I, Integrated Solutions

- 12.-14..09.07. <http://www.iwc-berlin.de/pdf/2%20Workshop%20I%20Integrated%20Solutions/Gysser%20Presentation.pdf>
- Hagemann, A. 2007. Untersuchungen zur Co-Kompostierung von Klärschlamm und organischen Strukturmitteln bei hoher Umgebungstemperatur. Diplomarbeit im Vertiefungsfach Siedlungswasserwirtschaft an der TU Braunschweig
- Handelsblatt. 2005. Die Welt in Zahlen. 1. Auflage 11/2005, ISBN 3-502-15049-4.
- He, P. J., Lü, F., Zhang, H., Shao, L. M., and Lee, D. J. Sewage Sludge in China: Challenges Towards a Sustainable Future. In Wastewater Biosolids Sustainability: Technical, Managerial, and Public Synergy (Moncton, New Brunswick, Canada, Juni 2007), pp. pp 39_45.
- IIASA (International Institute for Applied Systems Analysis). 2007. Dominant soils in China. http://www.iiasa.ac.at/Research/LUC/GIS/img/soil_china.jpg, 2007. (Stand 11/2007)
- IUSS Working Group WRB. 2006. World reference base for soil resources. World Soil Resources Reports. 2nd edition. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
- Jing, Z. 2008. Sludge disposal, a headache for wastewater treatment plants. http://www.china.org.cn/environment/news/2008-12/15/content_16952293.htm Stand 15.12.2008
- Lee, D. J., Spinosa, L., He, P. J., and Chen, T. B. 2006. Sludge production and management processes: case study in China. Water Science & Technology, Vol 54 (5) pp. 189-196.
- Messmann, S., Schneider, T. 2004. Exportorientierte Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet der Wasserver- und -entsorgung, Teil II: Abwasserbehandlung und Wasserwiederverwendung, Band 1, Anforderungen an die Abwassertechnik in anderen Ländern - China. Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhl für Siedlungswasserwirtschaft und Umwelttechnik.
- Meyerjohann, R. 2005. Klärschlamm Entsorgung in China – Aktuelle Probleme und Lösungsmöglichkeiten. Vortrag bei der WAR-Vortragsreihe an der TU Darmstadt, 31.10.2005.
- Mühr, B. 2007. Klimadiagramme von Urumtschi, Peking und Guangzhou. <http://www.klimadiagramme.de/asien/china.html>, Stand 05/2007.
- Nemitz, G. 2009. China – Geographie <http://www.transasien.org/pages/china/geographie.php>, Stand 09/2009.
- Statistisches Bundesamt. 2008. Länderprofil: G-20 Industrie- und Schwellenländer – China. Ausgabe 2008.
- Yao, G. 1997. Strategien zur städtischen Klärschlamm Entsorgung in der Volksrepublik China unter Berücksichtigung deutscher Erfahrungen. Dissertation, Institut für Siedlungswasserwirtschaft der RWTH Aachen.
- Zhang, F. 1999. Pricing Wastewater Treatment in China. EEPSEA Report: Marginal Opportunity Cost Pricing for Wastewater Disposal – A Case Study of Wuxi, China.
- Zhang, J., Xiong, B. 2006. Towards a healthy water cycle in China. Water Science & Technology Vol 53 No 9 (2006), pp. 9-15.

Zheng, G. D., Chen, T. B., Gao, D., Luo, W. 2004. Dynamic of lead speciation in sewage sludge composting. *Water Science & Technology* 51(9), pp. 75-82.

2.1.3.5 Baltikum und Skandinavische Länder

Stellvertretend für Regionen kühl-gemäßigter Klimate wurden die Zielländer Schweden und Estland betrachtet.

Klimageographische Randbedingungen

Schweden

Schweden nimmt eine Fläche von 450.000 m² mit 9,2 Mio Einwohnern (Stand 2009) ein. Das Land ist vom Kattegat, den Staaten Norwegen und Finnland sowie der Ostsee begrenzt. Weite Teile sind flach bis hügelig. Entlang der norwegischen Grenze steigen allerdings die Gebirgsmassive der Skanden bis auf über 2.000 m Höhe an. Entlang des Gebirges erstrecken sich große Hochlandebenen auf einer Höhe von 600 bis 700 Metern über dem Meeresspiegel, die in ein welliges Hügelland übergehen, das nach Osten abfällt. In dieser Landschaft befinden sich auch die großen Erzvorkommen (Eisen, Kupfer, Zink, Blei) Schwedens (Svenska Intitutet 2006).

Das Klima in Süd- und Zentralschweden ist aufgrund des Golfstromeinflusses trotz der geographischen Lage feucht-gemäßigt mit Durchschnittstemperaturen von 6 bis 8 °C und 800 mm Niederschlag. Der Temperaturunterschied in Süd- und Nordschweden ist im Sommer gering, im Winter jedoch erheblich mit Jahresdurchschnittstemperaturen deutlich unter 0 °C. Nordschweden und die Hochlandebenen sind dem feuchten Borealklima zuzuordnen (Bild 32).

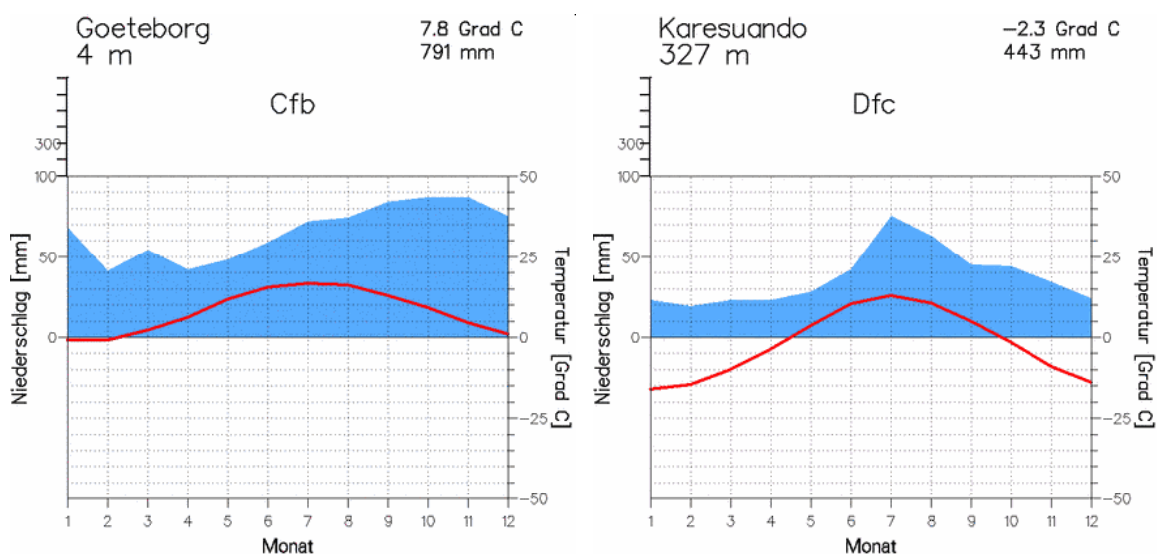


Bild 32: Klima in Südwestschweden (Göteborg), kontinental geprägt und Nordschweden (Karesuando), boreal (Mühr, 2007)

56 % der Staatsfläche sind bewaldet und werden forstwirtschaftlich genutzt, nur 10 % (fast ausschließlich im Süden des Landes) werden für Ackerbau und Viehzucht genutzt. Die wichtigsten landwirtschaftliche Produkte sind Getreide und Kartoffeln (Svenska Institutet, 2006).

Estland

Estland ist das nördlichste Land des Baltikums und nimmt eine Fläche von rund 45.000 m² mit 1,3 Mio Einwohnern (Stand 2007) ein. Es grenzt im Süden an Lettland, im Osten an Russland sowie im Norden und Westen an die Ostsee. Über den Finnischen Meerbusen hinweg bestehen enge Beziehungen zu Finnland.

Das Klima Estlands ist im Allgemeinen feucht-boreal geprägt mit kalten, frostigen Wintern und mäßig warmen Sommern mit geringen Schwankungen innerhalb des Landes. Die Jahresdurchschnittstemperatur in Tallinn liegt bei 5,1 °C, es fallen 853 mm Niederschlag mit einem Maximum im Spätsommer. Im Juli werden im Landesdurchschnitt 16,5 °C und im Januar -6,0 °C erreicht (Bild 33).

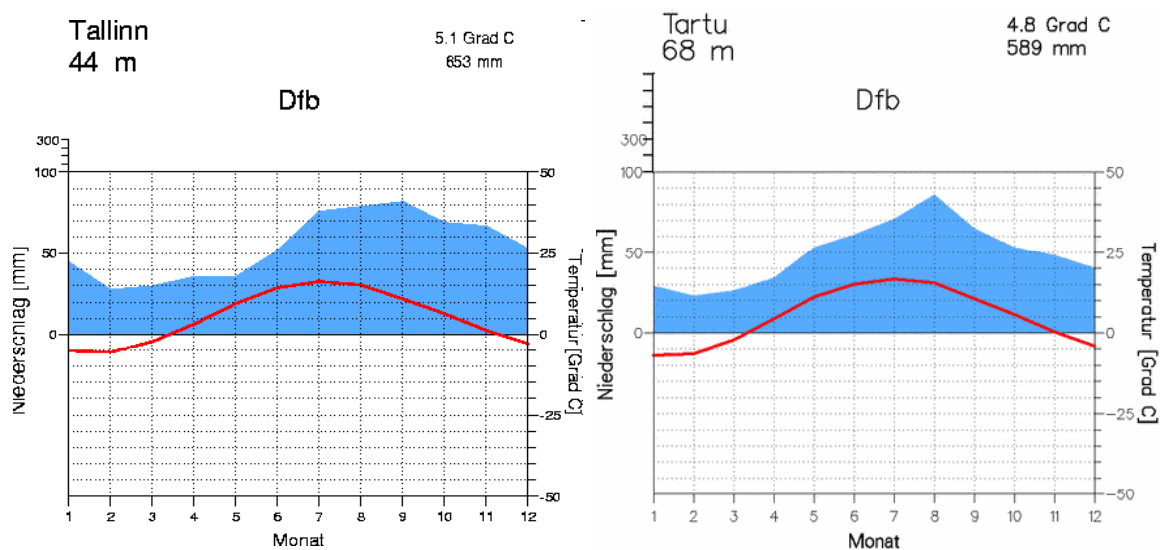


Bild 33: Klima in Nordestland (Tallin), Zentralestland (Tartu), boreal (Mühr, 2007)

Über 40 % des Landes sind bewaldet und die Holz verarbeitende Industrie stellt einen wichtigen Wirtschaftszweig dar. 45 % der Landfläche sind landwirtschaftliche Nutzfläche, die vor allem zur Erzeugung tierischer Produkte, für den Futterbau und den Anbau von Ölsaaten genutzt wird. Traditionell war die Landwirtschaft einer der wichtigsten Sektoren der estnischen Wirtschaft, seit der Unabhängigkeit und der bisher nicht abgeschlossenen Privatisierung ging die Produktion allerdings deutlich zurück (Europäische Kommission, 2009).

Rechtliche Rahmenbedingungen

Schweden

Die rechtlichen Rahmenbedingungen für wasser- und abwasserrelevante Fragestellungen in Schweden stellt das schwedische Wasserversorgungs- und Abwassergesetz, letztmals 1999 überarbeitet. Wasserver- und Abwasserentsorgung sind in Schweden traditionell vergesellschaftet und unterliegt der Verantwortung von Gemeinden und Lokalbehörden. Die Abwasserentsorgungsunternehmen sind Non-Profit Unternehmen, die nur durch Verbindungsentgelte und Betriebskosten finanziert werden dürfen. Der Umweltkodex von 1999 verlangt für alle Wasser- und Abwasseranlagen Umweltverträglichkeitsprüfungen und sieht auch Sanktionszahlungen vor (Hollos, 2003). Rechtliche Grundlage für die Klärschlammverwertung ist die Statens naturvardsverks forfattningssamling, in der Qualitätskriterien für die Klärschlammaufbringung festgehalten sind.

In Tabelle 31 sind die Schwermetallgrenzwerte für die landwirtschaftliche Klärschlammverwertung in Deutschland, Schweden und Estland gegenüber gestellt. Schweden gehört gemeinsam mit den übrigen skandinavischen Ländern, Dänemark und den Niederlanden zu den Staaten mit den strengsten Auflagen für die landwirtschaftliche Klärschlammverwertung.

Tabelle 31: Schwermetallgrenzwerte für Klärschlamm in mg/kg TR in Deutschland, Schweden und Estland im Vergleich zur Richtlinie 86/278/EWG (Europäische Kommission, 2001 und BMU, 2006

	86/228/EEC	Deutschland	Deutschland (Novelle 2007)	Schweden	Estland
Cd	20 – 40	10	2	2	15
Cr	-	900	80	100	1200
Cu	1000 – 1750	800	(600)	600	1000
Hg	16 – 25	8	1,4	2,5	16
Ni	300 – 400	200	60	50	400
Pb	750 – 1200	900	100	100	900
Zn	2500 – 4000	2500	(1500)	800	2500

Estland

Mit dem Beitritt Estlands zur Europäischen Union im April 2003 traten auch die Rahmenvorschriften der Umweltgesetzgebung der EU in Kraft. So ist Estland nationales Recht zur Abwasser- und Klärschlammthematik auch primär an den Vorgaben der EU orientiert (vgl. Tabelle 31). Für die Landwirtschaft wurde im Rahmen eines umfangreichen Umweltmonitoring von 2000 bis 2006 der Code of Good Agricultural Practice (GAP) mit entsprechenden Richtlinien entwickelt, der als richtungweisend

für eine angepasste Düngung und zum Schutz des Grundwassers insbesondere in sensiblen Regionen gilt. Die Richtlinien der GAP umfassen Empfehlungen zur Anbauplanung, zu Pflanzenschutzmaßnahmen, zur Ausbringung von Wirtschaftsdüngern und auch zum Abwassermanagement aus landwirtschaftlicher Produktion. Für die Verwendung dezentral und zentral produzierter Klärschlämme existieren gemäß der EU-Vorgaben zusätzlich zu den Qualitätskriterien Ausbringungsvorschriften und Nutzungsmaßgaben für klärschlammgedüngte Flächen.

Stand der Abwasserreinigung

Schweden

Der Anschlussgrad der schwedischen Bevölkerung an kommunale Kläranlagen und dezentrale Kleinkläranlagen liegt bei 83 % (Europäische Kommission, 2007). In Schweden gibt es etwa 500 großtechnische kommunale Kläranlagen, die jeweils das Abwasser von mehr als 2000 Einwohner reinigen. Dazu kommen etwa 800 kleine Anlagen, die das Abwasser von bis zu 2000 Personen behandeln. Jährlich fallen ca. 1,3 Mrd. m³ zu behandelndes kommunales Abwasser an. Das Abwasser kommunaler Kläranlagen wird mechanisch-biologisch und chemisch (Phosphorelimination) gereinigt (Bild 34). In erster Linie werden konventionelle Belebtschlammverfahren und SBRs eingesetzt. Eutrophierungsprobleme an schwedischen Küsten sorgten darüber hinaus dafür, dass seit den 90er Jahren ein gezieltes Stickstoffmonitoring und zusätzliche Maßnahmen zur Stickstoffelimination mit der „Vierten Reinigungsstufe“ in Form bepflanzter Filterbetten vorgenommen wird. Die Eliminationsleistungen mechanisch-biologischer Kläranlagen mit Phosphorfällung insgesamt liegen im Durchschnitt bei 54 % für Stickstoff, 95 % für Phosphor und 96 % für BSB (Mundt, 2006).

Nicht an das kommunale Kanalnetz angeschlossen sind etwa 450.000 Haushalte, dass entspricht mit etwa 1,2 Mio. Menschen 13% der Bevölkerung Schwedens. Dazu kommen noch weitere 290.000 Ferienhäuser die an dezentrale on-site Abwasserbehandlungsanlagen angeschlossen sind. Von diesen Anlagen erfüllen nur ca. 60% die Anforderungen der schwedischen Umweltgesetzgebung insbesondere hinsichtlich der Phosphorelimination. Die gebräuchlichen Verfahren sind Infiltrations-Brunnen (40 %), Schlammabscheider (24 %) und Erdbeete (18 %). Der Trend geht allerdings zu einer Sammlung des anfallenden Abwassers abgelegener Häuser in dafür vorgesehenen Tanks. Bei Erreichen einer maximale Befüllhöhe wird das gesammelte Abwasser ausgepumpt und in eine nahe gelegene Kläranlage zur weiteren Behandlung gebracht (Prade, 2007). Insbesondere im kälteren Norden des Landes mit geringer Besiedlungsdichte findet entgegen der EU-Richtlinien keine oder nur eine unzureichende Abwasserreinigung statt (Mundt, 2006).

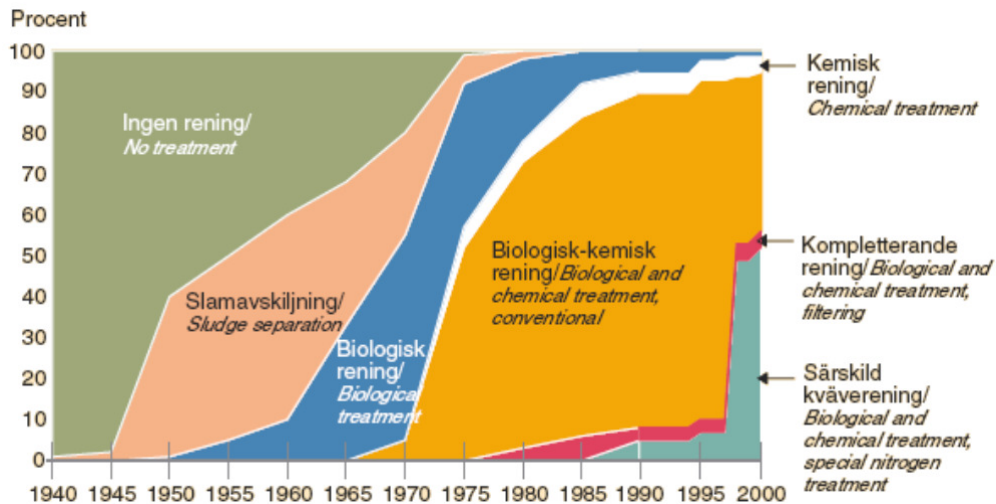


Bild 34: Anschlussgrad und Reinigungsstufen kommunaler Kläranlagen in Schweden (Handelmann, 2007)

Estland

In Estland hat sich erst zu Beginn der 90er Jahre eine flächendeckende Abwasserbehandlung etabliert. Bis dahin wurden Abwässer aus Industrieanlagen und privaten Haushalten noch weitgehend ungeklärt in Binnengewässer und direkt oder indirekt in die Ostsee geleitet (Ludwig, 1999). Graf und Kerner (1998) geben an, dass vorhandene Kläranlagen häufig überaltert oder außer Betrieb genommen waren und oft nur aus einer mechanischen Reinigungsstufe bestanden. In Städten wie Tartu, Tapa und Kuressaare gab es bis 1993 noch keine Kläranlagen. Im Zuge der Eutrophierungsprobleme vor allem in der Ostsee, sowie den Auflagen der EU Waste Water Directive 91/227/EEC wurden in Estland in den 90er Jahren, wie auch in den baltischen und skandinavischen Nachbarstaaten vermehrt Kläranlagen mit mechanisch-biologischer Reinigung und Phosphorfällung gebaut und modernisiert (Graf und Kerner, 1998). Ende der 90er Jahre betrug der Anschlussgrad städtischer Bevölkerung bereits > 90 %, auf dem Land > 60 % (Banhard, 2001). Die Auswirkungen auf die Seewasserqualität war beachtlich: Die Frachten eingeleiteter organischer Schadstoffe sind seit 1993 um fast 88 %, die Stickstoffeinträge um fast 50 % gesunken (Graf und Kerner, 1998; EstoniaStatistics, 2007), .

Nach Angaben der Europäischen Kommission (2007) lag der Bevölkerungsanteil mit einem Anschluss an kommunale Kläranlagen im Jahr 2002 bei 71 %. Der Anschluss an dezentrale Anlagen allein zur Abwasserableitung lag bei 28 % (2002) und an dezentrale Anlagen mit Abwasserbehandlung bei 1 % (2002). Die Menge des zu behandelnden Abwassers ist während der letzten Jahre weitestgehend konstant geblieben. Im Jahr 1994 sind insgesamt 379 Mio. m³ Abwasser angefallen, im 2005 326 Mio. m³ (EstoniaStatistics, 2007). 1994 wurden noch 5,4% des Abwassers nicht behandelt, 2005 sind dagegen über 99,4% einer Reinigung unterzogen worden. In

städtischen Agglomerationen wird in erster Linie eine Abwasserreinigung nach dem Belebtschlammverfahren durchgeführt, während in ländlichen Gebieten überwiegend Pflanzenkläranlagen genutzt werden. In den vergangenen Jahren wurde insbesondere auch in Estland intensiv zur Reinigungseffizienz von bepflanzten Bodenfiltern unter niedrigen Umgebungstemperaturen geforscht und die Ergebnisse werden bei der Betriebsführung von Pflanzenkläranlagen umgesetzt.

Stand der Klärschlammbehandlung

Schweden

Mehr als zwei Drittel des Klärschlammes in Schweden wird vor einer Nachbehandlung oder Verwertung in einer anaeroben Faulungsstufe behandelt (Prade, 2007). Ein hoher erreichbarer Abbaugrad und damit eine hohe Massenreduzierung sowie die Produktion nutzbaren Biogases sind die Hauptargumente für eine anaerobe Schlammbehandlung. So deckt z.B. Auf der Zentralkläranlage Stockholm die Biogas-Produktion 40 bis 45 % der internen Stromkosten der Abwasseranlage und alle Heizkosten der Stockholmer Wasserversorgung (Hollos, 2003).

Vor dem Hintergrund hoher gesetzlicher Auflagen für eine direkte landwirtschaftliche Verwertung werden derzeit vermehrt Anstrengungen unternommen, Wertstoffe aus dem Schlamm oder aus Schlammmaschen rückzugewinnen (z.B. Klärschlammhydrolyse zum erweiterten Zellaufschluss vor einer anaeroben Stabilisierung und Phosphorfällung im Schlammwasser (Hultmann, 1999)).

Estland

Trotz der Zunahme an Abwasserbehandlungsanlagen in Estland ist die sachgerechte Behandlung, Entsorgung und Verwertung entstehender Klärschlämme noch nicht flächendeckend realisiert wurden. Allein auf Kläranlagen größerer städtischer Agglomerationen wird eine biologische Schlammstabilisierung in Form der Kompostierung oder Klärschlammfäulung betrieben. Im folgenden wird die Klärschlammbehandlung auf den Zentralkläranlagen in Tartu und in der Hauptstadt Tallin vorgestellt:

In Tartu (100.000 Einwohner) wird der Klärschlamm der Zentralkläranlage nach der Eindickung und Entwässerung gemeinsam mit Rindenmulch und anderen organischen Abfällen in offenen Mieten über drei Monate unter regelmäßigem Wenden kompostiert und im Anschluss über ein Jahr nachgelagert. Pro Jahr fallen 12.000 m³ Kompost an. Die landwirtschaftliche Verwertung in unmittelbarer Umgebung zur Stadt Tartu erweist sich jedoch als problematisch, da die Landwirte wegen der relativ nährstoffreichen Böden in dieser Region nicht auf umfangreiche Düngung angewiesen sind und sich durch die Nutzungseinschränkungen klärschlammgedüngter Ackerflächen nicht einschränken lassen wollen (Handelmann, 2007). Es ist geplant,

die Klärschlammkompostierung langfristig durch eine Klärschlammfaulung zu ersetzen.

In Tallin (400.000 Einwohner) wurde auf der Zentralkläranlage bereits eine Klärschlammfaulung integriert, obschon Pläne aus den 90er Jahren noch eine simultan aerobe Schlammstabilisierung favorisierten. Nach der Faulung wird der Klärschlamm kompostiert und landwirtschaftlich verwertet.

Für den Klärschlamm in ländlichen Regionen, aus dezentralen Anlagen zur mechanischen Abwasserbehandlung, Rückständen aus Filterbetten und Pflanzenkläranlagen gibt es bisher keine angepassten Entsorgungsstrategien. Der Klärschlamm wird überwiegend getrocknet und deponiert.

Kosten der Abwasserbehandlung

Schweden

Die Abwasserreinigung und auch die Trinkwasserversorgung obliegt in Schweden den Gemeinden und wird hauptsächlich über Gebühreneinzüge finanziert. Investitionen werden z. T. vom Staat oder durch öffentliche Fonds finanziert. Die Höhe der Gebühren variiert stark innerhalb des Landes: 2001 wurden im Mittel umgerechnet 2,25 EUR/m³ verbrauchten Wassers bei einem Konsum bis 200 m³/a erhoben.

Estland

Auch in Estland unterliegt die Erhebung von Gebühren für die Wasserver- und Abwasserentsorgung den Gemeinden. Die Gebühren orientieren sich am Verbrauch einzelner Haushalte, sofern eine Mengenerfassung installiert ist und haben sich in den 90er Jahren mit den umfangreichen Investitionen zu Sanierung und zum Neubau von Wasser- und Abwasserinfrastruktur von ehemals ca. 0,3 EUR/m³ in 1994 (Banhard, 2001) vervielfacht. Der Wasserpreis liegt heute in Tallin bei umgerechnet 1,13 EUR/m³, der Abwasserpreis bei umgerechnet 0,92 EUR/m³, zuzüglich einer Pauschale für den Ausbau der Infrastruktur von umgerechnet 0,67 EUR/m³ (Tallina Vesi, 2009). In Haushalten ohne Mengenerfassung wird pauschal über den Pro-Kopf-Verbrauch, der je nach Art des Trinkwasserherkunft mit 30 bis 300 L/(E·d) angesetzt wird, abgerechnet (Banhard, 2001).

Klärschlammverwertung in der Landwirtschaft

Schweden

Nach Angaben der Europäischen Kommission (2007) sind in Schweden im Jahr 2002 242 Mio. kg TR Klärschlamm angefallen. Dieser wurde zu über 50% kompostiert, zu etwa 18% deponiert und zu etwa 12% landwirtschaftlich verwertet (Bild 35).

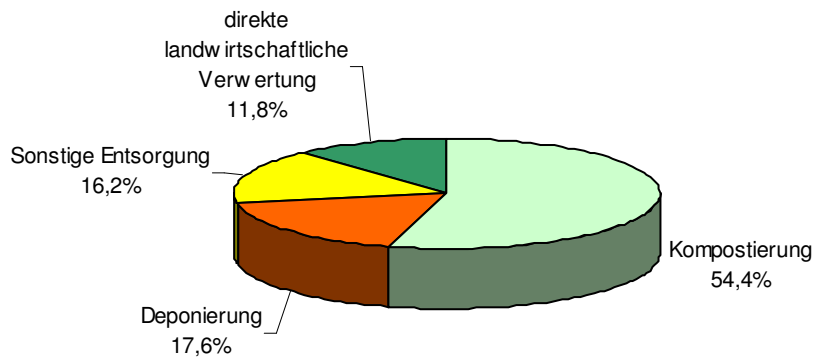


Bild 35: Klärschlammverbleib in Schweden 2002 (Europäische Kommission, 2007)

Nach Angaben von Prade, 2007 werden in den nördlichen Regionen Schwedens sogar zwischen 30 - 48% des Klärschlammes in der Landwirtschaft verwertet. Im Durchschnitt enthält der Schlamm 2,8 % Phosphor, 3,8 % Stickstoff und wird damit als guter Dünger eingestuft (Mundt, 2006). Problematisch für die landwirtschaftliche Verwertung sind allerdings die strengen gesetzlichen Auflagen, insbesondere die Schwermetallgrenzwerte, die eine landwirtschaftliche Verwertung beschränken.

Seit Oktober 1999 wird darüber hinaus von Seiten der Federation of Swedish Farmers von einer landwirtschaftlichen Klärschlammverwertung abgeraten. Ursache sind Untersuchungen der jüngsten Vergangenheit, die den Verbleib von bromierten Flammschutzmitteln im Klärschlamm feststellten. Es wird im allgemeinen befürchtet, dass ein Eintrag organischer Schadstoffe auf Flächen zur Nahrungsmittelerzeugung bisher unbekannte Konsequenzen und damit gesundheitliche und marktwirtschaftliche Risiken birgt. Ein ausreichendes Monitoring auch für organische Schadstoffe auf Kläranlagen wird aufgrund der Stoffvielfalt als ineffizient und zu kostspielig eingeschätzt (Swedish Food Federation, 1998, Swedish Environmental Protection Agency and Swedish Chemicals Inspectorate, 1999).

Es ist absehbar, dass die landwirtschaftliche Verwertung in Schweden stark zurückgehen wird, zumal auch nur ein begrenztes Angebot an möglichen Flächen für die Schlammapplikation zur Verfügung steht. Eine alternative Verwertung des Schlammes in der Forstwirtschaft, wie sie auch in Finnland z. T. durchgeführt wird, ist vor allem aus technischen Gründen nicht praktikabel. Möglichkeiten zur Klärschlammverbrennung stehen in Schweden bisher nicht zur Verfügung, die Deponierung wird schrittweise zurückgefahren. Eine Chance zur Klärschlammverwertung bietet derzeit die Bodensanierung und Rekultivierung, bei der vor allem Klärschlammkomposte zum Einsatz kommen (Europäische Kommission, 2001).

Estland

In Estland wurden 2007 28,8 Mio. kg TR Klärschlamm in öffentlichen Abwasserbehandlungsanlagen produziert. Davon wurden lediglich knapp 10 % direkt landwirt-

schaftlich verwertet (Bild 36). Unter den Großteil Klärschlämme die unter „sonstiger Entsorgung“ erfasst sind, fallen auch Schlämme zur Wiederaufforstung und Rekultivierung von ehemaligen Torfabbauf Flächen sowie die in Schlammfeldern gelagerten Klärschlämme (Pikka, 2005).

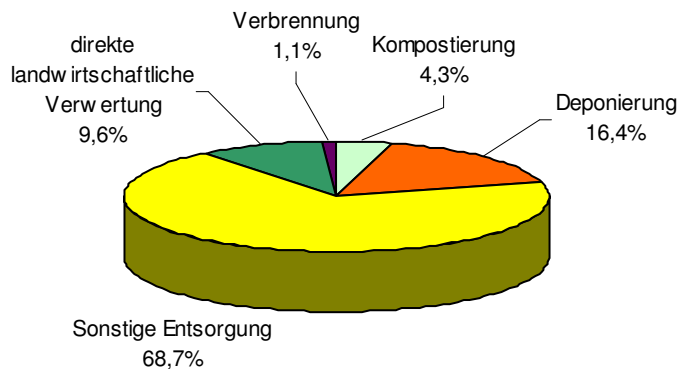


Bild 36: Klärschlammverbleib in Estland 2007 (Eurostat 2009)

Gegenüber den skandinavischen Ländern gibt es in Estland keine Imageprobleme bei der landwirtschaftlichen Verwertung von Klärschlämmen und auch keine gegenüber den EU Vorgaben deutlich verschärften Grenzwerte z.B. für Schwermetalle, die eine landwirtschaftliche Verwertung des Großteils kommunaler Klärschlämme unmöglich machen würde. Nach Angaben von Varnomasing (2007) wird Klärschlamm als günstiges Düngemittel von den Landwirten in ländlichen Gebieten sogar gerne verwendet, vor allem weil die Böden in Estland relativ nährstoffarm sind und das Image industriell hergestellter Dünger durch seine niedrige Qualität und hohen Schadstoffgehalte zu Sowjetzeiten eher negativ ist.

Literatur

- Banhard, P. 2001. Water Pricing and Policy in Estonia. Presentation for the 1st Conference of the NIS Water Senior Officials. Kiev, 09.-11.09.2001.
- EstoniaStatistics. 2007. Statistical database: Environment - Environmental pressure. http://pub.stat.ee/px-web.2001/l_Databas/Environment/01Environmental_pressure/12Water_pollution/12Water_pollution.asp
- Europäische Kommission. 2001. Disposal and recycling Routes for Sewage Sludge. Part 1 – Sludge Use Acceptance Report. European Commission DG Environment, Luxemburg.
- Europäische Kommission. 2007. EUROSTAT - Statistik kurz gefasst, Umwelt und Energie. http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page?_pageid=1090,1&_dad=portal&_schema=PORTAL, Stand 07/2007.
- Europäische Kommission. 2009. MOEL. Lage und Aussichten der Landwirtschaft in den mittel- und osteuropäischen Ländern – Estland. http://ec.europa.eu/agriculture/publi/peco/estonia/summary/sum_de.htm, Stand 09/2009.

- Eurostat. 2009. Entsorgung von Klärschlämmen aus öffentlicher Abwasserbehandlung. Europäische Statistiken der Europäischen Kommission. http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/product_results/search_results?mo=containsall&ms=sewage+sludge&saa=&p_action=SUBMIT&l=d&co=equal&ci=&po=equal&pi=, Stand 03/2009.
- Graf, H., Kerner, M. 1998. Handbuch Baltikum heute. Berlin Verlag.
- Handelmann, B. 2007. Untersuchungen zur natürlichen Klärschlammmentwässerung und -trocknung in kalten Klimaten. Diplomarbeit im Vertiefungsfach Siedlungswasserwirtschaft an der TU Braunschweig.
- Hollos, B.M. 2003. Privatisierung und Liberalisierung öffentlicher Dienstleistungen in der EU-15: Wasser und Abwasser. ÖGPP, Stand 09/2003.
- Hultmann, B. 1999. Trends in Swedish sludge handling., Proceedings of the Polish – Swedish Seminar on Sustainable Municipal Sludge and Solid Waste Handling, Royal Institute of Technology, Stockholm August 24th 1999.
- Ludwig, K. 1999. Estland. C. H. Beck Verlag.
- Mühr, B. 2007. Klimadiagramme von Göteborg und Karesuando. <http://www.klimadiagramme.de/Europa/goeteborg.html> und <http://www.klimadiagramme.de/Europa/karesuando.html>, Stand 05/2007.
- Mundt, K. 2009. Wastewater Treatment in Schweden. <http://www.docstoc.com/docs/2984080/Waste-Water-Treatment-in-Sweden>, Stand 03/2010.
- Pikka, J. 2005. Use of wastewater sludge for soil improvement in afforesting cutover peatlands. – Metsanduslikud uurimused. Forestry Studies 42 , pp. 95–105. ISSN 1406-9954.
- Prade, T. 2007. Fernmündliche Auskunft. Hochschule Halmstad, Schweden.
- Swedish Environmental Protection Agency and Swedish Chemicals Inspectorate. 1999. Att Finna Farliga Flöden: Kemikalier i Samhället (Finding Hazardous Flows: Chemicals in the Society). Report #5036, Swedish Environmental Protection Agency, Stockholm (auf Schwedisch).
- Swedish Food Federation. 1998. Metadata: The Swedish Food Federation's sludge policy. www.li.se, Stand 05/2003, (auf Schwedisch).
- Svenska Institutet. 2006. Schwedens Geographie. Eigenverlag, Stockholm.
- Tallinna Vesi. 2009. Tariffs for Domestic Customers. <http://tallinnavesi.ee/?op=body&id=152>, Stand 09/2009.
- Varnomasing, P. 2007. Fernmündliche Auskunft. Estonian University of Life Sciences.

2.1.4 Gegenüberstellung der vorgegebenen und erreichten Ziele

In der folgenden Tabelle sind die übergeordneten geplanten und realisierten Ziele des Forschungsprojektes abschließend gegenübergestellt.

Tabelle 32: Gegenüberstellung ursprünglicher und realisierter Ziele

	Ursprüngliches Ziel	Realisierung
1	Literatur und Länderstudien zur Klärschlammbehandlungs- und Verwertungspraxis in Europa und im außereuropäischen Ausland	Status Quo Deutschland; Länderstudien für die Zielländer/-regionen <ul style="list-style-type: none"> • Ägypten • Thailand • China • Vietnam • Region: Baltikum/Skandinavien mit Vor-Ort Studien in Ägypten und Vietnam (vgl. Kapitel 1.3.6)
2	Auswertung von bereits bekannten Zusammenhängen zwischen klimatischen Randbedingungen, Behandlungsdauer und Stabilisierungs-, Desinfektionserfolg	Durchgeführt; Integration von Literaturdaten in Empfehlungen zur Behandlungszeit in Abhängigkeit der Temperatur bei biolog. Stabilisierungsverfahren
3	praktische Untersuchungen zu einzelnen Behandlungsverfahren unter im Projektverbund abgestimmten Untersuchungsbedingungen (Temperaturen von 5 bis 30 (35) °C) in Klimakammern	Versuche im labor- und halbtechnischen Maßstab in Klimakammern mit Variation der Untersuchungstemperatur und sonstigen Versuchsbedingungen gemäß Tabelle 2; Durchführung in drei statt vier der geplanten Klimakammern durch Laufzeitverlängerung möglich (vgl. Kapitel 1.3.6); Zusätzliche Untersuchungen zur Bewertung des Behandlungserfolges mittels Pflanzenverträglichkeitstests durch Laufzeitverlängerung möglich (vgl. Kapitel 1.3.6)
4	Hinweise zur Bemessung und zum Betrieb von Klärschlammbehandlungsanlagen unter geänderten Randbedingungen	Zusammenstellung der Kernaussagen aus Punkt 1 und 2 zur Bemessung und zum Betrieb der untersuchten Behandlungstechnologien für den Leitfaden
5	Entscheidungsmatrix zur Auswahl geeigneter Klärschlammbehandlungsverfahren	Qualitative Bewertung von Vor- und Nachteilen verschiedener Behandlungsverfahren hinsichtlich Stabilisierungserfolg, Verwertbarkeit des Produktes und Kosten; Zusätzliche Auswertung hinsichtlich geeigneter Behandlungsverfahren in Abhängigkeit der Anschlussgröße

2.2 Notwendigkeit und Angemessenheit der Arbeit

In der Bundesrepublik Deutschland gibt es heute mehrere 100.000 Arbeitsplätze im Umweltschutzbereich. Die deutsche Industrie gehört in Fragen des Umweltschutzes und bei der Produktion von Umweltschutzprodukten zu den führenden Industrienationen dieser Welt, sieht sich aber einem wachsenden internationalen Wettbewerb konfrontiert. Nur eine stete Anpassung von Wissen und Technologie kann dazu beitragen, die Belange des Umweltschutzes sowie der Nachhaltigkeit in Zukunft noch

besser zu berücksichtigen, d.h. die Probleme besser und nachhaltiger zu lösen als bisher und damit die Position am Markt auszubauen.

Eine Ursache hierfür ist auch darin zu sehen, dass insbesondere im Bereich der Abwassertechnik bis heute eine sachbezogene Forschung zur Adaption der bei uns vorliegenden Erkenntnisse und Techniken an die andersartigen klimatischen, sozi-ökologischen sowie sozioökonomischen Randbedingungen nicht stattgefunden hat. Genau hier greift das Verbundprojekt als übergeordneter Rahmen und insbesondere das Teilprojekt „Klärschlammbehandlung und -verwertung“ an und trägt dazu bei, dass im Bereich der Wasserwirtschaft deutsche Technologie besser als bisher in andere Regionen dieser Welt transferiert werden kann. Letztendlich kann somit, insbesondere auch für die mittelständische Umweltindustrie, die internationale Wettbewerbsfähigkeit nicht nur erhalten sondern sogar gesteigert werden.

Das Teilprojekt „Klärschlammbehandlung und -verwertung“ ist das einzige Projekt, das sich im Rahmen des Projektverbundes mit Fragestellungen zur Behandlung von Reststoffen aus der Abwasserreinigung befasste. Aus der Vielzahl an zur Verfügung stehenden und gleichzeitig unter deutschen bzw. mitteleuropäischen Verhältnissen gut erforschten Klärschlammbehandlungstechnologien wurden acht Verfahren für das Untersuchungsprogramm ausgewählt, die in Anlehnung an die EU-Klärschlammrichtlinie als Stand der Technik anzusehen sind und prinzipiell für den Transfer insbesondere auch in Entwicklungs- und Schwellenländer geeignet sind. Damit Aussagen über die Leistungsfähigkeit der Verfahren in Abhängigkeit von geänderten Randbedingungen, insbesondere der Temperatur möglich sind, musste ein umfangreiches Untersuchungsprogramm zur Erhebung des Status Quo in ausgewählten Zielländern sowie zu ergänzenden praktischen Versuchen entwickelt werden um einen möglichst lückenlosen Aussagen hinsichtlich Wirkungsweise, Funktion und Erfolg der Behandlungs- und Verwertungs- bzw. Entsorgungsmöglichkeiten treffen zu können. Der in Kapitel 2.1.1 vorgestellte Untersuchungsumfang war vor dem Hintergrund der übergeordneten Projektziele (vgl. Kapitel 1.1) absolut notwendig, um diesen Fragestellungen in der erforderlichen Detailtiefe gerecht zu werden. Das vorliegende Teilprojekt ist damit essentieller und integraler Bestandteil des gesamten Projektverbundes, wenn es darum geht, vollständige Lösungswege für die gesamte Verfahrenskette aus Abwasserreinigung und Reststoffbehandlung für geänderte Randbedingungen aufzuzeigen.

2.3 Verwertungsplan

Die teilprojektspezifischen Verwertungen werden in den folgenden Abschnitten beschrieben und als Verwertungsliste tabellarisch zusammengefasst.

2.3.1 Wirtschaftliche Erfolgsaussichten

Die im Rahmen der Untersuchungen zu unterschiedlichen Klärschlammbehandlungstechnologien erarbeiteten Erkenntnisse liefern einen wertvollen Beitrag dafür, dass bei der zukünftigen Entwicklung von nachhaltigen Konzepten zur Abwasserbehandlung in der Entwicklungszusammenarbeit auch das Klärschlammmanagement einen angemessenen Stellenwert einnimmt. In diesem Zusammenhang ist insbesondere die Verwertung der Empfehlungen im Leitfaden des Projektverbundes hinsichtlich einer stabilen Betriebsführung für qualitativ hochwertige Klärschlammprodukte sowohl für Anlagenbauer als auch Planungsbüros als besonders hoch einzustufen, da diese einen Zugang zu neuen Zielregionen und/oder einen Wettbewerbsvorteil auf dem freien Markt erhalten. Der Leitfaden soll noch im Jahr 2009 veröffentlicht werden und steht somit kurzfristig nach Projektabschluss der Koordinationsprojekte (Oktober 2009) der Fachwelt zur Verfügung.

Der volkswirtschaftliche Nutzen in den Zielregionen liegt in der mittel- und langfristigen Verbesserung der Lebensqualität, wenn zukünftig insbesondere in Entwicklungs- und Schwellenländern verstärkt ganzheitliche Lösungen zur Abwasserreinigung und Reststoffbehandlung zur Verfügung stehen und ihre Anwendung finden. Immer noch wird der Klärschlammproblematik in vielen Projekten der Entwicklungszusammenarbeit auf dem Abwassersektor eine sehr geringe Priorität zugesprochen. Aber auch in den Wachstumsregionen dieser Zielländer nehmen Umweltschutzmaßnahmen einen wachsenden Stellenwert bei gleichzeitiger Verschärfung der Leistungsbewertung und Betriebskontrolle ein. Eine wissenschaftlich fundierte Entscheidungshilfe für oder gegen mögliche Klärschlammbehandlungsstrategien und Empfehlungen für eine sichere Betriebsführung, wie sie im Rahmen des Forschungsprojektes veröffentlicht werden, sind daher von hoher Wichtigkeit.

Schließlich ist darüber hinaus zu berücksichtigen, dass die Produktion qualitativ hochwertiger Stabilisierungsendprodukte eine weitergehende Nutzung der enthaltenen Wertstoffe im Sinne des Ressourcenschutzes bedeutet.

2.3.2 Wissenschaftliche Erfolgsaussichten

Die Ergebnisse der Untersuchungen zum Zusammenhang zwischen Stabilisierungsbzw. Desinfektionserfolg sowie vorherrschenden klimatischen und sonstiger Randbedingungen ergänzen systematisch bereits aus der Literatur bekannte oder auf Erfahrungen beruhende Erkenntnisse. Die wissenschaftlichen Grundlagen zur Klärschlammbehandlung wurden anwendungsorientiert erweitert und tragen somit zu einer optimierten Konzipierung und Dimensionierung sowie sicheren und stabilen Betriebsführung von Klärschlammbehandlungsanlagen bei. Die wissenschaftlich aufbereiteten Ergebnisse wurden Projekt begleitend publiziert.

Darüber hinaus werden die Ergebnisse des Teilprojektes in der universitären Lehre des ISWW für das Studienangebot in Braunschweig und im Rahmen der jüngst eingeworbenen DAAD-Exzellenzinitiative zum Thema „Nachhaltiges Wassermanagement“ verwertet. Einzelfragestellungen innerhalb des Arbeitsplans boten bereits während der Projektlaufzeit eine Vielzahl von Seminar-, Studien- und Diplomarbeiten.

Die mehrjährige Zusammenarbeit aller Verbundprojektteilnehmer und insbesondere innerhalb des dem TP B4 zugehörigen Kernprojekts B, festigte die Beziehungen zwischen den beteiligten Institutionen und trug dazu bei, dass vorhandene Kompetenzen und Forschungsschwerpunkte um wertvolle Impulse ergänzt werden konnten.

2.3.3 Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

Über die Veröffentlichung der wesentlichen Erkenntnisse im Leitfaden wird der breiten Fachwelt der Zugang zu den Projektergebnissen sichergestellt, so dass diese zukünftig insbesondere in Projekten zur technischen Entwicklungszusammenarbeit genutzt werden können.

Darüber hinaus ist ab Ende 2009 vorgesehen, die Ergebnisse in der DWA-Arbeitsgruppe AK 2.1 „Stabilisierung“ zu verbreiten und zu diskutieren. Damit werden die Forschungsergebnisse über das Verbundprojekt hinaus diskutiert und können ggf. langfristig zu einer Erweiterung des entsprechenden technischen Regelwerks, das bisher hauptsächlich Empfehlungen zur Klärschlammstabilisierung unter in Deutschland vorherrschenden Randbedingungen enthält, beitragen.

2.3.4 Verwertungsliste

Nachfolgend sind die in den Abschnitten 2.3.1 bis 2.3.3 genannten Verwertungen zusammengefasst und jeweils einem Zeithorizont zugeordnet.

Tabelle 33: Verwertungsliste

Nr.	Bezeichnung	Zeithorizont
1	Präsentationen (siehe Anlage 2.3.5): 2 Vorträge 5 Publikationen 1 Messebeitrag	2007-2009
2	Studentische Arbeiten (siehe Anlage 2.3.5): 1 Seminarvortrag 2 Studienarbeiten 5 Diplomarbeiten	2007-2009
3	Beitrag zur Lehre: Berücksichtigung der Projektergebnisse im Skript zur Lehrveranstaltung „Verfahrenstechnik der Schlammbehandlung“ des Vertiefungsstudiums am ISWW und in den Lehrveranstaltungen der DAAD-Exzellenzinitiative „Nachhaltiges Wassermanagement“ in den Partnerländern	Seit 2009 Ab 2010
4	Beitrag zum Projektverbund: Präsentation in Workshops projektübergreifender Schlussbericht	2006-2009 2009

	Leitfaden	2009
5	Fachverbände: Verbreitung der Ergebnisse in der DWA-Arbeitsgruppe AK 2.1 „Stabilisierung“	Ab Ende 2009
6	Zuarbeit zu anderen Projekten: Anknüpfung an Ergebnisse zur Trockenbeetentwässerung im DBU-Projekt „Realisierung eines stoffstromorientierten Abwasser- und Reststoffentsorgungskonzeptes in exponierter Lage unter Berücksichtigung objektspezifischer und ortsgebundener Randbedingungen, insbesondere des Umweltschutzes (KOMPEX II)“	Seit 2008

2.3.5 Anlage zur Verwertungsliste

2.3.5.1 Vorträge

Bauerfeld, K., Dockhorn, T., Dichtl, N. 2007. Sludge Treatment and Reuse Considering Different Climates and Varying Other Conditions – Export-Oriented Research for Developing and Threshold Countries. Artikel und Vortrag auf der IWA Tagung „Facing Sludge Diversities: Challenges, Risks and Opportunities“ vom 28.03.-30.03.2007 in Antalya, Türkei.

Bauerfeld, K., Dockhorn, T., Dichtl, N. 2007. Technologies for Sewage Sludge Stabilization and Sanitation Considering Different Climates and Varying Other Conditions. Vortrag auf der „H₂O Vietnam – Networking the Water Industries“, Deutsch-Vietnamesisches Forum am 19.10.2007 in Ho Chi Minh City, Vietnam.

2.3.5.2 Publikationen

Bauerfeld, K., Dockhorn, T., Dichtl, N. 2007. Klärschlammbehandlung und -verwertung unter anderen klimatischen und sonstigen Bedingungen. *Müll und Abfall*, 39 (9), pp 427-432.

Bauerfeld, K., Dockhorn, T., Dichtl, N. 2008. Sludge Treatment and Reuse Considering Different Climates and Varying Other Conditions – Export-Oriented Research for Developing and Threshold Countries. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 43 (13), pp 1556-1561

Geplant:

Bauerfeld, K., Dockhorn, T., Dichtl, N. 2009: Klärschlammbehandlung und -verwertung unter anderen klimatischen und sonstigen Randbedingungen. Abschlussbericht zum BMBF-Forschungsvorhaben 02WA0733, TU Braunschweig.

Bauerfeld, K., Dockhorn, T., Dichtl, N. 2009: Klärschlammbehandlung und -verwertung unter anderen klimatischen und sonstigen Randbedingungen. In: Gesamtabschlussbericht des BMBF-Verbundprojektes „Exportorientierte Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet der Wasserver- und -entsorgung, Teil II: Abwasserbehandlung und Wasserwiederverwendung“.

Bauerfeld, K., Dockhorn, T., Dichtl, N. 2009. Klärschlammbehandlung und -verwertung. In: Leitfaden des BMBF-Projektverbundes „Exportorientierte Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet der Wasserver- und -entsorgung, Teil II: Abwasserbehandlung und Wasserwiederverwendung“.

2.3.5.3 Messebeitrag

Bauerfeld, K., Dockhorn, T., Dichtl, N. 2009: Klärschlammbehandlung und -wertung unter anderen klimatischen und sonstigen Randbedingungen. Posterpräsentation auf der IFAT München, 5.-9. Mai 2009.

2.3.5.4 Studentische Arbeiten

Seminarvortrag

Heußner, Christoph. 2008. Solare Klärschlamm-trocknung in Deutschland. Seminarvortrag im Vertiefungsfach Siedlungswasserwirtschaft an der TU Braunschweig.

Studienarbeiten

Kosolkamolmas, Natcha. 2008. Fallstudie: Angepasstes Klärschlammmanagement in Thailand mit besonderem Fokus auf die anaerobe Stabilisierung. Studienarbeit im Vertiefungsfach Siedlungswasserwirtschaft an der TU Braunschweig.

Geplant:

Daenecke, Kerstin. 2009. Erstellung von Stoffumsatzmodellen für die aerobe Nachstabilisierung von Klärschlamm. Studienarbeit im Vertiefungsfach Siedlungswasserwirtschaft an der TU Braunschweig.

Diplomarbeiten

Handelmann, Birte. 2007. Untersuchungen zur natürlichen Klärschlamm-entwässerung und -trocknung in kalten Klimaten. Diplomarbeit im Vertiefungsfach Siedlungswasserwirtschaft an der TU Braunschweig.

Hagemann, Antje. 2007. Untersuchungen zur Co-Kompostierung von Klärschlamm und organischen Strukturmitteln bei hoher Umgebungstemperatur. Diplomarbeit im Vertiefungsfach Siedlungswasserwirtschaft an der TU Braunschweig.

Kosolkamolmas, Natcha. 2008. Erstellung von Stoffumsatzmodellen für die anaerobe Klärschlammstabilisierung. Diplomarbeit im Vertiefungsfach Siedlungswasserwirtschaft an der TU Braunschweig.

Feldhaus, Helen. 2009. Untersuchungen zur Klärschlammvererdung mit Schilf bei hoher Umgebungstemperatur. Diplomarbeit im Vertiefungsfach Siedlungswasserwirtschaft an der TU Braunschweig.

Orth, Inken. 2009. Untersuchungen zur Temperaturabhängigkeit des Stoffumsatzes bei der aeroben Nachstabilisierung von Klärschlamm. Diplomarbeit im Vertiefungsfach Siedlungswasserwirtschaft an der TU Braunschweig.

2.4 Arbeiten, die zu keiner Lösung führten

Die geplanten Arbeiten konnten erfolgreich bearbeitet und abgeschlossen werden.

2.5 Während des Vorhabens bekannt gewordener Fortschritt bei anderen Stellen

Der während des Vorhabens bekannt gewordene Fortschritt von dritter Seite betrifft in erster Linie die nationale Umweltforschung zum Thema Klärschlammbehandlung

im außereuropäischen Ausland und stellt eine wertvolle Ergänzung der in Braunschweig durchgeführten Studien dar. Im Rahmen der Länderstudien wurde das Zusammentragen umfangreichen Datenmaterials zur Klärschlammproblematik ermöglicht und Vor-Ort-Besuche an verschiedenen Kläranlagen und Behandlungszentren im Ausland durchgeführt, die eine differenzierte Betrachtung der Klärschlammsituation für verschiedene Zielregionen ermöglichten (vgl. Kapitel 2.1.3).

Durch die Ergebnisse der Untersuchungen in Klimakammern an der TU Braunschweig und der Literaturrecherchen hatten sich bereits insbesondere die Klärschlamm-trocknung und Co-Kompostierung mit organischem Strukturmaterial als zielführend für warme Klimate herauskristallisiert. So wurden z.B. auch in Ägypten in den letzten Jahren zwei Behandlungszentren zur Klärschlammkompostierung errichtet. Besonders wertvoll waren in diesem Zusammenhang die Ergebnisse zur Produktqualität behandelter Klärschlämme, die unter den vorliegenden Bedingungen bei der Kompostierung erreicht werden kann. Im Gegensatz zu den eigenen praktischen Untersuchungen in der Klimakammer mit Schlämmen deutscher Kläranlagen wurden auf den Anlagen in Ägypten höhere Reduktionsraten pathogener Mikroorganismen während des Kompostierungsprozesses erreicht, als bisher angenommen.

Die Vor-Ort Studien in Vietnam und Thailand hingegen zeigten deutlich, dass neben natürlichen Verfahren zur Klärschlamm-entwässerung wie die konventionelle Trockenbeetentwässerung oder aber die Klärschlammvererdung ein großes Interesse an einer anaeroben Klärschlammbehandlung insbesondere auf den großen Kläranlagen in den Städten (Thailand) oder in den Industriezonen (Vietnam) besteht. Die Klärschlammfaulung unter Umgebungstemperaturen nimmt in diesen Ländern einen Forschungsschwerpunkt ein. Die großtechnische Faulung kommunalen Klärschlammes spielt zwar vor allem in Vietnam aus Mangel an funktionstüchtigen Kläranlagen derzeit noch keine Rolle, wird aber in zukünftige Planungen, insbesondere bei der Industrieschlammbehandlung, bereits eingeschlossen.

Zusätzlich zu den Erkenntnissen über erreichbare Stabilisierungs- und Desinfektionserfolge aus Pilotstudien unter anderen Randbedingungen war es für das Projekt insbesondere relevant, zukünftige Entwicklungen und Perspektiven für die stoffliche Verwertung von Klärschlammprodukten zu bewerten. Im Rahmen der Länderstudien konnte erarbeitet werden, dass mit steigenden Kosten für die landwirtschaftliche Produktion auch die Nachfrage nach Sekundärrohstoffen und damit nach alternativen Düngemitteln steigt, sofern diese qualitativ hochwertig sind und kostengünstig in der Landwirtschaft eingesetzt werden können. Ein Akzeptanzproblem für die Verwertung von Klärschlammprodukten konnte für keines der Zielländer festgestellt werden, allerdings bestehen erhebliche Mängel bei der Qualitätskontrolle der vermarkteten

Produkte und damit auch nur ein begrenztes Vertrauen in die erzeugten Sekundärrohstoffdünger.

2.6 Veröffentlichungen

Bauerfeld, K., Dockhorn, T., Dichtl, N. 2007. Sludge Treatment and Reuse Considering Different Climates and Varying Other Conditions – Export-Oriented Research for Developing and Threshold Countries. Artikel und Vortrag auf der IWA Tagung „Facing Sludge Diversities: Challenges, Risks and Opportunities“ vom 28.03.-30.03.2007 in Antalya, Türkei.

Bauerfeld, K., Dockhorn, T., Dichtl, N. 2007. Klärschlammbehandlung und -verwertung unter anderen klimatischen und sonstigen Bedingungen. *Müll und Abfall*, 39 (9), pp 427-432.

Bauerfeld, K., Dockhorn, T., Dichtl, N. 2007. Technologies for Sewage Sludge Stabilization and Sanitation Considering Different Climates and Varying Other Conditions. Vortrag auf der „H₂O Vietnam – Networking the Water Industries“, Deutsch-Vietnamesisches Forum am 19.10.2007 in Ho Chi Minh City, Vietnam.

Bauerfeld, K., Dockhorn, T., Dichtl, N. 2008. Sludge Treatment and Reuse Considering Different Climates and Varying Other Conditions – Export-Oriented Research for Developing and Threshold Countries. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 43 (13), pp 1556-1561

Geplant:

Bauerfeld, K., Dockhorn, T., Dichtl, N. 2009: Klärschlammbehandlung und -verwertung unter anderen klimatischen und sonstigen Randbedingungen. In: Gesamtabschlussbericht des BMBF-Verbundprojektes „Exportorientierte Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet der Wasserver- und -entsorgung, Teil II: Abwasserbehandlung und Wasserwiederverwendung“.

Bauerfeld, K., Dockhorn, T., Dichtl, N. 2009. Klärschlammbehandlung und -verwertung. In: Leitfaden des BMBF-Projektverbundes „Exportorientierte Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet der Wasserver- und -entsorgung, Teil II: Abwasserbehandlung und Wasserwiederverwendung“.