Vortrag auf dem
Seminar des VDI-Bildungswerkes
"Klärschlammentsorgung"
18.-20. Mai 1987, München

SCHLAMMKOMPOSTIERUNG

Prof. Dr.-Ing. W. Baader VDI, Dr. F. Schuchardt,
Dipl.-Ing. H. Sonnenberg VDI

1. Einleitung

Klärschlamm enthält neben einem hohen Anteil an organischer Substanz (50 bis 80 % der Trockensubstanz) erhebliche Mengen an Pflanzennährstoffen (Stickstoff, Phosphor, Kalium, Kalzium, Magnesium). Er ist daher ein wertvolles Bodenverbesserungs- und Düngemittel. Soweit keine beeinträchtigenden Schadstoffe enthalten sind, wird die Verwertung des Schlammes in der landwirtschaftlichen Pflanzenproduktion aus ökonomischer und ökologischer Sicht als sinnvoll angesehen.

Den wertvollen Eigenschaften stehen einige Nachteile gegenüber:

- Ein Teil der organischen Substanz geht leicht in Fäulnis über und führt zu unangenehmen Gerüchen.
- Aus hygienischer Sicht ist die Verwendung von Klärschlamm wegen des Besatzes an Krankheitserregern und Parasiten häufig bedenklich.
- Der hohe Wassergehalt des Naßschlammes bedingt eine niedrige Nährstoffkonzentration, führt leicht zur Entmischung und verursacht hohe Lager- und Transportkosten.
- Bei hohen Ausbringungsraten von Naßschlamm auf landwirtschaftlich genutzte Flächen und/oder Ausbringung zum falschen Zeitpunkt (keine Nährstoffaufnahme durch die Pflanze) besteht die Gefahr, daß Nährstoffe in das Grund- und/oder Oberflächenwasser verfrachtet werden.

Aus den vorgenannten Problemen lassen sich für eine Schlammbehandlung folgende Ziele ableiten:

- Stabilisierung (Verhinderung von Fäulnis durch Verminderung des organischen Anteils in der Trockensubstanz auf ≤ 45 % [10]),
- stabile Geruchsverbesserung,
- Entseuchung,
- Konsistenzerhöhung (Verbesserung der Stoffeigenschaften für Lagern, Transportieren und Verteilen durch Umwandlung des Naßschlammes in einen schüttbaren Feststoff),
- Volumenreduzierung.

Eine Möglichkeit, diese Ziele zu erreichen, ist die Kompostierung.

2. Kennzeichen des Kompostierverfahrens

2.1 Definition

Unter Kompostierung bzw. Rotte ist generell ein aerober biologisch-biochemischer Abbauprozeß bei organischen Stoffen zu verstehen, bei dem durch den Stoffwechsel der an diesem Prozeß beteiligten Mikroorganismen (Bakterien, Aktinomyceten, Pilze)

Wärme freigesetzt wird, was zu einer Selbsterhitzung des Substrates führt, bei der Temperaturen über 45° C erreicht werden können 4,10 . Bei diesem Abbauprozeß werden bis zu 50 % der organischen Stoffe mineralisiert, wobei Stickstoff teils in Biomasse und in Huminkomplexen gebunden wird, teils als Ammoniak abgast. Ferner werden Kohlendioxid und Wasserdampf freigesetzt (Bild 1).

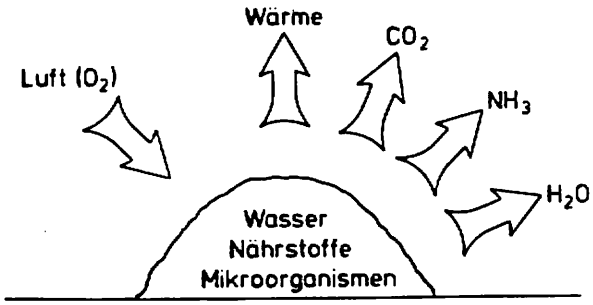

Bild 1:
An der Kompostierung beteiligte Stoffe

2.2 Prozeßvoraussetzungen

Die Aufgabe der Verfahrenstechnik bei der Kompostierung besteht darin, den am Rotteprozeß beteiligten Mikroorganismen ein für das Wachstum und die Vermehrung günstiges Milieu zu schaffen und zu erhalten.

Im einzelnen bestehen folgende Ansprüche:

- Wassergehalt: mindestens 35 %; nach oben beschränkt durch die Gasdurchlässigkeit der Schüttung; abhängig von den strukturbildenden Komponenten (z.B. in Stroh-Schlamm-Gemischen bis 80 % Wasser möglich).
- Gasaustausch: zur Versorgung der Aerobier mit Sauerstoff und zur Entsorgung des bei der Atmung gebildeten Kohlendioxids. Daraus folgt: eine poröse Schüttung mit einem hohen Anteil an Luftporen (mind. 50 % des Schüttvolumens) ist notwendig; bei niedrigen Schütthöhen und Zwangsbelüftung kann dieser Anteil niedriger sein. Der Einfluß des Luftangebotes auf die Tätigkeit der Mikroorganismen geht aus Bild 2 hervor.

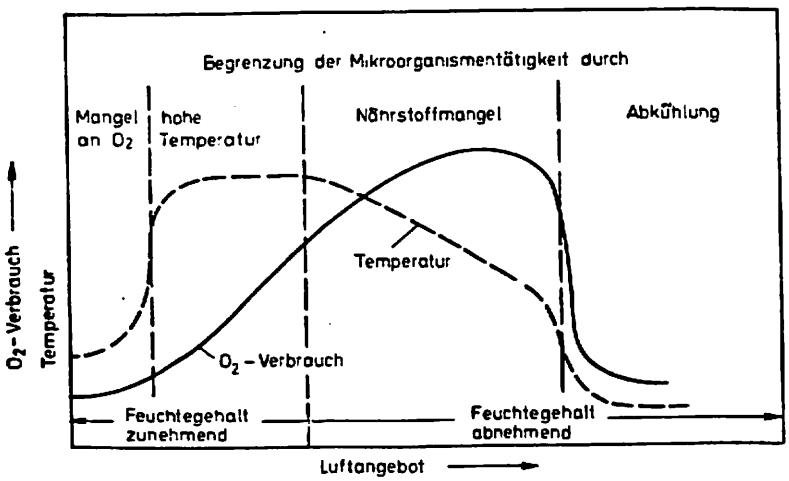

Bild 2:
Begrenzung des Rottevorganges bei Veränderung des Luftangebotes (nach [15])

- Nährstoffe: sind im Rohschlamm ausreichend enthalten; bei stärker ausgefaultem Schlamm fehlen mitunter die leicht verfügbaren Nährstoffe für eine spontane Selbsterhitzung [4,11].

- C/N-Verhältnis: je enger, desto schneller verläuft die Rotte, aber desto höher sind die N-Verluste durch abgasendes Ammoniak; Optimum bei 20 bis 25; Zuschlag von C-Trägern ist nicht notwendig [4,10,11,12].
- pH-Wert: neutral bis leicht alkalisch; bei saurem pH-Wert verzögert sich der Rotteverlauf [4].

2.3 Maßnahmen zur Erfüllung der Prozeßbedingungen
- Einstellung des Wassergehaltes und der Gasdurchlässigkeit (Struktur) des Haufwerks
  - mechanische Entwässerung (etwa 75 % erreichbar), daher zusätzlich;
  - Zugabe von zerkleinerten, feuchtearmen Feststoffen in Form von Fremdmaterial (z.B. Sägemehl, Rinde, Stroh, Holzschnitzel) und/oder von Fertigprodukten (Rückgut). In den USA werden die Holzschnitzel aus dem Fertigprodukt abgesiebt und rückgeführt.
- Sauerstoffversorgung
  - Umschichtung, um Zutritt von Außenluft zu ermöglichen;
  - Konvektionsbelüftung bei ausreichender Gasdurchlässigkeit des Haufwerks (abhängig von Größe und mechanischer Stabilität der Aggregate und von der Druckbelastung);
  - Zwangsbelüftung (Druck- oder Saugbetrieb) in Verbindung mit ausreichender Gasdurchlässigkeit des Haufwerks.

3. Verfahrenslösungen

Die wichtigsten der z. Zt. verwirklichten Anlagensysteme sind mit ihren wesentlichen technischen Merkmalen in der Tafel 1 aufgeführt und schematisch in Bild 3 a - d und Bild 4 a - c dargestellt. Sie sind in der Literatur, auf die jeweils hingewiesen wird, ausführlich beschrieben. Ergänzend zu den in der Bundesrepublik bekannten Systemen wird auf die in den USA gebräuchlichen Bauarten hingewiesen.

Ein Fortschritt hinsichtlich der Sicherheit der Substratführung, der Verringerung der Massenströme und der Verkürzung der Vorrottezeit ist bei dem am Institut der Verfasser entwickelten und von der Fa. SEVAR in den großtechnischen Maßstab umgesetzten Aggregat-Kompostierverfahren zu verzeichnen, das im folgenden Abschnitt genauer vorgestellt wird. Das Anlagensystem Roediger ging aus einer frühen Entwicklungsstufe dieses Verfahrens hervor; jedoch hat der Hersteller den wesentlichen Schritt, die Aggregierung des Rottegutes, nicht übernommen.

4. Das Aggregat-Kompostierverfahren SEVAR/FAL

Das Verfahren wurde am Institut für Technologie der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL), Braunschweig, zunächst für die Kompostierung organischer Schlämme aus der landwirtschaftlichen Tierhaltung im labor- und halbtechnischen Maßstab entwickelt, dann mit Förderung durch das Umweltbundesamt für die Verarbeitung von kommunalem Klärschlamm modifiziert. Die hygienische Überprüfung führte Prof. Strauch, Universität Hohenheim, durch. Die Fa. SEVAR Entsorgungsanlagen, Marktredwitz, hat inzwischen an der dortigen Kläranlage mit finanzieller Förderung durch das Bundesministerium für Forschung und Technologie eine Pilotanlage mit einer Kapazität von 25.000 EGW errichtet.

System	Lit.-Quelle	Bauart	Betriebsweise	Rottegut-Konditionierung Wassergehalt	Struktur	Sauerstoffversorgung und Gasaustausch	Rottezeit Reaktor (Tage)	Rottezeit Miete (Wochen)	Volumen ($m^3/10^3$ EGW)	Stand der Entwicklung
Miete	5,8,9	statische Lagerung offen oder mit seitlicher Begrenzung	dis-kontinuierlich	Zugabe von zerkleinertem Trockenmaterial z.B. Stroh, Sägemehl, rückgeführte Holzschnitzel (USA)		Konvektionsbelüftung mit Umschichtung über Versatz und/oder Druck- bzw. Saugbelüftung (USA)	20-25	6 20 4	25 18-26	in der Praxis eingeführt
Bioreaktor: BAV	2	Zelle	quasi-kontinuierlich (chargenweise Zugabe und Entnahme)	nach mech. Entwässerung Zugabe von Rückgut und zerkleinertem Trockenmaterial z.B. Stroh, Sägemehl, Rinde		Druckbelüftung	10-14	6	9-13	
Bioreaktor: Weiss	2	Zelle				gesteuerte kombin. Druck-Saugbelüftung	10-14	6	9-13	
Bioreaktor: Fairfield (USA)	1	Zelle				Druckbelüftung mit Umschichtung über ortsveränderl. Schnecken	14	?	14	Großanlage im Bau
Bioreaktor: Dambach-Schnorr	13	Zelle mit Etagen				Druckbelüftung mit Umschichtung über Etagen-Klappböden	28	4	22	zwei Großanlagen
Bioreaktor: HKS	3	Trommel		dosierte Zugabe mech. entwäss. Schlamm in die umgewälzte Kompostmasse Feuchteentzug mit Warmluft	Aufbau-Granulierung	Druckbelüftung	7-9	2	5-6	Pilotstufe
Bioreaktor: Roediger	14	Zelle		nach mech. Entwässerung Zugabe von getrocknetem Rückgut		Konvektionsbelüftung mit Umschichtung über Rottegutumlauf	4-6	6	5	Erprobung einer Großanlage abgebrochen
Bioreaktor: SEVAR/FAL	11,12	Zelle		nach mech. Entw. Zugabe von entw. getrocknetem Schlamm oder getr. Rückgut (RG)	Aggregierung	Konvektionsbelüftung	4-5	6	1 (o.RG) 5 (m.RG)	Großanlage in Erprobung

Tafel 1: Technische Merkmale von Klärschlamm-Kompostiersystemen (s. a. Bild 3 a - d, Bild 4 a - c und Bild 9)

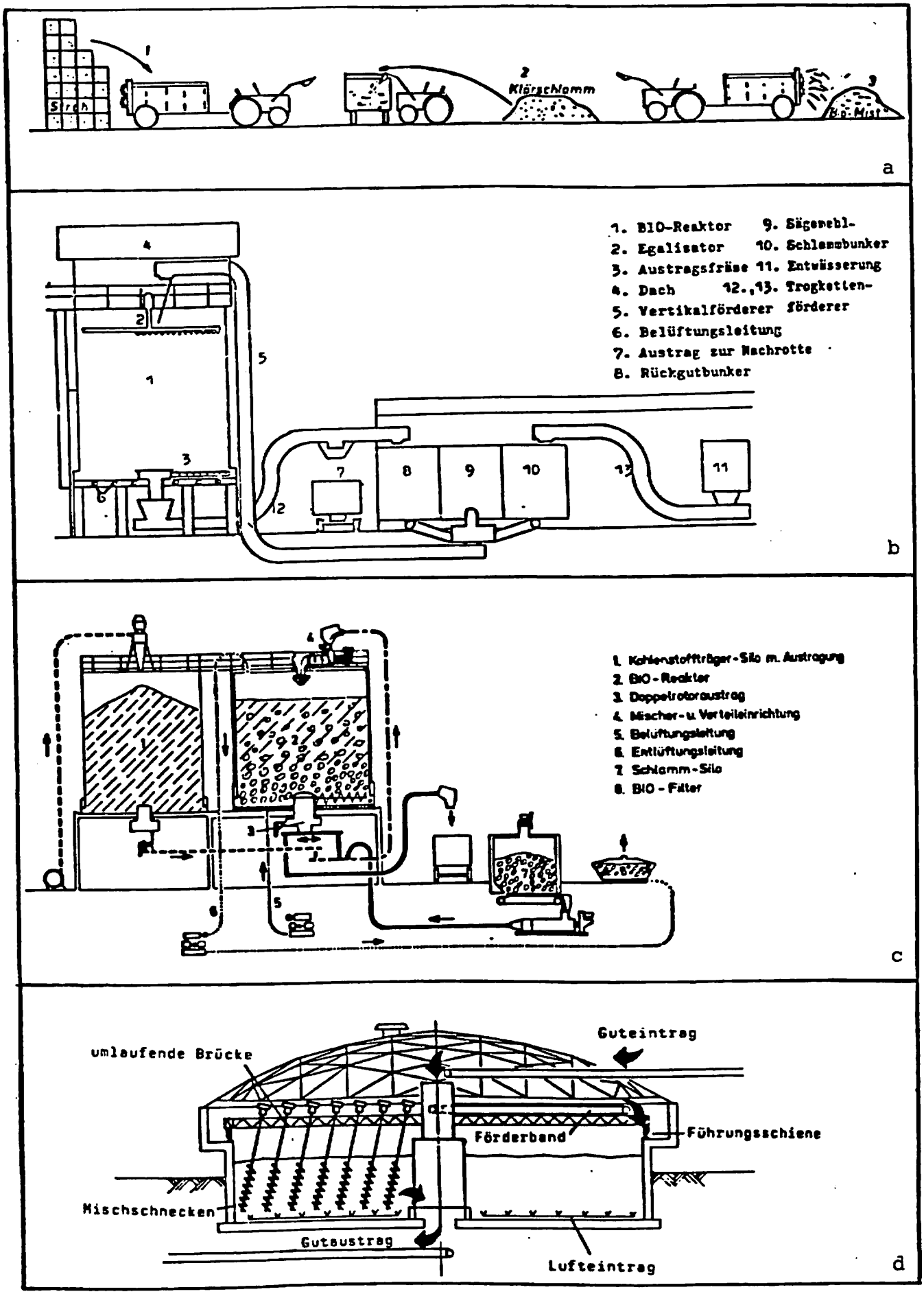

Bild 3: Klärschlamm-Kompostiersysteme
a Miete [2], b BAV [2], c Weiss [2], d Fairfield [1]

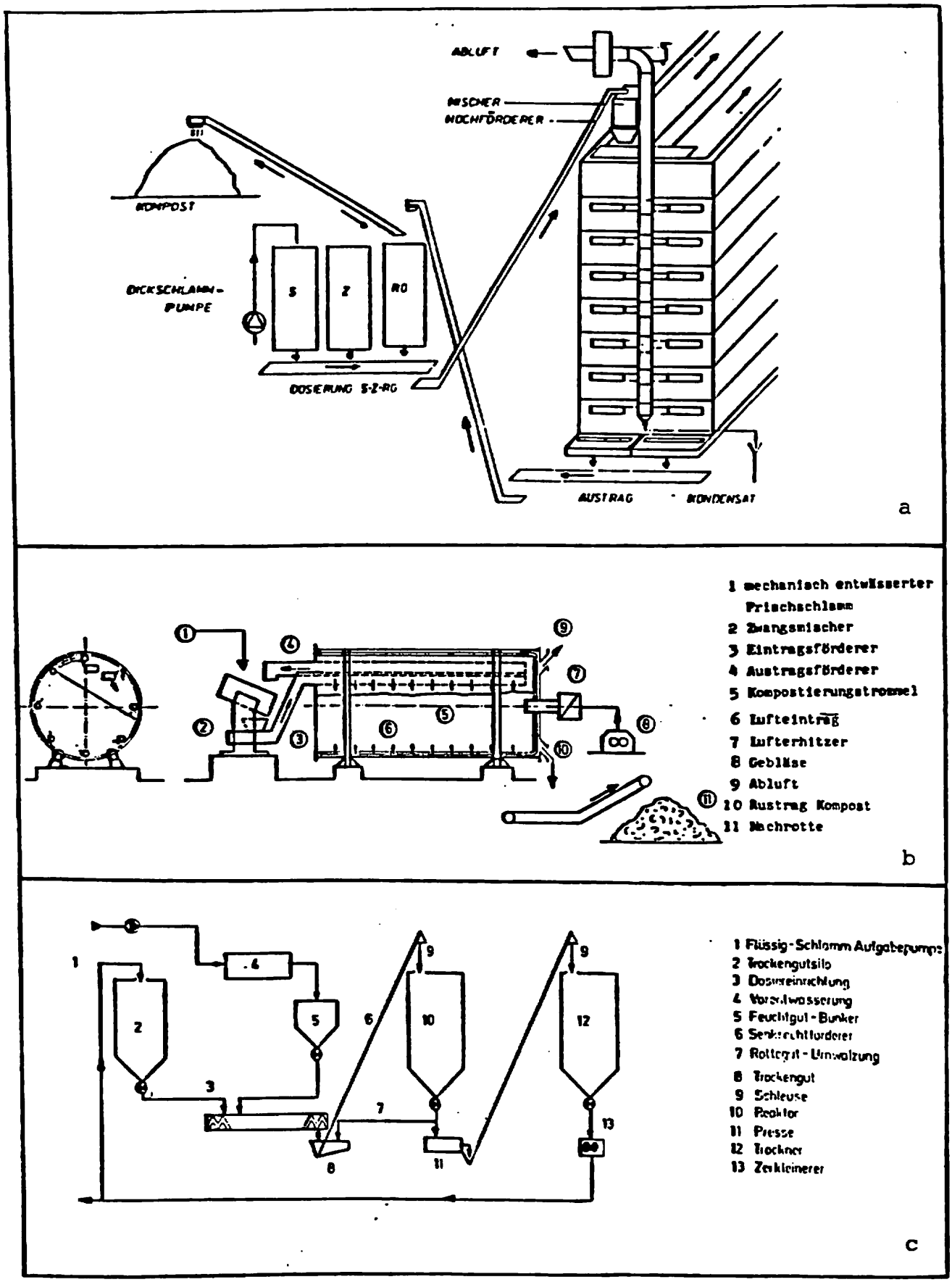

Bild 4: Klärschlamm-Kompostiersysteme
a Dambach-Schnorr [2], b HKS [2], c Roediger [2]

Da aufgrund der in den vorausgegangenen Betriebsläufen gewonnenen Erkenntnisse gegenwärtig noch technische Änderungen an der Anlage vorgenommen werden und unsere Versuche und Messungen noch nicht abgeschlossen sind, kann an dieser Stelle noch keine abschließende Aussage und Bewertung vorgenommen werden.

4.1 Verfahrensablauf (Bild 5 und 9)
Ein Teilstrom des mechanisch auf etwa 70 bis 75 % Wassergehalt entwässerten Klärschlammes wird getrocknet, gemahlen und mit dem übrigen Teilstrom des Schlammes vermischt, so daß sich ein mittlerer Feuchtegehalt von 40 bis 45 % einstellt. Das feuchtkrümelige Gemenge wird anschließend zu runden, strangförmigen Preßlingen mit einem Außendurchmesser von 50 mm aggregiert.
Die Preßlinge haben zur Verbesserung der Sauerstoffversorgung der Mikroorganismen im Zentrum ein Loch von 15 mm Durchmesser; die mittlere Länge beträgt etwa 100 mm.
Die Rotte wird bei einer Schütthöhe des Preßlingshaufwerks von 3,5 m in einer Zelle vollzogen, der täglich, nach Entnahme von 1/4 bis 1/5 der Füllung über einen am Boden befindlichen Walzenrost, eine gleiche Menge feuchter Preßlinge aufgegeben wird. Entsprechend der täglich entnommenen Menge bewegt sich das Rottegut in vier bis fünf Tagen in gleichbleibenden Schichten abwärts durch den Reaktionsraum. Das angerottete Gut wird anschließend in Mieten nachgerottet.
Der optimale Feuchtegehalt des Gemenges von 40 bis 45 % ergibt sich aus der erforderlichen mechanischen Stabilität der Preßlinge bei der Rotte. Bei höheren Feuchtegehalten werden die Preßlinge zu weich, und die Schüttung im Rottereaktor verliert die notwendige Gasdurchlässigkeit. Bei niedrigeren Feuchtegehalten erhöht sich zum einen der Kraftbedarf zur Herstellung der Preßlinge, zum anderen besteht die Gefahr eines Wasserdefizits für die Mikroorganismen.

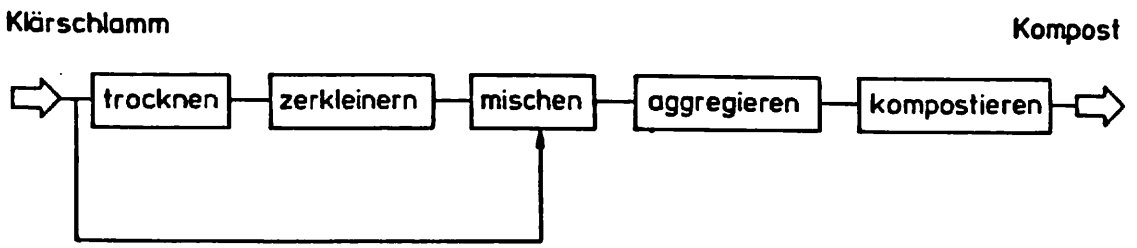

Bild 5: SEVAR/FAL-Kompostierverfahren

Durch die mikrobielle Selbsterhitzung im Rottereaktor steigt die Temperatur innerhalb eines Tages auf über 70° C an und verbleibt auf diesem Niveau. Sie nimmt erst gegen den Austrag hin unter der Einwirkung der dort einströmenden Außenluft ab.

Während die Rotte im Reaktor im wesentlichen der Entseuchung dient, führt die nachfolgende, mehrwöchige Mietenrotte zur Geruchsveränderung und stofflichen Stabilisierung des Schlammes.

4.2 Vorteile der Aggregat-Kompostierung
Schüttungen aus Preßlingen weisen gegenüber solchen aus Krümeln insbesondere bei größeren Schütthöhen (über 1,5 bis 2,0 m) einen geringen Strömungswiderstand auf (Bild 6). Im Luftvolumenanteil besteht dagegen zwischen beiden Aggregatstrukturen in der Schüt-

tung kein nennenswerter Unterschied, er beträgt jeweils etwa 45 %. Bei Schüttungen aus Preßlingen ist der Anteil großer Poren vorherrschend, während bei den Krümeln gleichmäßig verteilt kleine Poren anzutreffen sind.

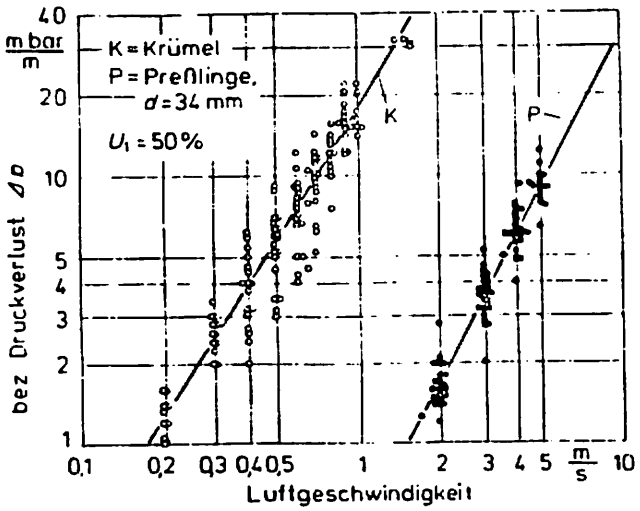

Bild 6:
Strömungswiderstand von Schüttungen aus Krümeln (K) bzw. aus Preßlingen (P)

Diese strukturellen Unterschiede wirken sich auf das Selbsterhitzungsverhalten aus: Die Preßlinge erwärmen sich wesentlich schneller als die Krümel, was auf eine bessere Sauerstoffversorgung in der Schüttung schließen läßt. Die Preßlinge haben nach 20 Stunden das Temperaturmaximum von etwa 70° C erreicht, die Krümel erst nach 80 Stunden (Bild 7). Nach unseren Versuchsergebnissen ist es möglich, noch in einer 3,5 m hohen Schüttung in einem Zellenreaktor Preßlinge aus organischen Schlämmen ohne Zwangsbelüftung zur Selbsterhitzung zu bringen.

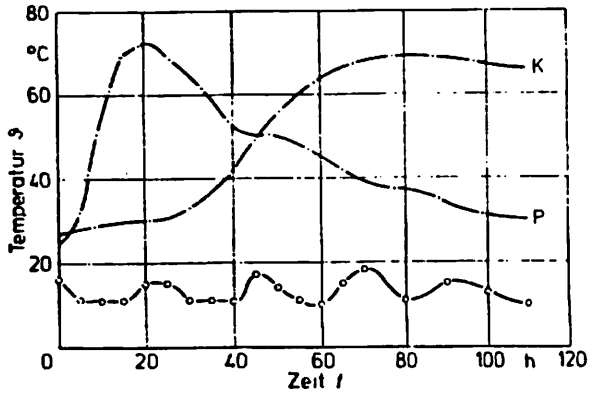

Bild 7:
Selbsterhitzungsverlauf von 2 m hohen Schüttungen aus Krümeln (K) bzw. aus Preßlingen (P)

4.3 Massenströme

Bild 8 zeigt die Massenströme bei der Aggregat-Kompostierung von Klärschlamm. Danach müssen 73 % des auf einen Feuchtegehalt von 70 % entwässerten Dickschlammes getrocknet werden, wobei 49 % der Ausgangsmasse als Wasser freigesetzt werden und 24 % als Trockengut anfallen, die zu mahlen sind. Dieses Trockengut ist gemeinsam mit den übrigen 27 % des Dickschlammes dem Mischer und dann über die Presse dem Reaktor zuzuführen. Während der Vorrote im Reaktor und der Nachrotte ist mit einer Massevermindерung (organische Substanz und Wasser) von etwa 50 % zu rechnen.

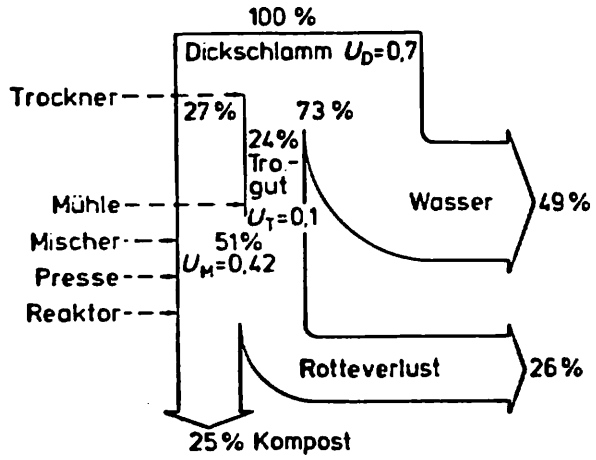

Bild 8:
Massenströme bei Aggregat-Kompostierung

4.4 Technische Ausführung

Der Aufbau der Pilotanlage geht aus Bild 9 hervor.

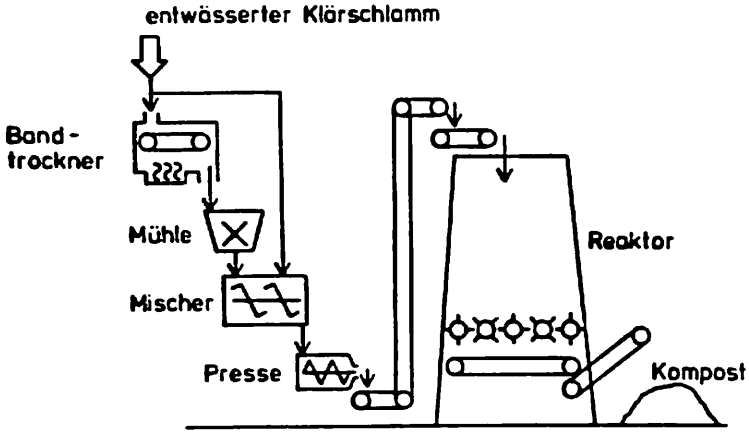

Bild 9:
Verfahrensfließbild der Pilotanlage

Einige technische Daten sind in Tafel 2 zusammengestellt.

		Bandtrockner	Mühle	Mischer	Presse	Reaktor
Mengen-Durchsatz	der Gesamt-Anlage	370 kg/h entwässerter Schlamm mit ≈ 70 % Wassergehalt				
	der Komponenten	270 kg/h	89 kg/h	189 kg/h		
		0,28 m³/h	0,18 m³/h	0,24 m³/h		
Anschluß-Leistung		13 kW Elektr. + 10 m³/h Heizgas	13 kW	3 kW	0,35 kW	10 kW
Haupt-Abmessungen L x B x H		10 x 2,5 x 3 m	1 x 0,6 x 1 m	3 x 0,5 x 1,2 m	1,2 x 0,5 x 1,2 m	3 x 3 x 6 m
Weitere Kenndaten		Konvektions-Tr.; 181 kg/h Wasserverdampfung; 5 MJ/kgw spezif. Energieverbrauch; ≤ 200°C Heißgastemperatur; 70°C Ablufttemp.; ≤ 6000 kg/h Frischluft-Bed.;	Hammermühle	Doppelw.-Paddelm. 650 min^{-1} Drehzahl	Schneckenstrangpresse 0,15 m Schneckendurchm. 110 min^{-1} Schneckendrehzahl	offener Schach 30 m³ Füllvolumen

Tafel 2: Technische Daten der Hauptkomponenten der Pilotanlage (Anhaltswerte)
Kapazität für 25 000 EGW, Betriebszeit 24 h/Tag und 5 Tage/Woche

Zu den Kosten sind beim heutigen Stand der Erprobung der Anlage lediglich vorläufige Angaben möglich.*)

Betriebskosten

- Energiekosten für den Trockner, unter Berücksichtigung, daß ungünstigenfalls die Entfeuchtung mit Fremdenergie vorzunehmen ist und nicht auf Faulgas oder Abwärme von Faulgasmotoren zurückgegriffen werden kann. ca. 150,-- DM/t TS
- Stromkosten für Fördereinrichtungen Mischer und Trockner ca. 30,-- " "
- Personalkosten ca. 20,-- " "
- Abschreibung ca. 200,-- " "

Gesamt: ca. 400,-- DM/t TS

250,-

Für Verfahren, bei denen Sägemehl eingesetzt werden muß, entstehen bei einem Mischungsverhältnis von 1/3 Sägemehl, 1/3 Rückgut, 1/3 entwässerter Schlamm folgende Mehrkosten:

5 m³ Sägemehl pro Tonne TS	ca. 200,-- DM/t TS
Belüftung	ca. 30,-- " "
	ca. 230,-- DM/t TS

gegenüber 150,-- DM/t TS beim Aggregat-Verfahren.

Investitionskosten

(ohne maschinelle Schlammentwässerung und Umbauung)

für 20 000 E+EGW	ca. 1,7 Mio DM
40 000 "	ca. 2,2 " "
60 000 "	ca. 2,6 " "

*) Angaben der Fa. SEVAR

Literatur:

(1) Anderson, J., et al.: Design components of an aerated bed system. Biocycle, Sept. 1984, S. 44-46.
(2) Bidlingmaier, W.: Faktoren zur Steuerung der gemeinsamen Kompostierung von Abwasserschlamm mit organischen Strukturmitteln. Stuttgarter Berichte zur Abfallwirtschaft, Band 12, Erich Schmidt Verlag Bielefeld, 1980.
(3) Britsch, T., Spennes, G.: Klärschlammkompostierung ohne Zusatzstoffe. Umwelt 8 (1978), H. 3, S. 159-161.
(4) Chrometzka, P.: Zur Biologie der Klärschlammkompostierung. In: Thomé-Kozmiensky (Hrsg.): Kompostierung von Abfällen 2, EF-Verlag für Energie- und Umwelttechnik GmbH, Berlin, 1985.
(5) Epstein, E. et al.: A forced aeration system for composting wastewater sludge. Journal WPCF Vol. 48 (1976), No. 4, S. 688-694.
(6) Goldstein, N.: Odor-free sludge in a high density suburb. Biocycle, Sept./Oct. 1983, S. 24-27.
(7) Goldstein, N.: Sewage sludge composting facilities on the rise. Biocycle, Nov./Dec. 1985, S. 19-24.
(8) Haug, R.T., Davis, B.: Composting Results in Los Angeles. Biocycle, Nov./Dec. 1981, S. 19-24.
(9) Klausing, O., Knipping, H., Noltze, H.: "Bio-Mist" aus Schlamm und Stroh. Umwelt 5 (1974), S. 29-30.
(10) Loll, U.: Kompostierung als Verfahren zur Klärschlammstabilisation. In: Thomé-Kozmiensky (Hrsg.): Kompostierung von Abfällen2, EF-Verlag für Energie- und Umwelttechnik GmbH, Berlin, 1985.
(11) Schuchardt, F., Sonnenberg, H.: Untersuchungen über das Rotte- und Trocknungsverhalten grobkörnig aggregierter Gemenge aus entwässertem Klärschlamm und durch Rotte und Trocknung aus diesem gewonnenen Rückgut. Forschungsbericht Nr. 80-103 03 505 für das Umweltbundesamt, 1980.
(12) Schuchardt, F., Baader, W.: Kompostierung von brikettiertem Klärschlamm. Müll und Abfall 11 (1979), H. 8, S. 205-214.
(13) Schwanhäuser, H.: Erfahrungen mit dem Schlammverrottungssystem Dambach-Schnorr in Rastatt. Müll und Abfall (1978), H. 1, S. 20-25.
(14) Widmer, P., Konstandt, H.: Ein neues Schnellrotte-Verfahren als Beitrag zur weitergehenden Klärschlamm-Verwertung. Gas - Wasser - Abwasser 57 (1977), Nr. 3, S. 297-303.
(15) Willson, G.B., Hummel, J.W.: Solid Composting of Dairy Manure. ASAE Publ. SP-01-73. Americ.Soc.Agr.Eng., St. Joseph, Mich. 1973.