

Das thixotrope Zeitverhalten von trockensubstanzreicher Schweinegülle

Dr.-Ing. M. Türk, KDT, Forschungszentrum für Mechanisierung der Landwirtschaft Schlieben-Bornim der AdL der DDR

Verwendete Formelzeichen

d	m	Rohrinnendurchmesser
k	Pa · s ⁿ	Konsistenzkoeffizient
l	m	Förderlänge
m	1/ln s	Konstante der Zeitfunktion $\delta(t)$
n		Fließexponent
Δp	bar	Reibungsdruckverlust
t	s	Belastungszeit
t_M	s	Belastungszeit bei Erreichen eines quasistatischen Strukturzustands
TS	%	Trockensubstanzgehalt
\dot{V}	m ³ /h	Volumendurchsatz
v	m/s	mittlere Strömungsgeschwindigkeit
$\dot{\gamma}$	1/s	Schergeschwindigkeit
$\delta(t)$		Zeitkorrekturfunktion der Strukturzerstörung
δ_0		relative Größe der Strukturzerstörung
τ	Pa	Schubspannung
τ_w	Pa	Wandschubspannung im Rohr
τ_0	Pa	Fließgrenze

1. Problemstellung

Mit steigender Konzentration der Gülle sind bei der Untersuchung des Fließverhaltens Plastizität, Thixotropie und Zusammensetzung verstärkt zu berücksichtigen. Über die allgemeinen Bemessungsgrundlagen beim Fördern von TS-reicher Schweinegülle und die experimentelle Bestimmung der Fließgesetze wurde bereits berichtet [1, 2]. Schweinegülle mit TS > 10% hat ein zeitabhängiges Fließverhalten, das allein durch das Fließgesetz $\tau = f(\dot{\gamma})$ nicht mehr ausreichend charakterisiert werden kann. Die rheologischen Eigenschaften hängen von der Deformationsdauer ab, und bei konstanter Belastung zeigt sich eine monoton fallende Funktion $\tau(t)$, d. h. eine zeitabhängige Verminderung des Scherwiderstands. Diese Erscheinung nennt man Thixotropie. Nach einer endlichen Ruhezeit stellt sich im Normalfall lt. Definition der Ausgangszustand wieder ein, der Vorgang ist reversibel. Unbelastete Schweinegülle ist jedoch kein

homogenes Medium. Bei der erstmaligen intensiven mechanischen Belastung in der Pumpe oder im Scherspalt eines Rotationsviskosimeters wirken zugleich die komplexen Vorgänge

- Homogenisierung mit Auflösung von Kotballen
- Zerkleinerung von festen Bestandteilen und Agglomerationen
- reversible Strukturzerstörung (Thixotropie).

So wird bei Gülle eine bleibende Verminderung des Scherwiderstands beobachtet und man spricht von unechter Thixotropie.

Nach der erstmaligen Belastung und einer mehrstündigen Ruhezeit erfolgt in begrenztem Maß ein Struktur Aufbau (Gelierung), so daß mit kurzzeitiger Erhöhung des Scherwiderstands von max. 20% gerechnet werden kann. Echte Thixotropie liegt nur bei homogenen molekular- oder kolloiddispersen Suspensionen vor, wie z. B. bei separiertem Bioschlamm [3]. Das thixotrope Verhalten von TS-reicher Gülle ist durch den Aufbau einer ungeordneten Gerüststruktur der Feststoffteilchen und Bindungen zwischen den Kolloiden zu erklären. Diese werden bei der Scherung zerstört, und die Feststoffe richten sich in Strömungsrichtung aus, so daß sie den geringsten Widerstand leisten.

Folgende Aufgaben sind zu lösen:

- experimentelle Untersuchung und mathematische Beschreibung der zeitabhängigen Strukturzerstörung unbelasteter konzentrierter Schweinegülle, die am Stallrand im Pumpensumpf anfällt
- Anwendung auf die Druckverlustberechnung bei laminarer Rohrströmung.

2. Kenntnisstand

Fließkurven werden meist nach einer hinreichend intensiven Scherbeanspruchung im Rotationsviskosimeter aufgenommen, wenn

ein quasistationärer Strukturzustand erreicht ist [1]. Dann erhält man reproduzierbare Fließkennwerte, die allerdings bei der Druckverlustberechnung die thixotropen Effekte nicht berücksichtigen, und es kann u. U. eine Unterbemessung erfolgen.

Erste Untersuchungen zur komplexen Beschreibung des Zeitverhaltens von Rinder- und Schweinegülle wurden von Boese [4] durchgeführt. Aufgrund des erheblichen experimentellen Aufwands und der komplizierten Anwendung zur Bemessung konnten diese Arbeiten noch nicht in der Breite abgeschlossen und für die Projektierung verallgemeinert werden. Boese erhielt im Ergebnis seiner Untersuchungen für das Herschel-Bulkley-Potenzgesetz

$$\tau = \tau_0 + k \dot{\gamma}^n \quad (1)$$

Zeitfunktionen der Fließkennwerte τ_0 , k und n. Da diese auch Funktionen des TS-Gehalts sind [1], wurden durch die Verknüpfung der Variablen „Belastungszeit“ und „TS-Gehalt“ charakteristische rheologische Eigenschaften verwischt und Vergleiche mit anderen Medien, also auch anderen Fließgrenzen unmöglich. Daher ist also eine Methode zu finden, mit der die Strukturzerstörung bei der erstmaligen Scherbeanspruchung unabhängig vom Fließverhalten gemessen und modellmäßig beschrieben werden kann (Bild 1).

3. Modell der thixotropen Strukturzerstörung

Definiert sei ein quasistationärer Gleichgewichtszustand, der sich nach einer bestimmten endlichen Belastungszeit t_M einstellt. Die dann gemessenen Fließkurven $\tau = f(\dot{\gamma}, t_M)$ sind weitgehend zeitstabil und lassen bei unmittelbar aufeinanderfolgender Auf- und Abwärtsmessung keine Hysterese mehr erkennen. Strukturholungsvorgänge können

Bild 1. Thixotroper Strukturabbau von Schweinegülle durch Scherdeformation im Rotationsviskosimeter $\tau = f(\dot{\gamma}, t)$

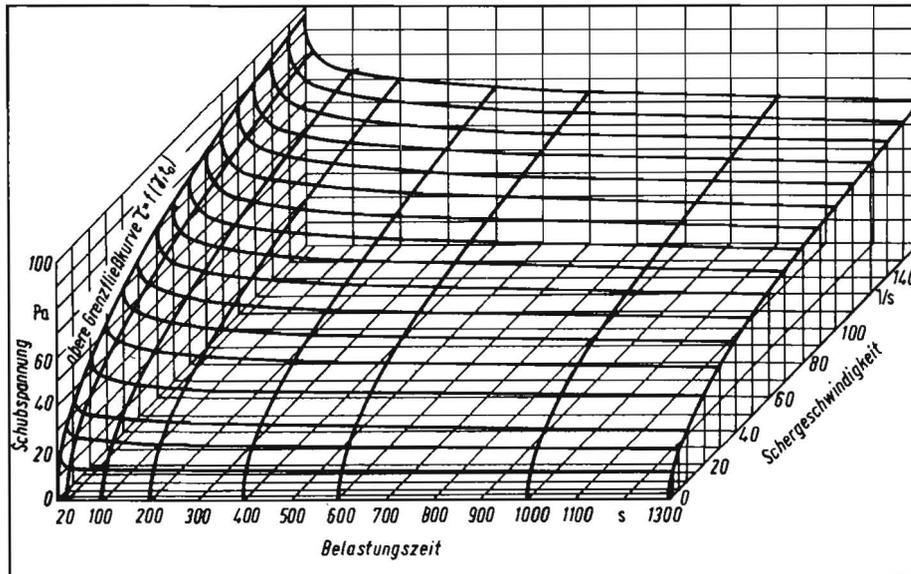
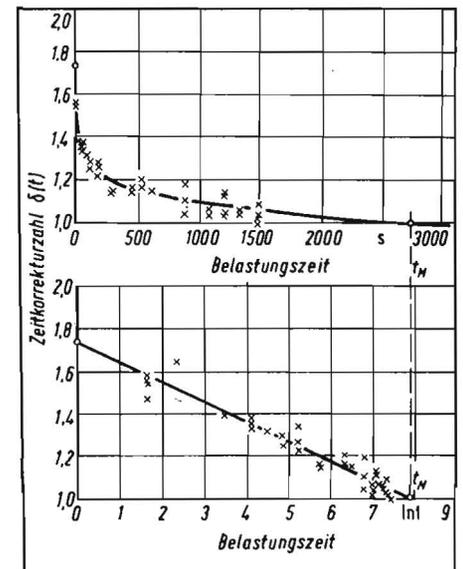


Bild 2. Modell des Strukturabbaus von Schweinegülle



vernachlässigt werden. Vorausgesetzt wird, daß sich die grundsätzliche Fließcharakteristik während des Strukturabbaus nicht verändert, d. h. für alle zeitabhängigen Fließkurven gilt das gleiche zwei- oder dreiparametrische Fließmodell.

Im Normalfall wird mit maximaler konstanter Schergeschwindigkeit im Rotationsviskosimeter belastet und dabei die Zeitfunktion $\tau(t)$ aufgenommen. Bei Schweinegülle ist eine Belastungszeit von $t_M = 30 \dots 40$ min ausreichend, da mit Sicherheit mehr als 95% des Strukturabbaus erfolgt sind. Anschließend wird das Schubspannungsverhältnis

$$\delta(t) = \frac{\tau(t)}{\tau(t_M)} \quad (2)$$

punktweise berechnet und in Abhängigkeit von der Belastungszeit t dargestellt (Bild 2). Diese Zeitfunktion kann bei Schweinegülle mit folgendem linearen Rechenmodell beschrieben werden:

$$\delta(t) = \delta_0 + m \ln t. \quad (3)$$

Diese Geradengleichung gilt nur für einen konstanten Fließexponenten n . Das trifft für Schweinegülle zu. Bei Rindergülle ist mit zeitlich und belastungsmäßig veränderlichen Fließexponenten $n(t, \dot{\gamma})$ zu rechnen, und es ergeben sich andere Rechenmodelle. Die durchgeführten Versuche mit konzentrierter Schweinegülle ergaben im Schergeschwindigkeitsbereich der praktischen Rohrförderung $10 < \dot{\gamma} < 145$ 1/s keine nachweisbare Abhängigkeit zwischen $\dot{\gamma}$ und der Zeitfunktion $\delta(t)$. Das bedeutet, daß $\delta(t)$ und $\tau(\dot{\gamma})$,

t_M) als relevante Zustandsfunktionen für konzentrierte Schweinegülle anzusehen sind, mit deren Hilfe das zeit- und konzentrationsabhängige Fließverhalten $\tau(\dot{\gamma}, t, TS)$ im Komplex beschrieben werden kann.

Die zeitabhängigen Fließkennwerte kann man durch einfache Multiplikation mit der Korrekturgröße $\delta(t)$ ermitteln:

$$\tau_0(t) = \delta(t) \tau_0(t_M) \quad (4)$$

$$k(t) = \delta(t) k(t_M). \quad (5)$$

Wird als Bezugsgröße die Belastungszeit $t_M = 1800$ s festgelegt, so bestimmt sich aus Gl. (3) der Anstieg der Zeitgeraden:

$$m = \frac{\delta_0 - 1}{\ln t_M} = \frac{\delta_0 - 1}{7,4955}. \quad (6)$$

Hierin ist δ_0 eine Stoffkenngröße, die den relativen Umfang der Strukturzerstörung direkt kennzeichnet und die nur von der Güllekonzentration und der Zusammensetzung abhängt.

Es wird eine wesentliche Vereinfachung der Meßmethodik erreicht, da der Strukturabbau mit der Fließkurvenbestimmung verbunden werden kann. Die frische Probe wird mit maximaler konstanter Schergeschwindigkeit im Rotationsviskosimeter bei $\dot{\gamma} = 68 \dots 145$ 1/s belastet und die Zeitfunktion $\tau(t)$ aufgenommen. Unmittelbar anschließend nach $t_M = 1800$ s erfolgt die Fließkurvenmessung.

Nach dieser Versuchsmethodik wurden an 11 verschiedenen Gülleproben bei unterschiedlichem Futtereinsatz 55 Zeitfunktionen $\delta(t)$ im Bereich $TS = 10 \dots 25,5\%$ aufgenom-

men und miteinander verglichen. Dabei zeigte sich ein unwesentlicher Einfluß der Fütterung, und es kann zusammenfassend für TS-reiche Schweinegülle das folgende empirische Rechenmodell für δ_0 vorgeschlagen werden:

$$\delta_0(TS) = 0,8082 \exp(0,0437 TS). \quad (7)$$

Mit den Gln. (3) und (7) erhält man die im Bild 3 gezeigte Kurvenschar. Dieses vereinfachte Modell des Zeitverhaltens von konzentrierter Schweinegülle entspricht einer phänomenologischen Betrachtungsweise und ist sicher nicht auf alle Stoffe übertragbar. Es hat jedoch den Vorteil der einfachen Anwendbarkeit und vor allem des geringen Meßaufwands. Auch bei anderen untersuchten organischen Suspensionen [3, 5] und konzentrierten Futtermischungen mit Kartoffeln [6] konnte der Ausgangszustand des Fördermediums durch die Definition einer Zeitkonstanten der gezeigten Form in ähnlicher Weise gekennzeichnet werden.

4. Berücksichtigung der thixotropen Effekte bei der Druckverlustberechnung

Zur Berücksichtigung des thixotropen Zeitverhaltens bei laminarer Rohrströmung wird eine konstante mittlere Fördergeschwindigkeit in Rohren mit bekanntem Durchmesser d vorausgesetzt. Nun kann der sich für eine bestimmte Rohrlänge l ergebende Reibungsdruckverlust Δp durch Integration über die Förderzeit $t = l/v$ bestimmt werden. Ausgehend vom spezifischen Druckverlust bei Laminarströmung

$$\frac{\Delta p}{\Delta l} = \frac{4}{d} \tau_w \quad (8)$$

ergibt sich der Differentialquotient

$$\frac{dp}{dl} = \frac{4}{d} \tau_w(t). \quad (9)$$

Mit der Korrekturfunktion

$$\tau_w(t) = \delta(t) \tau_w(t_M) \quad (10)$$

wird das bestimmte Integral

$$\Delta p = \frac{4v}{d} \int_0^l \delta(t) \tau_w(t_M) dl \quad (11)$$

berechnet, und als Lösung erhält man

$$\Delta p(l) = \frac{4\tau_w(t_M)}{d} [\delta_0 - m(\ln \frac{l}{v} - 1)]. \quad (12)$$

Der nicht mehr lineare Reibungsdruckverlust $\Delta p(l)$ berücksichtigt die sich mit der Rohrlänge von 0 bis l stetig verändernden Fließ-

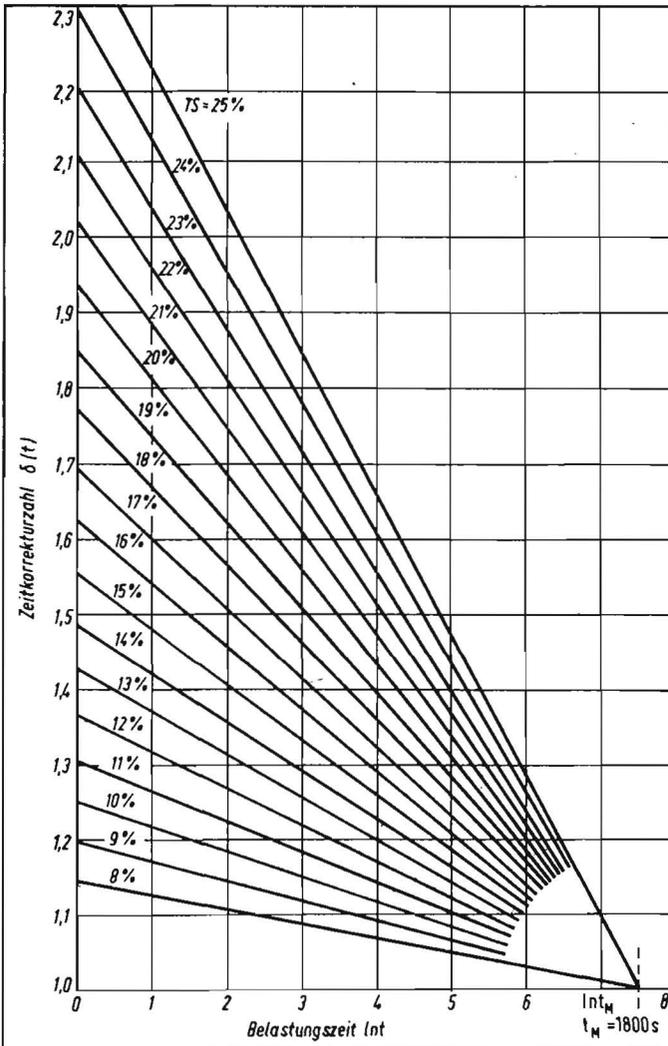
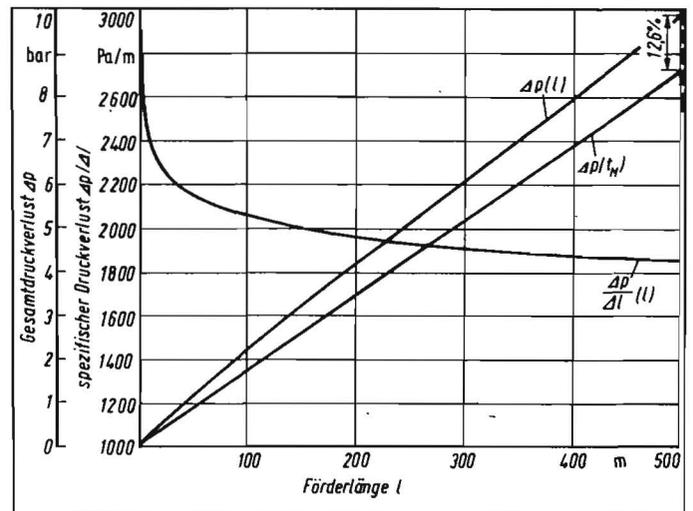


Bild 3
Modell des Strukturabbaus von Schweinegülle $\delta(t) = \delta_0 - m \ln t$

Bild 4
Thixotroper Strukturabbau bei der Rohrförderung von Schweinegülle; Berechnungsbeispiel:
TS = 15%,
 $\tau_0(t_M) = 1,91$ Pa,
 $k(t_M) = 5,8841$ Pa · sⁿ,
 $n = 0,4484$, $\delta_0 = 1,5565$,
 $m = 0,0742$,
 $\dot{\gamma} = 20$ m³/h, $d = 0,1$ m



eigenschaften des Fördermediums (Bild 4). Der augenblickliche spezifische Druckverlust an der beliebigen Stelle l errechnet sich nach Gl. (13):

$$\frac{\Delta p}{\Delta l} (l) = \frac{4\tau_w(t_M)}{d} (\delta_0 - m \ln \frac{l}{d}) \quad (13)$$

Das Berechnungsbeispiel verdeutlicht, daß bei Nichtbeachtung der thixotropen Effekte eine Unterbemessung erfolgen würde, die u. U. Betriebsstörungen zur Folge haben könnte.

5. Zusammenfassung

Konzentrierte Schweinegülle mit $TS > 10\%$ hat zunehmend ein zeitabhängiges Fließverhalten. Wenn die thixotropen Effekte bei der Druckverlustberechnung unberücksichtigt bleiben, kann es zur Unterbemessung der Förderanlagen führen. Bekannte Untersuchungsmethoden erfordern einen erheblichen experimentellen Aufwand und setzen

die genaue Kenntnis des Fließverhaltens voraus.

Die dargestellte Meßmethodik ermöglicht eine wesentliche Vereinfachung der Messungen mit Rotationsviskosimetern. Bei konstanter maximaler Schergeschwindigkeit wird die Zeitfunktion $\tau(t)$ aufgenommen, bis ein quasistationärer Zustand zur Zeit t_M erreicht ist. Die unmittelbar anschließend gemessene Fließkurve $\tau(\dot{\gamma}, t_M)$ liefert die relevanten Fließkennwerte [1]. Für Schweinegülle gilt $n(t) = \text{konst.}$, und die Zeitkorrektur kann mit Hilfe eines einfachen linearen Rechenmodells $\delta(t)$ erfolgen, dessen Faktoren nur von der Konzentration TS abhängig sind. Damit ist die Berechenbarkeit des Zeitverhaltens von TS -reicher Schweinegülle mit vertretbarem Aufwand gegeben. Die Anwendung auf die Druckverlustberechnung wird dargestellt und an einem Rechenbeispiel gezeigt.

Literatur

- [1] Türk, M.: Das Fließverhalten von trockensubstanzreicher Schweinegülle. agrartechnik, Berlin 36 (1986) 1, S. 31–33.
- [2] Türk, M.: Bestimmung der Fließgrenze von Gülle. agrartechnik, Berlin 35 (1985) 10, S. 472–474.
- [3] Türk, M.: Fließverhalten von separiertem Bioschlamm aus Schweinegülle. agrartechnik, Berlin 28 (1978) 7, S. 292–295.
- [4] Boese, E.: Untersuchungen zur Beschreibung des thixotropen Verhaltens der Gülle und ihre Anwendung auf die Berechnung technischer Prozesse. Wilhelm-Pieck-Universität Rostock, Dissertation 1977.
- [5] Türk, M.; Hörnig, G.; Schiller, G.: Berechnung des Druckverlustes beim Rohrtransport von Schlempe. Lebensmittelindustrie, Leipzig 28 (1981) 11, S. 503–507.
- [6] Türk, M.: Druckverlust bei der Förderung konzentrierter fluider Medien aus Kartoffeln in Rohrleitungen. agrartechnik, Berlin 28 (1978) 8, S. 347–350.

A 4198

Entwässerung von Feststoff aus Schweinegülle auf einer Deponie

Dr. H. Kühl, KDT, Wilhelm-Pieck-Universität Rostock, Sektion Tierproduktion

1. Aufgabenstellung

Bei der Fest-Flüssig-Trennung von Schweinegülle durch Bogensiebe werden Gülleflüssigkeit und Feststoff als Trennprodukte gewonnen. Die Gülleflüssigkeit kann unverändert der Verwertung in der Pflanzenproduktion oder einer weiteren Aufbereitung zugeführt werden. Der Feststoff fällt bei diesem Verfahren mit einem Trockensubstanzgehalt von 9 bis 16% an. Für seine Verwendung als organischer Dünger in der Pflanzenproduktion ist eine weitere Entwässerung erforderlich, durch die seine Schüttguteigenschaften verbessert und ein Nachdränen während des Transports vermieden werden sollen. Aus der Literatur [1] und aus Voruntersuchungen war bekannt, daß ein Feststoff mit einem Trockensubstanzgehalt von 25 bis 30% über gute Schüttguteigenschaften verfügt und für den Transport auf öffentlichen Verkehrswegen geeignet ist. Für die Entwässerung des Feststoffs sind das Pressen oder das Zentrifugieren verbreitet. Als eine weitere Möglichkeit wurde das Entwässern durch selbsttätiges Abdränen auf einer Deponie mit planbefestigter Fläche untersucht. Das Ziel der Untersuchungen bestand darin, den Entwäs-

serungsverlauf beim Feststoff bis zum Erreichen des erforderlichen Trockensubstanzgehalts zu ermitteln. Der Trockensubstanzgehalt der verwendeten Gülle betrug 1,8 bis 3,5%.

2. Untersuchungsmethode

Bei den Untersuchungen wurde unterstellt, daß sich der Feststoff aufgrund seiner Struktur ähnlich wie Erdstoffe verhält. In diesem Fall konnten die Gesetzmäßigkeiten der Filterströmung, wie sie aus der Hydraulik bekannt sind, zur Klärung der Vorgänge bei der Entwässerung des Feststoffs genutzt werden. So kann mit großer Wahrscheinlichkeit angenommen werden, daß die Entwässerung eines Feststoff-Schüttkegels oder -stapels auf einer befestigten Deponie in vertikaler und horizontaler Richtung verläuft, wobei sich die Flüssigkeit im Feststoff bei der Entwässerung in vertikaler Richtung wie Sickerwasser und in horizontaler Richtung wie Grundwasser verhält.

Zur experimentellen Überprüfung dieser Annahmen wurden folgende Versuche durchgeführt:

- Untersuchung eines Schüttkegels aus Feststoff mit einem Volumen von rd. 7 m^3 , wobei der Trockensubstanzgehalt des Feststoffs nach der Fest-Flüssig-Trennung und aus der unteren Schicht des Schüttkegels (Höhe bis zu 10 cm) ermittelt wurde; außerdem wurde die Flüssigkeitsoberfläche im Schüttkegel beobachtet.
- Untersuchungen an Schüttkegelmodellen mit einem Volumen von 12 dm^3 zur Ermittlung der zeitabhängig ablaufenden Flüssigkeitsmenge; zur Kontrolle wurde der Trockensubstanzgehalt des Feststoffs vor und nach den Versuchen festgestellt
- Untersuchung der Korngrößenverteilung beim Feststoff
- Untersuchung des Entwässerungsvorgangs in einem Feststoffstapel, bei der der Trockensubstanzgehalt des Feststoffs in

verschiedenen Schichthöhen und nach unterschiedlicher Entwässerungszeit ermittelt wurde.

3. Untersuchungsergebnisse

Bei der Schüttung des Feststoffs auf der Deponie bildeten sich Schüttkegel, deren Form erheblich variierte. Zwei extreme Formen von Schüttkegeln sind im Bild 1 dargestellt. In diesen Schüttkegeln erfolgte die vertikale Entwässerung im Vergleich zur horizontalen sehr schnell. Im Ergebnis dieses Vorgangs bildete sich im Schüttkegel eine Flüssigkeitsoberfläche heraus, die weitgehend der Oberfläche des unteren Kegelteils angepaßt war.

Die Flüssigkeitsabgabe in horizontaler Richtung erfolgte bei der Entwässerung des unteren Kegelteils am gesamten Umfang seiner Grundfläche. Dieser Vorgang wurde vorrangig durch den Gefälleunterschied zwischen der Flüssigkeitsoberfläche im unteren Kegelteil und der Deponiefläche bewirkt.

Im Ergebnis des Entwässerungsvorgangs wurde der Trockensubstanzgehalt in der unteren Schicht des Schüttkegels zunächst erheblich reduziert (Bild 2). Er erreichte dabei Werte, die dem Trockensubstanzgehalt von Gülle entsprachen. Die trotz dieses hohen Wassergehalts geringe Fließfähigkeit dieser Schicht ist vermutlich auf die Korngrößenverteilung im Feststoff und auf das bei der Kegelschüttung und dem Entwässerungsvorgang entstandene Teilchengefüge zurückzuführen. Im weiteren Verlauf der Entwässerung wurde erst nach 6 Tagen in der unteren Schicht des Schüttkegels ein Trockensubstanzgehalt erreicht, der den Durchschnittswert des Feststoffs bei der Schüttung nicht wesentlich übertraf. Dieser Sachverhalt begrenzt die Möglichkeiten, auf einer Deponie ohne eine weitere Bearbeitung des Feststoffs in kurzer Zeit ein Schüttgut mit den geforderten Kennwerten herzustellen. Die Untersuchung der in der Zeiteinheit ab-

Bild 1. Schüttkegelformen des Feststoffs

