

Zwischenlagern von Güllefeststoffen und Futtermischungen mit Güllefeststoffanteil

Dr.-Ing. C. Fühl, KDT

Forschungszentrum für Mechanisierung der Landwirtschaft Schlieben/Bornim der AdL der DDR, Betriebsteil Potsdam-Bornim

1. Problemstellung

In den vergangenen Jahren erhöhte sich in der DDR die Bedeutung verschiedener Aufbereitungsformen zum Herstellen von Güllefeststoff aus Flüssiggülle. Hühner- und Schweineexkremate wurden bereits mit Erfolg in der Mastrinderproduktion eingesetzt [1][2].

In industriemäßigen Verfahren wird Flüssiggülle meist in mehrschichtigem Betrieb kontinuierlich verarbeitet. Die Abnahme in der Fütterung hat diskontinuierlichen Charakter. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit des Zwischenlagerns. Aus technologischen Gründen ist das Bevorraten in Behältern mit Möglichkeiten der momentanen oder dosierten Entnahme dem Flachlager vorzuziehen. Für das Gestalten und Dimensionieren entsprechender Arbeitsmittel müssen die physikalischen Eigenschaften untersucht werden.

2. Aufgabenstellung

Bei den durchzuführenden Untersuchungen waren folgende Aufgaben zu lösen:

- Für die fließgerechte Gestaltung von Behältern mit Gravitationsfluß müssen die Fließeigenschaften — Kohäsion, Adhäsion, innere Reibung, äußere Reibung, Eigenfestigkeit — und die Lagerungsdichte von Güllefeststoffen und Futtermischungen mit Güllefeststoffanteil bestimmt werden.

- Zur Lagerung in Behältern mit Entnahmemöglichkeiten von oben über einen zentralen Fallschacht ist die Standsicherheit des freien zentralen Fallschachtes nachzuweisen.

- Die zulässige Lagerdauer ist durch das Bestimmen des Verlaufes der Selbsterwärmung anzugeben.

3. Methode und Versuchsdurchführung

3.1. Bestimmung der Fließeigenschaften

3.1.1. Ermittlung von Stoffkenngrößen

Äußerer Reibwert

Zum Bestimmen des äußeren statischen und dynamischen Reibwerts wird ein auf Rollen verfahrbarer, oben und unten offener Kasten benutzt. Der Abstand zwischen der Unterkante des Kastens und der festen Unterlage, gegenüber der der Reibwert bestimmt werden soll, ist kleiner als 1 mm. Vor dem Versuch wird der Kasten mit dem Gut befüllt und dieses mit einer Normalspannung σ_N belastet. Die Guthöhe im Kasten überschreitet 20 mm nicht, damit die Verminderung der Normalspannung und die Belastung des Kastens infolge Wandreibung in zulässigen Grenzen bleiben. Der Versuch wird so durchgeführt, daß der mit dem belasteten Gut gefüllte Kasten mit einer konstanten Geschwindigkeit über die feste Unterlage gezogen wird. Als Meßgröße wird dabei die Scherspannung τ in Abhängigkeit vom Gleitweg registriert.

Innerer Reibwert

Innere Reibwerte werden aus der Fließfunk-

tion $\tau = f(\sigma)$ ermittelt. Für feinkörnige Güter hat sich hierzu in den letzten Jahren vor allem die Jenike-Methode [3] bewährt. Die Jenike-Scherzelle ist jedoch für fasrige Güter mit ausgeprägtem Deformationsverhalten nicht geeignet. Schergeräte bestehen aus einem horizontal geteilten Kasten. Der Unterkasten, der auf einer festen Unterlage befestigt ist, und der Oberkasten werden mit Gut befüllt.

Da der Verlauf der Fließorte jeweils von der Gutdicke abhängt, werden Versuchsreihen mit unterschiedlicher Dichte des Gutes in der Scherzelle durchgeführt. Im Einzelversuch wird das Gut zunächst mit einer Normalspannung σ_{NE} angesichert, die dem Endpunkt eines Fließorts entspricht. Danach werden die Normalspannung reduziert und die Probe abgeschüttelt [3].

Kohäsion

Die Kohäsion ist im betrachteten Fall die Scherfestigkeit, die sich bei einer Normalspannung $\sigma_N = 0$ ergibt. Der Wert der Kohäsion wird durch Extrapolation eines Fließorts ermittelt.

Adhäsion

Die Adhäsion wird aus dem Scherspannungsverlauf $\tau = f(\sigma_N)$ ermittelt, der sich bei der Bestimmung des äußeren Reibwerts bei der Normalspannung $\sigma_N = 0$ einstellt.

Eigenfestigkeit

Die Eigenfestigkeit f_c eines Gutes ist nach Jenike die größere Hauptspannung σ_1 des Mohrschen Spannungskreises, dessen kleinste Hauptspannung $\sigma_2 = 0$ ist und der den Fließort tangiert.

3.1.2. Experimentelle Ausfließversuche

Da beim Anwenden von Berechnungsgleichun-

gen für das Dimensionieren einer fließgerechten Behältergeometrie z. T. Abweichungen auftreten, sind Ausfließversuche als Kontrolle und Überprüfung unumgänglich, wozu ein Behältermodell zur Verfügung steht. Das Probegut unterliegt dem ebenen Spannungszustand. Die Vorderwand ist durchsichtig und hat die Abmessungen von 1600 mm \times 2000 mm. Die geometrischen Größen Behälterbreite, Behältertiefe, Neigung der Seitenwände und Füllhöhe können stufenlos variiert werden.

3.2. Retardationseigenschaften

Die Retardationsfunktion $q_L = f(\text{Vertikaldruck } p_v, \text{Belastungsdauer } t)$ wird zum Berechnen der Lagerungsdichte in Behältern benötigt.

Das Ermitteln dieser rheologischen Stoffbeziehung erfolgt experimentell im Preßtopfversuch [4]. Die Versuche sind so angelegt, daß der Wandreibungseinfluß gering ist und bei der Bestimmung des wirksamen Vertikaldrucks auf Null korrigiert wird.

3.3. Verlauf der Selbsterwärmung

Zum Aufnehmen der Selbsterwärmung wird das Gut in Behälter mit einem Durchmesser $d = 1000$ mm und einer Höhe $h = 1000$ mm gefüllt. Als Meßgeber werden Thermolemente verwendet.

4. Ergebnisse der Laborversuche und ihre Anwendung in der Praxis

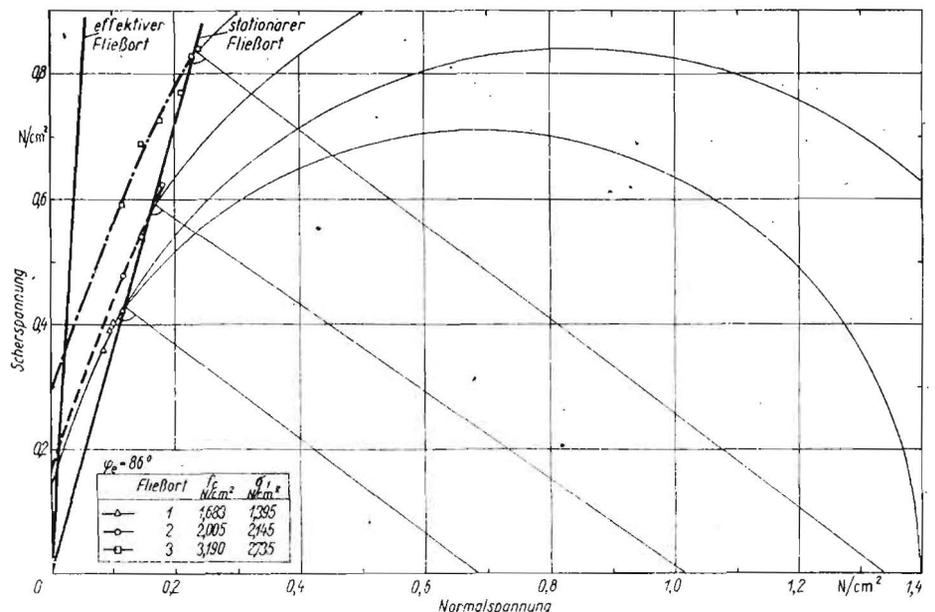
4.1. Fließgerechte Behältergeometrie

4.1.1. Stoffkenngrößen

Dekantierter Geflügelgüllefeststoff

Die Fließorte für dekantierten Geflügel-

Bild 1. Fließorte für dekantierten Geflügelgüllefeststoff (TS = 40%)



gülfeststoff (TS = 40 %) beweisen die schwerfließenden Eigenschaften (Bild 1). Die Werte der Kohäsion C liegen je nach Vorbelastung und Lagerungsdichte zwischen $0,14 \text{ N/cm}^2$ und $0,29 \text{ N/cm}^2$. Der innere Reibwinkel φ_i beträgt

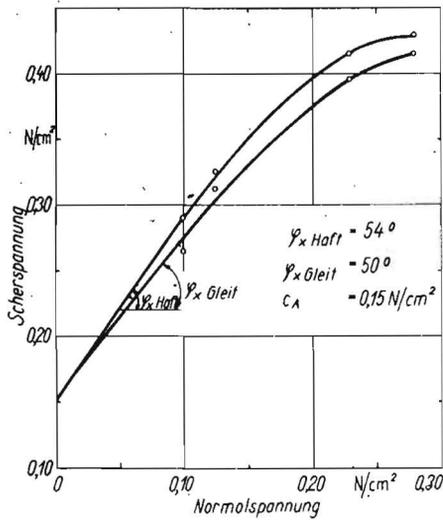


Bild 2. Äußerer Reibwinkel φ_x von dekantiertem Geflügelgülfeststoff (TS = 40 %) gegenüber Stahlblech; Vorverdichtung $\sigma_v = 5,16 \text{ N/cm}^2$

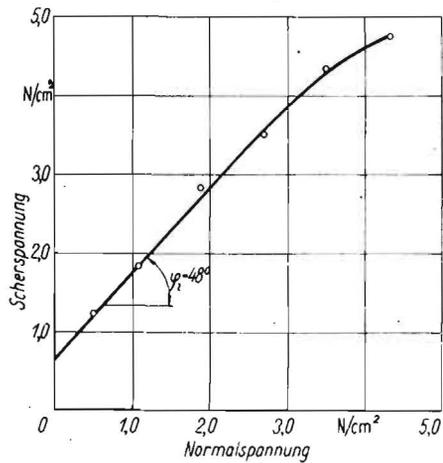
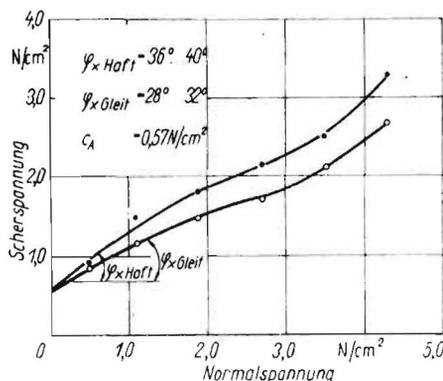


Bild 3. Fließort für Futtergemisch aus Schweinegülfeststoff und Schweinemastfutter S II (TS = 51 %); $\sigma_v = 10,65 \text{ N/cm}^2$, $C_A = 0,57 \text{ N/cm}^2$

Bild 4. Äußerer Reibwinkel φ_x von Futtergemisch aus Schweinegülfeststoff und Schweinemastfutter S II (TS = 51 %) gegenüber Stahlblech; $\sigma_v = 10,65 \text{ N/cm}^2$, $C_A = 0,57 \text{ N/cm}^2$



70° . Der Verlauf des äußeren Reibwinkels gegenüber Stahlblech ist im Bild 2 dargestellt. Die Adhäsion C_A liegt mit $0,15 \text{ N/cm}^2$ im Bereich der Kohäsion.

Futtergemisch Schweinegülfeststoff und Schweinemastfutter S II

Die Fließeigenschaften des Futtergemisches aus Schweinegülfeststoff (Masseanteil 61 %) und Schweinemastfutter S II (Masseanteil 39 %) gehen aus der Darstellung des Fließorts hervor (Bild 3). Der Wert der Kohäsion ist größer als beim Geflügelgülfeststoff. Der innere Reibwinkel und die äußeren Reibwinkel sind kleiner (Bild 4). Diese Ergebnisse sind auf die höheren Vertikaldrücke der Vorbelastung zurückzuführen.

4.1.2. Ausfließversuche

Die Ergebnisse der Ausfließversuche aus dem Modellbehälter zeigen, daß Behälter für das Lagern von Gülfeststoffen und Futtergemischen mit Gülfeststoffanteil im untersuchten Bereich des Trockensubstanzgehalts eine Neigung der Trichterwände zur Vertikalen von $\Theta \leq 10^\circ$ haben müssen. Bei größeren Neigungen treten im Behälter bevorzugt Gutbrücken auf. Außerdem bleiben infolge der hohen Adhäsion und äußeren Reibung Gutreste an den Wänden haften. Das Schließorgan von Behältern muß den gesamten Entnahmequerschnitt freigeben. Wird diese Forderung nicht erfüllt, bilden sich Gutreste mit senkrechten Wänden (Schachtbildung).

Ein störungsfreies Ausfließen stellte sich im Modellbehälter bei Schlitzbreiten $b \geq 700 \text{ mm}$ und der Trichterneigung zur Vertikalen $\Theta \leq 10^\circ$ ein. Bei Schlitzbreiten $b = 500 \text{ mm}$ und $\Theta = 10^\circ$ war das Ausfließen mit zeitweiligen Unterbrechungen und Verzögerungen verbunden.

4.1.3. Berechnung der optimalen Behältergeometrie auf der Grundlage der ermittelten Stoffkenngrößen

Die Berechnung von Massenflußbehältern nach der Jenike-Methode [3] ist nicht möglich, weil die erforderlichen Nomogrammtafeln, die für die ermittelten Stoffkenngrößen gelten, in der Literatur nicht veröffentlicht sind. Es werden

deshalb die Berechnungsmethoden nach Zenkow [5], Richmond [6] und Walker [7] [8] angewendet.

Die Ergebnisse für Geflügelgülfeststoff zeigen eine gute Übereinstimmung der Schlitzbreite nach Zenkow mit den experimentellen Werten der Ausfließversuche (Tafel 1). Die Schlitzbreiten und Auslaufdurchmesser nach Richmond und der Schaftdurchmesser sowie der Abstand zwischen parallelen senkrechten Wänden nach Walker liegen weit über den Ergebnissen der praktischen Modellversuche.

4.1.4. Praktische Empfehlungen für die Gestaltung von Behältern mit Gravitationsfluß

Aus den ermittelten physikalisch-mechanischen Stoffkennwerten, den berechneten Behälterabmessungen und den Ergebnissen der experimentellen Ausfließversuche werden für die Lagerung von Gülfeststoffen und Futtergemischen mit Gülfeststoffanteil folgende konstruktiven Parameter vorgeschlagen:

- Durchmesser des zylindrischen Behälter-schaftes $\geq 4 \text{ m}$
- Abstand zwischen parallelen Wänden von Schlitzbunkern $\geq 2 \text{ m}$
- Durchmesser von kreisförmigen Auslauföffnungen $\geq 3 \text{ m}$
- Schlitzbreite von Schlitzbunkern $\geq 1,50 \text{ m}$
- Neigung der Trichterwände zur Vertikalen $\leq 10^\circ$.

Der Querschnitt der angegebenen Auslauföffnungen darf durch den Behälterverschluß oder die Entnahmeeinrichtung nicht eingeschränkt werden.

4.2. Standfestigkeit eines freien Fallschachtes

Die Lagerung schwerfließender Stoffe ist auch in Behältern möglich, die eine Entnahmemöglichkeit von oben mit Abwurf durch einen zentralen Fallschacht aufweisen. Die Standfestigkeit eines frei geformten Schachtes kann nach der Bohrlochtheorie von Westergaard [9] berechnet werden. Für den Radius r_e der plastischen Zone in der Tiefe z unter dem Füllgutspiegel gilt der Ausdruck:

Tafel 1. Abmessungen von Auslauföffnungen, berechnet nach verschiedenen Methoden für Geflügelgülfeststoff

	Gutart Geflügelgülfeststoff	Geflügelgülfeststoff	Geflügelgülfeststoff	Geflügelgülfeststoff	Geflügelgülfeststoff	Geflügelgülfeststoff
Kohäsion C	N/cm^2	0,14	0,17	0,17	0,29	0,29
Adhäsion C_A	N/cm^2	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
innerer Reibwinkel φ_i	$^\circ$	70	70	70	70	70
äußerer Reibwinkel φ_e	$^\circ$	54	54	54	54	54
Lagerungsdichte	kg/m^3	690	750	750	800	800
berechnet nach	Schlitzbreite b	Auslaufdurchmesser d	Schlitzbreite b	Auslaufdurchmesser d	Schlitzbreite b	Auslaufdurchmesser d
	m	m	m	m	m	m
Zenkow	0,79	1,57	0,88	1,76	1,41	2,81
Richmond	6,77	13,54	7,48	14,95	11,69	23,39
	Abstand von parallelen Wänden a	Schaftdurchmesser d	Abstand von parallelen Wänden a	Schaftdurchmesser d	Abstand von parallelen Wänden a	Schaftdurchmesser d
	m	m	m	m	m	m
Richmond I	1,15	2,30	1,29	2,57	2,06	4,11
Richmond II	0,79	1,57	0,88	1,76	1,41	2,81
Walker			5,97	11,95		

$$r_e = r_0 \left[\frac{2 [(\lambda_p - 1) \rho \cdot g \cdot z + 2 C \sqrt{\lambda_p}]}{(\lambda_p + 1) [(\lambda_p - 1) \sigma_{r_0} + 2 C \sqrt{\lambda_p}]} \right]^{\frac{1}{\lambda_p - 1}}$$

- ρ Dichte des Gutes
- g Erdbeschleunigung
- λ_p Horizontaldruckverhältnis;
 $\lambda_p = \tan^2 (45^\circ + \varphi_i/2)$
- φ_i innerer Reibwinkel
- σ_{r_0} Normalspannung in der Wandung des Bohrlochs in der Tiefe z
- r_0 Radius des Bohrlochs
- r_e äußerer Radius der plastischen Zone in der Tiefe z
- C Kohäsion des Gutes.

Für ein kohäsionsloses Gut erhält man folgende Gleichung:

$$r_e = r_0 \left[\frac{2 \rho \cdot g \cdot z}{\sigma_{r_0} (\lambda_p + 1)} \right]^{\frac{1}{\lambda_p - 1}}$$

Hat die Normalspannung σ_{r_0} einen positiven Wert, ist der Radius der plastischen Zone r_e endlich. Es genügen schon geringe Aussteifungen in Form von Überzügen, um ein Bohrloch in einem kohäsionslosen Gut standsicher zu gestalten.

Bei kohäsiven Gütern ohne innere Reibung gilt die Beziehung

$$r_e = r_0 e^{(\rho \cdot g \cdot z - C - \sigma_{r_0})/2C}$$

Aus dieser Gleichung kann man entnehmen, daß auch für nicht abgestützte Bohrlochwandungen, d. h. $\sigma_{r_0} = 0$, der Radius r_e für jeden endlichen Wert der Tiefe z endlich ist. Deshalb brauchen bei kohäsiven Gütern Bohrlöcher nicht ausgesteift zu werden.

Auf Güllefeststoffe und Futtergemische mit Güllefeststoffanteil bezogen, bedeuten diese Aussagen, daß ein frei geformter zentraler Fallschacht standfest ist. Voraussetzung sind kohäsive Eigenschaften des Gutes.

4.3. Lagerungsdichte

4.3.1. Retardationseigenschaften

Aus den ermittelten Retardationsfunktionen $\rho_L = f(p_v, t)$ in kg/m^3 von Geflügelgüllefeststoff (Bild 5) lassen sich folgende Regressionsgleichungen angeben:

— Lagerungsdauer $t = 0$ h

$$\rho_L = 933,6 \left(\frac{p_v}{10} \right)^{0,16}$$

$B = 0,98$

— Lagerungsdauer $t = 1$ h

$$\rho_L = 1039,1 \left(\frac{p_v}{10} \right)^{0,17}$$

$B = 0,99$

— Lagerungsdauer $t = 2$ h

$$\rho_L = 1046,1 \left(\frac{p_v}{10} \right)^{0,17}$$

$B = 0,99$

— Lagerungsdauer $t = 24$ h

$$\rho_L = 1069,3 \left(\frac{p_v}{10} \right)^{0,18}$$

$B = 0,99$

4.3.2. Mittlere und örtliche Lagerungsdichten

Die geringe Zeitabhängigkeit der Retardationsfunktionen bewirkt, daß die mittleren und örtlichen Lagerungsdichten von Geflügelgüllefeststoff mit zunehmender Lagerungs-

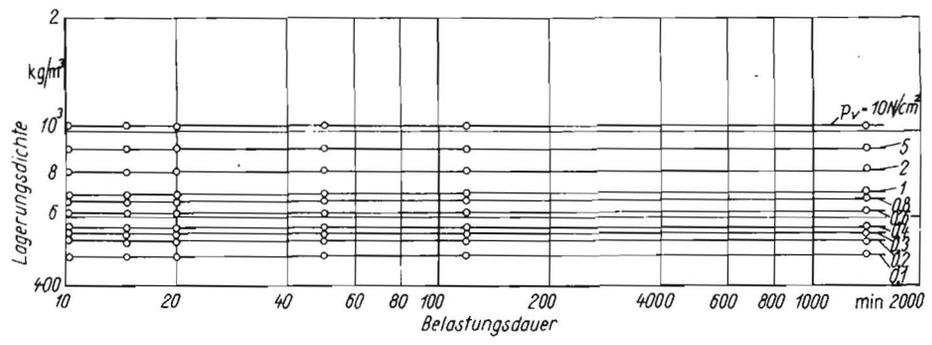


Bild 5. Retardationsfunktionen $\rho_L = f(t)$ für konstante Vertikaldrücke p_v von Geflügelgüllefeststoff (TS = 40%)

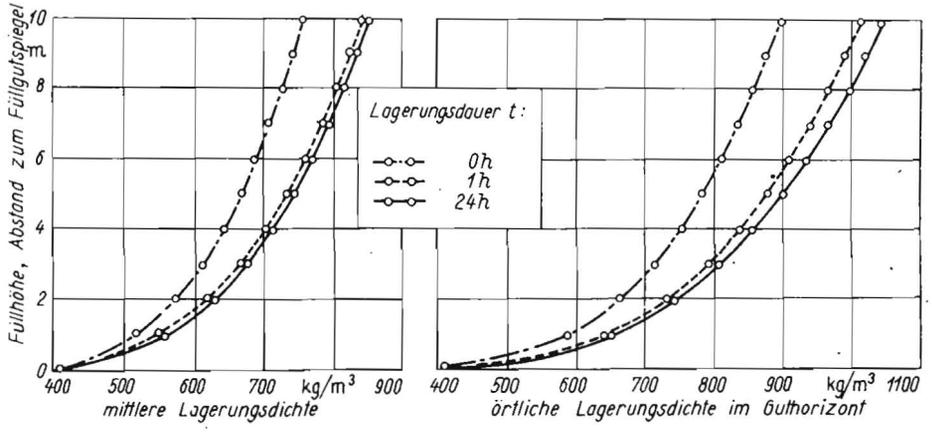


Bild 6. Mittlere und örtliche Lagerungsdichten von Geflügelgüllefeststoff (TS = 40%) ohne Berücksichtigung der Wandreibung

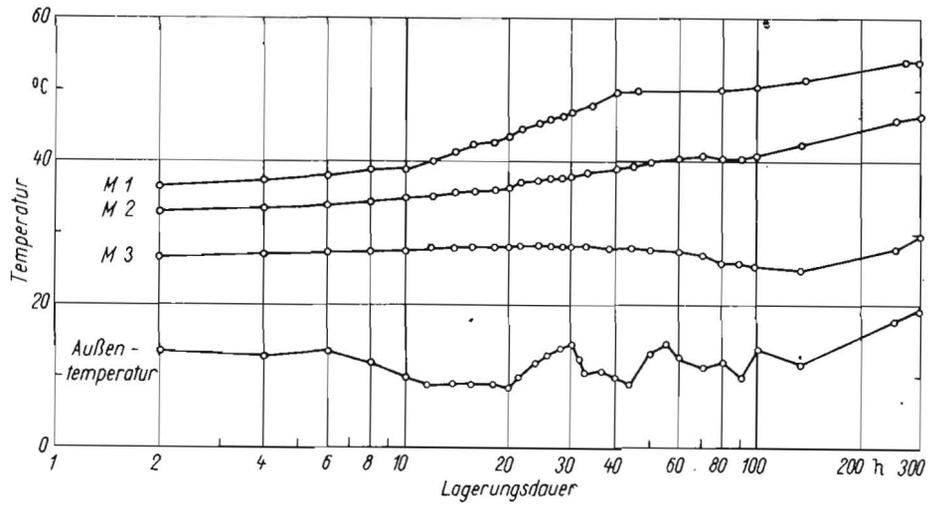


Bild 7. Verlauf der Selbsterwärmung von Geflügelgüllefeststoff (TS = 40%); Abstand zur Gutoberfläche: 300 mm (M 1), 450 mm (M 2), 700 mm (M 3)

dauer kaum noch bemerkenswert ansteigen (Bild 6). Die Dichten bei 1 h und 24 h Lagerungsdauer weisen nur geringe Unterschiede auf. Die Lagerungsdauer $t = 0$ h ist nur ein theoretischer Fall und kann in der Praxis nur durch eine Momentbeschickung angenähert werden.

4.4. Selbsterwärmung

Die Selbsterwärmung von Güllefeststoffen ist unerwünscht. Bei gleichbleibenden Umgebungstemperaturen werden die maximalen Guttemperaturen etwa nach 40 bis 60 h erreicht

(Bild 7). Charakteristisch ist, daß sich 30 cm unter der Gutoberfläche höhere Erwärmungen als in tieferen Schichten einstellen. Während in den oberen Gutschichten bei Lagerungsdichten von rd. 450 kg/m^3 und einem Gasporenanteil von rd. 60% gute Bedingungen für die Tätigkeit von aeroben Bakterien vorherrschen, wird z. B. in einer Tiefe von 700 mm bei Lagerungsdichten von 600 bis 650 kg/m^3 und Gasporenanteilen von 45 bis 50% die Bakterientätigkeit eingeschränkt. Ähnliche Selbsterwärmungsverläufe wie bei Geflügelgüllefeststoff wurden bei der Lagerung von Schweinegüllefeststoff ermittelt. Höchsttemperaturen bis zu 70°C treten

im Trockensubstanzbereich von 40 bis 60% auf.

5. Zusammenfassung

Güllefeststoffe und Futtergemische mit Güllefeststoffanteil sind aufgrund ihrer faserigen Textur schwerfließende Güter. Die sichere Entnahme aus Behältern mit Gravitationsfluß ist nur bei Auslaufdurchmessern $d \geq 3$ m, Schlitzbreiten $b \geq 1,50$ m und Neigungen der Trichterwände zur Vertikalen $\theta \leq 10^\circ$ möglich. Da Behälterverschlüsse und Entnahmeorgane für Auslaufdurchmesser $d \geq 3$ m konstruktiv schwer realisierbar sind, sollte in der Praxis auf Schlitzbunker orientiert werden. Frei geformte zentrale Fallschächte sind durch die hohe Kohäsion und innere Reibung von Güllefeststoffen standfest. Die Lagerungsdichte vergrößert sich mit zunehmender Lagerungsdauer nur sehr wenig. Der Verlauf ist vom Trockensubstanzgehalt abhängig. Maximale Guttemperaturen infolge Selbsterwärmung treten

nach 40 bis 60 h auf. Im Trockensubstanzbereich von 40 bis 60% treten Höchstwerte von 50 bis 70°C auf. Ist kein Teilprozeß zur Abkühlung vorgesehen, muß bei Güllefeststoffen und Futtergemischen mit Güllefeststoffanteil auf eine Sofortverfütterung orientiert werden.

Literatur

- [1] Flachowsky, G.: Untersuchungen zum Einsatz von pelletierten Fertigfuttermitteln mit Stroh und Feststoffen der Schweinegülle unter besonderer Berücksichtigung der Schlachtkörperzusammensetzung von Mastbullen. Vortrag zum Symposium „Kompaktierte Futtermittel für die industriemäßige Tierproduktion“, Halle 1976.
- [2] Schlage, M.: Zum Einsatz von Legehennenexkrementen in der Fütterung. Vortrag zum Symposium „Kompaktierte Futtermittel für die industriemäßige Tierproduktion“, Halle 1976.
- [3] Schwedes, J.: Fließverhalten von Schüttgütern in Bunkern. Weinheim: Verlag Chemie 1968.

- [4] Füll, C.: Ein Beitrag zum Berechnen von Dichten und Horizontaldrücken bei der Lagerung landwirtschaftlicher Halmgüter in Behältern. Universität Rostock, Sektion Landtechnik, Dissertation 1972.
- [5] Zenkow, R.L.: Schüttgutmechanik, Moskva: Mašgiz 1952.
- [6] Richmond, O.: Gestaltung von Bunkern mit Schwerkraftdurchsatz. *Energie* 15 (1963) H.6, S. 214—216.
- [7] Walker, D.M.: Eine Nährungstheorie für Drücke und Brückenbildung in Trichtern. *Chem. Engng. Sci.* 21 (1966) S. 975—997.
- [8] Walker, D.M.: Grundlagen für die Bunkerkonstruktion. *Powder Technology* (1967) H.1, S. 228—236.
- [9] Westergaard, H.M.: Plastic State of Stress around a Deep Well. *J. Boston Soc. civ. Engrs.* (1940) H. 27, S. 1—5. A 1900

Berechnung des Druckverlustes bei der Förderung konzentrierter Futtermischungen mit chemisch konservierten Zuckerrüben in Rohrleitungen

Dr.-Ing. M. Türk, KDT

Forschungszentrum für Mechanisierung der Landwirtschaft Schlieben/Bornim der AdL der DDR, Betriebsteil Potsdam-Bornim

Verwendete Formelzeichen

a	Ns/m ⁶	Konstante der Regressionsfunktion $\Delta p/\Delta l = f(\dot{V})$
d	m	Rohrinnendurchmesser
(dv/dr) _w	l/s	Schergefälle nicht-Newtonscher Medien
H _{geo}	m	geodätische Förderhöhe
k	Ns ⁿ /m ²	Konsistenzkoeffizient des Potenzgesetzes
l	m	Rohrlänge gerader Rohre
l _{ges}	m	Gesamtförderlänge
l*	m	äquivalente Rohrlänge örtlicher Widerstände
l ₀	m	Einbaulänge von Armaturen und Formstücken
m _{ZR}	kg	Massenanteil Zuckerrübenschnitzel
m _{TMF}	kg	Massenanteil Trockenmischfutter
m _w	kg	Massenanteil Wasser
n	—	Fließexponent des Potenzgesetzes
p _{ges}	Pa	Gesamtdruck
Δp	Pa	Druckdifferenz statischer Drücke
Δp/Δl	Pa/m	spezifischer Druckverlust
R	m	Rohrradius
R _k	m	Krümmungsradius
Re _n	—	verallgemeinerte Reynoldszahl
Re' _n	—	modifizierte Re _n -Zahl
Tr	%	Trockensubstanzgehalt
Ṃ	m ³ /s; m ³ /h	Volumenstrom, Durchsatz
v	m/s	mittlere Strömungsgeschwindigkeit
β _{Bö}	°	Schüttwinkel
ζ	—	Widerstandszahl von Armaturen und Formstücken
η	cP	dynamische Viskosität
γ	—	Rohrreibungszahl
ϑ _F	°C	Temperatur der Futtermischung
ρ	kg/m ³	Dichte
ρ _{Sch}	kg/m ³	Schüttdichte
τ _w	Pa	Wandschubspannung
τ ₀	Pa	Fließgrenze

1. Problemstellung

Zur Berechnung von Förder- und Verteilanlagen für die fließfähige Fütterung in Schweinegroßanlagen ist die Kenntnis der Druckverlustanteile der Strömung in geraden Rohren und örtlichen Widerständen notwendige Voraussetzung. Beim Einsatz konzentrierter Hackfruchtfuttermischungen mit chemisch konservierten Zuckerrüben zeigt sich ein kompliziertes Verformungsverhalten, das in starkem Maß von der Futterzusammensetzung, von den physikalischen Eigenschaften der Komponenten und von der mechanischen Beanspruchung abhängig ist. Gelingt die Bestimmung reproduzierbarer und übertragbarer Fließkurven, so können mit Hilfe bekannter Fließgesetze Druckverlust-Durchsatz-Abhängigkeiten für die laminare Rohrströmung berechnet werden. Dieses Förderproblem ist Inhalt des folgenden Beitrags, wobei die wesentlichen Berechnungsgrundlagen bereits bekannt sind [1].

Konzentrierte Futtermischungen aus Zuckerrübenschnitzeln (ZR), Trockenmischfutter (TMF) und Wasser können als nicht-Newtonsche, grobdisperse Suspensionen gekennzeichnet werden. Aufgrund einer charakteristischen Gerüststruktur der ZR mit großem Zwischenraumvolumen, in dem die wesentlich kleineren Schrotteilchen des TMF eingelagert sind, werden kaum Entmischungerscheinungen beobachtet. Die Fließeigenschaften werden im wesentlichen durch die ZR bestimmt. Das ZR-Konservat (mit 0,2% Benzoesäure im Hochsilo eingelagert) besteht aus länglichen (< 50 mm), z. T. zerfaserten, weichen Schnitzeln mit folgenden Eigenschaften:

Tr = 22 ... 23 %
 ρ_{Sch} = 480 ... 500 kg/m³
 β_{Bö} = 41 ... 44°.

Bei der chemischen Konservierung im Hochsilo [2] erfolgt der Austritt von etwa 10 bis 15% Zuckersaft (Tr = 15 ... 17%; η = 3 ... 4 cP), der mit seinem hohen Nährwert grundsätzlich zur Fütterung verwendet werden sollte.

Bei den vorliegenden Versuchen wurde der Zuckersaft nicht verwertet, um die ungünstigsten Bedingungen im Betrieb zu simulieren [3].

2. Versuchsmethodik

Bei der Vielzahl von Einflußgrößen auf den Reibungswiderstand kommt der sorgfältigen und reproduzierbaren Bestimmung der Fließeigenschaften besondere Bedeutung zu. Da nur mit einem Rohrviskosimeter übertragbare Fließkennwerte der grobdispersen ZR-Futtermischungen gewonnen werden können [1] [3], wurden bei stationärer, laminarer Strömung in einem Viskosimeter-Meßrohr (NW 100 mm) mit den prozeßbestimmenden integralen Meßgroßen Durchsatz Ṃ und Druckverlust Δp/Δl Fließkurven $\tau_w = f[(dv/dr)_w]$ ermittelt. Am Rohrleitungsversuchsstand des Forschungszentrums für Mechanisierung Schlieben/Bornim wurden weiterhin Druckverluste von handelsüblichen Stahlrohren, Formstücken (Reduzierstücke, 90°-Krümmer, T-Stücke) und Keilschiebern unterschiedlicher Nennweiten (NW 50 bis 125 mm) im Durchsatzbereich $\dot{V} = 5 \dots 25$ m³/h bei konstanten Temperaturen $\vartheta_F = 18 \dots 20^\circ\text{C}$ gemessen. Durch diese Versuchsmethodik wurde die Übertragbarkeit der ermittelten Fließkennwerte auf andere Rohrenweiten überprüft.

Zur meßtechnischen Erfassung der statischen Druckdifferenz Δp wurde ein neues Meßprinzip mit Membrankammer und U-Rohr-Manometer entwickelt und mit Erfolg eingesetzt [4]. Die