

Meno TÜRK

Akademie der Landwirtschaftswissenschaften der DDR
Forschungszentrum für Mechanisierung der Landwirtschaft Schlieben/
Bornim

Hartmut ECKSTÄDT

Wilhelm-Pieck-Universität Rostock

KLASSIFIZIERUNG VON GÜLLE AUS TIERPRODUKTIONSANLAGEN ZUR GENAUEREN DRUCKVERLUSTBERECHNUNG BEIM ROHRTRANSPORT

Zusammenfassung

Die relevanten Einflußgrößen auf das Fließ- und Förderverhalten von konzentrierter Rinder-, Schweine- und Hühnergülle wurden analysiert und systematisch untersucht. Auf der Grundlage des Futtereinsatzes, der Tierart und des TS-Gehaltes erfolgt eine Einteilung in unterschiedliche Güllearten, für die zeit- und temperaturabhängige Fließkennwerte bestimmt wurden. Das Förderverhalten im Laminar- und Turbulenzbereich wurde unter Berücksichtigung der Sedimentation in geraden Rohrleitungen und lokalen Einbauten untersucht. Der aktuelle Kenntnisstand zur Gülle-Rohrhydraulik mündet ein in einen Bemessungskatalog mit umfangreichen Druckverlusttabellen, der als Projektierungsrichtlinie in der DDR ab 1987 vorliegen wird.

1. Problemstellung

Die Gewinnung von trockensubstanzreicher Gülle durch wassersparende Bewirtschaftung ist eine bedeutende volkswirtschaftliche Aufgabe in den Tierproduktionsanlagen der DDR.

Hohe Erträge in der Pflanzenproduktion können u. a. nur durch eine optimale organische Düngung erreicht werden. Nicht nur aus Gründen des Umweltschutzes, sondern auch aus energie- und transportökonomischer Sicht ist eine Wasserreduzierung in der Gülle dringend geboten. Auch künftig wird die hydromechanische Förderung mit Pumpen und Rohrleitungen einen bedeutenden Umfang der innerbetrieblichen Transportaufgaben, der Gülleausbringung und der -aufbereitung einnehmen. Die Förderanlagen müssen stets mit der Zielstellung des optimalen Werkstoff- und Energieaufwandes sowie hoher Betriebssicherheit und Automatisierbarkeit projektiert werden. Voraussetzung dazu sind Bemessungsgrundlagen auf der Basis aktueller Fließkennwerte zur Druckverlustberechnung der Rohrleitungen. Insbesondere bei trockensubstanzreicher Rinder- und Schweinegülle mit mehr als $TS = 8\%$ beeinflussen zunehmend Plastizität und Zeitabhängigkeit neben der Zusammensetzung - entsprechend Futtereinsatz - und der Temperatur das Fließ- und Förderverhalten in Rohrleitungen. In Abhängigkeit von der Konzentration (Trockensubstanzgehalt TS) wurden die relevanten Einflußgrößen auf das Fließverhalten rheometrisch untersucht, bewertet und

mit Hilfe einfacher Rechenmodelle verallgemeinert. Das ist die Grundlage zur Klassifizierung in Güllegruppen nach Tierart, Fütterung und Nutzungsrichtung sowie die Voraussetzung zur genaueren Druckverlustberechnung beim Rohrleitungstransport. Parallel zur Ermittlung der rheologischen Parameter wurden Förderversuche durchgeführt. Damit konnten geeignete Berechnungsansätze für die Druckverluste bei Rohrströmung ausgewählt und die Sedimentationseigenschaften bestimmt werden.

Diese Untersuchungen wurden arbeitsteilig vom FZM der AdL und der WPU Rostock in den letzten Jahren intensiv durchgeführt und münden ein in einen Bemessungskatalog für Gülledruckrohrleitungen, der als Projektierungsmaterial 1986 erarbeitet wurde.

2. Untersuchun smethodik

2.1. Rheologische Messungen

Gülle besteht aus den Abprodukten Kot, Harn, Futterresten, Wasser und Fremdstoffen und kann als grobdisperses fluides Medium mit einem sehr breiten Teilchengrößenspektrum sowie äußerst unterschiedlichen Teilchenformen (Körner, Spelzen, Halme, Haare, Sand, Steine, usw.) gekennzeichnet werden. Dabei muß für rheometrische Messungen im Viskosimeter stets Quasihomogenität angenommen werden, obwohl Sedimentationserscheinungen in Abhängigkeit von TS - Gehalt auftreten.

Es hat sich gezeigt, daß das im FZM entwickelte Rotationsviskosimeter großer Spaltweise (Bild 1) für Gülle gut geeignet ist und absolute Fließkurven erhalten werden, die reproduzierbar und auf die Rohrströmung hinreichend genau übertragbar sind. Aus ausgewählten Tierproduktionsanlagen wurden Kot-, Harn- und Gülleproben gewonnen und schrittweise im Meßbereich von

$$\begin{aligned} 3,5 < TS < 16,8 \% & \text{ (Rindergülle) / 1 / ,} \\ 5,0 < TS < 25,0 \% & \text{ (Schweinegülle) / 2 / ,} \\ 6,0 < TS < 20,0 \% & \text{ (Hühnergülle) / 3 / } \end{aligned}$$

verdünnt. Die Fließkurvenaufnahme erfolgte in der Regel nach Erreichen eines definierten Normstrukturzustandes nach einer Belastungszeit von $t_N = 40 \dots 60$ min bei maximaler Scherbelastung von $\dot{\gamma}_{max} = 70$ l/s. Die Zeitabhängigkeit wird dabei wie bereits beschrieben / 4 / modellmäßig berücksichtigt. Als Normtemperatur wurde 20°C gewählt.

2.2. Förderversuche

Neben den rheologischen Messungen mit dem Rotationsviskosimeter wurden Druckverlustmessungen mit einer Förderversuchsanlage (Bild 2) durchgeführt. Dabei konnte die Gülle in Kreisläufen gefördert werden, um die Bedingungen weitgehend konstant zu halten. Die Verdünnung der angelieferten TS-reichen Güllen (TS < 13 % bei Schweinegülle und TS < 11 % bei Rindergülle) erfolgte schrittweise durch Zumischen entsprechender Mengen Wasser. Die Ermittlung der Durchflüsse konnte volumetrisch (durch Zeitmessung bei der Füllung eines Meßbehälters) und mit induktiven Durchflußmengenmessern durchgeführt werden. Zur Druckverlustmessung dienten Differenzdruckmanometer. Die Gesamtfüllmenge der Anlage betrug ca. 2,5 m³. Das Sedimentationsverhalten ließ sich durch in die Meßrohrstrecken eingesetzte Glasrohrabschnitte beobachten.

3. Meßergebnisse

3.1. Fließverhalten

Es wurden folgende relevante Einflußgrößen auf das Fließverhalten gekennzeichnet:

- Tierart (Rind, Schwein, Huhn)
- Konzentration (TS- Gehalt)
- Futterzusammensetzung
- Zeitabhängigkeit
- Temperatur

Konzentration und Futterzusammensetzung sind die wichtigsten Größen zur technologischen und rheologischen Klassifizierung von Gülle. In Abhängigkeit vom TS-Gehalt sind dabei die in Tafel 1 angegebenen Fließgesetze gebräuchlich. Primär sind bei Rinder- und Schweinegülle Art, Zusammensetzung und Qualität des Futters von entscheidender Bedeutung. Auf dieser Grundlage konnten die folgenden Güllegruppen unterschieden und entsprechende Funktionen der Fließkennwerte

$$\tau_0 = a_0 \exp(a_1 \text{ TS}) \quad (1)$$

$$k = b_0 \exp(b_1 \text{ TS}) \quad (2)$$

$$n = c_0 \exp(c_1 \text{ TS}) \quad (3)$$

bestimmt werden (Bild 3):

- Schweinegülle A: Getreidefütterung
B: Fütterung von Kartoffeln und Getreide
C: Fütterung von Sammelfutter (Küchenabfälle, Industrieabfälle, Getreide)
- Rindergülle D: Kälbergülle
E: Fütterung von Maissilage (> 50 %) (vorwiegend Rindermast)
F: Fütterung von Silagegemischen (Gras-, Anweilsilage) oder Grünfütter (vorwiegend Milchvieh- und Jugviehhaltung)
- Hühnergülle Getreidefütterung

Von untergeordneter Bedeutung ist in der Schweinemast die Futterkonsistenz. Grundsätzlich ist festzustellen, daß sich bei gleichem TS-Gehalt das Fließverhalten von Rindergülle deutlich von dem der Schweine- und Hühnergülle unterscheidet (Bild 4). Ursache dafür ist im wesentlichen die Futterstruktur, d. h. vor allem der hohe Anteil langfaseriger pflanzlicher Teilchen in der Rindergülle. Der Rohfasergehalt des Futters kann dabei als Orientierungswert dienen, da sich mit steigendem Rohfaseranteil die Fließfähigkeit stark verschlechtert.

Das thixotrope Zeitverhalten ist erst bei TS-reicher Gülle mit TS > 10 % von steigendem Einfluß und zudem bei Rindergülle erheblich stärker ausgeprägt als bei Schweinegülle. Bei erstmaliger Scherbelastung in der Förderpumpe und der anschließenden Rohrleitung laufen bis zum Erreichen des Normstrukturzustandes Misch-, Zerkleinerungs- und Ausrichtungsvorgänge zugleich ab. Dieses thixotrope Zeitverhalten ist bei Rindergülle von der Belastungszeit und der Belastungsintensität abhängig. Bei wiederholter Belastung nach Ruhepausen ist demnach der thixotrope Strukturaufbau zu beachten, der in Abhängigkeit von der vorherigen Belastung und Länge der Ruhezeit zu einem um den Faktor 1,2...1,5 erhöhten Anfahrdruckverlust führen kann.

Mit Verminderung der Temperatur verschlechtert sich das Fließverhalten. Zur Korrektur der Fließkennwerte wurde eine Temperaturzahl definiert / 5 / (wobei der Normwert $\mathcal{J}_N = 20^\circ\text{C}$)

$$\alpha_t(\mathcal{J}) = \frac{\tau(\mathcal{J})}{\tau(\mathcal{J}_N)} = \frac{\eta_S(\mathcal{J})}{\eta_S(\mathcal{J}_N)}, \quad (4)$$

die von der Gülleart und im wesentlichen von Wasseranteil abhängt (Bild 5). Mit Gl. (4) können die Fließkennwerte τ_0 und k korrigiert werden, der Fließexponent des Potenzgesetzes ist nicht von der Temperatur abhängig.

Sind bei der Gülleverarbeitung, insbesondere bei der Beschickung von Biogasreaktoren, Güllemischungen zu fördern, so kann das Fließverhalten bei Anwendung des Potenzgesetzes von OSTWALD und DE WAELE (Tafel 1) überschläglich folgendermaßen bestimmt werden / 6 /:

$$\lg k = \lg k_1 + \left(\frac{m_2}{m_1 + m_2} \right) (\lg k_2 - \lg k_1) \quad (5)$$

$$n = n_1 - \left(\frac{m_2}{m_1 + m_2} \right) (n_1 - n_2) . \quad (6)$$

Der Index 1 kennzeichnet dabei grundsätzlich das Medium mit der besseren Fließfähigkeit.

3.2. Förderverhalten

Rindergüllen mit TS > 8 % und Schweinegüllen mit TS > 10 % sedimentieren nicht. Bei der Förderung solcher TS-reicher Güllen sind die Feststoffe quasihomogen über den Rohrquerschnitt verteilt. Einschränkungen auf den Förderbetrieb gibt es nicht. Bei Förderung von Güllen, die im Ruhezustand sedimentieren, treten je nach Rohrdurchmesser, Gülleart, TS-Gehalt und Durchflußmenge typische Feststoffverteilungen auf. Zur Unterscheidung der ablagerungsbehafteten von ablagerungsfreien Förderzuständen dient die kritische Ablagerungsgeschwindigkeit v_{krit} . Die gemessenen Abhängigkeiten bei Rinder- und Schweinegülle zeigt Bild 7. Für die Projektierung wurden Mindestfließgeschwindigkeiten v_{min} vorgeschlagen, die in einem bestimmten Bereich von Trockensubstanzgehalten konstant sind ($v_{min} \geq v_{krit}$). Nach längeren Förderpausen sollten die Geschwindigkeiten zunächst größer als v_{krit} sein. Rohrspülungen mit Wasser sind nur von sehr langen Förderpausen oder zum vollständigen Entleeren erforderlich. Fremdkörper und größere Sandanteile sind vor der Förderung aus der Gülle zu entfernen.

Für Rohrdurchmesser $d > 200$ mm wurden Extrapolationen der kritischen Ablagerungsgeschwindigkeiten entsprechend Bild 8 vorgenommen.

4. Druckverlustberechnung

Das Fließverhalten von Gülle reicht entsprechend TS-Gehalt von Newtonschen bis zum plastischen Bereich (Tafel 1). Die verschiedenen Fließmodelle können mit Hilfe der definierten Scheinviskosität nach einer einheitlichen Berechnungsmethodik angewendet werden / 7 /. Der Übergang zur turbulenten Strömung ist mit $Re_{krit} = 2000 \dots 2300$ hinreichend gekennzeichnet. Dieser Übergang

erfolgt bei landwirtschaftlichen Fördermedien zumeist stetig und ohne plötzliche Druckerhöhungen (Bild 6). Für den turbulenten Bereich ist die in Tafel 1 angegebene METZNER/DODGE - Gleichung gut geeignet. Für Überschlagsrechnungen sind Näherungslösungen in Abhängigkeit vom Fließexponenten n angegeben. Der Bereich der voll ausgebildeten turbulenten Rohrströmung wird äußerst selten und auch nur bei Dünngülle erreicht, daher ist die Rohrrauigkeit ohne wesentlichen Einfluß. Die äquivalenten Rohrlängen lokaler Einbauten sind Tafel 2 zu entnehmen.

Auf der Grundlage der gezeigten Berechnungsmodelle zur Bemessung von Gülle-Druckrohrleitungen, der Klassifizierungsmöglichkeiten der Gülle und der Korrekturmodelle zum Zeit- und Temperaturverhalten wurde ein Bemessungskatalog erarbeitet / 8 %. Damit erfolgte eine Zusammenfassung des aktuellen Kenntnisstandes zur Güllerohrhydraulik als Projektierungsrichtlinie. Dieser Katalog umfaßt einmal sämtliche Berechnungsalgorithmen und Stoffkennwerte, die für eine Druckverlustberechnung erforderlich sind, zum anderen aufbereitete Druckverlusttabellen (Tafel 3) der verschiedenen Güllearten einschließlich Benutzungsanleitung und Rechenbeispiele. Die Druckverlusttabellen wurden mit Hilfe eines Kleinrechners bearbeitet, das FORTRAN-Rechenprogramm dazu liegt im FZM vor.

Neben den errechneten Druckverlusthöhen in Abhängigkeit von Durchsatz und Rohrdurchmesser wird der Übergangsbereich zur Turbulenz gekennzeichnet ($>$) und ein Vergleich mit den kritischen Strömungsgeschwindigkeiten v_{krit} angestellt ($*$). Diese Informationen sind für den Projektanten in der Regel ausreichend. Zwischenwerte der angegebenen Rohrdurchmesser können interpoliert werden. Auf spezielle Fragestellungen wurde gesondert eingegangen.

5. Zusammenfassung

Die relevanten Einflußgrößen auf das Fließ- und Förderverhalten von Rinder-, Schweine- und Hühnergülle wurden analysiert und systematisch untersucht. Dabei wurde insbesondere konzentrierte Gülle bis zum Grenzbereich des Pumpeneinsatzes berücksichtigt. Auf der Grundlage der Tierart, des Futtereinsatzes und des TS-Gehaltes erfolgt eine Klassifizierung in unterschiedliche Güllearten, für die Fließkennwerte bestimmt wurden. Korrekturen hinsichtlich Zeit- und Temperaturabhängigkeit sind möglich.

Das Förderverhalten im Laminar- und Turbulenzbereich wurde unter Beachtung der Sedimentation in geraden Rohrleitungen und

lokalen Einbauten in Abhängigkeit von der Zeit untersucht, so daß die Druckverlustberechnung hinreichend gesichert ist.

Der aktuelle Kenntnisstand zur Gülle-Rohrhydraulik mündet ein in einen Bemessungskatalog mit umfangreichen Druckverlustta-bellen, der als Projektierungsrichtlinie in der DDR ab 1987 vorliegen wird.

Formelzeichen

d	m	Rohrinnendurchmesser
k	Pa s ⁿ	Konsistenzkoeffizient
k _R	mm	absolute Rohrrauigkeit
l	m	Rohrlänge
l'	m	äquivalente Rohrlänge lokaler Verluste
n	-	Fließexponent
Re	-	Reynoldszahl
t	s	Zeit
v	m/s	mittlere Strömungsgeschwindigkeit
α_T	-	Temperaturzahl
$\dot{\gamma}$	1/s	Schergeschwindigkeit
$\dot{\gamma}_N$	1/s	Newtonsche Schergeschwindigkeit
η	Pa s	Newtonsche dynamische Viskosität
η_S	Pa s	Scheinviskosität
ϑ	°C	Temperatur
λ	-	Rohrreibungszahl
ρ	kg/m ³	Dichte des Fördermediums
τ	Pa	Schubspannung
τ_0	Pa	Fließgrenze

Literatur

- / 1 / TÜRK M. Bemessung von Druckrohrleitungen zum Fördern von trockensubstanzreicher Rindergülle, Agrartechnik, Berlin (in Vorbereitung)
- / 2 / TÜRK M. Das Fließverhalten von trockensubstanzreicher Schweinegülle Agrartechnik, Berlin 36 (1986) 1, S. 31 - 33
- / 3 / TÜRK M. Fließverhalten von Hühnergülle Agrartechnik, Berlin 34 (1984) 8, S. 361 - 363

- / 4 / TÜRK, M. Druckverlustbestimmung beim Rohrtransport von trockensubstanzreicher Schweinegülle unter Berücksichtigung der Zeitabhängigkeit
Vortrag AK 3 - 1
Hydromechanisation 4, Karl-Marx-Stadt 1985
- / 5 / TÜRK, M. Temperatureinfluß auf das Fließverhalten von Gülle
Agrartechnik, Berlin (in Vorbereitung)
- / 6 / TÜRK, M. Zum Fließverhalten von Güllemischungen
Agrartechnik, Berlin (in Vorbereitung)
- / 7 / TÜRK, M.;
HÖRNIG, G.;
ECKSTADT, H. Bemessung von Gölledruckrohrleitungen (Arbeitsmaterial)
FZM 1984
- / 8 / TÜRK, M.;
ECKSTADT, H. Bemessungskatalog für Gölledruckrohrleitungen.
(Berechnungsgrundlagen und Tabellen)
Sonderdruck 1987 (in Vorbereitung)

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Jan PALARSKI

Wpłynęło do Redakcji 1987.03.10

KLASYFIKACJA GNOJÓWKI ZE STANOWISK HODOWLANYCH W CELU DOKŁADNIEJSZYCH
OBLICZEŃ SPADKU CIŚNIEŃ PODCZAS TRANSPORTU RUROCIĄGAMI

S t r e s z c z e n i e

Stanowiska hodowlane w NRD są mocno ukierunkowywane na uzyskiwanie gnojówek o dużym udziale substancji stałych. Gdy udział substancji stałych w gnojówce pochodzenia wołowego i od trzody chlewnej wzrośnie ponad 8%, w znacznym stopniu komplikuje procesy przepływu.

Analizie i systematycznym badaniom poddano istotne wielkości wpływające na procesy przepływu i transportu stężonej gnojówki pochodzenia bydłowego, od trzody chlewnej oraz drobiarskiego. W oparciu o stosowaną paszę, gątanku zwierząt i zawartości substancji suchej dokonano podziału na różne rodzaje gnojówek, dla których określano zmienne w czasie i zależne od temperatury wartości charakteryzujące proces płynięcia. W celu określenia wartości mieszalnych zastosowano wiskozymetr rotacyjny o dużej rozdzielczości. Na doświadczalnym stanowisku rurociągów (o średnicach 50, 65, 80, 100, 125, 150 i 200 mm) badano proces przepływu w zakresie laminarnym i burzliwym z uwzględnieniem sedymentacji na prostoliniowych odcinkach i elementach miejscowych.

Aktualny stan wiedzy na temat hydrauliki gnojówki zawarto w katalogu pomiarowym mieszczącym obszerne tabele spadków ciśnień, który to będzie od 1987 r. dostępny jako pomoc projektowa.

КЛАССИФИКАЦИЯ НАВОЗНОЙ ЖИЖИ С ЖИВОДНОВОДЧЕСКИХ ФЕРМ
С ЦЕЛЬЮ БОЛЕЕ ТОЧНОГО РАСЧЕТА ПЕРЕПАДА ДАВЛЕНИЙ
ПРИ ТРАНСПОРТИРОВКЕ ТРУБОПРОВОДА

Р е з ю м е

На живодноводческих фермах ГДР стараются получить навозную жижку с большим содержанием твёрдых веществ. Однако, если в навозной жижке содержится более 8% твёрдых веществ, процесс протекания усложняется.

Проанализированы и исследованы основные величины, влияющие на процессы протекания и транспорта концентрированной скотской, свиной и куриной навозной жижки. Принимая во внимание корм, породу зверей и содержание сухих веществ, навозную жижку поделили на различные виды, для которых были определены переменные во времени и зависящие от температуры величины, характеризующие процесс протекания. С целью определения смешительных величин был применён ротационный вискозиметр с большой разделительной способностью. В экспериментальном трубопроводе с диаметром 50, 65, 80, 100, 125, 150 и 200 мм был исследован процесс протекания в ламинарном и бурном диапазоне с учётом седиментации на прямых отрезках и местных элементах.

Актуальные познания в области гидравлики навозной жижки содержатся в измерительном каталоге, в котором помещены большие таблицы перепадов давления. Этот каталог с 1987 года будет доступным для проектирования.

CLASSIFICATION OF WASTE SLURRIES FROM ANIMAL PRODUCTION
PLANTS FOR AN EXACT DETERMINATION OF THE PRESSURE DROP
IN PIPELINE TRANSPORT

S u m m a r y

The relevant influence factors on the flow behaviour of concentrated livestock waste slurries have been analysed systematically. The investigations were made with liquid manure of pigs, cows and poultry. Several liquid manure groups are created in dependance of the foot, the kind of animals and the concentration. For each of this groups the rheological parameters have been estimated. The influence of time and temperature is demonstrated.

Experimental data from tubing (diameter 50, 65, 80, 100, 125, 150 and 200 mm) have also been compared with calculated results using the flow parameters of measurements with rotational viscosimeter. The pipeline transport behaviour was researched in the laminar and turbulent region under consideration of sedimentation. A limit deposit velocity is presented for the organic sediment particles. The topical knowledge to the pipeline transport of livestock waste slurries is collected in a new catalogue with extensiv calculation tables. This catalogue will be published in the GDR in 1987.

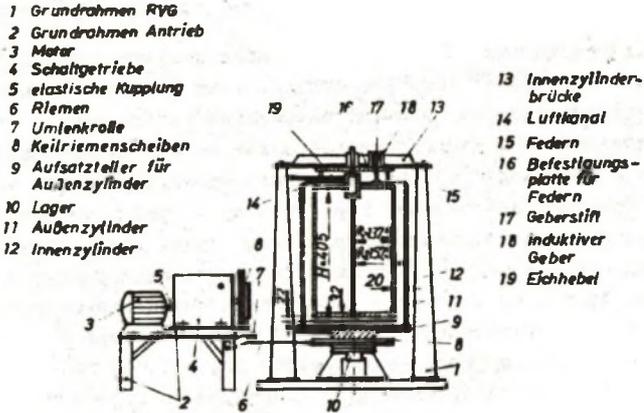


Bild 1 Rotationsviskosimeter großer Spaltweite

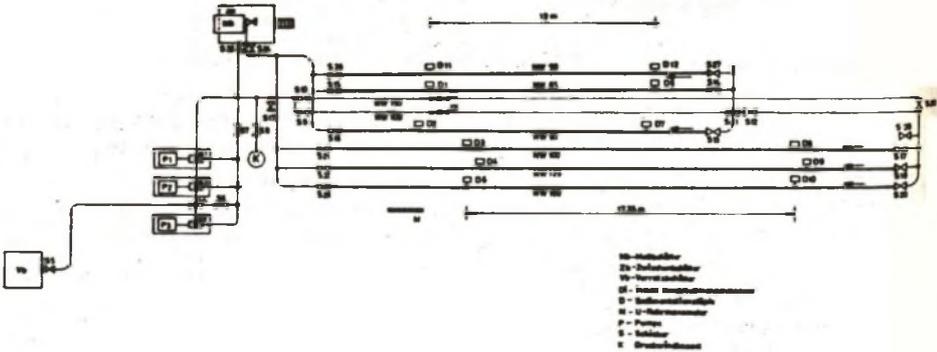


Bild 2 Rohrleitungsversuchsstand

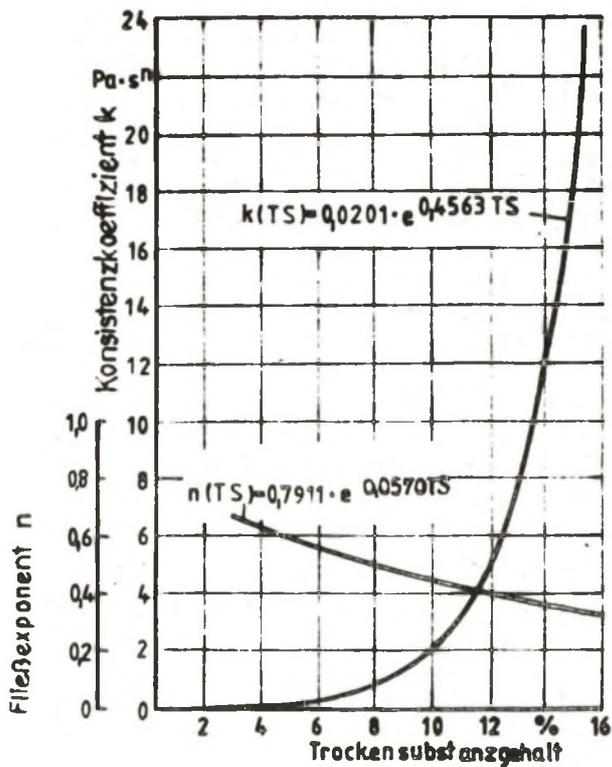


Bild 3 Abhängigkeit der Fließparameter vom Trockensubstanzgehalt

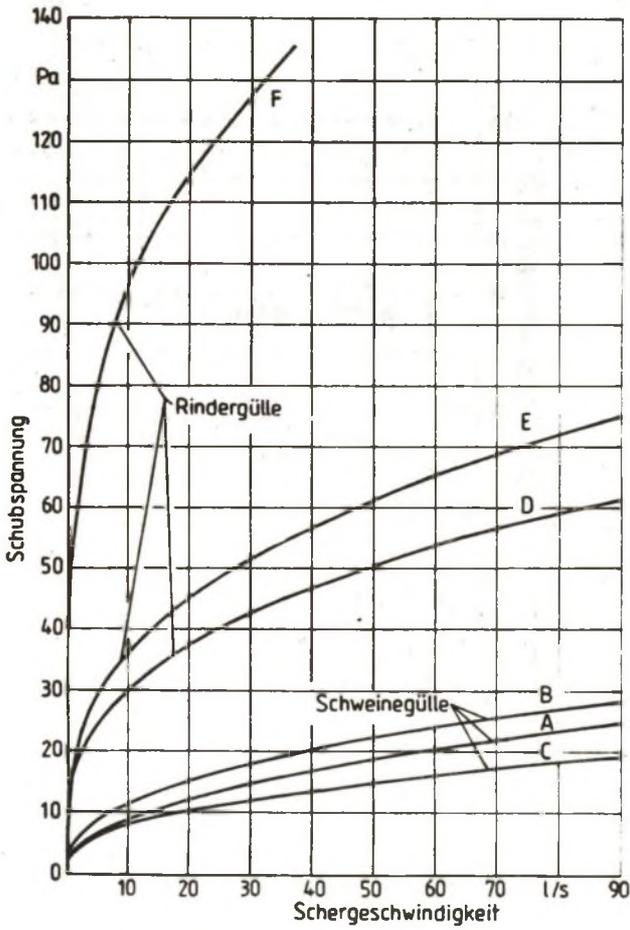


Bild 4 Einfluß der Güllegruppen auf das Fließverhalten

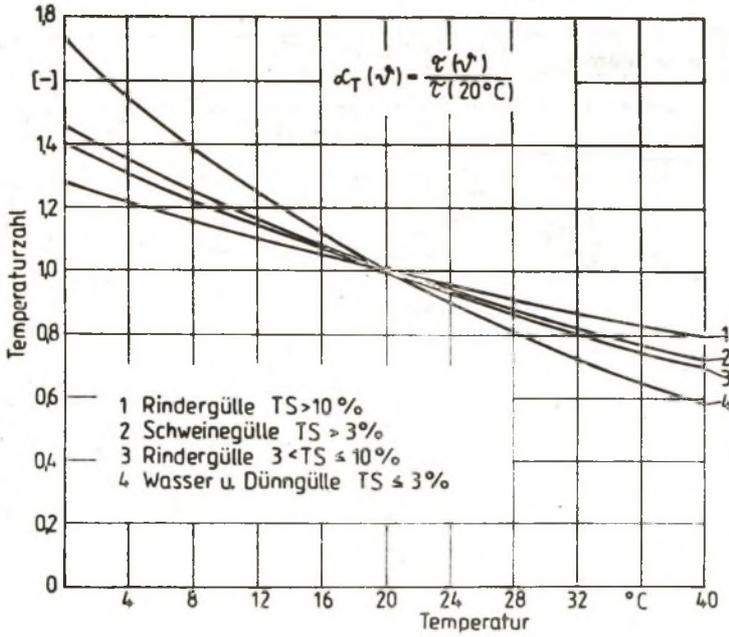


Bild 5 Temperaturzahlen von Rinder- und Schweinegülle

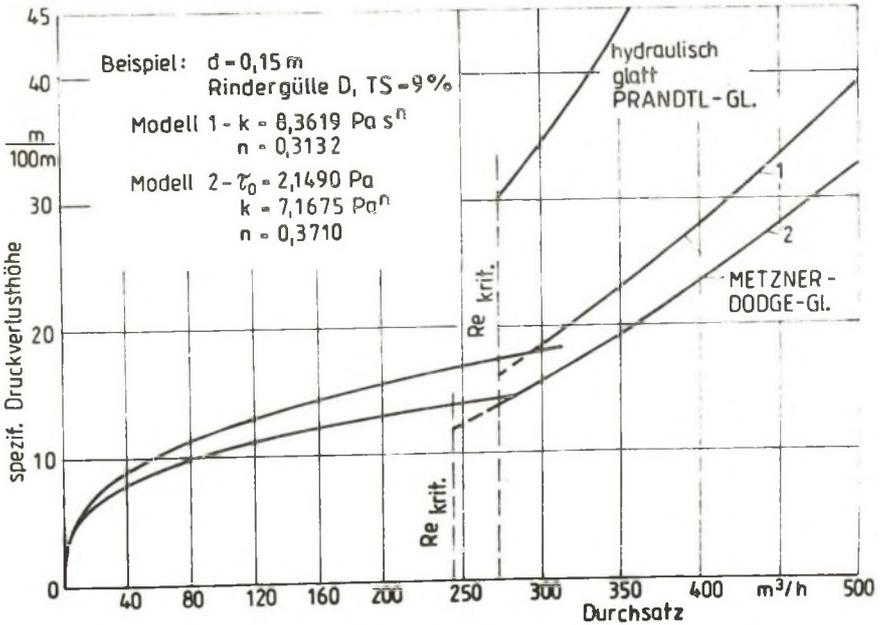


Bild 6 Rohrkenlinien bei Förderung von Rindergülle

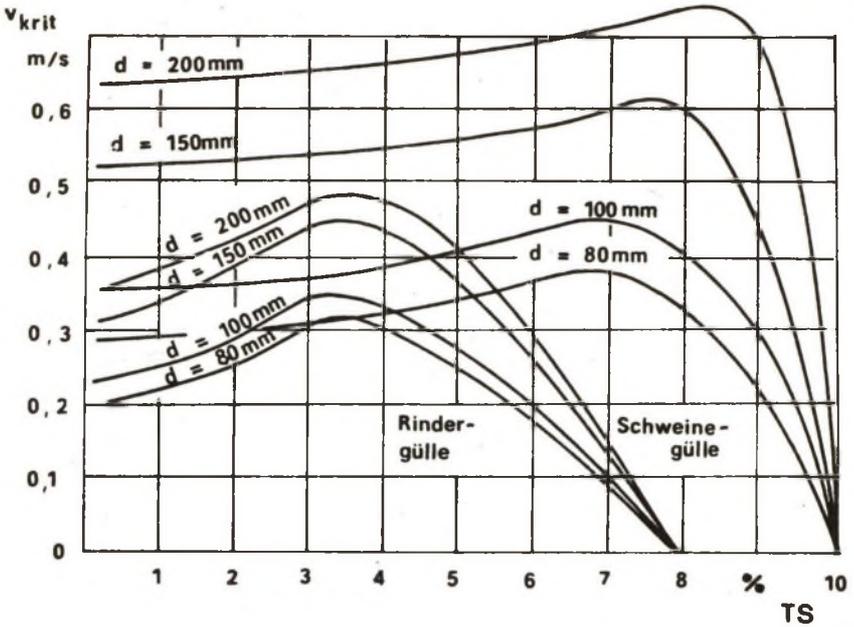


Bild 7 Kritische Ablagerungsgeschwindigkeiten bei Förderung von Rinder- und Schweinegülle

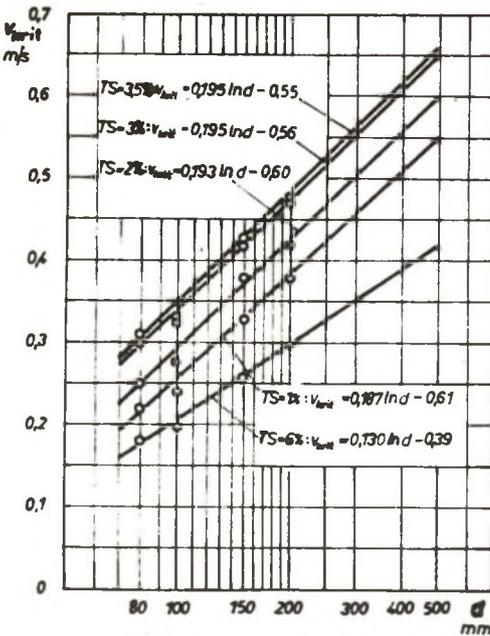
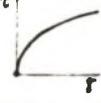
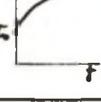


Bild 8 Extrapolation der krit. Ablagerungsgeschwindigkeiten (Rindergülle)

TS %	Fließverhalten	Fließgesetz	Scheinviskosität $\eta_s(\dot{\gamma}_N)$	Re-Zahl	Rohrreibungszahl λ	
					laminar	turbulent
$\bar{3}$	idealviskos 	NEWTON $\tau = \eta \cdot \dot{\gamma}$	$\eta_s(\dot{\gamma}_N) = \eta$			Übergangsgebiet: $\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \lg \left[\frac{251}{Re \sqrt{\lambda}} + \frac{K_R}{d} \cdot 0,2692 \right]$ Näherung $\lambda = \frac{0,25}{\left[\lg \left(\frac{K_R}{Re} + \frac{K_R}{d} \cdot 0,2692 \right) \right]^2}$
3...8	pseudoplastisch (strukturviskos) 	OSTWALD / DE WAELE $\tau = k \cdot \dot{\gamma}^n$	$\eta_s(\dot{\gamma}_N) = k \left(\frac{3n+1}{4n} \right)^n \cdot \dot{\gamma}_N^{n-1}$	$Re = \frac{v d \rho}{\eta_s(\dot{\gamma}_N)}$ $Re_{krit} = 2000 \text{ } 2300$	$\lambda = \frac{64}{Re}$	$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = \frac{2}{n^{0,75}} \lg \left[Re \left(\frac{\lambda}{4} \right)^{-\frac{n}{2}} \right] - \frac{0,1973}{n^{1,75}}$ Näherung $\lambda = \frac{a}{Re^b}$ $a = 0,3126 \cdot n \cdot 0,1107$ $b = 0,2514 \cdot n^{-0,2118}$
> 8	nichtlinearplastisch (quasiplastisch) 	HERSCHEL / BULKLEY $\tau = \tau_0 + k \dot{\gamma}^n$	$\eta_s(\dot{\gamma}_N) = \frac{\tau_0}{2\dot{\gamma}_N} + k \left(\frac{2n+1}{d} \right)^n$			

Tafel 1 Fließgesetze beim Fördern von Gällen

D. T. KIRCHENHÖLLE, KARLSRUHE

TAFEL-NR. 000000-00 BRUNNEN-NR. 101093-04
 St. 4 3008-00
 St. 424713-00

Stk. 3,00 St.

v [m/s]	Re									
	50	100	125	150	175	200	250	300	400	500
5	1,50*	,90*	,54*	,36*	,25*	,19*	,11*	,07*	,04*	,02*
10	2,01	1,21*	,73*	,48*	,34*	,25*	,15*	,10*	,05*	,03*
15	2,39	1,44	,87*	,57*	,40*	,30*	,18*	,12*	,06*	,04*
20	2,71	1,63	,98	,65*	,45*	,33*	,20*	,13*	,07*	,04*
30	4,45*	1,93	1,16	,77	,54*	,40*	,24*	,16*	,08*	,05*
40	6,73	2,73*	1,31	,87	,61*	,45*	,27*	,18*	,09*	,06*
50	9,33	3,77	1,50*	,95	,67	,50*	,30*	,20*	,10*	,06*
60	10,23	4,91	2,00	1,03	,73	,54	,38*	,21*	,11*	,07*
70	10,42	6,15	2,49	1,20*	,78	,57	,34*	,23*	,12*	,07*
80	10,07	7,49	3,02	1,43	,92	,61	,36*	,24*	,12*	,07*
90	10,56	8,93	3,58	1,70	,93*	,64	,38*	,25*	,13*	,08*
100	10,55	10,44	4,18	2,00	1,08	,67	,40	,26*	,14*	,08*
120		13,78	5,47	2,60	1,40	,80*	,43	,29*	,15*	,09*
140			6,88	3,25	1,74	1,08	,46	,30*	,16*	,10*
160			8,42	3,94	2,11	1,23	,49	,32	,17*	,10*
180				4,72	2,51	1,44	,60*	,34	,18*	,11*
200					2,93	1,70	,69	,35	,18*	,11*
250					4,08	2,36	,95	,46*	,20*	,12*
300						3,09	1,84	,59	,22	,13*
350							1,95	,74	,23	,14*
400*							1,89	,90	,26*	,15*
450								1,07	,33	,16*
500								1,25	,39	,16
550								1,44	,45	,18*
600								1,64	,50	,21*
650									,57	,23*

Tafel 3 Druckverlusttabelle

Formstück/Armatür	l' Klarwasser m	l' Gulle m	Gulleart/TS	empz. l' Wert m
Flansch-T-Stück 200/200 ND 10 TGL 14390	 1,02	1,18	S/7,70 %	1,2
	 10,38	4,75	R/8,12 %	10
Flansch-T-Stück 150/150 ND 10 TGL 14390	 1,11	0,92	R/8,43 %	1,2
	 9,46	4,2	R/8,12 %	10
Flansch-T-Stück 100/100 ND 10 TGL 14390	 1,3	0,96	R/8,43 %	1,2
	 11,6	4,5	R/8,12 %	10
Flanschbogen Q 200 ND 10		5	S/7,70 %	5
Flanschbogen Q 150 ND 10	4,06	1,96	R/8,12 %	5
Flanschbogen Q 100 ND 10	3,6	1,78	R/8,12 %	5
Rückschlagklappe NW 200 mit innenliegen- der Klappenwelle TGL 44-519.04	19,5	14,78	S/7,70 %	20
Rückschlagklappe NW 150 mit Hebelarm TGL 44-519.03				
l = 15 cm	13,51	22,94	S/7,70 %	23
l = 30 cm	21,7	34,05	S/7,70 %	34
KOS, TGL 18299				
NW 200	1,25	0,50	S/7,70 %	1,25
NW 150	0,95	0,56	S/7,70 %	
		0,43	R/8,12 %	1,0
NW 100	0,76	0,39	R/8,12 %	0,8
Keilflachschieber TGL 18298B				
NW 200	2,5	0,75	S/7,70 %	2,5
NW 150	1,6	0,53	R/8,43 %	1,6

Tafel 2