

gemeinem Interesse ist, konzentrieren sich die folgenden Ausführungen besonders auf diese Variante.

Bei den ökonomischen Untersuchungen wird davon ausgegangen, daß in Abhängigkeit vom Gülleaufkommen der einzelnen Tierproduktionsanlagen z. Z. (also ohne Güllefeldspeicher) im Verwertungsgebiet I 159 100 m<sup>3</sup> Gülle mit einer durchschnittlichen Transportentfernung von 9 km und im Verwertungsgebiet II 47 800 m<sup>3</sup> mit einer Transportentfernung von 5 km auszubringen sind. Mit der Einordnung des Güllefeldspeichers in das Verwertungsgebiet I ändern sich die Transportbedingungen wie folgt: mittlere Entfernung Stall — Feldspeicher 4 km und Feldspeicher — Schlag 5 km.

Tafel 2 enthält Informationen zum Bedarf an mobiler AusbringeKapazität ohne Güllelager-raumerweiterung. Dabei erweist sich der Zeitraum von Dezember bis März infolge der ungünstigen Verwertungsbedingungen (geringe Anzahl verfügbarer Tage, schlechte Befahrbarkeit der Felder u.a.) als bedarfsbestimmend. Um die Leistungsanforderungen zu erfüllen, sind 16 Traktoren ZT 300 mit Gülletankanhänger HTS 100.27 erforderlich. Wird das Feldspeichersystem mit einer Lagerkapazität von 25 000 m<sup>3</sup> wirksam, dann kann die in den kritischen Zeitspannen nicht effektiv verwertbare Gülle dort zwischengelagert und in Zeitspannen mit besseren Verwertungsmöglichkeiten ausgebracht werden. Im gewählten Beispiel ist das von Juni bis November möglich. Damit steigen die Leistungsanforderungen in dieser Zeit von 1 042 auf 1 269 m<sup>3</sup>/d an, was mit einer Kapazitätserhöhung von 12 auf 14 ZT 300/HTS 100.27 verbunden ist. Der zusätzliche

Bedarf von HTS 100.27 ist vergleichsweise gering, weil jetzt die Transportvorleistung in den Wintermonaten wirksam wird. Die 25 000 m<sup>3</sup> Gülle im Feldspeicher sind nur noch durchschnittlich 5 km zu transportieren, während die Entfernung Stall — Schlag 9 km beträgt.

Andererseits ist es jetzt möglich, von Dezember bis April die gesamten Arbeitstage für die Gülleabfuhr zum Feld bzw. Feldspeicher zu nutzen. Dadurch vermindern sich die Anforderungen an die Leistung von 1 328 auf 700 m<sup>3</sup>/d und die Kapazitätsansprüche in dieser Zeit von 16 auf 9 HTS 100.27. Gleichzeitig wird die Transportentfernung für mindestens 25 000 m<sup>3</sup> Gülle von 9 auf 5 km reduziert, und die Transportleistung erhöht sich von 6 auf 8,5 m<sup>3</sup>/h (T<sub>08</sub>). Dieser Effekt ist aber nur zeitspannenspezifisch, er ermöglicht die bessere betriebswirtschaftliche und technologische Beherrschung der Gülle, ist jedoch nicht in jedem Fall mit tatsächlichen Einsparungen von Arbeitskräften und Fahrzeugkapazität verbunden. Ursache ist die auch beim gebrochenen Gülletransport durch Einordnung von Güllefeldspeichern unveränderte Gesamttransportentfernung Stall — Feld.

In Tafel 3 sind die ökonomischen Auswirkungen der Güllefeldspeichereinordnung in das gewählte Modellbeispiel dargestellt. Hier ist die Erhöhung der Kapazitätsansprüche im Zeitraum von Juni bis November durch die Veränderung des Zeitregimes der Gülleausbringung kleiner als der Mehrbedarf an Gülletankanhängern HTS 100.27 in der kritischen Zeitspanne vor dem Feldspeicherbau. Insgesamt gelingt es dadurch, 2 HTS 100.27 einzusparen und die Ausnutzung je ZT 300/

HTS 100.27 von 1959 auf 2 306 h/a zu verbessern. Das ist mit einer absoluten Verminderung des Investitionsmittelbedarfs und der Verfahrenskosten für die mobile Ausbringung um 48 000 bzw. 31 000 M verbunden. Infolge der Erweiterung der Lagerkapazität übersteigen jedoch die Gesamtkosten die der Vergleichsvariante um 93 000 M. Wichtig ist, daß der Arbeitszeitbedarf praktisch unverändert bleibt. Demzufolge gleichen die durch den gebrochenen Gülletransport erzielten Einsparungen durch Leistungserhöhungen die Mehraufwendungen, bedingt durch das Bewirtschaften der Zusatzspeicher, annähernd aus. Haupteffekte sind jedoch die durch die Schaffung der Feldlagerkapazität erzielte Verbesserung der Güllerverwertung sowie der effektivere Einsatz der in der Gülle enthaltenen Nährstoffe und organischen Substanz. Das gegenwärtige Verwertungs-niveau von 55 bis 60% [3] rechtfertigt in jedem Fall die vorgeschlagenen Investitionen.

## Literatur

- [1] Konzeption für die Erweiterung des Güllelager-raumes ab 1981. Ministerium für Land-, Forst- und Nahrungsgüterwirtschaft, Berlin, Dezember 1980.
- [2] Mittag, G.: Aus dem Bericht des Politbüros an die 13. Tagung des ZK der SED. Neues Deutschland vom 12. Dezember 1980.
- [3] Wissing, P.: Produktionsorganisatorische und technologische Maßnahmen zur Erhöhung der Effektivität der organischen Düngung. Kooperation 15 (1981) H. 1, S. 12—15.
- [4] Zimmermann, K.-H.: Ökonomische Richtwerte für die Güllewirtschaft unter den Bedingungen der industriemäßigen Tier- und Pflanzenproduktion. AdL der DDR, Dissertation 1976.

A 3076

# Berechnung der Druckverluste beim Fördern von Rinder- und Schweinegülle in Gülledruckrohrleitungen

Dr. sc. techn. G. Hörnig, KDT, Forschungszentrum für Mechanisierung der Landwirtschaft Schlieben/Bornim der AdL der DDR

## Verwendete Formelzeichen

A	—	modifizierte Hedströmzahl
d	m	Rohrdurchmesser
g	m/s <sup>2</sup>	Erdbeschleunigung
h <sub>geod.</sub>	m	geodätische Förderhöhe
k	Pa · s <sup>n</sup>	Konsistenzfaktor
l	m	Rohrlänge
n	—	Fließindex
p	Pa	Förderdruck
Δp	Pa	Druckverlust
r	—	Korrelationskoeffizient
Re	—	Reynoldszahl
Re <sub>n</sub>	—	verallgemeinerte Reynoldszahl
Re <sub>n,kr</sub>	—	kritische verallgemeinerte Reynoldszahl
TS	%	Trockensubstanzgehalt
v	m/s	Fließgeschwindigkeit
v <sub>min</sub>	m/s	Mindestfließgeschwindigkeit
V	m <sup>3</sup> /h, m <sup>3</sup> /s	Volumenstrom
γ	1/s	Schergradient
η <sub>s</sub>	Pa · s	dynamische Scheinviskosität
λ	—	Widerstandszahl (Rohrreibungszahl)
ρ	kg/m <sup>3</sup>	Dichte
τ <sub>0</sub>	Pa	Fließgrenze
τ	Pa	Scherspannung

## 1. Problemstellung

Zum Transport der Gülle innerhalb der Stall- und Güllelagerkomplexe verwendet man ausschließlich Pumpen- und Rohrleitungssysteme, während der Transport zur Verwertung auf den landwirtschaftlichen Nutzflächen über Rohrleitungen oder Fahrzeuge realisiert wird. Das Fördern der Gülle mit Pumpen in Druckrohren erfordert die Kenntnis der zutreffenden hydro-mechanischen Gesetzmäßigkeiten in Abhängigkeit von natürlichen und technischen Parametern. Gesucht ist der Wert der Wirkpaarungskenngröße „Druckverlust Δp“, die mit Stoffkenngrößen, Betriebs- und Konstruktionsparametern in funktionellem Zusammenhang steht.

Das besondere Verformungsverhalten der Gülle durch unterschiedliche Belastung während des Förderns spielt dabei eine wesentliche Rolle. Diesem Sachverhalt trägt das im Jahr 1971 veröffentlichte Bemessungsverfahren Rechnung, das als Druckverlusttabelle [1, 2] in den Standard TGL 6466/03 [3] eingegangen ist. Für die weitere Anwendung spricht der aus-

reichende Grad der Übereinstimmung der berechneten Werte mit den in der Praxis auftretenden Druckverlusten [4].

Die Druckverlusttabelle ist entsprechend ihrer Auflage nur in begrenztem Umfang in den Projektierungseinrichtungen der DDR verfügbar. Häufige Anfragen von Projektanten zum Inhalt und zur Anwendung des Tabellenwerks sind Veranlassung, das zugrunde liegende mathematische Modell zur Berechnung von Δp, den Vorrat der Fließkennwerte und Hinweise zur Anwendung der kritischen Reynoldszahl Re<sub>n,kr</sub> näher zu erläutern. Auswirkungen der Anwendung der SI-Einheiten werden dabei berücksichtigt. Der Projektant von Gülledruckrohrleitungen soll damit in die Lage versetzt werden, die Druckverluste selbst zu berechnen.

## 2. Berechnung der Druckverluste

Für bestimmte TS-Bereiche der Gülle sind verschiedene Fließfunktionen relevant. Gülle mit einem Trockensubstanzgehalt ab TS ≈ 3% zeigt pseudoplastisches Fließverhalten [5, 6, 7]. Die Fließkurve wird im praktischen Förderbe-

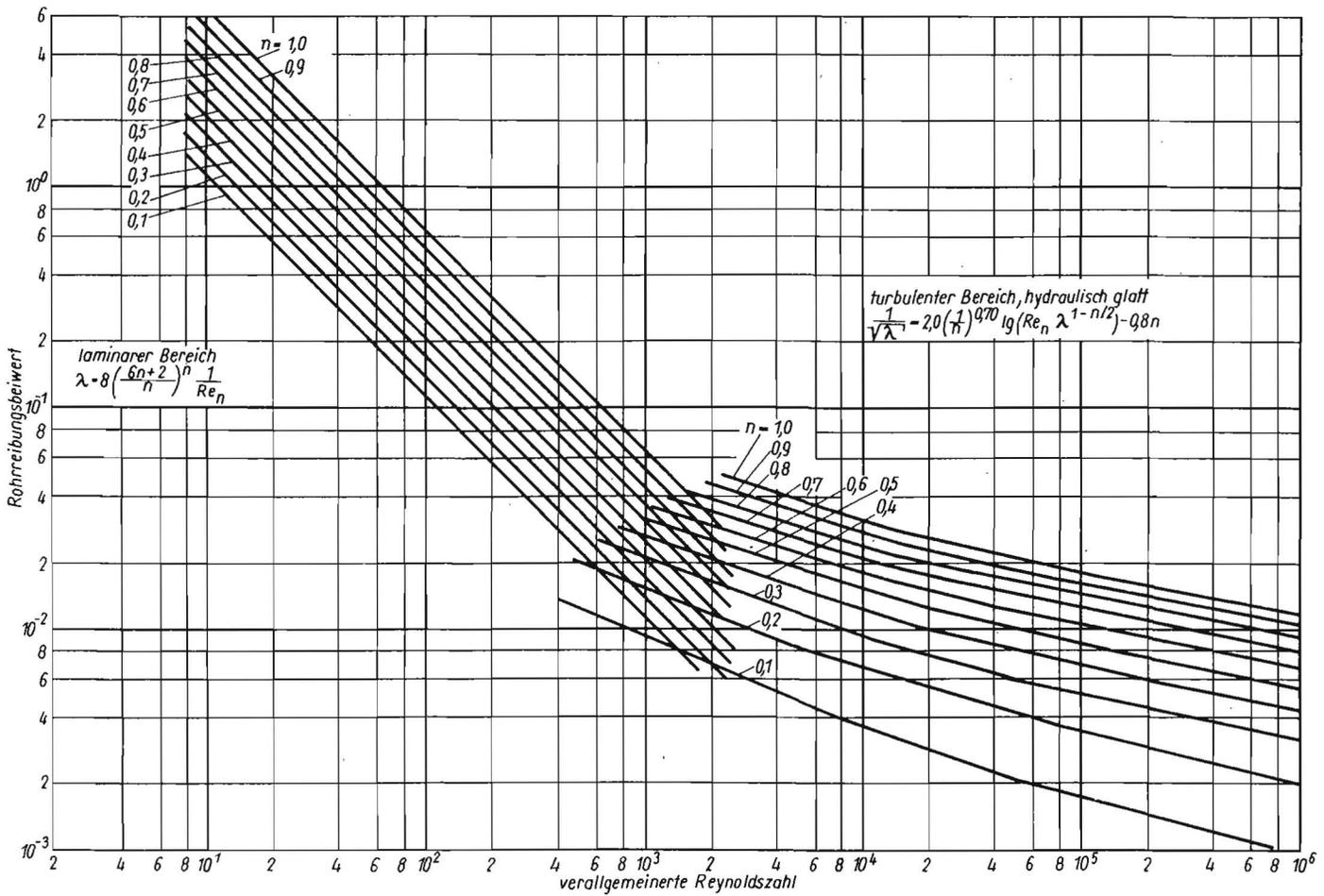


Bild 1. Widerstandsgesetz  $\lambda = f(Re_n, n)$  für laminare und turbulente Strömung pseudoplastischer Flüssigkeiten

reich durch den Potenzansatz von Ostwald und de Waele approximiert:

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

Fließgrößen sind der Konsistenzfaktor (Steifigkeit)  $k$  und der Fließindex (Strukturziffer)  $n$ . Gülle mit  $TS > 6...7\%$  weist eine Fließgrenze  $\tau_0$  auf. Die Fließkurve läßt sich mathematisch mit dem Herschel-Bulkley-Ansatz beschreiben [5, 8, 9]:

$$\tau = \tau_0 + k \dot{\gamma}^n \quad (2)$$

Es liegt *nichtlinearplastisches* Verhalten vor, und bei der Aufstellung des Widerstandsgesetzes müssen drei Stoffparameter, nämlich  $\tau_0$ ,  $k$  und  $n$ , berücksichtigt werden. Von Eckstädt [8] wurde für die laminare Rohrströmung ein Widerstandsgesetz

$$\lambda = f(Re_n, n, A); \quad (3)$$

$$A = \frac{\tau_0}{v^2 \rho} \quad (4)$$

erarbeitet, das aber infolge eines zu geringen Vorrats an relevanten Stoffkennwerten bisher nicht in die Projektierungspraxis überführt werden konnte.

Das Berechnungsverfahren für das Druckverlusttabellenwerk [1, 2] stützt sich im Bereich  $3\% \leq TS \leq 17\%$  auf den Ostwald-de Waele-Ansatz. Das bedeutet, daß auch bei  $TS > 7\%$  die Fließgrenze  $\tau_0$  nicht berücksichtigt wird. Die vereinfachende Annahme  $\tau_0 = 0$  führt im praktikablen Förderstrombereich zu Berechnungsfehlern von  $\pm 5\%$  [10]. Das zeigt, daß man den  $\tau_0$ -Einfluß zwar noch exakt nachweisen muß, aber nicht pauschal überbewerten darf.

Das Widerstandsgesetz der *laminaren* Rohrströmung lautet für pseudoplastische Flüssigkeiten [11]:

$$\lambda = 8 \left( \frac{6n+2}{n} \right)^n \frac{1}{Re_n} \quad (5)$$

Seine Gültigkeit wurde für Gülle durch Förderversuche nachgewiesen [5, 7]. Die Größe  $Re_n$  wird als verallgemeinerte Reynoldszahl bezeichnet. Sie errechnet sich aus

$$Re_n = \frac{v^{2-n} d^n \rho}{k} \quad (6)$$

Bei entsprechend hohen Geschwindigkeiten bzw. bei kleinem Konsistenzfaktor fließt pseudoplastische Gülle auch *turbulent*. Die Anwendbarkeit des folgenden Widerstandsgesetzes für den turbulenten, hydraulisch glatten Bereich wurde ebenfalls für Gülle experimentell bewiesen [5, 7]:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2,0 \left( \frac{1}{n} \right)^{0,70} \lg(Re_n \lambda^{1-n/2}) - 0,8n \quad (7)$$

Die Ermittlung der Widerstandszahl  $\lambda$  wird durch die grafische Darstellung der Widerstandsgesetze  $\lambda = f(Re_n, n)$  erleichtert (Bild 1).

Der Druckverlust in einer horizontalen Rohrleitung errechnet sich aus

$$\Delta p = \lambda \frac{\rho v^2}{2} \frac{l}{d} \quad (8)$$

Unter Berücksichtigung der geodätischen und der Geschwindigkeitsdruckhöhe ergibt sich der

von der Förderpumpe aufzubringende Gesamtdruck:

$$p = \rho g \left[ \frac{v^2}{2g} \left( 1 + \lambda \frac{l}{d} \right) + h_{\text{geod.}} \right] \quad (9)$$

Das positive Vorzeichen gilt für das Fördern von einem niedrigeren zu einem höheren geodätischen Niveau.

Für den Gültigkeitsbereich der Widerstandsgesetze nach Gln. (5) und (7) ist die Grenze zwischen laminarem und turbulentem Fließen von grundlegender Bedeutung. Sie liegt für idealviskose Medien bei  $Re_{n,kr} = 2320$ . Bei nicht-Newtonschen, also auch bei pseudoplastischen Flüssigkeiten treten abweichende Werte auf.

Im Druckverlusttabellenwerk [1] wurde — dem damaligen Erkenntnisstand entsprechend — ein Bereich  $2320 \leq Re_{n,kr} \leq 5000$  empfohlen.

Neuere Arbeiten führten zur mathematischen Formulierung kritischer Reynoldszahlen unter Einbeziehung relevanter Stoffkenngrößen. Sie tragen vorwiegend hypothetischen Charakter.

Die exakte Angabe der stoffbezogenen kritischen Reynoldszahl erfordert weitere klärende Untersuchungen theoretischer und experimenteller Art. Vorerst sollte bei der Bemessung von Gölledruckrohrleitungen zur Abgrenzung des Gültigkeitsbereichs der Gln. (5) und (7) folgende Beziehung angenommen werden [10]:

$$Re_{n,kr} = 2300 \frac{\left( \frac{6n+2}{n} \right)^n}{8} \quad (10)$$

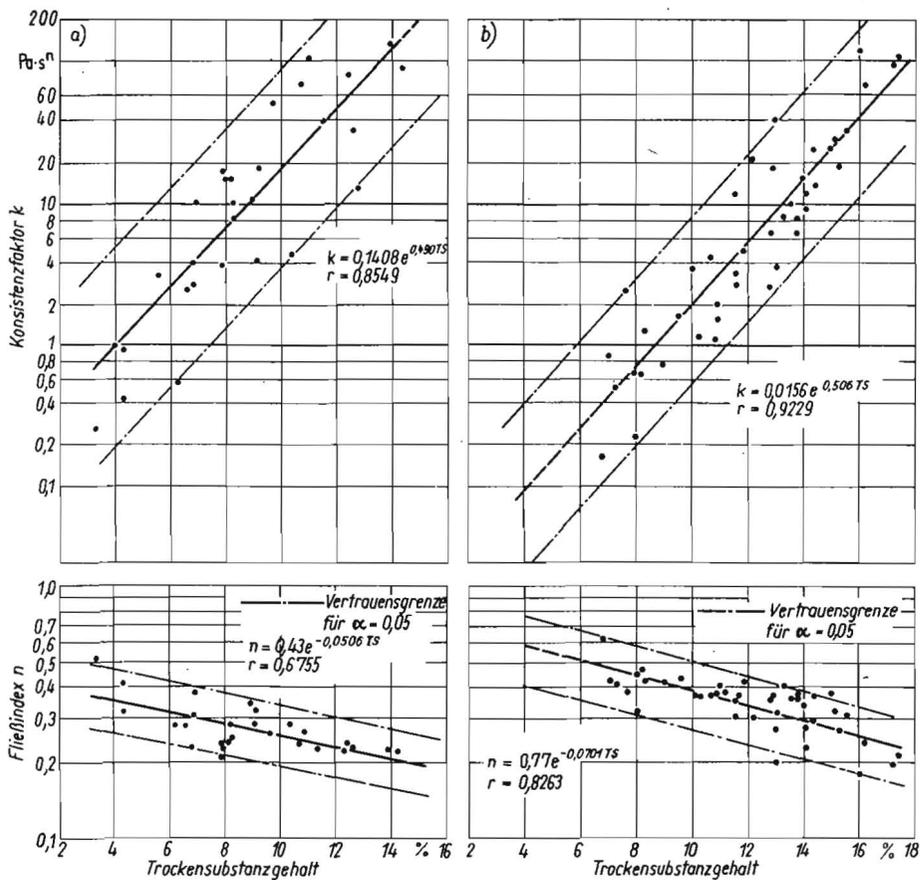


Bild 2. Fließkennwerte  $k$  und  $n$  als Funktion des Trockensubstanzgehalts  
a) Rindergülle; b) Schweinegülle

### 3. Stoffkenngrößen und -werte

Der Druckverlust  $\Delta p$  hängt von den Stoffkenngrößen Dichte  $\rho$ , Konsistenzfaktor  $k$  und Fließindex  $n$  ab [s. Gln. (5) bis (9)], die wiederum trockensubstanzabhängig sind. Die Dichte von Gülle liegt infolge des hohen Wassergehalts von Kot und Harn in einem engen Bereich um  $1000 \text{ kg/m}^3$ . Geringere Werte beziehen sich auf Schwimmschichten mit hohem organischen Anteil oder Gaseinschlüssen. Gülle mit  $\rho > 1000 \text{ kg/m}^3$  enthält mehr mineralische Stoffe, wie sie in Sinkschichten auftreten. Für die Druckverlustberechnung empfiehlt sich, einen Wert von  $\rho = 1025 \text{ kg/m}^3$  zugrunde zu legen.

Zur Bestimmung der Werte von  $k$  und  $n$  sur-

den aus einer Vielzahl von Tierproduktionsanlagen rd. 180 Gülleproben entnommen und viskosimetrisch untersucht. Die Einflüsse verschiedener Tierarten und Produktionsstufen sowie der Verfahren der Fütterung, Reinigung und Gülleabfuhrung sind in den Ergebnissen enthalten. Um die Projektierung von Druckrohrleitungen möglichst rationell zu gestalten, wurden die korrelativen Beziehungen zwischen den Kenngrößen  $k$  und  $n$  einerseits und dem TS-Gehalt andererseits ermittelt. Zur Auftragung der  $k$ - und  $n$ -Werte über dem TS-Gehalt wurde eine halblogarithmische Darstellung gewählt, bei der sich die Meßpunkte zu einer Geradengleichung verrechnen lassen (Bild 2). Die für eine Irrtumswahrscheinlichkeit von 5%

Tafel 1. Fließkennwerte  $k$  und  $n$  von Rinder- und Schweinegülle

TS-Gehalt %	Rindergülle		Schweinegülle	
	$k$ Pa · s <sup>n</sup>	$n$	$k$ Pa · s <sup>n</sup>	$n$
3	0,612	0,369	0,071	0,624
4	0,998	0,350	0,117	0,582
5	1,631	0,333	0,195	0,542
6	2,663	0,317	0,324	0,505
7	4,347	0,301	0,538	0,471
8	7,096	0,286	0,893	0,439
9	11,580	0,272	1,482	0,409
10	18,910	0,259	2,458	0,382
11	30,860	0,246	4,077	0,356
12	50,380	0,234	6,763	0,332
13	82,830	0,222	11,220	0,309
14	134,200	0,212	18,610	0,288
15	219,100	0,201	30,860	0,269
16			51,190	0,251
17			84,900	0,234

errechneten Vertrauensgrenzen geben an, daß außerhalb des gekennzeichneten Bereichs Werte von  $k$  und  $n$  nur mit einer Wahrscheinlichkeit von 5% auftreten. Es ist nicht zweckmäßig, sich bei der Berechnung der Druckverluste auf die Extremwerte zu stützen, die auf der unteren oder oberen Vertrauensgrenze liegen, sondern auf die zu erwartenden Durchschnittswerte, die durch die errechneten Geradenfunktionen repräsentiert werden.

Der Korrelationskoeffizient  $r$  sagt aus, daß mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von nur 0,1% ein Zusammenhang zwischen dem TS-Gehalt und den Fließkennwerten  $k$  und  $n$  besteht. Die von Podstavek [6] durchgeführten Untersuchungen und Auswertungen zum korrelativen Zusammenhang zwischen dem TS-Gehalt sowie  $k$  und  $n$  bestätigten bei bemerkenswerter Übereinstimmung qualitativ und quantitativ die o. g. Abhängigkeiten. Zur Erleichterung der Bemessung sind die Kennwerte von  $k$  und  $n$  für abgestufte TS-Werte tabellarisch zusammengestellt worden (Tafel 1). Ein Problem besteht in der Vorauswahl des TS-Wertes für die zu projektierende Anlage. Irrt man sich bei dieser Festlegung um  $\pm 1\%$  — wählt man z. B. statt TS = 9% Werte von 8% oder 10% — so beträgt der Druckverlust, bezogen auf das Beispiel nach Abschn. 5., 64% bzw. 156%. Der TS-Gehalt des Kot-Harn-Gemenges liegt für Rinder bei  $TS = 11,6 \pm 1,4\%$  und für Schweine bei  $TS = 10,5 \pm 1,6\%$ . Der TS-Bereich der Gülle bewegt sich durch technologisch, aber oft auch subjektiv bedingte Wasserzusätze in weiten Grenzen: TS = 1,2...13,0% (Rinder), TS = 0,3...9,0% (Schweine) [12].

Eine Orientierung geben die „Normative für Gülleanfall und Richtwerte für Gülleinhaltsstoffe“ [13]. Sie wurden aus den Ergebnissen umfangreicher Untersuchungen in Tierproduktions- und Versuchsanlagen abgeleitet und stellen die gegenwärtig in der Produktion zu realisierenden Parameter dar. Da die Normative in umfangreichen Tabellen zusammengefaßt sind, muß der Anwender auf diese Literatur verwiesen werden.

Unter bestimmten Bedingungen — es zeigt sich z. B. durch Veränderung der Futterationen oder des Wasserzusatzes ein besonderes Fließverhalten der Gülle — besteht die Notwendigkeit, Gülleproben viskosimetrisch zu untersuchen. In verschiedenen Forschungseinrichtungen, so z. B. im FZM Schlieber/Bornim und an der Wilhelm-Pieck-Universität Rostock, sind geeignete Viskosimeter vorhanden. Türk [14] hat für die laminare Strömung ein rationelles nomografisches Bestimmungsverfahren für den spezifischen Druckverlust  $\Delta p/l$  unter direkter Nutzung der Fließkurven entwickelt. Er stützt sich dabei auf eine Druckverlustbeziehung, in der eine dem jeweiligen Fließverhalten definierte Scheinviskosität  $\eta_s$  eingesetzt wird. Die spezielle Druckverlust-Volumenstrom-Abhängigkeit liegt dem Nomogramm zugrunde. Wenn die Fließkennwerte bekannt sind (Tafel 1), können die Fließkurven auf einfache Weise konstruiert und so weiter für die nomografische Druckverlustbestimmung verwendet werden. Die Fehler zwischen analytisch und nomografisch ermittelten  $\Delta p$ -Werten liegen unter 2%.

### 4. Kritische Fließgeschwindigkeiten

Betriebs- und Konstruktionsparameter der Güledruckrohrleitung sind so aufeinander abzustimmen, daß Funktionsstörungen durch Ablagerungen ausgeschlossen werden. Sedimentationserscheinungen treten bei geringer Feststoffkonzentration und niedriger Fließ-

geschwindigkeit auf. In Abhängigkeit vom TS-Gehalt der Rinder- und Schweinegülle sind die Förderströme und Rohrdurchmesser so zu wählen, daß bestimmte Mindestfließgeschwindigkeiten nicht unterschritten werden. Eckstädt hat dieses Problem systematisch untersucht und als Ergebnis Mindestfließgeschwindigkeiten  $v_{\min} = f(\text{TS}, d)$  empfohlen [7] (Tafel 2).

### 5. Berechnungsbeispiel

Es wird der Druckverlust nach dem Beispiel aus dem Tabellenwerk [1] analytisch berechnet.

Gegeben: Rindergülle mit  $\text{TS} = 9\%$ ,  
 $\rho = 1025 \text{ kg/m}^3$ ,  
 horizontale Rohrleitung,  
 Rohrdurchmesser  $d = 200 \text{ mm}$ ,  
 Rohrlänge  $l = 600 \text{ m}$ ,  
 Volumenstrom  $\dot{V} = 100 \text{ m}^3/\text{h}$ .

Gesucht: Druckverlust  $\Delta p$ .

— Berechnen der Fließgeschwindigkeit:

$$v = \frac{4 \dot{V}}{\pi d^2} = 0,884 \text{ m/s}$$

(Vergleich  $v$  und  $v_{\min}$  nach Tafel 2:  $0,884 \text{ m/s} > 0,30 \text{ m/s}$ ).

— Berechnen der verallgemeinerten Reynoldszahl nach Gl. (6) mit  $k = 11,58 \text{ Pa} \cdot \text{s}^n$  und  $n = 0,272$  nach Tafel 1:

$\text{Re}_n = 46,17 < \text{Re}_{n,kr} = 582$  nach Gl. (10) (laminare Strömung).

— Berechnen der Widerstandszahl  $\lambda$  nach Gl. (5):

$$\lambda = 0,351.$$

— Berechnen des Druckverlustes nach Gl. (8):

$$\Delta p = 421\,722 \text{ Pa} = 4,217 \text{ bar}.$$

Steht beispielsweise eine Güllepumpe mit einem Nennförderdruck von nur 3,0 bar (300 000 Pa) zur Verfügung, muß berechnet werden, welche Rohrenweite erforderlich ist. Zu diesem Zweck werden die Gln. (8), (5) und (6) verknüpft und nach  $d$  umgestellt:

$$d = \left[ \frac{4^{1+n}}{\pi^n} \left( \frac{6n+2}{n} \right)^n \frac{k l \dot{V}^n}{\Delta p} \right]^{\frac{1}{3n+1}} \quad (11)$$

Werden die entsprechenden Werte eingesetzt, ergibt sich der Durchmesser  $d = 0,241 \text{ m}$ ; es ist eine Rohrenweite von 250 mm vorzusehen.

Tafel 2. Mindestfließgeschwindigkeiten  $v_{\min}$  für das Fördern von Gülle in Druckrohrleitungen [7]

d mm	$v_{\min}$ in m/s		
	Schweinegülle TS $\leq 10\%$	Rindergülle TS $\leq 6\%$	6% < TS < 8%
80	0,38	0,32	0,18
100	0,45	0,36	0,20
125	0,55	0,40	0,23
150	0,60	0,45	0,26
175	0,65	0,48	0,28
200	0,75	0,50	0,30
250	0,80	0,55	0,33
300	0,90	0,58	0,35
400	1,00	0,65	0,40
500	1,10	0,70	0,45

In Erweiterung des Beispiels aus [1] wird der Druckverlust für turbulente Strömung berechnet.

Gegeben: Schweinegülle mit  $\text{TS} = 6\%$ ,

$$\rho = 1025 \text{ kg/m}^3,$$

$$d = 200 \text{ mm}, l = 600 \text{ m}, \dot{V} = 100 \text{ m}^3/\text{h}.$$

Gesucht:  $\Delta p$ .

—  $v = 0,884 \text{ m/s} > 0,45 \text{ m/s}$  (s. Tafel 2).

— Berechnen von  $\text{Re}_n$  nach Gl. (6) mit  $k = 0,324 \text{ Pa} \cdot \text{s}^n$  und  $n = 0,505$  (s. Tafel 1):  
 $\text{Re}_n = 1167,2 > 918$  nach Gl. (10) (turbulente Strömung).

— Bestimmung von  $\lambda$  aus Bild 1:

$$\lambda = 0,030.$$

— Berechnen von  $\Delta p$  nach Gl. (8):

$$\Delta p = 36\,045 \text{ Pa} = 0,36 \text{ bar}.$$

### 6. Zusammenfassung

Projektanten von Güledruckrohrleitungen stützen sich bei der Druckverlustberechnung meistens auf die Druckverlusttabelle, die im Jahr 1971 vom Institut für Mechanisierung Potsdam-Bornim herausgegeben und später im Standard TGL 6466 als verbindliche Bemessungsgrundlage für Gülle mit  $\text{TS} \geq 3\%$  erklärt worden ist. Da dieses Projektierungshilfsmittel vergriffen ist, werden das Berechnungsverfahren für den Druckverlust  $\Delta p$  näher erläutert und ergänzt sowie der benötigte Vorrat der das Fließverhalten beschreibenden Kennwerte wiedergegeben. So ist es dem Projektanten möglich, den Druckverlust  $\Delta p$  zu berechnen. Die grafische Darstellung der Abhängigkeit zwischen Widerstandszahl und Reynoldszahl erleichtert dabei die Berechnung. Neuere Er-

gebnisse zu den kritischen Fließgeschwindigkeiten werden mitgeteilt und ermöglichen die qualifizierte Abstimmung der Parameter Durchsatz und Rohrdurchmesser.

### Literatur

- [1] Hörnig, G.: Druckverlusttabelle für das Fördern von Rinder- und Schweinegülle in Druckrohrleitungen. IFM Potsdam-Bornim, Institutsbericht Nr. 24, 1971.
- [2] Hörnig, G.: Ergänzung zum Tabellenwerk für den niedrigen Durchsatzbereich beim Fördern von Rinder- und Schweinegülle in Druckrohrleitungen. agrartechnik 25 (1975) H. 2, S. 92—93.
- [3] TGL 6466/03 Meliorationen; Bewässerung landwirtschaftlicher Nutzflächen; Grundsätze für die Projektierung von Beregnungsanlagen. Ausg. 3.80.
- [4] Holjewilken, H.; Böttcher, W.; Müller, T.: Gülepipelines und ihre Anlagen und Ausrüstungen. Melioration und Landwirtschaftsbau (1979) H. 7, S. 325—327.
- [5] Hörnig, G.: Beitrag zur Bemessung von Beregnungsrohrleitungen beim Klärschlamm- und Gülletransport. TU Dresden, Dissertation 1969.
- [6] Podstavek, B.: Průdenie hnojovice v potrubí (Strömung von Gülle in Rohren). Zemědělská technika, Praha 22 (1976) H. 7, S. 379—396.
- [7] Eckstädt, H.: Beitrag zur Bemessung von Rohrleitungen für die Förderung von Gülle unter Berücksichtigung der Sedimentation. Wilhelm-Pieck-Universität Rostock, Dissertation 1978.
- [8] Eckstädt, H.: Druckverluste bei laminarer Rohrströmung quasisplastischer Flüssigkeiten. Wasserwirtschaft-Wassertechnik 25 (1975) H. 6, S. 194—195, 209.
- [9] Boese, E.: Untersuchungen zur Beschreibung des thixotropen Verhaltens der Gülle... Wilhelm-Pieck-Universität Rostock, Dissertation 1976.
- [10] Türk, M.: Bemessungsgrundlagen für das Fördern von Gülle und flüssigen Gülleaufbereitungsprodukten in Rohrleitungen. FZM Schlieben/Bornim, Forschungsbericht 1979 (unveröffentlicht).
- [11] Annen, G.: Rohrströmung von Klärschlamm. TH Karlsruhe, Dissertation 1961.
- [12] Hörnig, G.: Bemessen gülleabführender Systeme in Ställen. Humboldt-Universität Berlin, Dissertation B 1981.
- [13] Autorenkollektiv: Normative für Gülleanfall und Richtwerte für Gülleinhaltsstoffe. Markkleeberg: agrabuch 1979.
- [14] Türk, M.: Nomogramm zur Ermittlung von Druckverlusten bei laminarer Rohrströmung nicht-Newtonscher Flüssigkeiten. agrartechnik 28 (1978) H. 4, S. 168—171. A 3167

## Untersuchungen zum Einfluß der Lagerdauer auf das Fließverhalten einer Schweinegülle mit hohem Trockensubstanzgehalt

Dipl.-Ing. H. U. Hesse, Datenverarbeitungszentrum Schwerin

Prof. Dr.-Ing. habil. H. G. Hummel, Wilhelm-Pieck-Universität Rostock, Sektion Meliorationswesen und Pflanzenproduktion

### 1. Aufgabenstellung

Anknüpfend an die von den Verfassern in [1, 2, 3] mitgeteilten Ergebnisse der Beeinflussung wichtiger physikalischer Parameter einer Schweinegülle mit hohem Trockensubstanzgehalt durch Temperatur und Lagerdauer, soll in der vorliegenden Arbeit über den Einfluß der Lagerdauer auf das Fließverhalten dieser Gülle

berichtet werden. Da die vorwiegend aus organischen Stoffen bestehende Gülle während der Lagerung in den Vorratsbehältern infolge anaerob-biologischer und chemischer Zersetzungs Vorgänge bestimmten Veränderungen unterliegt, ist die Kenntnis dieser Veränderungen für die ständige Verbesserung der Verfahren der Güllewirtschaft von grundsätzlichem Interesse.

### 2. Meßeinrichtung und Versuchsmethodik

Die ausführliche Beschreibung der Meßeinrichtung und Versuchsmethodik ist in [4] enthalten. Es wurden rd. 1001 geimpfte Schweinegülle in einem Plastefaß im geschlossenen Raum gelagert und über einen Zeitraum von 121 Tagen mit dem Rotationsviskosimeter kleiner Spaltenweite vom Typ „Rheotest 2“ viskosimetrisch untersucht. Die Lufttempera-