

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 Δp .

— 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:

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

— Berechnen der Widerstandszahl λ 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: Δp .

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

— Berechnen von 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 λ aus Bild 1:

$$\lambda = 0,030.$$

— Berechnen von Δp nach Gl. (8):

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

6. Zusammenfassung

Projektanten von Gülledruckrohrleitungen 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 Δp näher erläutert und ergänzt sowie der benötigte Vorrat der das Fließverhalten beschreibenden Kennwerte wiedergegeben. So ist es dem Projektanten möglich, den Druckverlust Δp 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.: Güllepipelines 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 quasilastischer 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-

Tafel 1. Zusammenstellung der ermittelten Fließparameter nach der Herschel-Bulkley-Beziehung in Abhängigkeit von der Lagerdauer für Schweinegülle mit $Tr = 11,21\%$ (nach Hönl/Krüger [4]); τ_0 Fließgrenze, k Steifigkeit, n Strukturziffer

Lagerdauer D d	Meßrichtung fallender Schergradient					steigender Schergradient				
	τ_0 Pa	k Pa · s ⁿ	n	B	Sign. %	τ_0 Pa	k Pa · s ⁿ	n	B	Sign. %
1	1,3	1,949	0,5041	0,9675	99	1,7	2,274	0,3973	0,7849	99
3	1,6	1,865	0,4117	0,7651	99	1,8	2,166	0,3772	0,7754	99
8	3,6	1,743	0,5566	0,9844	99	3,8	2,174	0,5059	0,9642	99
10	3,0	1,859	0,5611	0,9922	99	2,9	2,455	0,5015	0,9524	99
15	3,0	2,121	0,5299	0,9903	99	3,2	2,648	0,4835	0,9811	99
17	3,0	2,378	0,5131	0,9876	99	3,0	2,976	0,4688	0,9906	99
21	3,5	1,878	0,5689	0,9967	99	3,3	2,823	0,4741	0,9867	99
29	3,7	1,701	0,5990	0,9921	99	3,5	2,619	0,5116	0,9801	99
31	3,2	2,256	0,5373	0,9923	99	3,2	2,981	0,4815	0,9882	99
38	3,4	1,674	0,6073	0,9974	99	3,4	2,367	0,5265	0,9936	99
43	3,2	1,607	0,6411	0,9964	99	2,8	2,938	0,4251	0,7798	99
51	3,3	2,283	0,4795	0,7963	99	3,3	3,190	0,4134	0,7962	99
57	3,9	2,387	0,4803	0,7924	99	4,0	3,159	0,4305	0,8000	99
64	4,0	2,107	0,4974	0,7958	99	3,7	3,374	0,4062	0,7991	99
71	4,0	2,196	0,5960	—	—	3,8	3,247	0,4959	0,9923	99
79	4,2	2,285	0,5994	0,9904	99	4,0	3,378	0,4930	0,9915	99
86	3,8	3,084	0,4412	0,7864	99	3,8	3,928	0,3941	0,7876	99
93	4,7	2,637	0,5840	—	—	4,5	3,871	0,4850	—	—
121	5,5	2,786	0,5901	0,9942	99	4,8	4,252	0,4804	0,9875	99

tur schwankte in einem Bereich von 12 bis 20°C (Durchschnittswert während der gesamten Lagerdauer rd. 16°C). Die Temperatur der Gülle unterschied sich nur unwesentlich von diesen Werten. Nach Motz [5] entsprechen diese Verhältnisse annähernd den natürlichen Lagerbedingungen in den Monaten Juni/Juli und September/Oktober, bei denen relativ intensive chemisch-biologische Abbauvorgänge in der lagernden Gülle ablaufen. An 19 Meßterminen wurden je 4 Meßreihen mit fallendem und 4 Meßreihen mit steigendem Schergradienten aufgenommen, für die anschließend je Meßrichtung die Mittelwerte errechnet wurden. Parallel dazu erfolgte je Meßtermin die dreimalige Bestimmung der Dichte und des Trockensubstanzgehalts Tr , von denen anschließend ebenfalls Mittelwerte errechnet wurden. Weiterhin wurde an ausgewählten Meßterminen der pH-Wert bestimmt. Der Trockensubstanzgehalt betrug über den gesamten Versuchszeitraum durchschnittlich $Tr = 11,21\%$.

3. Darstellung und Diskussion der Versuchsergebnisse

3.1. Fließfunktion

Die Ergebnisse der an den jeweiligen Meßterminen aufgenommenen Fließkurven sind in Tafel 1 zusammengestellt. Grundlage der mathematischen Beschreibung der aufgenommenen Fließkurven war die als bekannt vorausgesetzte dreiparametrische Herschel-Bulkley-Beziehung.

Im Bild 1 sind für die Meßrichtung „fallender Schergradient“ einige ausgewählte Fließkurven in Abhängigkeit von der jeweiligen Lagerdauer dargestellt. Anhand des Bildes und aus den hohen Bestimmtheitsmaßen nach Tafel 1 kann zunächst nachgewiesen werden, daß die Herschel-Bulkley-Beziehung für den gesamten Lagerzeitraum gültig ist. Gleichzeitig ist aus Bild 1 ersichtlich, daß die Fließkurven mit steigender Lagerdauer höher und steiler verlaufen. Allerdings muß vermerkt werden, daß diese Tendenz in Abhängigkeit vom Meßtermin nicht immer eindeutig ist. Allgemein läßt sich diese Tatsache aber anhand der Abhängigkeit der Mittelwerte der gemessenen Schubspan-

nungen τ von der Lagerdauer D hinreichend genau belegen. Diese Abhängigkeit ist linear nach Gl. (1):

$$\tau = 9,45082 + 0,07069 D; \quad (1)$$

$$B = 0,9103$$

Sign. 99%.

Nach Gl. (1) steigt somit der Mittelwert der gemessenen Schubspannungen um rd. 0,07 Pa je Tag Lagerdauer an. Im Zeitraum von 120 Tagen hat er sich nahezu verdoppelt. Die gesamte Schar der gemessenen Fließkurven läßt sich bei bekannter Anfangsfließkurve nach einem Tag Lagerdauer mit den Gin. (2) und (3) genügend genau darstellen:

$$\tau = 1,39207 - 0,02613 D + x \tau_{1d} \quad (2.1)$$

für $1 \leq D \leq 43$

$$\tau = -0,29771 + 0,01548 D + x \tau_{1d} \quad (2.2)$$

für $43 < D \leq 121$

$$x = 1,121838 + 0,007699 D; \quad (3)$$

τ Schubspannung in Pa

τ_{1d} Schubspannung nach 1 Tag Lagerdauer in Pa.

Die durchschnittliche Abweichung der beobachteten von den berechneten Werten betrug anhand einer zufällig ausgewählten Stichprobe von 10 Beispielen 4,10%.

Aus den Gln. (2.1) bzw. (2.2) ist ersichtlich, daß sich die „Alterung“ der Gülle im Untersuchungszeitraum in zwei wesentlichen Phasen vollzieht. Die erste Phase ist nach rd. 40 Tagen abgeschlossen, und unmittelbar daran schließt sich die zweite Phase an, in der die Fließkurven stärker ansteigen. Zu ähnlichen Schlüssen kommt auch Hönl [4] in bezug auf die Entwicklung der Viskosität.

3.2. Fließgrenze τ_0

Die Abhängigkeit der Fließgrenze von der Lagerdauer ist im Bild 2 und in Tafel 1 ersichtlich. Zunächst kann festgestellt werden, daß sich die Fließgrenze τ_0 im Untersuchungszeitraum diskontinuierlich, aber deutlich erhöht. Das mathematische Modell für diesen Zusammenhang ergab sich für die Meßrichtung „fallender Schergradient“ zu:

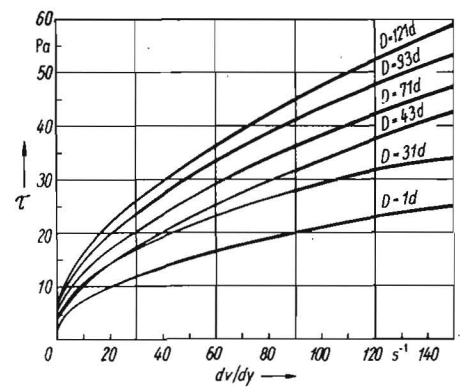


Bild 1. Darstellung der Schubspannung τ in Abhängigkeit vom Schergradienten dv/dy und von der Lagerdauer D (Schweinegülle, $Tr = 11,21\%$, Meßrichtung „fallender Schergradient“)

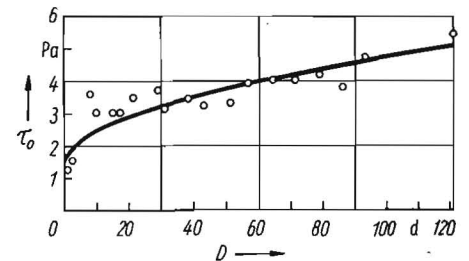


Bild 2. Darstellung der Fließgrenze τ_0 in Abhängigkeit von der Lagerdauer D (Schweinegülle, $Tr = 11,21\%$, Meßrichtung „fallender Schergradient“)

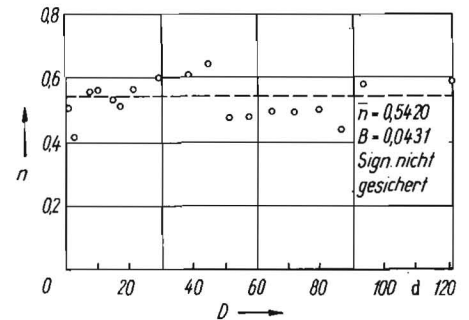


Bild 3. Darstellung der Strukturziffer n in Abhängigkeit von der Lagerdauer D (Schweinegülle, $Tr = 11,21\%$, Meßrichtung „fallender Schergradient“)

$$\tau_0 = 1,4 + 0,3369 \sqrt{D}; \quad (4)$$

$$B = 0,6335$$

Sign. 99%.

Das noch recht gute Bestimmtheitsmaß soll die Gültigkeit dieser Beziehung praktisch belegen.

3.3. Strukturziffer n

Aus Bild 3 und Tafel 1 wird deutlich, daß vom 3. bis zum 44. Tag der Lagerung ein offensichtliches Ansteigen der Strukturziffer n zu verzeichnen ist. Bis zum 51. Tag erfolgt ein rapides Absinken und danach bis zum Ende der Lagerdauer wieder ein leichter Anstieg. Im Komplex des gesamten Zeitraumes ergab eine Regression lediglich ein nicht gesichertes Bestimmtheitsmaß von $B = 0,0431$. Man muß somit annehmen, daß die Strukturziffer n von

Tafel 2. Zusammenstellung der Parameter des linearen Ausgleichs der absoluten und relativen Rohrreibungsverlusthöhe in Abhängigkeit von der Nennweite für eine mittlere Fließgeschwindigkeit von 1,5 m/s (Schweinegülle, Tr = 11,21 %, Meßrichtung „fallender Schergradient“)

Nennweite mm	$h_r = f(D)$				$h_{r,rel} = f(D)$			
	b_0 MPa	b_1 MPa/d	B	Sign. %	b_0	b_1	B	Sign. %
150	0,055275	0,000429	0,9839	99	1,0449	0,0081	0,9839	99
300	0,018977	0,000134	0,9685	99	1,0148	0,0072	0,9685	99
500	0,008645	0,000056	0,9426	99	0,9936	0,0065	0,9426	99
800	0,004200	0,000025	0,8978	99	0,9769	0,0058	0,8978	99
1000	0,002956	0,000018	0,8672	99	0,9854	0,0058	0,8673	99

der Lagerdauer D der untersuchten Gülle nahezu unabhängig ist.

3.4. Steifigkeit k

Wie Tafel 1 und Bild 4 erkennen lassen, steigt die Steifigkeit k unregelmäßig, aber deutlich im Verlauf der Lagerung an. Als bester mathematischer Ausgleich ergab sich für die Meßrichtung „fallender Schergradient“ ein Modell der Form

$$k = 1,7811 + 0,00830 D; \quad (5)$$

$$B = 0,5131$$

Sign. 99%.

Da nach Eckstädt [6] die Steifigkeit k als ein Analogon zur dynamischen Viskosität angesehen werden kann, ist mit dem deutlichen Ansteigen der Steifigkeit als Folge der Lagerung auch ein Anstieg der Rohrreibungsverluste beim hydromechanischen Transport der Gülle zu erwarten.

3.5. Modifizierter Parabelparameter p'

Durch Transformation der Herschel-Bulkley-Beziehung in die Form einer klassischen Parabel folgt u. a.

$$p' = 2p = \sqrt[n]{k}. \quad (6)$$

Die praktische Bedeutung des modifizierten Parabelparameters p' besteht darin, daß er der Rohrreibungsverlusthöhe h_r proportional ist. Die zeitliche Abhängigkeit von p' in $10^{1/n} \text{ Pa}^{1/n} \text{ s}$ lautet:

$$p' = 0,040039 + 0,000596 D; \quad (7)$$

$$B = 0,9331$$

Sign. 99%.

3.6. Rohrreibungsverlusthöhe

Die Ermittlung der Rohrreibungsverlusthöhe h_r erfolgte nach Annen [7] in der von den Autoren in [2] beschriebenen Weise. Aus Bild 5 ist ersichtlich, daß die Zeitbeeinflussung mit steigender Nennweite abnimmt, aber für alle Nennweiten die Rohrreibungsverlusthöhe mit der Zeit größer wird. Die lineare Ausgleichung der absoluten und relativen Rohrreibungsverlusthöhe ergab entsprechend Gl. (8) die in Tafel 2 zusammengestellten Werte:

$$h_r \text{ bzw. } h_{r,rel} = f(D) = b_0 + b_1 D. \quad (8)$$

Anhand des Parameters b_1 des relativen Wertes $h_{r,rel}$ kann der prozentuale Anstieg der Rohrreibungsverlusthöhe je Tag Lagerdauer ermittelt werden. Die hohen Bestimmtheitsmaße und die hohe Signifikanz bestätigen die Annahme des linearen Zusammenhangs. Kritisch muß jedoch bemerkt werden, daß durch die „Ausreiber“ im Zeitraum von 50 bis 70 Tagen eine gewisse „Lücke“ besteht, die sich aber mit der Vergrößerung der Nennweite immer weniger auswirkt. Nach Tafel 2 nehmen bei der NW 150

die Reibungsverluste in 100 Tagen um rd. 80 % und bei der NW 1000 um rd. 60 % zu. Der A-Wert nach Eckstädt [8] erhöht sich in 100 Tagen auf das etwa 3,5fache des Ausgangswertes. Das mathematische Modell für die Geradenschar im Bild 5 ergab sich zu:

$$h_r = 46,3084 \text{ NW}^{-1,474027} + 2685,33 \text{ NW}^{-1,650839} p'; \quad (9)$$

p' nach Gl. (7)

h_r Rohrreibungsverlusthöhe in MPa/100 m
NW Nennweite in mm.

4. Zusammenfassung

Nach Schemel und Hörnig [9] ist die Unkenntnis des Zeitverhaltens der Gülle die entscheidende Ursache für die Abweichungen der Berechnungsansätze von den tatsächlichen Verhältnissen und damit auch für die Störungen und unbefriedigenden Ergebnisse beim Fließprozeß der Gülle. In der vorliegenden Arbeit wird ein methodischer Weg mit ersten Versuchsergebnissen gezeigt, mit dem der Einfluß der Lagerdauer auf das Fließverhalten der Gülle schrittweise geklärt werden kann. Mit den ermittelten Gleichungen liegen für die Meßrichtung „fallender Schergradient“ mathematische Modelle vor, die es ermöglichen, die wesentlichen Fließparameter beim hydromechanischen Transport der Gülle in Abhängigkeit von der Zeit (Lagerdauer) zu berechnen. Aus der errechneten Veränderung der Reibungsverluste nach Annen [7] kann die These abgeleitet werden, daß die Lagerdauer einen erheblichen Einfluß auf das Fließverhalten einer Gülle mit hohem Trockensubstanzgehalt hat. Zur Einbeziehung derartiger Ergebnisse in technische Berechnungen sind weitere Untersuchungen erforderlich.

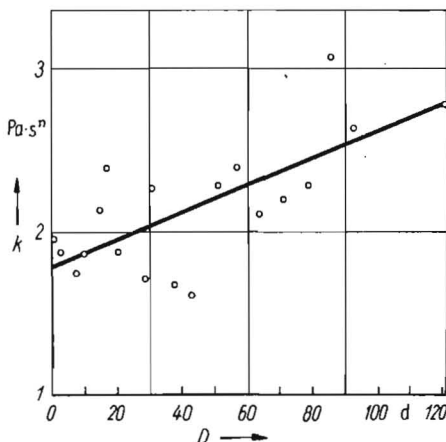


Bild 4. Darstellung der Steifigkeit k in Abhängigkeit von der Lagerdauer D (Schweinegülle, Tr = 11,21 %, Meßrichtung „fallender Schergradient“)

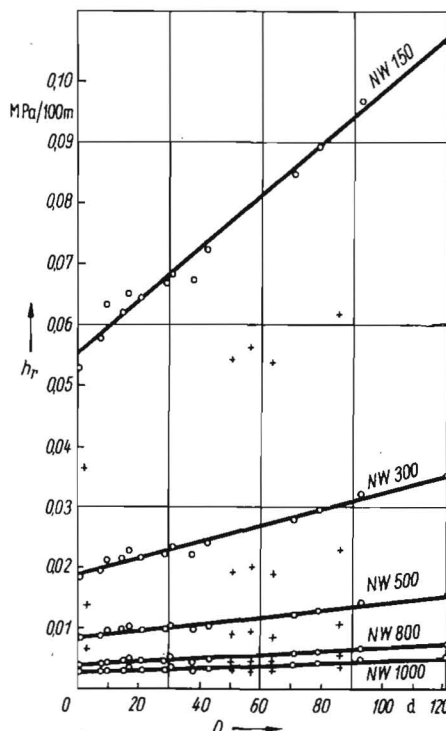


Bild 5. Darstellung der Rohrreibungsverlusthöhe h_r in Abhängigkeit von der Lagerdauer D für ausgewählte Nennweiten und einer mittleren Fließgeschwindigkeit von 1,5 m/s (Schweinegülle, Tr = 11,21 %, Meßrichtung „fallender Schergradient“); + „Ausreiber“, die nicht zur Regression benutzt wurden

Literatur

- [1] Hesse, H. U.; Hummel, H. G.: Untersuchungen zum Einfluß der Temperatur auf Dichte, pH-Wert und Viskosität einer Schweinegülle mit hohem Trockensubstanzgehalt. Wiss. Zeitschrift der WPU Rostock, math.-naturw. Reihe, 29 (1980) H. 6, S. 85–88.
- [2] Hesse, H. U.; Hummel, H. G.: Untersuchungen zum Einfluß der Temperatur auf das Fließverhalten einer Schweinegülle mit hohem Trockensubstanzgehalt. agrartechnik 30 (1980) H. 9, S. 405–407.
- [3] Hesse, H. U.; Hummel, H. G.: Untersuchungen zum Einfluß der Lagerdauer auf Dichte, pH-Wert und Viskosität einer Schweinegülle mit hohem Trockensubstanzgehalt. Wiss. Zeitschrift der WPU Rostock, math.-naturw. Reihe, 30 (1981) als Manuskript eingereicht.
- [4] Hönl, R.; Krüger, B.: Untersuchungen zur Zeit- und Temperaturabhängigkeit rheologischer Parameter von Schweinegülle. WPU Rostock, Diplomarbeit 1978 (unveröffentlicht).
- [5] Motz, R.: Über die Milieuvhältnisse anaerob lagernder Dickgülle und deren Beziehung zur Überlebenszeit einiger pathogener Bakterien. Angewandte Tierhygiene 1 (1971) H. 1, S. 9–97.
- [6] Eckstädt, H.: Beitrag zur Bemessung von Rohrleitungen für die Förderung von Gülle unter Berücksichtigung der Sedimentation. WPU Rostock, Dissertation A 1978 (unveröffentlicht).
- [7] Annen, G.: Rohrströmung von Klärschlamm. TH Karlsruhe, Dissertation A 1961.
- [8] Eckstädt, H.: Druckverluste bei laminarer Rohrströmung quasiplastischer Flüssigkeiten. Wasserwirtschaft-Wassertechnik (1975) H. 6, S. 194–195.
- [9] Schemel, H.; Hörnig, G.: Methode zur Berechnung der Tiefe von Fließkanälen in Rinderproduktionsanlagen. agrartechnik 29 (1979) H. 7, S. 296–299.