

Hansjürgen RICHTER, Hans Joachim KECKE

Technische Hochschule Otto von Guericke Magdeburg

ZUM TRANSPORTVERHALTEN VON HETEROGENEN SUSPENSIONEN MIT UNTERSCHIEDLICHEM FEINKORNTEIL DES FESTSTOFFS

Zusammenfassung. Zur Klärung des Verhaltens von quasi homogenen Suspensionen sowie des Einflusses eines merklichen Feinkornanteiles auf die Transportverhältnisse von heterogenen Systemen wurden experimentelle Ergebnisse mit Kaolin, Sand und Kies durchgeführt. Die Auswertung macht die Probleme hinsichtlich einer formal-rheologischen Beschreibung der Suspension und der Übertragung auf das komplexe System (Feinkorn und Grobkorn) deutlich.

1. Einleitung

Die bisher nicht mögliche einheitliche Darstellung der unterschiedlichen Erscheinungsformen feststoffbeladener Flüssigkeitsströmungen führt zwangsläufig zu Klassifizierungsbemühungen, deren Ansätze sich an den bekannten Gesetzmäßigkeiten bei der Strömung einphasiger Fluide und der Bewegung von Teilchen (einzeln und im Haufwerk) orientieren, z. B. /1/, /2/, /3/, /4/. In Bild 1 sind die Verhaltensbereiche und ihre Abgrenzung exemplarisch dargestellt.

Bewegt man sich mit den Kennwerten des Feststoffes (Haufwerkes) nur in einem Verhaltensbereich, so können

- homogene Suspensionen als Kontinua (pseudo-Kontinua) und
- heterogene Suspensionen als Zweiphasensysteme mit eigenständigen und in Wechselwirkung stehenden Phasen betrachtet werden.

Im Übergangsbereich (z. B. /2/) ist diese relativ klare Zuordnung nicht gegeben, was qualitativ in Bild 1 mit zum Ausdruck gebracht wird. Es stellt sich hierbei die Frage, ob unter Beachtung der Differenziertheit und Polydispersität der Haufwerke (sich meist über zwei oder alle drei genannten Verhaltensbereiche erstreckend) und der Möglichkeiten der unzureichend eindeutigen Beschreibung der Feststoffparameter für die praktische Arbeit, nicht die Zweiteilung homogen und heterogen zweckmäßig und ausreichend ist.

Beachtet man in diesem Zusammenhang, daß sich der technisch interessante Parameterbereich

- bei heterogenen Suspensionen durch kleinere Feststoffkonzentrationen und Transportgeschwindigkeiten mit deutlichsten Entmischungserscheinungen (nahe v_{krit}),

- bei homogenen Systemen durch größere bis maximal mögliche Feststoffkonzentrationen (bis hin zu zielgerichteter Minimierung der Porosität) weitestgehend ohne Entmischungserscheinungen auszeichnet, wird oben genannter Gedanke unterstützt. Die Besonderheiten des Bewegungsverhaltens im Übergangsbereich können durch Modifizierung oder Extrapolation aus dem jeweils dominierenden System berücksichtigt werden. Dazu sind die Kenntnisse zu der jeweiligen Verhaltensgrenze (\approx Grenzbereich) quantifiziert erforderlich. Anhand von Untersuchungen mittels zweier Haufwerkstypen unterschiedlicher Proportionierung in der Suspension sollen dazu Aussagen gewonnen werden.

2. Kennzeichen der experimentellen Untersuchungen

. Trägerflüssigkeit und Feststoffe:

Das Haufwerk für die homogene Suspension ist Kaolin ($\rho_{Mh} = 2314 \text{ kg/m}^3$, Teilchenverteilung nach Bild 1). Wegen seiner hohen Oberflächenladungsdichte ist eine hohe elektrostatische Wechselwirkung zwischen den Teilchen vorhanden, was bereits bei relativ kleinen Konzentrationen c_{Rh} zu veränderten Fließeigenschaften der Suspension führt.

Die heterogene Mischung wird mit einem Haufwerk aus Sand ($\rho_{Mhet} = 2636 \text{ kg/m}^3$, Teilchenverteilung nach Bild 1) gebildet.

Trägerflüssigkeit ist Wasser ($\rho_F = 1000 \text{ kg/m}^3$).

Für den Vergleich mit realen Aufgaben wurde unklassierter Kiessand ($\rho_M = 2500 \text{ kg/m}^3$, Teilchenverteilung nach Bild 1) in seinem Transportverhalten untersucht.

. Versuchsdurchführung, Meßeinrichtungen:

Das Fließverhalten der homogenen Suspension wurde mittels Rotationsviskosimeter und horizontaler Rohrstrecke ($d_R = 0,05 \text{ m}$, $k = 0,02 \text{ mm}$) untersucht.

Die Untersuchung der heterogenen Suspension sowie der komplexen Systeme homogen und heterogen erfolgten ebenfalls an der horizontalen Rohrstrecke.

. Variationsbereich der Anteile der komplexen Systeme:

$$c_R = c_{Rh} + c_{Rhet}$$

$$c_{Rhet} = 0,1; 0,2; 0,3 (\approx c_{Thet})$$

$$c_{Rh} = 0,022 \dots 0,126$$

Die obere Begrenzung ist durch die Leistungsfähigkeit der Versuchsanlage gegeben.

3. Fließeigenschaften der homogenen Suspension

Kaolinsuspensionen wurden von verschiedenen Autoren, sowohl zur Darstellung homogener Suspensionen für den Transport heterogener Anteile /6/, /7/, als auch zur Untersuchung des Fließverhaltens höherkonzentrierter Suspensionen verwendet /8/. Wegen der bereits genannten hohen Oberflächenladungsdichte bei Kaolin und der möglichen Variationsbreite der chemischen Zusammensetzung der Kaoline wurden die Fließeigenschaften des eingesetzten Kaolins "Wolfka" nochmals speziell ermittelt.

Im Bild 2 sind die mittels Rotationsviskosimeter gemessenen sowie die aus den Messungen mittels Rohrleitung (Bild 3) errechneten Fließkurven dargestellt. Im letzteren Falle wurden die beiden Möglichkeiten der Darstellung der Wandschubspannung ohne Fließgrenze (Ansatz nach Ostwald - de Weale)

$$\tau_w = K \cdot \left(\frac{dv}{dy}\right)^n \quad (1)$$

und mit Fließgrenze (Ansatz nach Herschel - Bulkley)

$$\tau_w = \tau_0 + K \cdot \left(\frac{dv}{dy}\right)^n \quad (2)$$

genutzt. Zur Auswertung nach Gl. (2) ist die Vorgehensweise nach /9/ herangezogen worden.

Deutliche Abweichungen zwischen den Ergebnissen aus beiden Meßverfahren sind zu bemerken, wobei die Differenzen mit wachsender c_{Rh} abnehmen, jedoch die Werte im Rohr immer die größeren bleiben.

Als Ursachen für die Abweichungen können genannt werden:

- Es liegen veränderte Versuchsbedingungen vor, sowohl hinsichtlich der Meßeinrichtung, als auch der Wandrauigkeit (vgl. /1/, /8/). Kommt es beim hydraulisch glatten Rotationsviskosimeter zum Wandgleiten der Teilchen (zumindest teilweise Aufhebung der Haftbedingung), so ist bei der mittleren Rauigkeit des Meßrohres ($k = 0,022$ mm in der Größenordnung der größten Kaolinteilchen) der Schervorgang gewährleistet. Messungen von /10/ z. B. mittels glattem Plastrohr liefern entsprechend kleinere Werte (vgl. Bild 3).
- Entmischungserscheinungen (lokaler Konzentrationsanstieg zur Rohrsohle hin) in der Rohrleitung sind trotz der kleinen Sinkgeschwindigkeit der Kaolinteilchen ($v_{SK} < 0,1$ mm/s) zu erwarten, so daß daraus lokal veränderte Fließeigenschaften resultieren. Dieser Effekt muß mit wachsender c_{Rh} abnehmen (wechselseitige Behinderung der Teilchen bei der Absetzbewegung nimmt zu), wie es sich auch darstellt.

Somit ist die Schlußfolgerung berechtigt, daß die Messungen mittels Rotationsviskosimeter die rheologischen Eigenschaften der Suspension besser widerspiegeln, wobei dem Problem der Haftbedingung weiter Aufmerksamkeit gewidmet werden muß.

Die Meßergebnisse an der Rohrleitung stellen die Fließeigenschaften unter deren spezifischen Bedingungen dar, was einen quantifizierten Vergleich beider Meßreihen erheblich erschwert.

Die gemessenen Fließparameter sind in Bild 4 aufgetragen.

Zum Vergleich mit anderen Suspensionarten sind Schrifttumsergebnisse eingeordnet.

Die genannte Differenziertheit der Meßergebnisse bei Einheitlichkeit in der Tendenz und zur möglichen Abgrenzung von Verhaltensbereichen wird deutlich. Bei $c_{Rh} = 0,07$ verändert sich offensichtlich das Fließverhalten, indem die Fließgrenze τ_0 wirksam wird und sowohl K als auch n als Potenzfunktion von c_{Rh} dargestellt werden können. Die Unterschiede der Meßwerte Rotationsviskosimeter/Rohr widerspiegeln sich, insbesondere im Gradienten von $n = f(c_{Rh})$, wofür die lokale Aufkonzentrierung verantwortlich gemacht werden könnte. Im Bereich $0,03 < c_{Rh} < 0,07$ ist vornehmlich K anwachsend bei wenig geänderter n , was auf noch annähernd newtonsches Verhalten mit erhöhter Viskosität η_s ($\eta_s \approx K$) der Suspension schließen läßt.

Im Bereich $c_{Rh} < 0,03$ ist newtonsches Verhalten ohne η_s -Änderung zu verzeichnen. Für etwa $c_{Rh} > 0,2 \dots 0,25$ stellen sich Fließverhältnisse ein, bei welchen die Gleiteffekte /8/ wirksam werden.

Bei turbulenter Strömung ist gleichsam newtonsches Verhalten der Suspension zu verzeichnen. Die Rohrleitungskennlinie berechnet man somit:

$$\frac{\Delta P_{Gh}}{l} = \lambda_{Fh} \cdot \frac{1}{d_R} \cdot \frac{\rho_{Gh}}{2} \cdot v_G^2 \quad (3)$$

mit $\lambda_{Fh} = f(Re_s(\eta_s); k)$ aus dem Colebrook-Diagramm;

$$\rho_{Gh} = c_{Rh} (\rho_{Mh} - \rho_F) + \rho_F$$

Für die Re_s -Zahl gilt bei pseudo-plastischem Verhalten nach /11/:

$$Re_s = \frac{8 \cdot d_R^n \cdot v_G^{2-n} \cdot \rho_{Gh}}{K} \cdot \left[\frac{n}{2 + 6n} \right]^n \quad (4)$$

4. Fließeigenschaften der heterogenen Suspension

Die gemessenen Rohrleitungskennlinien bestätigen bei $c_{Thet} = 0,1$ und $c_{Thet} = 0,2$ typisches heterogenes Verhalten. Die Konzentration $c_{Thet} = 0,3$ zeigt ein verändertes Fließverhalten im nichtnewtonschen Sinne (Bild 5).

Bei Anwendung des Potenzansatzes nach Ostwald - de Weale widerspiegelt folgende Gleichung die gemessenen Werte gut:

$$\tau_w = 2,7 \cdot \left(\frac{dv}{dy} \right)^{0,44} \quad (5)$$

Die Geschwindigkeit des Umschlags laminar/turbulent beträgt

$$v_{h/t} = 2,9 \text{ m/s (bei } Re_{pl} = 2100 \text{ nach /11/).}$$

Im turbulenten Bereich ist heterogenes Verhalten kennzeichnend. Die Rohrleitungskennlinien bei heterogenem Verhalten sind berechenbar mit den Gleichungen nach /12/, welche aus dem Schubmodell abgeleitet wurden. Die Anpassung an die Meßwerte mit Kiessand (vgl. Bild 1) /13/ ist gleichermaßen für diese Messungen gültig (Bild 5).

Der Druckverlust und die kritische Geschwindigkeit können berechnet werden mit:

$$\frac{\Delta P_G}{l} = \frac{\rho_F}{2} \cdot v_G^2 \cdot \frac{1}{d_R} \left[\lambda_F + 3,5 \cdot \mu \cdot c_{Thet} \cdot \left(\frac{\rho_M}{\rho_F} - 1 \right) \cdot \left(\frac{\rho \cdot d_R}{v_G^2} \right)^{1,1} \cdot \left(\frac{d_{km}}{d_{kg}} \cdot K\mu \right) \right] \quad (6)$$

$$v_{krit} = 12 \cdot \mu \cdot \left[\varepsilon \left(\frac{\rho_M}{\rho_F} - 1 \right) \right]^{\frac{1}{2}} \left[d_R^2 \cdot d_{km} \cdot c_{Thet} \cdot \left(\frac{d_{km}}{d_{kg}} \right)^{\frac{1}{6}} \cdot \left(\frac{d_{km}}{d_{kg}} \right)^{\frac{1}{2}} \right]^{\frac{1}{6}} \quad (7)$$

mit den Konstanten, Parametern und Korrekturgliedern:

$$\mu = 0,4$$

$$K\mu = 1,5 \cdot c_{Thet}^{0,08} \cdot \left(\frac{v_{krit}}{v_G} \right)^{\left(1 + \frac{0,0012}{c_{T1,6j}} \right)}$$

$$d_{kg} = 10^{-3} \cdot \left(\frac{6 \rho_F}{\rho_M - \rho_F} \right)^{\frac{1}{3}} \text{ m}$$

$$d_{km} = \sum_{i=1}^n \frac{d_{K1} \cdot \Delta D_i}{100}$$

$$\frac{d_{km}}{d_{kg}} = 1 \text{ für } \frac{d_{km}}{d_{kg}} \geq 1$$

Die bisherigen Ergebnisse sind zusammengefaßt in Bild 5 dargestellt. Der Vergleich homogen - heterogen zeigt, daß die homogene Suspension bei höheren v_G größere Reibungsverluste verursacht, nahe der kritischen Geschwindigkeit erst kehrt sich das Verhältnis um. Entsprechende Effekte sind bei komplexen Systemen zu erwarten.

5. Transportverhalten und Fließeigenschaften der komplexen Systeme

Mit den vorstehend beschriebenen Messungen wurde gezeigt, daß bei Suspensionen, deren feste Komponente homogenes oder heterogenes Verhalten erwarten läßt, konzentrationsabhängig die Fließeigenschaften unterschiedlich verändert werden. Die "Laminarisierung" kann bei Transportgeschwindigkeiten v_G erfolgen, welche im Bereich der technisch zu realisierenden Aufgaben liegen. Um so bedeutungsvoller wird die Kenntnis über das Wirken homogener und heterogener Komponenten im Komplex hinsichtlich

- Umschlaggeschwindigkeit laminar/turbulent v_{lt} ,
- Erhöhung oder Reduzierung des Reibungsdruckverlustes $\frac{\Delta p_G}{l}$,
- Erhöhung oder Reduzierung der kritischen Geschwindigkeit.

In Bild 6.1 bis 6.3 sind für unterschiedliche Gruppierungen von c_{Rh} die Meßwerte bei komplexen Systemen dargestellt und die Rohrleitungskennlinie homogen und heterogen als Vergleichsgrößen eingetragen. Dabei beziehen sich c_{Rh} auf das Gemisch ohne heterogenen Anteil (Sand) und $c_{Rh_{het}}$ auf das gesamte Gemisch.

Bei hoher $c_{Rh_{het}}$ ($= 0,3$) war bereits unter Pkt. 4. nichtnewtonsches Verhalten festgestellt worden. Unter den Bedingungen der homogenen Suspension als Trägermedium stellt sich eine Abhängigkeit von c_{Rh} ein. Etwa unterhalb auftretender Fließgrenze τ_0 (vgl. Pkt. 3.) sind eine Ver-ringerung des Druckverlustes und ggf. eine Verkleinerung der Struktur-ziffer n (Gleichung 5) vorhanden; das pseudo-plastische Fließverhalten wird grundsätzlich nicht verändert (Bild 6.1). Wird c_{Rh} weiter erhöht (Bild 6.2 $c_{Rh} = 0,101$), so nimmt offensichtlich die Wirkung des homo-genen Systems derart zu, daß bei kleinen v_G wesentlich kleinere Druck-verluste auftreten. Mit wachsender v_G werden schließlich die Werte des heterogenen Systems erreicht und überschritten, wo dann das homogene System ebenfalls dominierende Wirkung besitzt.

Kleinere $c_{Rh_{het}}$ ($\leq 0,2$ gemessen) zeigen in homogener Suspension $c_{Rh} < 0,027$ ($0,03$) einen erhöhten Druckverlust (Bild 6.1). Bereits $c_{Rh} = 0,05$ zeigt bei $c_{Rh_{het}} = 0,1$; $0,2$ eine $\frac{\Delta p_G}{l}$ - reduzierende Wirkung, welche mit wachsender v_G zurückgeht bzw. verschwindet. c_{Rh} mit beginnend wirksamer τ_0 ($c_{Rh} = 0,078$ in Bild 6.2) bewirkt bei kleiner $c_{Rh_{het}}$ ($= 0,1$) eine deutliche Erhöhung von $\frac{\Delta p_G}{l}$, bei $c_{Rh_{het}} = 0,2$ in geringeren Maße. Bei hohen v_G werden die Rohrleitungskennlinien zwischen homogener und heterogener Suspension erreicht.

Wird c_{Rh} weiter erhöht (Bild 6.3), so verringert sich $\frac{\Delta p_G}{l}$ im Bereich kleiner v_G entsprechend der Kennlinie des homogenen Systems. Allerdings bewirkt $c_{Rh} > c_{Rh_{het}}$, daß das homogene System dominiert und entsprechend eine $\frac{\Delta p_G}{l}$ - Erhöhung eintritt. Bei größeren v_G existiert ein Bereich des Dominierens vom heterogenen Anteil, was mit weiter wachsender v_G sich wieder verliert.

Diese Ergebnisse stimmen prinzipiell mit denen aus dem Schrifttum überein (z. B. /10/; /14/), wenn man das spezifische Fließverhalten von

Kaolinsuspension berücksichtigt (Pkt. 3.). Das betrifft sowohl die Druckverlustreduzierung im unteren Geschwindigkeitsbereich als auch die Druckverlusterhöhung bei großen v_G bezogen auf die heterogene Strömung, aber auch die Druckverlustreduzierung homogener Suspensionen infolge heterogenem Anteil.

Druckverlusterhöhung der heterogenen Kennlinie bei kleinen c_{Rh} durch geringe c_{Rh} wurden bisher im Schrifttum nicht meßtechnisch belegt. Die von /14/ gemessene Wirkungslosigkeit von $c_{Rh} = 0,025$ oberflächeninaktivem Kalksteinmehls auf heterogene Sandsuspension $c_{Rh} = 0,06$ kann unter Berücksichtigung der hohen Oberflächenladungsdichte des Kaolins entsprechend interpretiert werden.

Die Beeinflussung der kritischen Geschwindigkeit (v_G , bei der gerade noch keine stationären Ablagerungen auftreten) kann nicht quantitativ dargestellt werden, da nur eine visuelle Bestimmung im Glasrohr mit vom Stahlrohr abweichender Oberflächenrauigkeit möglich war. Die Reduzierung von v_{krit} mit wachsender c_{Rh} wurde beobachtet, wobei ein progressiver Verlauf zu erkennen war.

Die Umschlaggeschwindigkeit v_{lt} bei kleineren c_{Rh} lag unterhalb oder im Bereich von v_{krit} , so daß dazu keine Messungen mit vertrauenswürdigen Charakter möglich waren. Bei $c_{Rh} = 0,3 / c_{Rh} = 0,06$ scheint eine Verringerung gegenüber $c_{Rh} = 0$ vorzuliegen (Bild 6.1).

6. Zusammenfassung

Die Fließeigenschaften von Suspensionen aus Flüssigkeit und Feststoff mit realem, natürlichem Haufwerk (Teilchengrößenverteilung) stellen sich in äußerst differenzierter Weise dar. Besteht nicht die Möglichkeit der definierten Gestaltung des zu fördernden Haufwerkes, so wird hier erneut belegt, daß eine aufgabenspezifische Untersuchung erfolgen muß. Verallgemeinerungsfähige Aussagen aus den vorgelegten Untersuchungen sind in der Hinsicht möglich, daß bezüglich des Kaolins Fließeigenschaften der homogenen Suspension dargestellt wurden, welche die Möglichkeit aufzeigen, den Wirkungsbereich der homogenen Konzentration c_{Rh} und den Wirkungsbereich des Dominierens des heterogenen oder des homogenen Systems deutlich abzustecken. Es wurde gezeigt, daß neben der Reduzierung des Reibungsdruckverlustes $\frac{\Delta p_G}{l}$ bei entsprechend hohem homogenen Anteil auch eine Erhöhung real möglich ist. Dieser Effekt ist abhängig von den konkreten Fließeigenschaften der homogenen Suspension, so daß sowohl bei Modelluntersuchungen als auch beim Einsatz von Feststoffen aus praktischen Aufgabenstellungen darauf besonderes Augenmerk zu richten ist. Unter diesen Bedingungen und unter Bezug auf praktische Relevanz erscheint es sinnvoll, die eingangs dargestellte Klassifizierung nur in homogen und heterogen vorzunehmen, zumal sich die Verhaltensabgrenzung variabel, in Abhängigkeit vom jeweiligen Anteil ($c_{Rh}; c_{Rh}$), darstellt.

Verwendete Symbole und Indizes:

c_R		volumetrische Raumkonzentration
c_{Rh}		volumetrische Raumkonzentration der homogenen Phase
c_{Rhet}		volumetrische Raumkonzentration der heterogenen Phase in Suspension mit der homogenen Suspension
c_T		volumetrische Transportkonzentration
d_k	m	Teilchendurchmesser
d_{ki}	m	Teilchendurchmesserfraktion
d_{kg}	m	Grenzteilchendurchmesser
d_{km}	m	mittlerer Teilchendurchmesser
d_R	m	Rohrdurchmesser
D_i	%	Siebdurchgang der Fraktion d_{ki}
g	m/s^2	Erdbeschleunigung
k	mm	absolute Rohrrauigkeit
$K; K^1; K^a$	Pas^n	Steifigkeit
l	m	Länge der Rohrleitung
$n; n^1; n^a$	-	Strukturziffer
Δp	Pa	Druckverlust
v_G	m/s	Gemischgeschwindigkeit/mittl. Transportgeschwind.
v_{it}	m/s	Umschlaggeschwindigkeit laminar/turbulent
v_{krit}	m/s	kritische Geschwindigkeit
v_{SK}	m/s	Sinkgeschwindigkeit eines Teilchens
ρ_F	kg/m^3	Flüssigkeitsdichte
ρ_{Hh}	kg/m^3	Dichte des Feststoffes, die homogene Suspension bildend
ρ_{Hhet}	kg/m^3	Dichte des Feststoffes, die heterogene Suspension bildend
ρ_M	kg/m^3	Feststoffdichte
ρ_{Gh}	kg/m^3	Gemischdichte (homogene Suspension)
τ_w	Pa	Wandschubspannung
τ_0	Pa	Fließgrenze
ν	Pas	dynamische Viskosität
λ_F	-	Rohrreibungsbeiwert - Wasserströmung
λ_{FH}	-	Rohrreibungsbeiwert - Strömung homogener Suspension
	-	Gleitreibungsbeiwert

Literatur

- /1/ Parzonka W.: Modellierung der Transportvorgänge in horizontalen Rohrleitungen. Proceedings "Hydromechanisation 4" 2.10. - 4.10.85, Karl-Marx-Stadt, DDR; Vortrag A 1
- /2/ Kecke H. J.; Richter H.: Fließverhalten von fest-flüssig-Systemen und dessen Beschreibung. Proceedings "Hydromechanisation 4" 2.10. - 4.10.85, Karl-Marx-Stadt, DDR; Vortrag A 4
- /3/ Weber M.: Berücksichtigung der Kornverteilung im Druckverlust des hydraulischen Feststofftransportes. Beiträge zum 6. Kolloquium "Massenguttransport durch Rohrleitungen", Meschede 1984, Vortrag B
- /4/ Newitt D. M., Richardson J. F.; et. al.: Hydraulic conveying of solids in horizontal pipes. Trans. Inst. Chem. Engrs. 33 (1955) No. 2, S. 93-113
- /5/ Parzonka W.: Grenzablagerungsgeschwindigkeiten der Gemischströmung in horizontalen Rohrleitungen. Proceedings des 3. internat. Kolloquiums "Hydromechanisation 3" Miskolc 1983, Vortrag A 1
- /6/ Scarlett B.; Grimley A.: Particle velocity and concentration profiles during hydraulic transport in a circular pipe Proceedings on Hydrotransport 3, Golden, Colorado USA 15.-17. May 1974, Paper O3
- /7/ Parzonka W., Kenchington J. M.; Charles M. E.: Hydrotransport of Solids in Horizontal Pipes: Effects of Solids Concentration and Particle Size on the Deposit Velocity, The Canadian Journal of Chemical Engineering, Vol. 59, Jun. 1981, p. 291-295
- /8/ Windhab E.: Untersuchungen zum rheologischen Verhalten konzentrierter Suspensionen. Fortschrittberichte VDI, Reihe 3: Verfahrenstechnik Nr. 118, VDI-Verlag Düsseldorf 1986
- /9/ Hoppe K.-H.: Über den Reibungsdruckverlust von Kohlenstaub-suspensionen im runden Rohr. 3 R-international, 1966, S. 145-152 und 221-220
- /10/ Kenchington J. M.: Prediction of pressure gradient on dense phase conveying. Proceedings on Hydrotransport 5, Hannover, Mai 1978, Paper D 7
- /11/ Lazarus J. H.: Rheological characterisation for optimising specific power consumption of a phosphate ore pipeline. Proceedings on Hydrotransport 7, Sendai, Japan, November 1980, Paper D 1
- /12/ Richter H.; Scholz G.: Eine Methode zur Auslegung hydromechanischer Feststofftransportanlagen. Dissertation TH Magdeburg, 1977
- /13/ Richter H.; Kecke H. J.: Studie zum Transportverhalten eines speziellen Kiessandes. Unveröffentlichter Bericht, TH Magdeburg, 1986
- /14/ Brühl H.: Verfahren zur Berücksichtigung von Feinstanteilen in Baggergut bei der Druckverlustberechnung. 7076-154/11, S. 168-180

- /15/ Kazanskij, J.; Brühl, H.; Hinsch, J.: Influence of added fine particles on the flow structure and the pressure losses in sand-water-mixture. Proceedings of Hydrotransport 3, Golden, Colorado USA, May 1974, Paper D 2
- /16/ Govier, G. W.; Aziz, K.: The flow of complex mixtures in pipes. New York: Van Nostrand Reinhold Company, 1972
- /17/ Heywood, N. I.; Richardson, J. F.: Head loss reduction by gas injection for highly shear-thinning suspensions in horizontal pipe flow of Hydrotransport 5, Hannover, Mai 1978, Paper C 1

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Maciej ZARZYCKI

Wpłynęło do Redakcji 1987.04.8

PROCES TRANSPORTOWANIA HETEROGENICZNYCH ZAWIESIN
O RÓŻNICOWANYM ROZDROBNIENIU CIAŁA STAŁEGO

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

W celu wyjaśnienia zachowywania się quasi homogenicznych zawiesin, jak i wpływu znacznego różnicowania rozdrobnienia na procesy transportowe heterogenicznych systemów, przeprowadzono eksperymentalne doświadczenia z kaolinem, piaskiem oraz żwirem. Uzyskane wyniki wyjaśniają problemy odnośnie formalnie reologicznego opisu zawiesiny i jego przeniesienia na kompleksowe systemy (drobno i grubo ziarniste).

ПРОЦЕСС ТРАНСПОРТИРОВКИ ГЕТЕРОГЕННЫХ ВЗВЕСЕЙ
С ТВЕРДЫМИ ТЕЛАМИ РАЗЛИЧНОЙ ВЕЛИЧИНЫ

Р е з ю м е

Для того, чтобы объяснить поведение квазигомогенных взвесей и значительное влияние твердых тел различной величины на процессы транспортировки гетерогенных систем, проведены эксперименты с каолином, песком и гравием. Полученные результаты объясняют относительно формальное реологическое описание взвеси и его применение в комплексных системах (мелко и крупнозернистых).

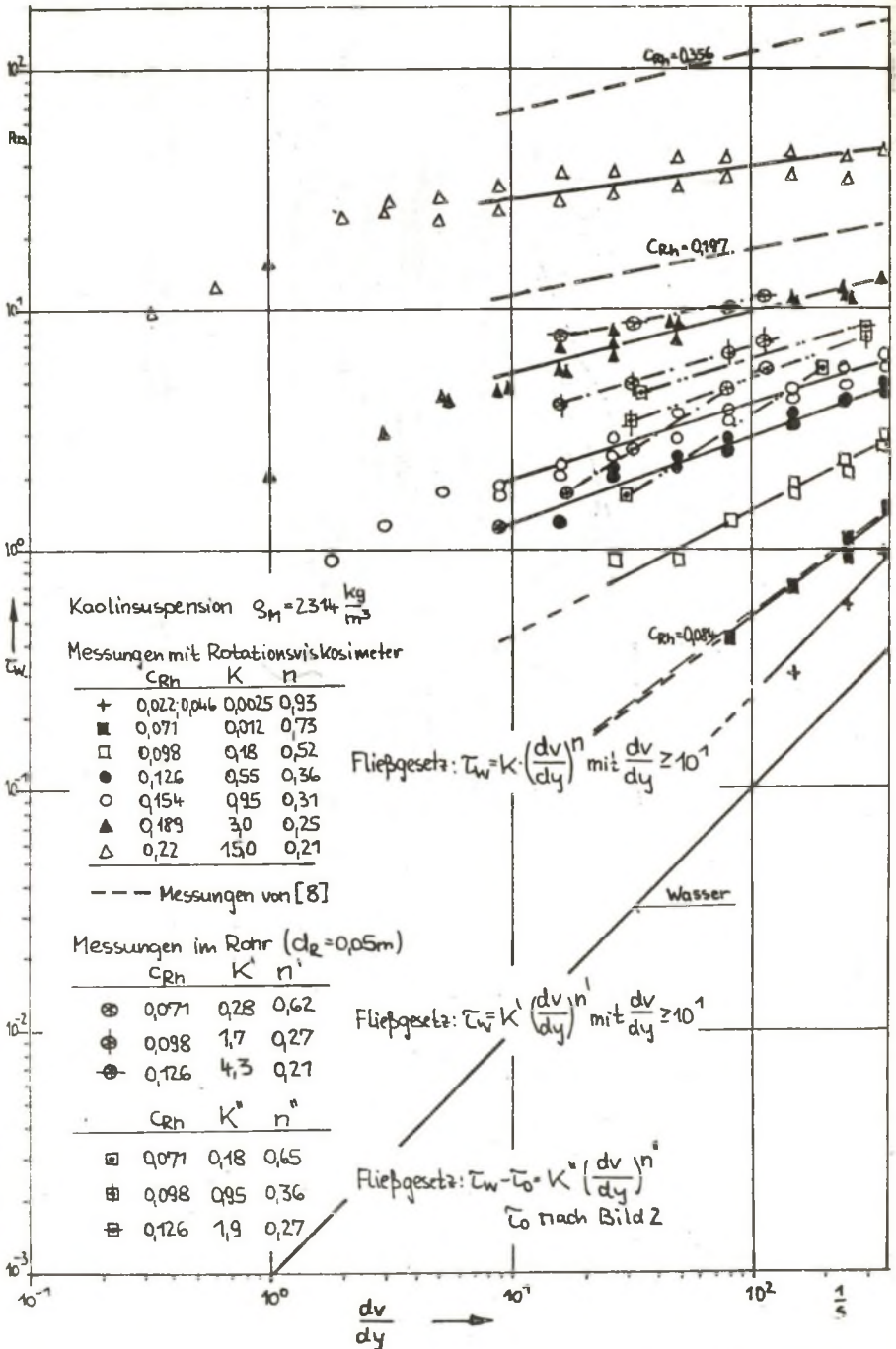


Bild 2: Fließkurven von Kaolinsuspensionen nach Messungen mittels Rotationsviskosimeter und im Rohr $d_R = 0,05\text{ m}$

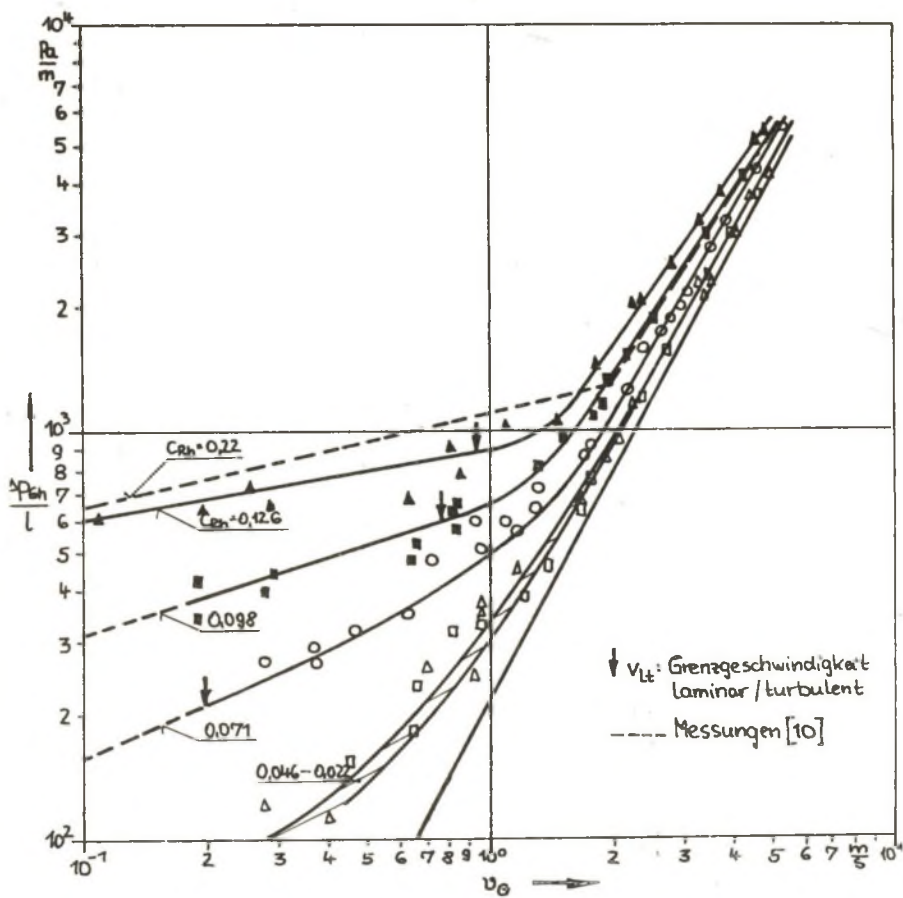


Bild 3: Gemessene Rohrleitungskennlinien bei Kaolinsuspensionen unterschiedlicher Konzentration c_{Rh} ($d_R = 0,05 \text{ m}$)

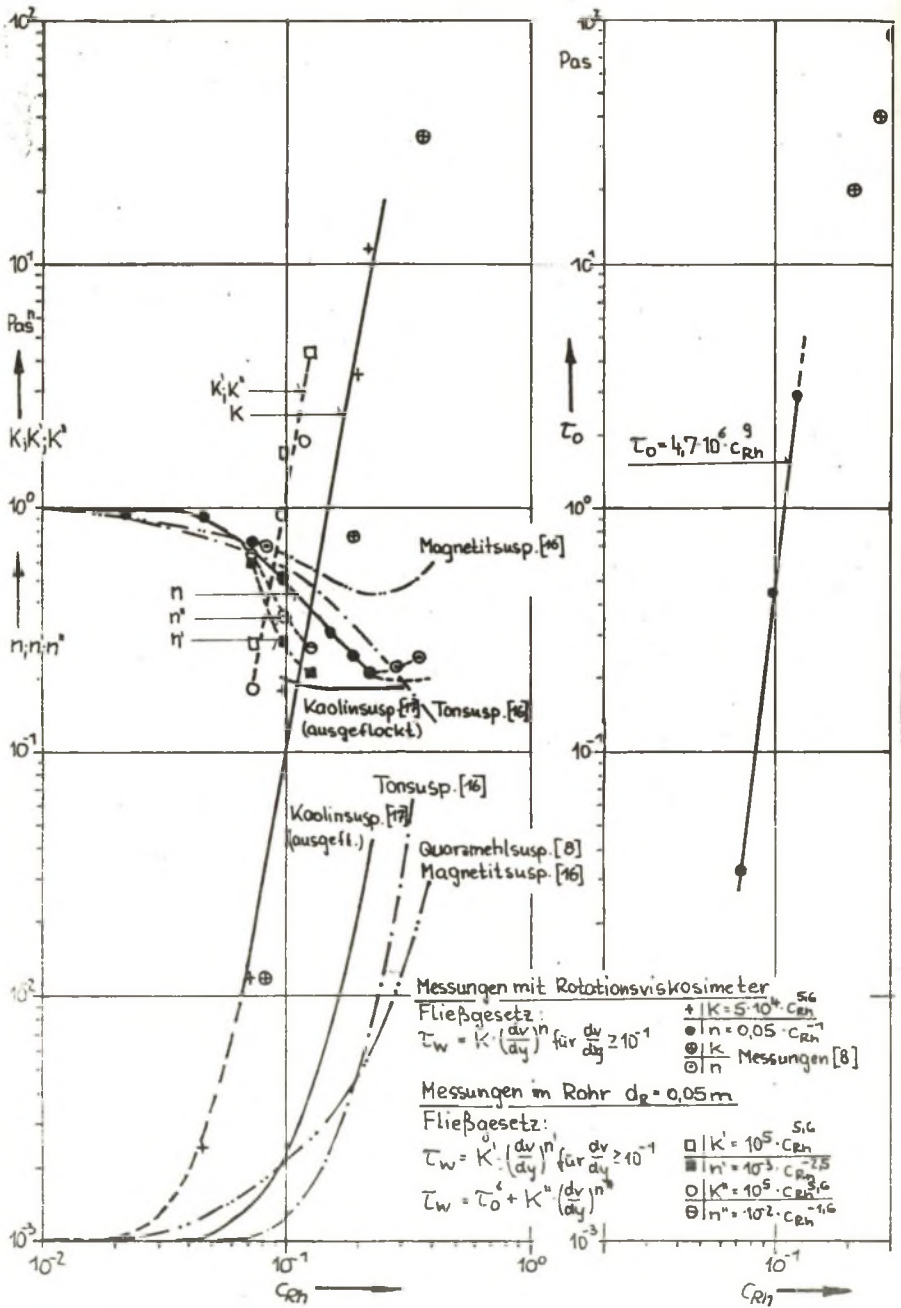


Bild 4: Fließparameter von Kaolinsuspensionen und anderer Suspensionen zum Vergleich

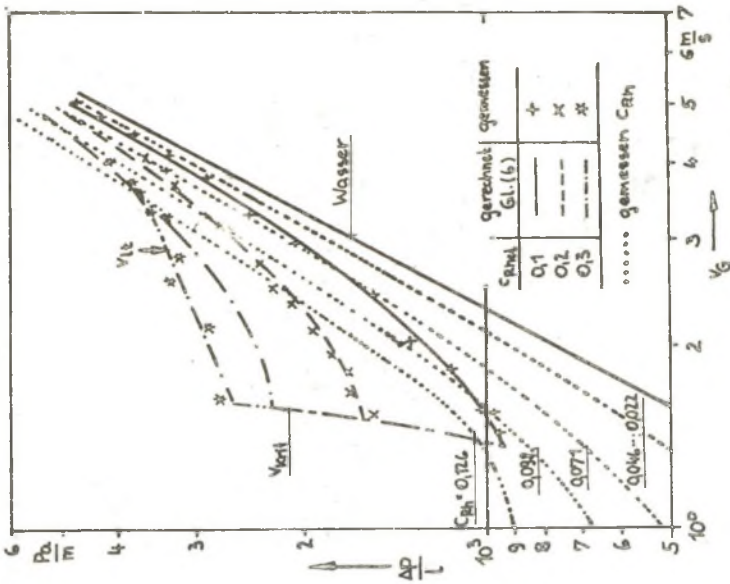


Bild 5: Gemessene Rohrleitungskennlinien für Sinksuspension, zum Vergleich solche von Kaolinsuspension

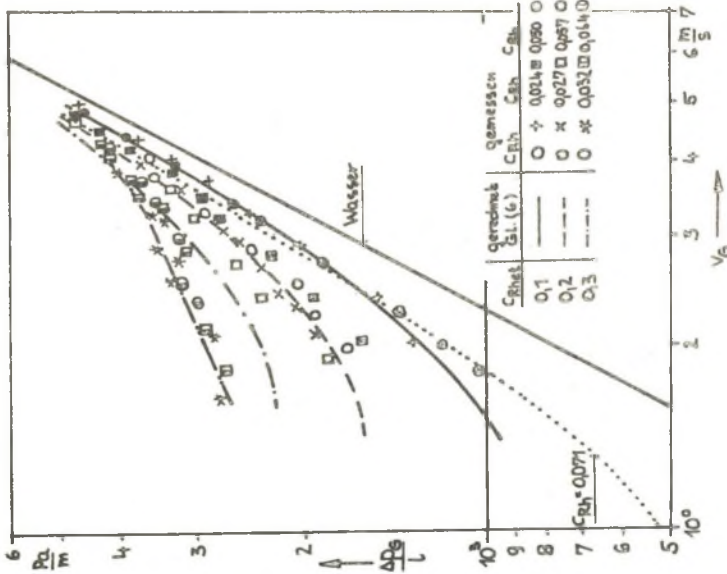


Bild 6.1: Gemessene Druckverluste von Suspensionen des komplexeren Systems Kaolin/Sand bei kleinen C_{Bh}

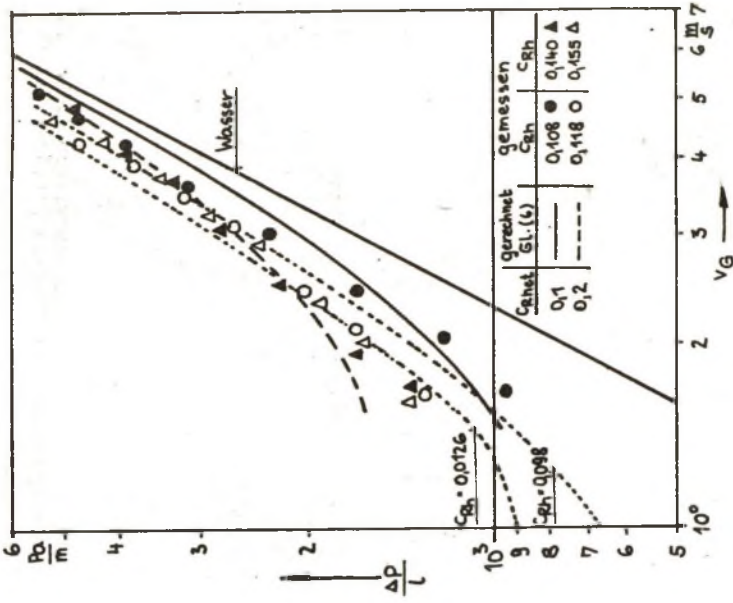


Bild 6.3: Gemessene Druckverluste von Suspensionen des komplexen Systems Kaolin/Sand bei hohen CRh

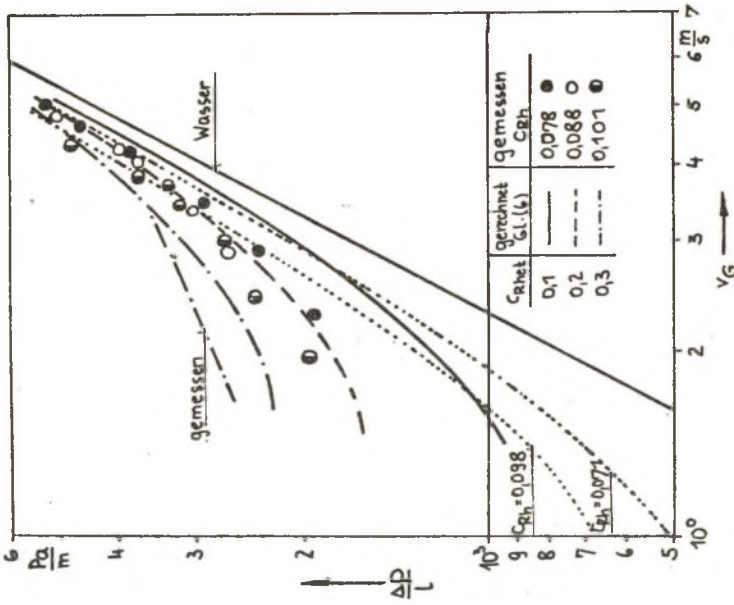


Bild 6.2: Gemessene Druckverluste von Suspensionen des komplexen Systems Kaolin/Sand bei CRh mit Beginn einer wirksamen Fließgrenze