

FLUIDISATIONSFÖRDERUNG VON ZEMENT

Von

L. PÁPAI und GY. SEBESTYÉN

Lehrstuhl für Wasserkraftmaschinen, Technische Universität Budapest

(Eingegangen am 19. Mai, 1965)

Vorgelegt von Prof. Dr. J. VARGA

Einleitung

In der Förderung feinkörnigen Massengutes hat sich die Fluidisationsförderung als eine verhältnismäßig saubere und moderne Förderungsmethode von gutem Wirkungsgrad und hoher Leistungsfähigkeit bewährt. Obwohl sie gegenüber den übrigen traditionellen Förderungsmethoden offenkundige Vorteile bietet, wird sie dennoch nur an wenigen Stellen, bloß vereinzelt angewendet. Daß sich diese neue Methode nicht schnell verbreitet hat, ist keineswegs auf wirtschaftliche Ursachen zurückzuführen. Aus dem Schrifttum geht hervor, daß gerade jene Versuchsdaten fehlen, die für die Projektierung derartiger Förderanlagen unentbehrlich sind, nämlich die wichtigeren Kennwerte der für die Förderung geeigneten Stoffe, die Dynamik der Förderung, das optimale Mischungsverhältnis von Fördermittel und Fördergut, die Änderungen in der Gemischkonzentration längs des Förderrohres usw. Die Ergebnisse der in den Forschungslaboratorien [1] errichteten Einrichtungen darf man lediglich als eine gute Annäherung an die wirklichen Betriebsverhältnisse ansehen, da die meisten derartigen Versuchseinrichtungen mit den ev. störenden Faktoren behaftet sind, die sich aus den unter den gegebenen Möglichkeiten ausgestalteten Rohrleitungen ergeben, wie z. B. viele Bogenelemente, häufiger Wechsel von waagrechten und senkrechten Strecken usw.

All dies läßt es überaus aktuell erscheinen, hier über die Ergebnisse von Messungen an der Fluidisationsförderanlage eines Industriebetriebes, über die aus diesen Meßergebnissen abgeleiteten Folgerungen und schließlich über ein für die Projektierung von Fluidisationsförderanlagen geeignetes Berechnungsverfahren zu berichten.

Pneumatische Förderung; Fluidisationsförderung

Die genaue Definition des Begriffes der Fluidisationsförderung motiviert den Vergleich dieser Fördermethode mit der pneumatischen Förderung.

Bei beiden Förderungsarten wird das Fördergut durch einen Luftstrom (Gasstrom) weitergetragen. Der Unterschied zwischen den beiden Förderungsarten liegt in ihrem Arbeitsprinzip.

Bei der *pneumatischen Förderung* erzeugt ein Lüfter einen Luftstrom von hoher Geschwindigkeit, der das ihm zugeführte körnige oder staubförmige Fördergut mit sich reißt. Die ein-

zelenen Stoffkörner bewegen sich hierbei in ziemlicher Entfernung voneinander mit relativ hoher Geschwindigkeit. Aus diesem Grunde bezeichnet man die pneumatische Förderung im Gegensatz zur Fluidisationsförderung als Förderart mit geringer Fördermenge.

Bei der *Fluidisationsförderung* mischt eine Luftfördermaschine das Fördergut mit Luft (Gas), es wird also ein dichtes Gemisch erzeugt, das flüssigkeitsähnliche Eigenschaften aufweist. Das Gemisch kann nicht nur in Rohrleitungen, sondern auch in offenen Kanälen mit kleinem Gefälle gefördert werden. In dem bei der Fluidisationsförderung entstehenden Fördergut-Luftgemisch beträgt der Anteil des Fördergutes ein Vielfaches desjenigen im Fördergut-Luftgemisch der pneumatischen Förderung, weshalb die Fluidisationsförderung als Dichtstromförderung bezeichnet wird.

Für die Fluidisationsförderung ist lediglich staubförmiges oder höchstens feinkörniges Material (von $d_0 < 5$ mm Korngröße) geeignet.

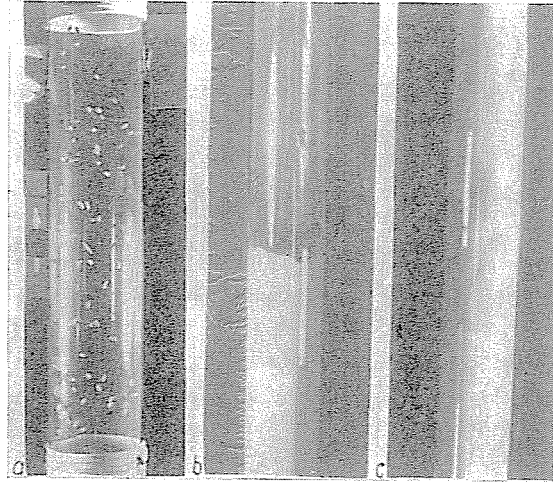


Abb. 1. a) Pneumatische Weizenförderung im Glasrohr. b) Fluidisationsförderung von Mehl; Beginn der Förderung. c) Fluidisationsförderung von Mehl

Die Differenz zwischen der pneumatischen und der Fluidisationsförderung geht aus Abb. 1 deutlich hervor. Sie zeigt die pneumatische Förderung von Weizen im Glasrohr (a), ferner die Fluidisations-Mehlförderung zu Beginn der Förderung (b) und während der kontinuierlichen Förderung (c). In diesem letzteren Fall füllt das dichte Stoff-Luftgemisch das Förderrohr völlig aus.

Auch in den Fördergeschwindigkeiten bestehen Unterschiede zwischen den beiden Förderarten. Während der Fluidisationsförderung beträgt sie $c_f = 1-6$ m/s, bei der pneumatischen Förderung dagegen liegt die Fördergeschwindigkeit um $c_p = 20-35$ m/s. Diese Tatsache weist gleichzeitig darauf hin, daß auch die Mischungsanteile von Fördergut und Fördermittel voneinander wesentlich abweichen. Pneumatische Fördereinrichtungen arbeiten mit einem Mischungsverhältnis von $\mu = 1-10$, die Fluidisationsförderanlagen hingegen mit einem solchen von $\mu = 50-150$.

Untersuchung der Betriebsverhältnisse von Fluidisationsanlagen für die Zementförderung

Ergebnisse hiesiger Versuche an Fluidisationsanlagen von Industriewerken haben an Hand theoretischer Überlegungen die Ausarbeitung eines Verfahrens zur rechnerischen Bestimmung der Betriebsverhältnisse und der technischen Kennwerte von Fluidisationsförderanlagen ermöglicht.

Die untersuchte Anlage dient dem Löschen von Zement aus Eisenbahnwagen und seiner Förderung in einen auf dem Fabrikgelände stehenden Bunker. Die Förderung beginnt hier mit der Fluidisierung, d. h. mit einer Auflockerung des Fördergutes durch Luft und endet mit seinem Absetzen in den Bunker über eine Rohrleitung.

Die hier folgenden Ergebnisse, ferner die Projektierungs- und Berechnungsmethoden können selbstverständlich außer auf Zement auch auf andere fluidisationsfähige Stoffe angewendet werden. Voraussetzung ist bloß, daß für das betreffende Fördergut die — eventuell durch Modellversuche ermittelten — Förderungskoeffizienten zur Verfügung stehen.

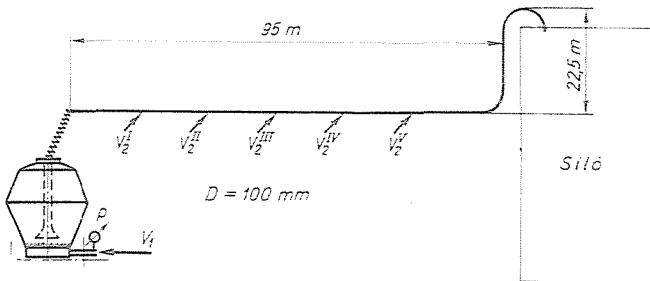


Abb. 2. Schema einer Fluidisationsförderanlage für Zement

Die jeweilige Förderaufgabe verlangt die Förderung einer bestimmten Fördermenge auf eine bestimmte Entfernung über eine gegebene Strecke. Der Ingenieur hat auf Grund der ihm vorliegenden orientierenden und determinierenden Unterlagen, an Hand von Meßdaten und theoretischen Erwägungen die Förderanlage samt ihren Energiemaschinen zu entwerfen. Den Gegenstand des Entwurfs bilden der Durchmesser der Rohrleitung, die Berechnung des in ihr auftretenden Druckgefälles und der in der Rohrleitung entstehenden Geschwindigkeitsverhältnisse, die Berechnung von Menge und Druck der erforderlichen Förderluft und schließlich die Wahl der Luftfördermaschinen.

Die Grundlage unserer Berechnungen bildet eine Anlage mit einem Förderrohrdurchmesser von $D = 100$ mm. Die untersuchte Einrichtung (ihre Skizze s. in Abb. 2) verfügt über eine 95 m lange horizontale und eine 22,5 m lange vertikale Rohrstrecke. Weiterhin werden, nach Fixierung der Meßergebnisse und der Folgerungen aus diesen die experimentell gewonnenen mit den rechnerisch ermittelten Ergebnissen verglichen.

Fluidisationsluft. Die Förderleistung wird wesentlich vom Feuchtigkeitsgehalt und vom Druck der Luft beeinflusst, die unter die sog. Fluidisations-schicht im Zementbehälter des Wagens eingeführt wird. Feuchtigkeit in der Luft führt zu Beginn zu Störungen, weil sie sich bei der Expansion niederschlägt; später verursacht sie mit erheblichen Mehrkosten verbundene Schäden.

weshalb dieser leistungsvermindernde Faktor durch Filter und Feuchtigkeitsabscheider ausgeschaltet werden muß. In den weiteren Ausführungen wird das Fördermittel als dunstfrei angenommen.

Den Höchstwert des Druckes der unter die Fluidisationsschicht eingeführten Luft bestimmt die zulässige Druckbelastung des Behälters. In der Regel handelt es sich um den Aufbau auf dem Spezial-Eisenbahnwagen, mit dem das Gut befördert wird. Dieser Höchstwert beträgt bei den üblichen Eisenbahnwagen $p_{\max} = 3$ atü.

Die Luft dringt durch die (für gewöhnlich aus Kunststoff, aus einem Textil- oder aus einem Eisengewebe bestehende) Fluidisationsschicht und

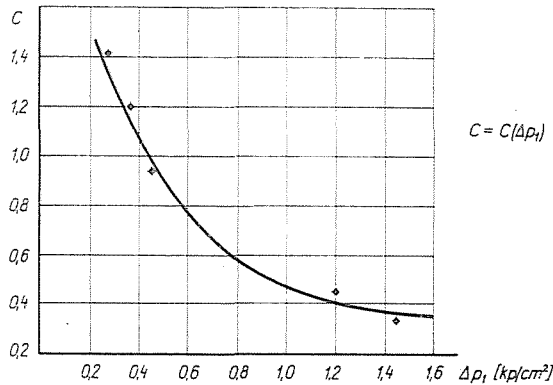


Abb. 3. Der für die Förderleistung charakteristische Faktor (C) in Abhängigkeit vom Widerstand (Δp_1) der Fluidisationsschicht

gelangt so mit dem Zement im Behälter in Berührung, lockert ihn auf und erzeugt in dieser Weise das Fluidum. Der Widerstand der luftdurchlässigen Schicht (Δp_1) hängt von vielen Faktoren ab. Ein großer Teil von ihnen (z. B. stark abgenützte Schicht, zusammengeklebte Zementstückchen auf der Schicht usw.) erhöht den Widerstand, ist also vom Standpunkt der Förderung als leistungsvermindernder Faktor zu berücksichtigen. Bei den Messungen bestand die Fluidisationsschicht aus einem Drahtgewebefilter, dessen Widerstand auch über das Maß der Fluidisierbarkeit Auskunft gibt.

Wenn $\Delta p_1 < 0,25$ at, ist der Behälter gut entleerbar. (Die Leistung der Förderanlage beträgt $Q_a > 28$ t/h),

bei $\Delta p_1 = 0,25 - 0,40$ at ist er gut entleerbar,

bei $\Delta p_1 = 0,40 - 0,60$ at ist die Entleerbarkeit mittelmäßig,

bei $\Delta p_1 > 0,60$ at spricht man von einem schlecht entleerbaren Behälter. ($Q_a < 10$ t/h; ungleichmäßige, schwankende Förderung. Die Druckwerte beziehen sich auf eine Luft $V \cong 500$ Nm³, von $\gamma = 3$ kp/m³ Wichte.)

Nach den Ergebnissen der Untersuchungen an der beschriebenen Werksanlage wird die Förderleistung vom Wert Δp_1 stark beeinflusst.

Zwischen der Fördermenge (Q_a [t/h]) und der durch die Fluidisations-
schicht hindurch zugeführten Luftmenge (V [m³/h]) kann die empirische
Beziehung

$$Q_a = C \cdot \sqrt{V} \text{ [t/h]} \quad (1)$$

für den Bereich $V = 100 \dots 500$ Nm³/h geschrieben werden.

Hierin ist C ein vom Widerstand der Fluidisationsschicht abhängiger
Faktor. Die auf das Drahtgewebefilter bezogene Funktion C (Δp_1) ist in Abb. 3,
die Funktion $Q_a(V)$ für den Wert $C = 1,3$ dagegen in Abb. 4 aufgetragen.
Die in diesen Abbildungen angegebenen Meßdaten sind auf Rohrlängen bis
120 m anwendbar.

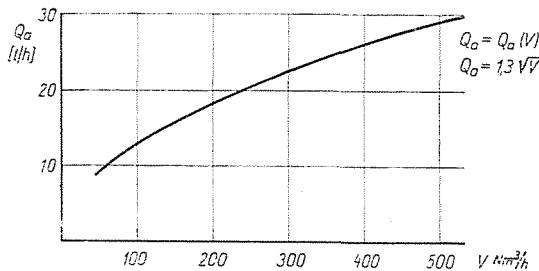


Abb. 4. Zusammenhang zwischen Förderleistung (Q_a) und der durch die Fluidisationsschicht
zugeführten Luftmenge (V)

In langen, horizontalen Fluidisations-Rohrleitungen äußert sich die Wir-
kung des Gravitationsfeldes in der Trennung des Gas-Luftgemisches. Diese
die Förderung beeinträchtigende Wirkung kann durch systematische Zufüh-
rung von Zusatzluft ausgeglichen werden. Die im Rohr befindliche Gemisch-
konzentration ändert sich nämlich stetig im senkrechten Querschnitt des
Rohres. In der Förderrichtung nähert sich das Fördergut kontinuierlich dem
Rohrboden, wo sich das Gemisch verdichtet und die Strömung verlangsamt;
dieser Umstand führt zur Erhöhung des Fördergutanteils im Gemisch, zu einer
weiteren Verlangsamung und zuletzt zur Ausbildung einer ganz langsam sich
fortbewegenden Materialschicht. Die Förderluft strömt eine Zeitlang im leeren
oberen Teil des Rohres, bald jedoch kommt es zur völligen Verstopfung der
Rohrleitung. Der Vorgang kann durch Zuführung von Zusatzluft an bestimm-
ten Stellen verhindert werden. Ihre Menge ist nach unseren Meßergebnissen
unabhängig von der Menge des Fördergutes, sie beträgt

$$V = 30 - 40 \text{ Nm}^3/\text{h je } 15 \text{ m Rohrlänge.}$$

(Mit anderen Worten, es genügt die Einschaltung einer Düse je 15 m Rohr-
länge.)

Mischungsverhältnis

Unter Mischungsverhältnis, unter Gewichtsanteilen der Mischung versteht man das Verhältnis der Fördermenge (Förderleistung) zum Gewicht der Förderluft:

$$\mu = Q_a / Q_l. \quad (2)$$

Dieses Verhältnis kennzeichnet die Güte der Fördereinrichtung und der Förderung im Luftstrom und damit auch deren Wirtschaftlichkeit. Der Wert dieses Verhältnisses beträgt bei der Fluidisationsförderung

$$\text{bei kurzer Förderlänge} \quad \mu_f = 50-150$$

$$\text{bei großer Entfernung} \quad \mu_f = 15-70$$

$$\text{bei pneumatischer Förderung} \quad \mu_p = 1-10$$

Nach unseren Versuchen ist bei gut entleerbaren Behältern $\mu_f = 50-70$, bei schlecht entleerbaren $\mu_f = 10-15$, d. h. die Förderung »verschlechtert« sich zu einer sehr guten pneumatischen Förderung.

Das Mischungsverhältnis wird infolge der Zufuhr von Zusatzluft geringer, sein Wert bewegt sich innerhalb eines Bereiches von $\mu' = 25-50$. Das Mischungsverhältnis (μ) ist nicht identisch mit dem im Rohr jeweils vorhandenen Anteil von Material- zu Luftgewicht (m), denn in einem untersuchten Querschnitt ist die durchschnittliche Materialgeschwindigkeit (c_a) kleiner als die durchschnittliche Luftgeschwindigkeit (c_l): $c_a < c_l$. Wegen des vorhandenen Slips

$$s = \frac{c_l - c_a}{c_l} \quad (3)$$

wachsen die Gewichtsanteile im Vergleich zu dem für die Verhältnisse beim Einspeisen charakteristischen Mischungsverhältnis auf

$$m = \frac{\mu}{1-s} \quad (4)$$

an.

Druckabfall in der Rohrleitung

Druckabfall im Leerlauf. Der Druckabfall infolge Rohrreibung kann bei einer Förderleistung von $Q_a = 0$ aus der Beziehung

$$\Delta p_0 = \lambda \frac{l}{D} \gamma_l \frac{c_l^2}{2g} \text{ [kp/m}^2\text{]} \quad (5)$$

berechnet werden. Hier ist λ die Reibungszahl. Ihr Wert beträgt nach unseren Messungen

$$\lambda = 0,022-0,025 \text{ für gerade Rohrstrecken,}$$

$$\lambda = 0,030-0,035 \text{ für Krümmer.}$$

Ferner bezeichnet

- l [m] die Rohrlänge,
- D [m] den Rohrdurchmesser,
- c_l [m/s] die Luftgeschwindigkeit,
- $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ die Schwerebeschleunigung,
- γ_l [kp/m³] die Luftwichte.

Die Luftgeschwindigkeit errechnet sich aus der Gleichung

$$c_l = \frac{V_l}{F}, \text{ [m/s]} \quad (6)$$

in der V_l [m³/s] die Luftmenge (Volumströmung),

$F = D^2 \pi/4$ [m²] die Querschnittsfläche des Förderrohres bedeutet.

Infolge der Expansion der strömenden Luft bleibt die Luftgeschwindigkeit in der Rohrleitung nicht konstant. Zweckmäßig wird man daher die Luftgeschwindigkeit statt aus der Volumströmung aus dem Gewicht der die Leitung in der Zeiteinheit durchströmenden Luft Q_l [kp/s] zu berechnen:

$$c_l = \frac{Q_l}{F \gamma_l} \text{ [m/s]}. \quad (7)$$

Die Luftwichte ist

$$\gamma_l = \gamma_n \frac{p}{p_0} \frac{T_0}{T}, \text{ [kp/m}^3\text{]} \quad (8)$$

worin

- $\gamma_n = 1,25 \text{ kp/m}^3$ die Luftwichte im (technischen) Normalzustand, d. h. bei einem Luftdruck p_0 [ata] und einer Lufttemperatur T_0 [K°],
- p [ata] den Druck an der untersuchten Stelle des Förderrohres,
- T [K°] die Temperatur an der untersuchten Stelle des Förderrohres bezeichnet.

Zum Druckabfall im Leerlauf kommt beim Beginn der Materialförderung noch der Überdruck der Materialförderung hinzu, der totale Druckabfall in der Rohrleitung ergibt sich also zu

$$\Delta p_{\text{Rohr}} = \Delta p_0 + \Delta p_a \quad \text{[kp/m}^2\text{]}. \quad (9)$$

Bei der Fluidisationsförderung ist der Druckabfall im Leerlauf (Δp_0) im allgemeinen erheblich geringer als der Überdruck der Materialförderung; sein Wert beträgt — nach der in Abb. 5 graphisch dargestellten Beziehung $\Delta p_0(V)$ — bei einer Luftmenge von $V = 700 \text{ m}^3/\text{h}$ $\Delta p_0 \approx 0,1 \text{ at}$, weshalb Δp_0 meistens vernachlässigt werden kann.

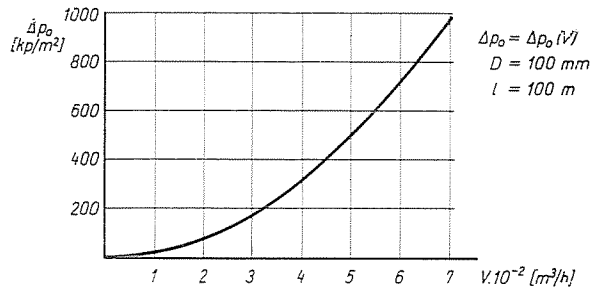


Abb. 5. Leerlaufdruckabfall in der Rohrleitung (Δp_0) in Abhängigkeit von der strömenden Luftmenge (\dot{V})

Entstehung der Druckabfälle während der Förderung

Zur Untersuchung der Entstehung des Druckabfalls muß man auf den Druckabfall zurückgreifen, der sich beim Fluidisationsvorgang ergibt. Die

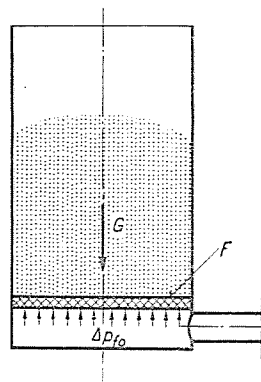


Abb. 6. Fluidisation

Abb. 6 zeigt ein staubartiges Material, das sich oberhalb der Fluidisierschicht im fluidisierten Zustand befindet. Zur Aufrechterhaltung des fluidisierten Zustandes ist — nach zahlreichen Versuchen [2], [3]— eine Druckdifferenz von

$$\Delta p_{f0} = \frac{G}{F} \text{ [kp/m}^2\text{]} \quad (10)$$

erforderlich. Hier bedeutet

G [kp] das Gewicht der Körnchen, die sich über der Fluidisationschicht befinden,

F [m²] die Querschnittsfläche des Fluidisationsrohres.

(Diese Druckdifferenz enthält natürlich den Widerstand der Fluidisationschicht nicht.) Für die Herstellung des Fluidisationszustandes benötigt man

lediglich jene Druckdifferenz, die die Körnchen in schwebendem Zustand hält. Infolge der kleinen Geschwindigkeit, die zur Fluidisation des feinkörnigen Materials erforderlich ist, ist der durch die Reibung zwischen fluidisierendem Gas und Rohrwand verursachte Druckabfall vernachlässigbar klein.

Für die vertikale Fluidisationsförderung wird ein Druckabfall benötigt der größer ist als Δp_{f0} . Zwecks Untersuchung der Entstehung dieses Druckes wurde das in Abb. 7 dargestellte Modell geprüft.

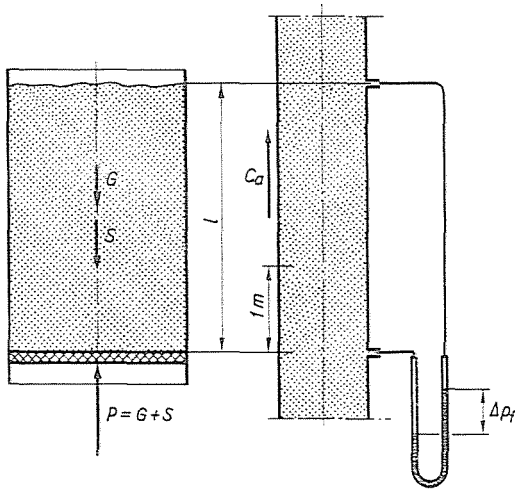


Abb. 7. Fluidisationsförderung und ihr Modell

Die vertikale Fluidisationsförderung kommt demnach in der Weise zustande, daß das G schwere Fördergut, das durch die Schicht in fluidisierten Zustand versetzt wurde, durch die mit der Geschwindigkeit v vor sich gehende Fortbewegung der fluidisierenden Schicht weitertransportiert wird. Bei der vertikalen Bewegung des Fördergutes wächst die Krafteinwirkung auf die Schicht. Nunmehr muß nicht nur das Gewicht G , sondern auch die Kraftwirkung S ausgeglichen werden, die durch die Reibung zwischen Körnern und Rohrwand und durch das Mischen entsteht. Nach den Versuchsergebnissen ist die Kraft S proportional dem Eigengewicht G , ($S = k_1 G$). Ebenso ist die zwischen Körnchen und Wand auftretende Reibung und auch die zum Mischen des G schweren Fördergutes erforderliche Kraft dem Eigengewicht G proportional. Der Druckabfall über den Schichten, der demnach für die Fluidisationsförderung erforderlich ist, beträgt

$$\Delta p_f = \frac{P}{F} = \frac{G + k_1 G}{F} = (1 + k_1) \frac{G}{F}$$

oder nach Einführung des Faktors der Fluidisationsförderung $1 + k_1 = k_f$

$$\Delta p_f = k_f \frac{G}{F} \quad [\text{kp/m}^2]. \quad (11)$$

Der Wert des in der Gleichung enthaltenen Faktors k_f der Fluidisationsförderung kann bei der vertikalen Förderung nur größer sein als 1.

Der Druckabfall Δp_f läßt sich auch mit den Kennwerten der Förderung ausdrücken, wenn man das sog. Metergewicht (q_a), d. h. das im $l_1 = 1$ m langen Rohr vorhandene Gewicht des Fördergutes, einführt:

$$q_a = \frac{Q_a}{c_a}, \quad [\text{kp/m}] \quad (12)$$

wenn

Q_a [kp/s] die Förderleistung

c_a [m/s] die Geschwindigkeit des Fördergutes, die Durchschnittsgeschwindigkeit der geförderten Körnchen.

Mit dem im l langen Rohr gleichzeitig vorhandenen Gewicht des Fördergutes $G = l q_a = l Q_a / c_a$ errechnet sich der für die Fluidisationsförderung erforderliche Druckabfall zu

$$\Delta p_f = k_f l \frac{Q_a}{c_a F} \quad [\text{kp/m}^2]. \quad (13)$$

Kennzeichnend für die Fluidisationsförderung ist im allgemeinen die geringe Fördergeschwindigkeit ($c_a = 1-6$ m/s). Sie wird von der kleinen Gasgeschwindigkeit erzeugt, deren Druckabfall im Leerlauf vernachlässigbar klein ist, weshalb der ganze Druckabfall im Förderrohr mit guter Näherung aus der Gleichung (13) errechnet werden kann.

Wenn der Durchschnittswert der Fördergeschwindigkeit eine gewisse (von den geförderten Körnchen abhängige, im allgemeinen $c_a > 5-6$ m/s betragende) Größe übersteigt, dann kommt es nicht zur sog. rein fluidisierten Förderung, vielmehr entsteht ein Übergang zwischen der fluidisierten und pneumatischen Förderung. (Ein Teil der Körnchen bewegt sich der fluidisierten, der andere Teil der pneumatischen Förderung entsprechend.) Unter diesen Umständen muß der Druckabfall wie derjenige in langen Rohrleitungen (s. weiter unten) berechnet werden, d. h. aus der Summe der Druckabfälle der Fluidisations- und der pneumatischen Förderung.

Der im horizontalen Fluidisationsförderungsrohr entstehende Druckabfall (Δp_{fv}) kann — nach den vorliegenden Meßergebnissen — ähnlich berechnet werden wie der Druckabfall im vertikalen Rohr, d. h. es ist

$$\Delta p_{fv} = k_{fv} l \frac{Q_a}{c_a F} \quad [\text{kp/m}^2]. \quad (14)$$

Der Unterschied besteht lediglich darin, daß der Faktor (k_{fv}) der horizontalen Fluidisationsförderung kleiner ist als jener der vertikalen Förderung (k_{ff}):

$$k_{fv} < k_{ff}.$$

Zur horizontalen Förderung reicht demnach eine geringere Druckdifferenz aus. In diesem Fall braucht nämlich der zur Förderung erforderliche Druckabfall das Eigengewicht des Fördergutes nicht auszugleichen.

In langen ($l > 10$ m) Fluidisations-Rohrleitungen wird der während der Förderung entstehende Druckabfall nicht der Rohrlänge proportional sein, die Beziehung (13) kann also nur bei Rohrlängen Anwendung finden, die in Abschnitte aufgeteilt sind. Diese Erscheinung läßt sich auf zwei Gründe zurückführen:

a) Der in langen Rohrleitungen auftretende Druckabfall ist so erheblich, daß die Expansion des Fördergases nicht vernachlässigt werden kann. Infolge der Expansion wächst im Vergleich zum Anfangszustand auch die Gasgeschwindigkeit (c_l), was auch eine Änderung der Fördergutgeschwindigkeit mit sich bringt. Die Berechnung des Druckabfalls in Rohrleitungen nach der Formel (13) ist auf Leitungslängen beschränkt, in denen der Wert c_a nahezu konstant bleibt.

b) In langen Rohrleitungen wird sich ein Teil des Fördergutes, unter der Einwirkung der expansionsbedingten Erhöhung der Gasgeschwindigkeit mit der Geschwindigkeit der pneumatischen Förderung bewegen. Die Förderung wird sich zum Teil in dichtem Strom (fluidisiert), zum Teil in dünnem Strom (pneumatisch) abspielen. Beim gleichzeitigen Abspielen beider Förderarten treten die Druckabfälle beider (der fluidisierten und der pneumatischen) Förderarten auf. Im Förderrohr muß daher mit ihrer Summe gerechnet werden.

Der bei der pneumatischen Förderung auftretende Druckabfall [4], [5] schreibt sich zu

$$\Delta p_p = k_p l \frac{Q_a c_a}{g F}, \quad [\text{kp/m}^2] \quad (15)$$

wenn k_p [l/m] den Verlustfaktor der pneumatischen Förderung bedeutet. Die Dimension l/m weist auf die Verminderung der Bewegungsenergie der geförderten Körnchen je Längeneinheit hin.

Der auftretende Druckabfall längs der langen Rohrleitung und seine Erläuterung ist aus Abb. 8 ersichtlich.

Die Gasgeschwindigkeit (c_l) und im Zusammenhang mit ihr die Geschwindigkeit des Fördergutes (c_a) wachsen infolge der Expansion längs der Rohrleitung an (Abb. 8a).

Der Druckabfall der Fluidisationsförderung je Längenmeter ($\Delta p_f/l$) oder die Ableitung des Druckabfalls längs der Röhlänge (dp_f/dl) nehmen ab [s. die Beziehung (13); c_a steht im Nenner].

Der Druckabfall je Längenmeter der pneumatischen Förderung ($\Delta p_p/l$) oder die Ableitung des Druckabfalls längs der Röhlänge (dp_p/dl) nehmen

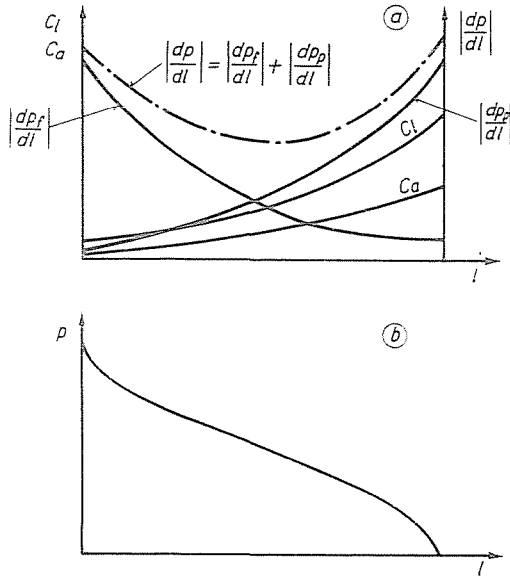


Abb. 8. Bei der Fluidisationsförderung an einer langen Röhlänge entlang: a) auftretende Geschwindigkeiten und Druckgradient, b) Änderung des Druckes (p) in Abhängigkeit von der Länge (l) des Förderrohres

längs des Rohres zu [s. die Beziehung (15); Δp_p ist proportional dem c_a]. Der Druckgradient längs des Rohres ist:

$$\frac{dp}{dl} = \frac{dp_f}{dl} + \frac{dp_p}{dl},$$

d. h. man erhält ihn als Summe der beiden Ableitungen (die graphische Addition s. Abb. 8a).

Der Druckabfall an der Röhlänge entlang verläuft demnach (s. Abb. 8b) am Anfang des Förderrohres steil, denn hier dominiert noch der Charakter der Fluidisationsströmung, während der Anteil der pneumatischen Förderung fast vernachlässigbar gering ist. Im weiteren Verlauf verflacht sich die Druckabfallkurve, um dann in der Nähe des Rohrendes erneut steil anzusteigen. In der Nähe des Rohrendes verstärkt sich infolge der höheren Gasgeschwindigkeit die pneumatische Förderung, hier findet sich daher im Zusammenhang mit der zunehmenden Gasgeschwindigkeit ein stetig wachsender Druckabfall.

Der hier beschriebene Charakter der Änderung von Drücken und Geschwindigkeiten erhellt auch aus der Abb. 9, die die Meßergebnisse von Friedrich [6] veranschaulicht. Friedrich hat in einem $l = 150$ m langen Rohr mit einem Durchmesser von $D = 36$ mm Kunststoff (Polyakrylnitril) gefördert. Im Verlauf der Förderung veränderte sich das Mischverhältnis von $\mu = 53$ (untere Kurve) bis $\mu = 9$ (obere Kurve).

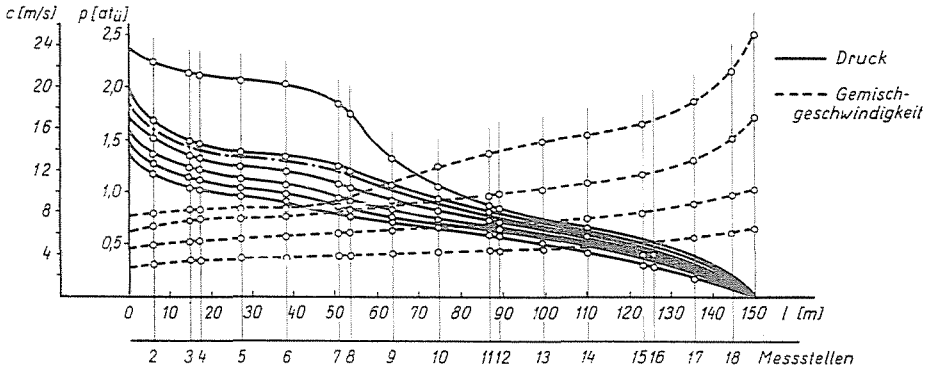


Abb. 9. Die Funktion $p = p(l)$ nach der Friedrichschen Messung

Die Abb. 10 zeigt die an der Rohrlänge entlang entstandenen Druckabfälle in der von uns untersuchten, und in Abb. 2 gezeigten Zementförderanlage. Die Druckabfälle zeigen, wie aus der Abbildung zu ersehen ist, einen den grundsätzlichen Erwägungen entsprechenden Verlauf.

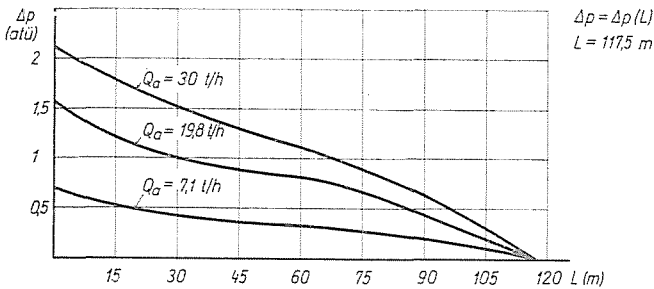


Abb. 10. Gemessene Werte des Druckabfalls (Δp) der Materialförderung in Abhängigkeit von der Länge (L) des Förderrohres bei verschiedenen Förderleistungen

Die Druckmessungen während der Zementförderung ergaben für den Faktor k folgende Werte:

für die horizontale Förderung:

bei fluidisierter Förderung $k_{fv} = 0,9 - 1,1$

bei pneumatischer Förderung $k_{pv} = 0,04 - 0,06/m$

für die vertikale Förderung:

bei fluidisierter Förderung $k_{ff} = 1,8 - 2,2$

bei pneumatischer Förderung $k_{pf} = 0,06 - 0,08/m$

Die genannten Faktoren werden aus dem gemessenen Druckabfall unter Annahme eines $c_a \approx c_l$ errechnet. Zur Zeit liegen noch keine Angaben über den Zusammenhang zwischen den bei der Fluidisationsförderung entstehenden Geschwindigkeiten vor.

Bei der Förderung in Krümmern kann man mit guter Annäherung mit den für die vertikale Förderung gültigen Werten rechnen.

Von den Grenzwerten der Faktoren sind die oberen die maßgebenden, wenn sich die Förderung infolge der Ablagerungen schwankend gestaltet; bei kontinuierlicher, gleichmäßiger Förderung können die niedrigeren Werte gesetzt werden

In den nachfolgenden Ausführungen wird anhand eines Zahlenbeispiels der Berechnungsgang für die Bestimmung der Betriebsverhältnisse einer Fluidisationsförderung umrissen.

Zahlenbeispiel für die Berechnung des Druckabfalls

Ein Güterwagen für Zementbeförderung ist mit einer Förderleistung von $Q_a = 30 \text{ t/h} = 8,3 \text{ kg/s}$ zu entladen. Das Förderrohr mit dem Durchmesser $D = 100 \text{ mm}$, geht nach einer $l_e = 90 \text{ m}$ langen horizontalen Strecke in eine $l_f = 30 \text{ m}$ lange vertikale Strecke über (die Länge der Krümmer wurde in das vertikale Maß einbezogen).

Der horizontalen Strecke wird zur Vermeidung von Ablagerungen durch 5 Düsen eine Luftmenge $V_{l1} = 200 \text{ Nm}^3/\text{h}$ zugeführt. Die Düsen sind in Abständen von 15, 30, 45, 60 und 75 m vom Rohranfang gerechnet eingebaut. Durch jede Düse gelangt eine nahezu gleiche Luftmenge von je $40 \text{ Nm}^3/\text{h}$ in das Rohr.

Für die Luftmenge, die in den Güterwagen eingeleitet wird, erhält man auf Grund der Beziehung (1) und der Abb. 3, bei der Fördermenge $Q_a = 30 \text{ t/h}$ und bei $\Delta p_1 = 0,25$ at den Wert $V_{l2} = 430 \text{ Nm}^3/\text{h}$.

Die Druckänderungen längs des Rohres werden an Hand der Beziehungen (7), (8), (14) und (15) durch Aufteilung in Strecken von je $l_i = 15 \text{ m}$ berechnet. Die Werte von k werden in der horizontalen Strecke zu $k_{fv} = 1,0$; $k_{pv} = 0,04/m$, in der vertikalen Strecke zu $k_{ff} = 2,0$; $k_{pf} = 0,07/m$ gewählt. Die Geschwindigkeit des Förderergutes sei der Luftgeschwindigkeit gleich gesetzt. Der Druckabfall im Leerlauf kann vernachlässigt bleiben.

Es empfiehlt sich, die Rechnung in Tabellenform durchzuführen (s. Tabelle 1), und mit der letzten Rohrstrecke zu beginnen, da man dort den Druck am Rohrende ($p_v = 1 \text{ ata}$, d. h. den atmosphärischen Druck) bereits kennt.

In der Tabelle bezeichnet

l_i [m] den Abstand der Rohrstreckenenden vom Ende des Förderrohres.

Q_i [kp/h] das Gewicht der in der Rohrstrecke strömenden Luft,

p_v [ata] den absoluten Druck am Ende der untersuchten Rohrstrecke,

γ_l [kp/m³] die Luftwichte in der Rohrstrecke (kann in der Rohrstrecke als konstant angenommen werden),

c_l [m/s] die Luftgeschwindigkeit in der Rohrstrecke,

Δp_f ; Δp_p [kp/m²] die Anteile des Druckgefälles der Materialförderung,

$\Delta p_a = \Delta p_f + \Delta p_p$ den Überdruck der Materialförderung.

Im Förderrohr beträgt daher der Druckabfall $\Delta p_{\text{Rohr}} = 2,35 \text{ at}$; den berechneten Druckabfall längs des Rohres zeigt die Abb. 11.

In diesem Zahlenbeispiel weist das Förderrohr annähernd die gleichen Abmessungen auf, wie das der Förderanlage in der Betonelementenfabrik in Zsolca, und auch die Förderleistung und die Luftmengen stimmen mit denen eines untersuchten Betriebszustandes überein (vgl. Abb. 10 und 11).

Tabelle I

Lfd. Nr.	m l_t	kp/h \dot{Q}_t	ata p_v	kp/m ² γ_t	m/s c_t	kp/m ² Δp_l	kp/m ² Δp_p	kp/m ² Δp_a
1	0— 15	790	1,000	1,25	22,4	1430	2620	4050
2	15— 30	790	1,405	1,78	16,0	2000	1800	3800
3	30— 45	790	1,785	2,23	12,5	1280	800	2080
4	45— 60	740	1,993	2,5	10,5	1520	670	2190
5	60— 75	690	2,212	2,76	8,9	1800	570	2370
6	75— 90	640	2,449	3,06	7,5	2140	480	2620
7	90—105	590	2,711	3,4	6,2	2600	390	2990
8	105—120	540	3,010	3,75	5,15	3100	330	3430
3,353 ata = 2,353 atü								23530 kp/m ² = = 2,353 at

Den Druckunterschied in einem für die Entladung geeigneten Kompressor erhält man, indem man den Wert Δp_{Rohr} , den vollen Druckabfall (Δp_2) im Transportbehälter und den Druckabfall (Δp_3) in der zum Behälter führenden Rohrleitung addiert:

$$\Delta p_{\text{Komp}} = \Delta p_{\text{Rohr}} + \Delta p_2 + \Delta p_3.$$

Nach den Messungen beträgt bei einem betriebsmäßig guten Wagen $\Delta p_2 = 0,5$ at, der Rohrleitungswiderstand hingegen $\Delta p_3 = 0,05$ at. Der Luftdruckanstieg errechnet sich demnach für einen Kompressor, der den Daten des Beispiels entspricht, zu

$$\Delta p_{\text{Komp}} = 2,35 + 0,5 + 0,05 = 2,9 \text{ at.}$$

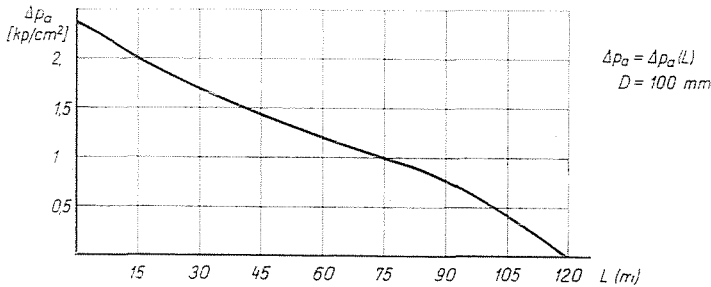


Abb. 11. Berechnete Werte des Druckabfalls (Δp_a) der Materialförderung in Abhängigkeit von der Länge (L) des Förderrohres

Energetischer Vergleich zwischen der pneumatischen und der Fluidisationsförderung

Der energetische Vergleich erfaßt lediglich die Arbeit des Fördermediums in der Fördereinrichtung. Im Einklang mit den bisherigen Darlegungen sei die Fördermenge $G_a = 30$ t, der Durchmesser der Rohrleitung $D = 100$ mm.

a) Bei der Fluidisationsförderung beträgt die Förderluftmenge (mit den oben gebrauchten Bezeichnungen) $V = 630 \text{ Nm}^3/\text{h}$ (hiervon entfallen $200 \text{ Nm}^3/\text{h}$ auf die durch Düsen zugeführte Zusatzluft). Das Mischungsverhältnis, bezogen auf die ganze Luftmenge, ist $\mu' = 35$.

Die Förderleistung errechnet sich zu

$$Q_a = \mu' Q_l,$$

oder zahlenmäßig zu

$$Q_a = 27,5 \text{ t/h}.$$

Die Fluidisations-Förderzeit beträgt:

$$t_f = \frac{G_a}{Q_a} = \frac{30 \text{ t}}{27,5 \text{ t/h}} = 1,09 \text{ h}$$

Die Leistung der Förderluft (im Interesse der einfachen Berechnung wird eine isothermische Zustandsänderung angenommen, die die tatsächlichen Verhältnisse gut annähert) beträgt:

$$N = \frac{V_l p_0 \ln x}{102} = 23,3 \text{ kW}.$$

Setzt man den Druckunterschied in der Förderanlage mit $\Delta p = 2,9 \text{ at}$ an (was einem Kompressionsverhältnis $x = 3,9$ entspricht), so ergibt sich die durch die Luft verrichtete Arbeit zu

$$W = N \cdot t_f = 25,4 \text{ kWh}.$$

b) Bei der pneumatischen Förderung bei $\mu = 4$ und bei einer Luftgeschwindigkeit $c_l = 30 \text{ m/s}$ beträgt die Luftmenge $Q_l = 1050 \text{ kp/h}$. Die Förderleistung ist dann

$$Q_a = \mu Q_l = 4 \cdot 1,05 = 4,2 \text{ t/h}$$

und hieraus die Förderzeit

$$t_p = \frac{G_a}{Q_a} = \frac{30 \text{ t}}{4,2 \text{ t/h}} = 7,15 \text{ h}.$$

Die Werte des Druckabfalls (unter Weglassung der Details der Berechnungen sind nur die Ergebnisse angegeben) sind:

1. der Druckabfall im Leerlauf in der bis zum Zyklon reichenden Rohrstrecke annähernd:

$$\Delta p'_1 = 2000 \text{ kp/m}^2,$$

2. der zur Beschleunigung des Fördergutes erforderliche Druckabfall:

$$\Delta p'_2 = 540 \text{ kp/m}^2,$$

3. der Druckabfall auf der horizontalen Strecke ($l_v = 90 \text{ m}$) bei gleichmäßiger Förderung:

$$\Delta p'_v = 2300 \text{ kp/m}^2,$$

auf der vertikalen Strecke ($l_f = 30 \text{ m}$) hingegen während der Förderung:

$$\Delta p'_f = 1100 \text{ kp/m}^2.$$

4. Andere zusätzliche Widerstände (Filter usw.)

$$\Delta p'_4 = 560 \text{ kp/m}^2.$$

Die Summe der Druckabfälle beträgt:

$$\Sigma \Delta p_p = 6500 \text{ kp/m}^2$$

und die Luftleistung

$$N = \frac{V_i p_0 \ln x}{102} = \frac{0,235 \text{ Nm}^3/\text{s} \cdot 10000 \text{ kp/m}^2 \cdot \ln 1,65}{102} = 11,6 \text{ kW}.$$

Die Arbeit des Fördermediums beträgt

$$W = N t_p = 11,6 \text{ kW} \cdot 7,15 \text{ h} = 83 \text{ kWh}.$$

(In der Berechnung der Arbeiten blieb der Wirkungsgrad des zur Herstellung der arbeitsfähigen Luft erforderlichen Kompressors unberücksichtigt!)

Die Wirtschaftlichkeit der pneumatischen Förderung bleibt — bei einer gegebenen Anlage — weit hinter derjenigen der Fluidisationsförderung zurück. Eine Änderung der Abmessungen der Anlage verbessert natürlich die früheren Förderverhältnisse, sie erhöht jedoch die Amortisationskosten erheblich. Auch bei einer gegebenen Anlage besteht zwischen den Abnutzungsfaktoren der Förderleitungen, bezogen auf die Mengen des Fördergutes, ein wesentlicher Unterschied zugunsten der Fluidisationsförderung.

Folgerungen

1. Die gute Übereinstimmung zwischen den Meßergebnissen aus Versuchen an Fluidisations-Förderanlagen in der Industrie und den Berechnungsverfahren bestärkt die frühere Annahme, daß sich die Strömungsverhältnisse in Fluidisations-Förderanlagen gut verfolgen und voraus berechnen lassen.

2. Die Ergebnisse von Untersuchungen der Betriebsverhältnisse der Fluidisationsförderung lassen erkennen, daß diese sowohl leistungsmäßig als auch wirtschaftlich vorteilhafter ist als die pneumatische Förderung.

Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit beschreibt die Ergebnisse von Messungen, die an Werksanlagen für die Fluidisationsförderung von Zement durchgeführt wurden, und gibt die Werte an, die sich für die Faktoren der Fluidisationsförderung ergeben haben. Die Verfasser stellen fest, daß die Fluidisationsförderung von Zement auf große Entfernungen so zu handhaben ist wie eine kombinierte Fluidisations- und pneumatische Förderung. Anhand der Meßergebnisse haben sie ein Berechnungsverfahren für die Bestimmung der Hauptdaten der unter bestimmten Bedingungen arbeitenden Fluidisationsförderanlage ausgearbeitet. Auf Grund des Berechnungsverfahrens wurde ein Zahlenbeispiel gegeben, dessen Endergebnis eine gute Übereinstimmung mit den Versuchsergebnissen aufweist. Die Verfasser stellen fest, daß sich die Strömungsverhältnisse in der Fluidisationsförderanlage gut verfolgen lassen.

Aus einem Vergleich zwischen Fluidisations- und pneumatischer Förderung geht hervor, daß die Fluidisationsförderung sowohl leistungsmäßig als auch wirtschaftlich vorteilhafter ist.

Schrifttum

1. PAL'CEW, W. S.—MALIS, A. J.—KRUGLOW, A. N.: Aerosoltransport muki, Leningrad, 1960.
2. BLICKLE, T.: Fluidisation. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1962.
3. LEVA, M.: Fluidisation. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1963.
4. PATTANTYUS, Á. G.: Pneumatic conveying, Acta Technica VIII, (1954). 129—177.
5. PÁPAI, L.: Pneumatikus gabonaszállítás. (Pneumatische Getreideförderung) MTA. Műszaki Oszt. Közl. XII, (1954). 319—363.
6. FRIEDRICH, W.: Eigenschaften und Förderarten von Stärkeprodukten. Die Stärke, 10, (1962).
7. BÉLAFALVI, J.: Porok és szemcsés anyagok fluidizációs szállítása. (Fluidisationsförderung von staubartigem und körnigem Material) Élelmezési ipar. XV, (1961).
8. PÉNZES, L.: Légnymásos anyagszállítás. (Pneumatische Materialförderung) Malomipari és terményforgalom. XI, (1964).

Dr. László PÁPAI	}	Budapest XI., Sztoczek u. 2—4. Ungarn.
Dr. Gyula SEBESTYÉN		