

Grundsätzliche Untersuchungen über die Phänomene im Blasversatzrohr

Von

Einosuke MIKUMO und Jun-ichi KOKADO

Abteilung der Bergbaukunde

(Eingegangen am 15. Nov. 1956)

Inhaltsangabe

Da die Berechnungsmethode des Druckabfalls bei der Körperförderung im Blasversatzverfahren bis jetzt nicht festgestellt ist, haben die bereits vorliegenden Experimentalresultate meistens keine Allgemeingültigkeit. Also bemühten wir uns um die Feststellung einer Berechnungsmethode, die so einfach wie möglich ist und mit der man zugleich eine praktisch genügende Genauigkeit erzielen kann.

Zuerst untersuchten wir den Bewegungszustand des einzelnen Körpers im Leitungsrohr, unter der Annahme, dass der Körper immer über den Boden des waagerechten oder geneigten Rohrs gleitend gefördert wird.

Zweitens behandelten wir die analytische Untersuchung über die Feststellung der bei der Körperförderung den Druckabfall ergebenden Berechnungsmethode auf Grund der obigen Untersuchungsergebnisse, und haben bestätigt, dass die Berechnungs- und Experimentalresultate eine gute Deckung zeigen. Dabei nahmen wir an, dass der Bewegungszustand jedes Körpers der Rohrlänge entlang während der Gruppenförderung mit demjenigen des einzelnen Körpers dasselbe ist, dass die Körpergruppe über die ganze Strecke des Leitungsrohrs zeitlich gleichmässig verbreitet und auch die Körpergeschwindigkeit am Auslass des Krummers gleich Null ist.

1. Einleitung

Untersuchungen über den Bewegungszustand des Materials im Leitungsrohr und ferner über das Verhältnis zwischen der Leitungsstrecke, der Blastleistung, dem Luftverbrauch und dem Druckabfall sind eine grundsätzliche Voraussetzung für die Anwendung des Blasversatzverfahrens. Deshalb haben bereits einige Wissenschaftler experimentelle Untersuchungen hierüber angestellt. Im folgenden seien zur Nachprüfung einige Beispiele von denselben angeführt.

Vor allem kommt die 1924 veröffentlichte Untersuchung von H. Gasterstädt in Betracht¹⁾. Sie ist die erste, die betreffs der pneumatischen Förderung von Weizen, die Bewegung des einzelnen Körpers im Leitungsrohr, das Verhältnis zwischen dem zur Förderung der Körpergruppe nötigen Druckabfall und der Blasleistung, und sonstige Bedingungen mit experimenteller Ausführlichkeit und systematischer Folgerichtigkeit behandelt hat. Die Gasterstädsche Experimentalgleichung ist das berühmt gewordene Ergebnis seiner Experimente. Eine Untersuchung über den Fall, in dem das Förderungsmaterial mit grossem spezifischen Gewicht und ziemlicher Körpergrösse verwendet wird, wurde 1933 von Deuschl angestellt²⁾. Dabei war seine Hauptfrage, wie sich Rohrlänge und Luftverbrauch zu der Blasleistung verhalten. Das Verhältnis zwischen diesen beiden Bedingungen und dem Druckabfall, die Schwebegeschwindigkeit des Förderungsmaterials und dergleichen hat er ebenfalls in Frage gezogen und damit experimentiert. Dann machte Carl Albert³⁾ 1951 mit besonders eingerichteten, praktischen Anlagen umfangreiche Experimente und beschrieb eine Methode, nach der man die zur Förderung einer bestimmten Körpergruppe nötige, minimale Luftmenge analytisch zu finden vermag. Von der Richtigkeit dieser Methode sind wir aber noch nicht überzeugt, da wir in seiner Analyse einige fragliche Punkte bemerkten. Georg Peter⁴⁾, der auch umfassende Experimente mit praktischen Anlagen angestellt und nach dem Verhältnis geforscht hat, in dem Blasleistung, Luftverbrauch und Druckabfall zueinander stehen, erklärt, dass die Berechnungsmethode des Druckverlustes ein bis jetzt noch nicht gelöstes, für die künftige Untersuchung wichtiges Problem darstellt.

In welchem Verhältnis Rohrlänge, Luftverbrauch, Blasleistung, Druckabfall und dgl. zueinander stehen, ist also für das betreffende Forschungsgebiet die Hauptfrage. Die Experimentalresultate mehrerer sich mit dieser beschäftigenden Forscher besitzen aber wegen fehlender analytischer Behandlung meistens keine Allgemeingültigkeit.

Angesichts dieser Situation machten die Verfasser die Feststellung der Berechnungsmethode des Druckabfalls bei der Körperförderung zum Hauptgegenstand dieser unserer Abhandlung. Da die näheren Umstände dabei aber zu kompliziert sind, um eine Untersuchung mit strenger Analyse durchzuführen, bemühten wir uns um die Aufstellung einer Berechnungsmethode des Druckabfalls bei der Körperförderung, die so einfach wie möglich ist und mit der man zugleich praktisch eine genügende Genauigkeit erzielen kann.

2. Der Bewegungszustand des einzelnen Körpers im Leitungsrohr.

2.1. Die den Bewegungszustand des einzelnen Körpers im geradlinigen Leitungsrohr darstellende Gleichung.

Wenn der Körper im geradlinigen Leitungsrohr kraft des Luftstroms gefördert wird, lässt sich sein Bewegungszustand, in drei Hauptklassen eingeteilt, betrachten.

- i) Der Körper wird meistens im Luftstrom schwebend gefördert.
- ii) Der Körper wird immer über den Boden des waagerechten oder geneigten Rohres gleitend gefördert.
- iii) Der Körper wird im Rohr immer springend gefördert.

Wir brauchen den Zustand (i), der meistens im senkrechten Leitungsrohr eintritt, nicht zu analysieren, denn dieses Analyseresultat kann man mittels desjenigen des Zustands (ii) erhalten. Die Analyseresultate der Zustände (ii) und (iii) entsprechen, wie das Modellexperiment erwiesen hat, beide im gleichen Grade dem Experimentalresultat⁵⁾. In der folgenden Analyse wird also das Resultat betreffs des Zustands (ii), bei dem die Berechnung erleichtert ist, benutzt.

In der Annahme, dass die Luftgeschwindigkeit u (m/sek) bei bleibendem Durchschnitt des Leitungsrohrs konstant ist und dass gleich dem Quotienten die Luftstrommenge Q_L (m³/sek) bei dem Querschnitt F (m²) dividiert ist, erhalten wir die nachstehende Bewegungsgleichung des Körpers. In dieser bedeutet G (kg) das Gewicht des einzelnen Körpers, g (m/sek²) die Fallbeschleunigung, v (m/sek) die Körpergeschwindigkeit, C die Widerstandszahl, S (m²) den Projektionsflächenraum gegen die Bewegungsrichtung, γ_L (kg/m³) das spezifische Gewicht der Luft, μ den Reibungskoeffizienten zwischen dem Körper und Rohrboden im Bewegungszustand, t (sek) die Zeit und θ den Winkel des Leitungsrohrs gegen die Waagerechte.

$$\frac{G}{g} \frac{dv}{dt} = \frac{C \cdot S \cdot \gamma_L}{2g} (u-v)^2 \mp G(\mu \cos \theta + \sin \theta). \quad (1)$$

Das Zeichen (−) auf der rechten Seite bedeutet die Richtung nach oben, das Zeichen (+) diejenige nach unten. In obiger Gleichung sind G und g konstant, wogegen C , S , u , γ_L , μ sich je nach der Körpergeschwindigkeit, dem Bewegungszustand des Körpers oder der Stellung der Achsenrichtung des Leitungsrohrs verändern. Genau genommen, muss die Gleichung (1) in Rücksicht auf diese Veränderungen der Werte aufgelöst werden. Da ein solches Verfahren aber grosse Schwierigkeiten macht, haben die Verfasser durch folgende Voraussetzung die Gleichung vereinfacht.

Zuerst nehmen wir an, dass $S = \pi d^2/4$, wo wir mit d den reduzierten Durchmesser des Körpers bezeichnen, d.h. den Durchmesser der Kugel, die dasselbe Gewicht und dieselbe Dichtigkeit wie der betreffende Körper hat. Der Wert μ

beträgt im allgemeinen etwa 50-80% des statischen Reibungskoeffizienten. Wir betrachten den Wert μ als konstant, unter der Annahme, dass seine durch die Geschwindigkeit bedingte Veränderungsmenge nicht beträchtlich sei. C bedeutet im allgemeinen die Funktion der Reynoldsschen Zahl Re . Die Kugel betreffend hat man schon seit langem Untersuchungen angestellt, das Resultat kann mit

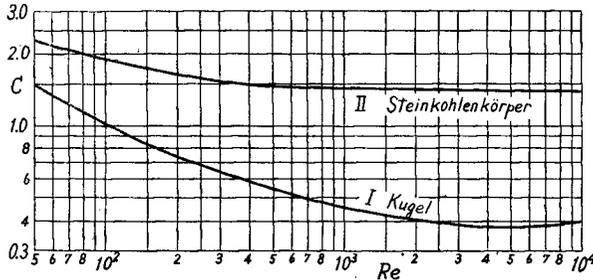


Abb. 1 Der Widerstandszahl C in Abhängigkeit von der Reynoldsschen Zahl Re für Kugel und Steinkohlenkörper.

Kurve I in Abb. 1 dargestellt werden. Der unregelmässige Körper jedoch, der Gegenstand hier unserer Arbeit, wurde noch erst wenig untersucht. Das Experimentalresultat, das Kurve II in Abb. 1 zeigt, haben wir mittels des Steinkohlenkörpers erhalten. Innerhalb der Grenzen: $50 < Re < 7500$

wurde es gewonnen, und wir fahren in unserer Berechnung in der Annahme, dass der Wert C konstant ist, fort. Insofern $Re \geq 300$, darf er nämlich in Beziehung auf Re fast als konstant angesehen werden, und das hier in Frage stehende Re hält sich ebenfalls innerhalb dieser Grenze. Der wert γ_L dürfte auch die ganze Strecke des Rohrs entlang konstant sein, ausgenommen der Fall, wo die Strömungsgeschwindigkeitsveränderungen, die im Leitungsrohr zwischen Einlass und Auslass eintreten, wegen grosser Länge des Rohrs nicht ausser Acht zu lassen sind.

Wenn wir nunmehr Gleichung (1) integrieren und $v = v_0$ bei $t = 0$ setzen, bekommen wir

$$v = u \mp \frac{B}{A} \frac{e^{2ABt} + K}{e^{2ABt} - K} \quad (2)$$

Wenn wir die Strecke der Rohrachsenrichtung mit l bezeichnen und diese Gleichung integrieren und $l = l_0$ bei $t = 0$ setzen, erhalten wir

$$l = ut + l_0 \mp \frac{1}{A^2} \left\{ \ln \frac{e^{2ABt} - K}{1 - K} - ABt \right\}, \quad (3)$$

worin

$$A^2 = C \cdot S \cdot \gamma_L / 2G, \quad B^2 = g(\mu \cos \theta + \sin \theta) \quad \text{und} \quad K = \{A(u - v_0) - B\} / \{A(u - v_0) + B\}.$$

Wenn wir die Körpergeschwindigkeit des Zustands $t = \infty$ in Gleichung (2) mit v_∞ bezeichnen, bekommen wir

$$v_\infty = u - B/A. \quad (4)$$

Diese Geschwindigkeit v_∞ nennen wir die Endgeschwindigkeit in Beziehung auf die Luftgeschwindigkeit u , und die Zeit, binnen der das v noch nicht als in Praxis

dem v_∞ gleich angesehen werden kann, soll die Beschleunigungszeit des Körpers heissen.

Wenn der Körper im waagrecht-geradlinigen Leitungsrohr kraft des Luftstroms gefördert wird, ist B in der obigen Gleichung folgenderweise darzustellen.

$$B_{\theta=0} = B_H = \sqrt{\mu g}. \quad (5)$$

Wenn im senkrechten Leitungsrohr, so ist B

$$B_{\theta=\pi/2} = B_S = \sqrt{g}. \quad (6)$$

Mit diesen Gleichungen haben wir also Veränderung der Körpergeschwindigkeit die ganze Strecke des Rohrs entlang dargestellt, und zwar in dem Fall, dass das Rohr gerade gelegt ist. Bis zu welchem Grade diese Analyse in Praxis Geltung besitzt, muss noch weiter experimentell untersucht werden. Falls die Veränderungen u und γ_L wegen grosser Rohrlänge in Betracht kommen sollten, müssen wir das Rohr so in Teile zerlegen, dass hinsichtlich des einzelnen Abschnittes u und γ_L als konstant ansehen werden können und obiges Analyseergebnis Anwendung finden darf. Alsdann fährt man vom Einlass des Rohrs an in richtiger Folge bis zum Auslass in der Berechnung fort. Die Methode, mittels der bei dieser Art der Berechnung der Druckabfall an den einzelnen Punkten des Rohrs festzustellen ist, wird in 3.3 genau behandelt.

2.2 Experimentelle Prüfung des Analyseresultats.

2.2.1. Wertmessung des Reibungskoeffizienten im Bewegungszustand.

Der statische Koeffizient der Reibung zwischen dem Körper und der Leitungsrohrwand ist praktisch durch Messung des Ruhewinkels, den das Rohr gegen die Waagerechte bildet, leicht zu finden. Dagegen ist die Messung des Reibungskoeffizienten im Bewegungszustand nicht so einfach. Die Verfasser sind daher bei der praktischen Wertmessung derselben wie folgt verfahren. Erst schiebt man den Körper in das geneigte Leitungsrohr, dessen Neigungswinkel grösser als der Ruhewinkel des Körpers ist, und lässt ihn aus seinem statischen Zustand ungehindert abgleiten. Wenn er eine bestimmte Strecke abgeglitten ist, misst man die Körpergeschwindigkeit in dem nämlichen Augenblick und findet mittels dieses Resultats μ .

Wenn wir den Winkel, den das Leitungsrohr gegen die Horizontalebene bildet, mit θ bezeichnen, bekommen wir

$$\frac{G}{g} \frac{dv}{dt} = G(\sin\theta - \mu\cos\theta) - \frac{C \cdot S \cdot \gamma_L}{2g} v^2. \quad (7)$$

Angenommen, dass der Wert von μ wie erwähnt, ungeachtet der Körpergesch-

windigkeit konstant, C und γ_L ebenfalls invariabel sind, und dass $v=0$, wenn $t=0$, so erhalten wir

$$v = D(e^{2ABt} + 1) / A(e^{2ABt} - 1), \tag{8}$$

worin

$$D^2 = g(\sin\theta - \mu\cos\theta).$$

Wenn wir die Richtung der Leitungsachse mit x in Gleichung (8) bezeichnen und $x=0$ bei $t=0$ setzen, erhalten wir

$$x = \frac{1}{A^2} \left\{ \ln \frac{e^{2ADt} + 1}{2} - ADt \right\}. \tag{9}$$

Das Experimentalgerät ist so hergestellt worden, wie Abb. 2 zeigt. Wir haben nämlich die 1,2 m lange Glasröhre, 22 mm im Durchmesser, (A) in Neigung von 30° – 40° gegen die Horizontalebene gelegt, den Quarzkörper von ihrem oberen Ende abgleiten lassen und die Geschwindigkeit an dem Punkt festgestellt, wo er eben 1 m abgeglitten ist, indem wir mittels der gelochten Drehscheibe (B) den Lichtstrahl der Bogenlampe (C) intermittierend hereingelassen und den geometrischen Ort der Bewegung des Körpers mit der Filmkamera (D) fotografiert haben. Da die Drehscheibe, wie in der Abbildung, d.h. bei einem Beispiel unserer Photographien, drei Löcher hat, bekommen wir, wenn wir die Zeit, die das Addieren von Hell und Dunkel macht, mit δ sek, und die Drehzahl der Scheibe mit R rpm. bezeichnen, die Gleichung:

$$\delta = 60/3R.$$

Tafel 1 Der Reibungskoeffizient im Bewegungszustand im Vergleich dem im statischen Zustand μ_s .

μ_s	0,45~0,50	0,50~0,57
μ	0,33~0,39 (0,36)	0,38~0,44 (0,41)

In Tafel 1 haben wir das Resultat der praktischen Messung von μ dem statischen

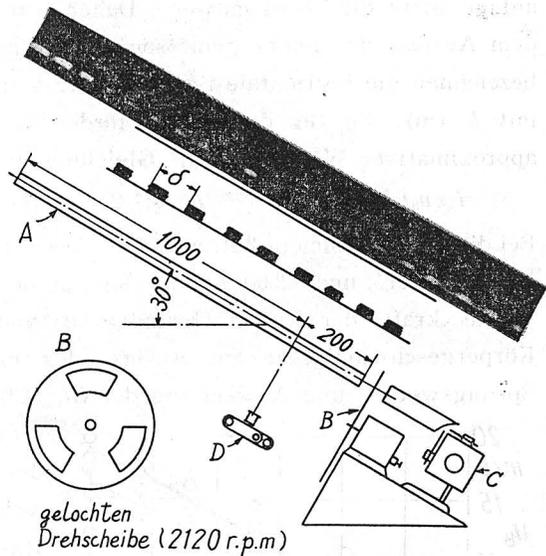


Abb. 2 Die Messungsanlage des Reibungskoeffizienten im Bewegungszustand

Also erhalten wir durch die Messung der Strecke (3~4) δ die Durchschnittsgeschwindigkeit des Körpers an dem betreffenden Punkt. Die in der Photographie beigeschriebene Geschwindigkeit wurde in dieser Weise bestimmt.

Reibungskoeffizienten gegenübergestellt.

2.2.2 Experiment in der Yanahara-Pyritgrube der Dowa-Erzbergbaugesellschaft.

Als Experimentalanlage haben wir ein 18 m langes Leitungsrohr, wie es Abb. 3 zeigt, aus einem Eisenrohr von 150 mm Durchmesser hergestellt. Die Ausflussgeschwindigkeit des Körpers am Auslass des Rohrs v_B (m/sek) war in dieser Experimental-

anlage nicht direkt zu messen. Daher wurde die Sprungweite des Körpers von dem Auslass des Rohrs gemessen, um v_B aus diesem Resultate zu folgern. Wir bezeichnen die horizontale Sprungweite von dem Auslass mit l (m), die Fallhöhe mit h (m), die für den Fall erforderliche Zeit mit t (sek), und erhalten in approximativer Weise folgende Gleichungen.

$$l = v_B t. \quad (10) \quad h = gt^2/2. \quad (11) \quad v_B = \sqrt{g l / \sqrt{2h}}. \quad (12)$$

Bei diesem Experiment hatten die Verfasser einen Kiesel von 3~4 cm im reduzierten Durchmesser und 2500 kg/m³ spezifischen Gewichts gebraucht; der Kiesel wurde kraft der Luftgeschwindigkeit von 26~45 m/sek gefördert und die Körpergeschwindigkeit am Auslass des Rohrs durch praktische Messung der Sprungweite l und Anwendung der Gl. (12) berechnet. Das Resultat ist in Abb.

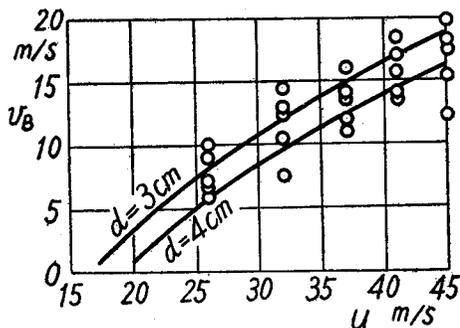


Abb. 4 Die Ausflussgeschwindigkeit des Blasgutes in Abhängigkeit von der Luftgeschwindigkeit.

4 dargestellt. Wenn wir diese Werte mit den Berechnungswerten vergleichen, die sich bei der Annahme ergeben, dass der Körper mit der Geschwindigkeit von Null über den Rohrboden gleitend 18 m gefördert wird, und dass $d=3$ cm und $d=4$ cm, so finden wir eine ziemlich gute Deckung der beiden, wie die durchgezogenen Kurve in der nämlichen Abb. anzeigt. Bei dieser Berechnung wurde der Wert μ als 0,41 gesetzt, da der statische Reibungskoeffizient 0,50~0,56 war. Der Wert C ist aufgrund der verhältnismässigen Rundheit des gebrauchten Körpers, d.h. des Kiesels, als $C=1,2$ angenommen.

Also können wir sagen: das Verhältnis zwischen der Körper- und Luftgeschwindigkeit im Rohr darf, auch bei der praktischen Anlage, durch die Berechnungsmethode dargestellt werden, unter der Annahme, dass der Körper über den Rohrboden gleitend gefördert wird.

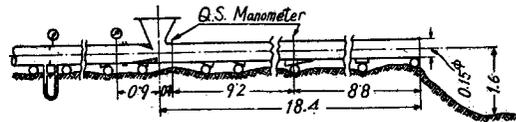


Abb. 3 Die Experimentalanlage in der Yanahara-Pyritgrube.

2.2.3 Prüfung des praktischen Messungsergebnisses in Deutschland.

Georg Peter stellte 1952 über das Verhältnis zwischen der Körper- und Luftgeschwindigkeit am Auslass des Rohrs experimentelle Untersuchungen an, indem



Abb. 5 Versuchsanlage von Georg Peter.

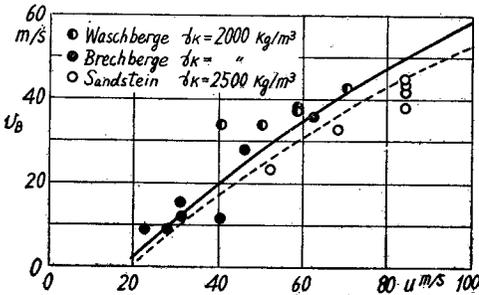


Abb. 6 Die Ausflussgeschwindigkeit des Blasgutes in Abhängigkeit von der Luftgeschwindigkeit, ermittelt auf Grund der Wurfweite.

er, wie Abb. 5 darstellt, ein Leitungsrohr von 150 mm im Durchmesser waagrecht und 111 m lang legte, und Waschberge, Brechberge sowie Sandstein von 4 cm Durchmesser benutzte. Daraus hat sich das Resultat ergeben, das in Abb. 6 mit Punkten bezeichnet ist. Diese experimentelle Untersuchung haben wir in der gleichen Weise geprüft, wie die in der Erzgrube Yanahara. Mit der Annahme, dass $\mu=0,41$ und $C=1,2$, haben wir nämlich die Körpergeschwindigkeit am Auslass des Rohrs berechnet. Dabei wurden die Druck- und Luftgeschwindig-

keitsveränderungen im Rohr berücksichtigt, da die Rohrlänge hier gross ist. Unser Berechnungsergebnis findet sich in Abb. 6 dargestellt; die durchgezogene Kurve betrifft die Wasch- und Brechberge, beide von 2000 kg/m³ spezifischen Gewichts, und die gestrichelte Kurve den Sandstein von 2500 kg/m³ spezifischen Gewichts. Auf diese Weise haben wir erkannt, dass das Berechnungs- und Experimentalresultat ziemlich gut einander decken. Ein Beispiel des Berechnungs-

resultats, nämlich die Veränderung der Luft- und Körpergeschwindigkeit im Verhältnis zur Rohrlänge ist in Abb. 7 dargestellt. Die Körpergeschwindigkeit steigt von Null in der Nähe des Einlasses durch Beschleunigung sehr rasch an, mindert dann allmählich seine Erhöhungsrates, und bleibt, nachdem der Körper etwa 40 m gefördert

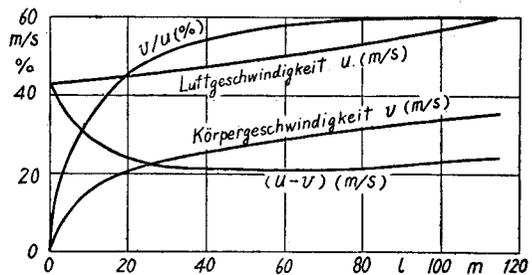


Abb. 7 Die Veränderungsart der Luft- und Körpergeschwindigkeit im Verhältnis zur Rohrlänge.

worden ist, fast im gleichen Verhältnis zur Luftgeschwindigkeit, bis der Körper den Auslass erreicht. Wenn die Veränderung der Luftgeschwindigkeit im Rohr bei einer kleinen Länge desselben ausser acht zu lassen ist, erhalten wir die Körpergeschwindigkeit an einem vom Einlass ziemlich entfernten Punkt, wie schon

erwähnt, durch Abziehen des konstanten Werts B_H/A von der Luftgeschwindigkeit. Auch bei einer grossen Länge des Rohrs aber ist $(u-v)$, nachdem sich der Körper vom Einlass etwa 50 m entfernt hat, im allgemeinen konstant, wie wir in Abb. 7 sehen. Wird der Wert v/u versuchsweise bildlich dargestellt, so erweist auch er sich, insofern $(u-v)$ konstant ist, ungefähr konstant. Dies ist eine bemerkenswerte Tatsache.

Hinsichtlich des senkrechten Rohrs haben wir keinen Vergleich der durch Analyse und Experiment gewonnenen Resultate anstellen können. Wir halten es aber für möglich, dass die beiden Ergebnisse, die sich bei dem waagerechten Rohr ziemlich gut decken, auch in dem Fall, wo es sich um das senkrechte Rohr handelt, ähnlicherweise miteinander zusammenfallen.

3. Berechnungsmethode des zur Förderung der Körpergruppe nötigen Druckabfalls.

3.1 Analyse bei kurzer Leitungsstrecke.

3.1.1 Voraussetzung.

Um die analytische Behandlung zu ermöglichen, setzen die Verfasser folgende Bedingungen voraus.

- i) Jeder Körper in der Gruppe bewegt sich gleichermassen, wie der im Kapitel 2 erwähnte, einzelne Körper; das Vorhandensein irgendeines Körpers hat nichts mit dem Bewegungszustand aller anderen zu tun.
- ii) Die Körpergruppe ist über die ganze Strecke des Leitungsrohrs zeitlich gleichmässig verbreitet.
- iii) Bei der Sachlage, die in diesem Kapitel in Betracht gezogen wird, d.h. bei der kurzen Leitungsstrecke, ist die Druckdifferenz zwischen dem Einlass und dem Auslass des Rohrs verhältnismässig klein. Deshalb dürfen Luftgeschwindigkeit, sowie Widerstandsziffer des Rohrs als konstant angesehen werden.
- iv) Der Druckabfall bei der Materialförderung p wird angenommen als die Summe des Druckabfalls in der Leerleitung p_L und des nur durch die Körpergruppe verursachten Druckabfalls p_K . Die Gültigkeit dieser Annahme erwähnen die Verfasser in 3.4.

3.1.2 Analyse.

Die Widerstandskraft r_b (kg), die durch einen Körper, der zu der Einsteckungszeit t_s abgefahren ist und eine Geschwindigkeit von v_t (m/sek) hat, ist:

$$r_b = C \cdot S \cdot \gamma_L (u - v_t)^2 / 2g. \quad (13)$$

Im Weiteren wird der Wert C als konstant angenommen, der gegenüber dem ziemlich weiten Veränderungsbereich der Reynoldsschen Zahl verhältnismässig konstant bleibt. Der zeitliche Abstand der einzelnen bewegten Körper voneinander in Δt sek kann mittels der Aufgabemenge berechnet werden und stellt sich im allgemeinen als ein sehr geringer Wert dar. Wenn man $(u-v)$ und t auf den Koordinatenachsen darstellt und das elementare Verfahren des Integrals hierauf anwendet, ist der Druckverlust nahe an der Einsteckungsstelle des Körpers p_{bK} , der nur der durch die Körpergruppe in der Beschleunigungszeit t_b sek. verursacht wird, in approximativer Weise folgendermassen zu formulieren:

$$p_{bK} = \frac{C \cdot S \cdot \gamma_L}{2g \cdot F \cdot \Delta t} \int_0^{t_b} (u-v)^2 dt, \quad (14)$$

worin F den Rohrquerschnitt bezeichnet. Bezeichnen wir mit p_{bL} den Druckverlust bei der Leerleitung in der Beschleunigungszeit, so bekommen wir

$$p_b = p_{bL} + p_{bK}. \quad (15)$$

Wenn wir andererseits mit t_c die Zeitlänge der Konstantgeschwindigkeit des Körpers bezeichnen, können wir die Widerstandskraft R_c in dieser Zeit, die von dem Körper allein ausgeht, wie folgt formulieren:

$$R_c = \frac{C \cdot S \cdot \gamma_L}{2g \cdot \Delta t} (u-v_\infty)^2 t_c. \quad (16)$$

Dann ist der Gesamtdruckabfall durch nachstehende Gleichung gegeben:

$$p = p_L + p_{bK} + \frac{R_c}{F}, \quad (17)$$

in der p_L den Druckabfall der Leerleitung wiedergibt.

Bei der Analyse hinsichtlich des waagerechten Rohrs wird angenommen, dass der über den Rohrboden gleitend geförderte Körper, wie in Kapitel 2 festgestellt wird. Damit wird die Gleichung (17) wie folgt umgeformt.

$$p = p_L + \frac{G \cdot B_H}{F \cdot g \cdot \Delta t \cdot A} \left\{ AB_H (t_b + t_c) - \frac{2K}{e^{2AB_H(t_b+t_c)} - K} + \frac{2K}{1-K} \right\}. \quad (18)$$

Wenn wir für B_H B setzen, kann der Druckabfall in dem Steigungsrohr berechnet werden.

Der Veränderungszustand der Körpergeschwindigkeit im senkrechten Rohr stellt sich, wie in Kapitel 2 festgestellt, in Gleichung (6) dar. Der Druck, der nötig ist, die Körpergruppe im senkrechten Rohr aufwärtsdrängend zu fördern, wird daher durch nachstehende Gleichung ausgedrückt.

$$p = p_L + \frac{G \sqrt{g}}{F \cdot g \cdot \Delta t \cdot A} \left\{ A \sqrt{g} (t_b + t_c) - \frac{2K}{e^{2A \sqrt{g}(t_b+t_c)} - K} + \frac{2K}{1-K} \right\}. \quad (19)$$

3.2 Theoretische Betrachtung der Gasterstädtchen Gleichung.

Gasterstädt hat mit der Kornförderung in dem Falle, wo der Druckabfall wenig als 3000 kg/m² beträgt, experimentiert und als Resultat die nachstehende Gleichung erhalten, die den für Körpergruppenförderung nötigen, gesamten Druckabfall p darstellt und deren Gültigkeit auch von ihm bewiesen worden war:

$$p = \{1 + G_m tg\alpha / G_L\} \cdot p_L. \quad (20)$$

In dieser Gleichung sind G_m das geförderte Körpergewicht (kg/sek), G_L die verbrauchte Luftmenge (kg/sek) und $tg\alpha$ die Konstante, die sich mit der Veränderung der Förderungsbedingung zugleich verändert. Diese Gleichung bedeutet, dass für gleiche Luftströmungsmenge der spezifische Druckabfall p/p_L eine lineare Funktion des Mischungsverhältnisses $M = G_m/G_L$ darstellt. Wir können die Gleichung (20) aus der Gleichung (17) ableiten.

Da der Druckabfall in dem Gasterstädtchen Experiment weniger als 3000 kg/m² beträt, können wir sehen, dass der experimentelle Bereich von Gasterstädt in dem analytischen Bereich dieser Kapitel enthalten ist. In der Gleichung (17) erhalten wir, wenn wir

$$I = \frac{C \cdot S \cdot \gamma_L}{2g} \left\{ \int_0^{t_b} (u-v)^2 dt + (u-v_\infty)^2 \cdot t_b \right\}$$

setzen:

$$P = (1 + I/p_L F \cdot \Delta t) \cdot p_L. \quad (21)$$

Wir wollen mit N die Anzahl der geförderten Körper je nach der Zeiteinheit annehmen. Da $N = 1/\Delta t$, gilt:

$$M = G_m/G_L = N \cdot G/G_L = G/\Delta t \cdot G_L. \quad (22)$$

Nehmen wir G_L und die Anfangsbedingung des bewegenden Körpers als konstant an, können wir I ebenfalls als konstant betrachten und es ergibt sich:

$$I \cdot G_L / F \cdot G \cdot p_L = tg\alpha. \quad (23)$$

Aus den Gleichungen (21), (22), (23) können wir Gleichung (20) ableiten. Also ist die Gasterstädtche Gleichung auch auf theoretischem Wege zu erhalten, bei ihrer Anwendung müssen wir aber Folgendes berücksichtigen. Bei der Berechnung des Druckafalls mittels der Gleichung (20) sind nämlich die Werte von p_L , N und andere ziemlich leicht zu finden. Der Wert $tg\alpha$ bezeichnet aber die Funktion verschiedener Elemente, d.h. er ist von der Gestalt des Körpers, seinem Gewicht, dem Durchmesser des Rohres, seiner Länge sowie von der Luft- und Anfangskörpergeschwindigkeit abhängig, deshalb ist der Wert $tg\alpha$, der sich

aus einem Experiment unter bestimmten Bedingungen ergeben hat, nicht für die Berechnung des Druckabfalls einer anderen Anlage anwendbar. Mit anderen Worten: die Gasterstädsche Gleichung gilt nur, wo die Resultate der unter bestimmten Bedingungen angestellten Experimente in Ordnung gebracht werden sollen.

3.3 Experiment mit kurzer Förderungsstrecke.

3.3.1 Modellexperiment.

In diesem Experiment wurden eine Glasröhre von 22 mm im Durchmesser als Leitungsrohr, ein Quarzkörper von $-6+10$ Tyler Masche und von 2600 kg/m^3 spezifischen Gewichts und ein Steinkohlenkörper von $-6+14$ Tyler Masche und 1400 kg/m^3 spezifischen Gewichts als Fördergut gebraucht. Sie wurden durch die in Abb. 8 dargestellten Aufgaben in einen $10,0 \sim 12,3 \text{ m/sek}$ Luftstrom ins Leitungsrohr getan.

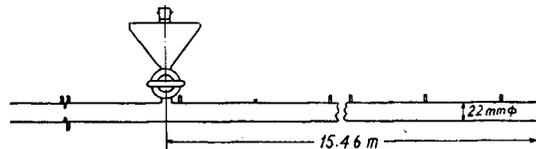


Abb. 8 Versuchsanlage.

Ein Beispiel der erhaltenen Resultate ist in Abb. 9 mittels der durchgezogenen Kurve gegeben: die Förderungsstrecke steht auf der Querachse, der Druckabfall auf der Längsachse und die Blasleistung auf dem Parameter. Die scharfe Veränderung des Druckabfalls nach der Aufgabestellung, wird durch die Beschleunigung der Körpergruppe zur Endgeschwindigkeit hin verursacht. Wenn die Resultate nach der Gasterstädschen Gleichung auf den Koordinaten, $(p/p_L - 1)$ auf der

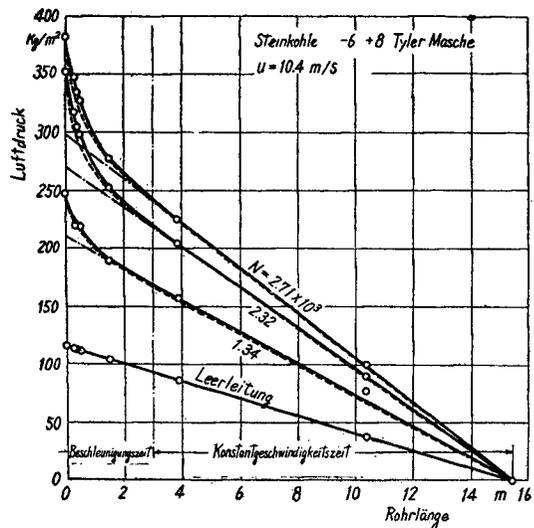
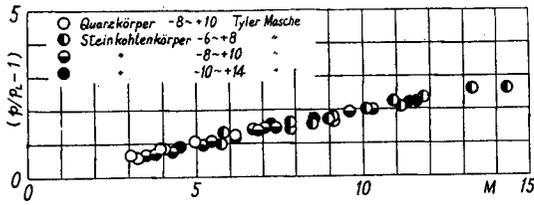


Abb. 9 Die Veränderungsart des Druckes in Verhältnis zur Rohrlänge.

Längsachse und des Mischungsverhältnis M auf der Querachse, dargestellt werden, ergibt sich, wie, in Abb. 10 beinahe eine gerade Linie. Der in dieser Abbildung erhaltene Wert $tg\alpha$ beträgt etwa 0,2, er verändert sich aber natürlicherweise den Bedingungen der Experimentalanlage, dem Förderungsmaterial, der Luftgeschwindigkeit und dgl. gemäss.

Abb. 10 $(p/p_L - 1)$ in Abhängigkeit von M .

des waagerechten Leitungsrohrs und in Hinsicht auf eine verhältnismässig kurze Förderungsstrecke gewonnen wurden, mit den Berechnungsergebnissen, die sich aus der Gleichung (18) und den betreffenden Werten ergeben, verglichen werden. Damit soll auch deutlich werden, bis zu welchem Grade das Analyseresultat die wirklichen Erscheinungen zu erklären vermag.

Wenn wir zuerst die Druckveränderung längs dem Leitungsrohr in Hinblick auf das Experimentalresultat in Abb. 9 mit der Gleichung (18) berechnen, erhalten wir, wie die gestrichelte Kurve in der nämlichen Abbildung zeigt, ein sehr gutes Ergebnis. Stellen wir das Experimentalresultat auf der Längsachse und das Berechnungsergebnis auf der Querachse dar, so erhalten wir Abb. 11, die das Sichdecken beider Ergebnisse sehr deutlich erkennen lässt. Es muss also angenommen werden, dass der Bewegungszustand jedes Körpers bei der Körpergruppenförderung demjenigen des einzelnen Körpers gleich ist, damit ist Annahme (i) in 3.1.1 gerechtfertigt.

Diese Tatsachen liefern den Beweis, dass die Gleichung (18) als das Ergebnis der in 3.2 wiedergegebenen Analyse, insofern sich die in 3.1.1 vorausgesetzte Annahme (iii) geltend macht, sich sehr wohl zur Anwendung in der Praxis eignet.

Zwar wurde die bisherige Untersuchung immer mit dem waagerechten Leitungsrohr angestellt, die praktische Geltung des Analyseresultats aber darf auch auf die Fälle erweitert werden, wo es sich um das senkrechte oder geneigte Leitungsrohr handelt.

Besagte Experimentalresultate müssen, wenn die für die Analyse aufgestellten Voraussetzungen gelten sollen, mit den Berechnungsergebnissen innerhalb der Fehlergrenze des Experiments übereinstimmen. Hier sollen sie, da sie mittels

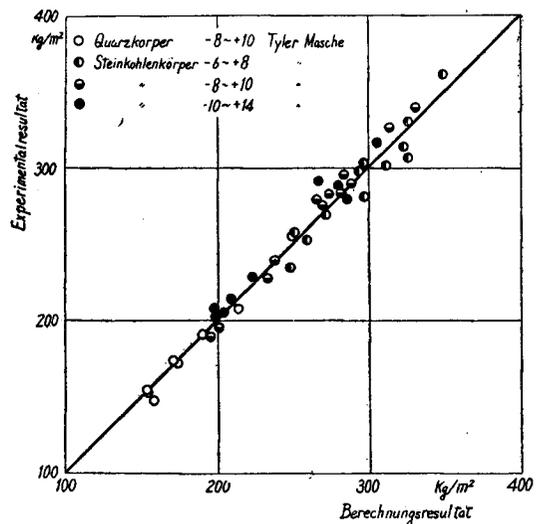


Abb. 11 Das Berechnungsergebnis des Druckabfalls in Abhängigkeit zum Experimentalresultat.

3.3.2 Praktisches Experiment in der Yanahara Pyritgrube der Dowa-Erzbergbaugesellschaft.

Als Leitungsrohr verwendeten wir ein waagrecht gelegtes Eisenrohr von 150 mm Durchmesser und 18 m Länge, für welches die in Abb. 12 dargestellte Bergeaufgabe bestimmt und der Luftdruck mittels des Quecksilber-Manometers gemessen wurde. Das Fördermaterial waren Stück von Flusskies und Brechberge 3 cm gross und 35 gr. schwer. Das Resultat ist in Tafel 2 dargestellt. Dieses Ergebnis des Experiments zeigt ein gutes Zusammenfallen des

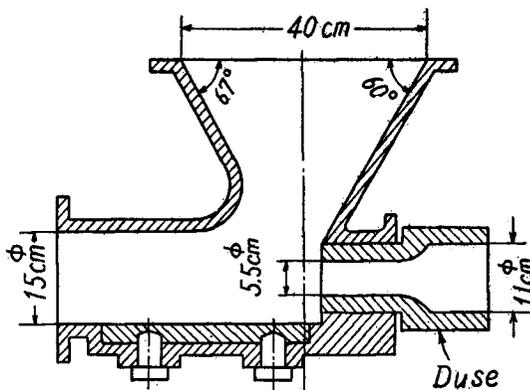


Abb. 12 Die Öffnungstypus-Aufgabemaschine.

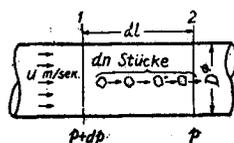


Abb. 13

Berechnungsergebnis mit dem Experimentalresultat. Somit dürfen wir behaupten, dass die Berechnungsmethode, von der die Verfasser in diesem Kapitel ausgehen, im Falls des für die Körpergruppenförderung nötigen Druckabfalls bei kurzer Leitungsrohrlänge, mit genügender Richtigkeit zu

Recht besteht.

3.4 Druckabfall bei langer Förderungsstrecke.

3.4.1 Bereich der Analyse.

Ist die Förderungsstrecke lang, so wird die Druckdifferenz zwischen dem

Tafel 2 Das Experimentalresultat des Druckabfalls in der Yanahara Pyritgrube im Vergleich zum Berechnungsergebnis.

Verbrauchte Luftmenge (m ³ /h)	Blasleistung (ton/h)	Experimentaldruckabfall (kg/m ²)	Berechneter Druckabfall (kg/m ²)	p_K (kg/m ²)	p_L (kg/m ²)	N Stück/sek
3000	29,5	1700	1710	1230	480	234
3000	27,1	1560	1610	1130	480	215
3000	22,5	1470	1420	940	480	179
3000	18,7	1220	1260	780	480	149
3000	15,2	1130	1115	635	480	121

Einlass und dem Auslass des Rohrs gross, und die Werte u , γ_L und die Widerstandsziffer λ dürfen nicht wie in 3.1 als konstant angesehen werden. Berücksichtigen wir aber nur die Beschleunigungsstrecke des Körpers, in der die Druckdifferenz zwischen ihren beiden Enden, trotz der raschen Druckveränderung, wegen der Kürze der Strecke nicht so gross ist, so dürfen wir u , γ_L und λ als konstant annehmen und den Druckabfall auf dieser Strecke mit der 3.1 gegebenen Gleichung (17)~(20) berechnen. In diesem Kapitel behandeln die Verfasser eine Konstantgeschwindigkeitsstrecke, bei der die Druckveränderung zwar langsam, die Druckdifferenz aber zwischen den beiden Enden gross ist, weswegen die Veränderungen von u , γ_L und λ nicht ignoriert werden dürfen.

3.4.2 Berechnungsmethode des Druckabfalls bei der Konstantgeschwindigkeitsstrecke.

Wir nehmen an, dass 1 und 2 in Abb. 13 zwei Rohrquerschnitte darstellen, die in einer horizontalen Leitungsröhre von dem Durchmesser D (m), in der dn Stücke eines Körpers kraft eines Luftstroms von der Geschwindigkeit u (m/sek) gefördert werden, dl (m) voneinander entfernt sind. Da die Druckveränderung $d\dot{p}$ (kg/m²) des Luftstroms in einem Abstand dl (m) in zwei Glieder, nämlich in die Reibungswiderstandskraft des reinen Luftstromes und in die Widerstandskraft des Körpers, eingeteilt werden kann, bekommen wir die Formel:

$$d\left(\frac{\dot{p}}{\dot{p}_0}\right) = \lambda \frac{dl}{D} \frac{u^2}{2g} \frac{\gamma_L}{\dot{p}_0} + \frac{1}{F} \frac{C \cdot S \cdot \gamma_L}{2g} (u-v)^2 \frac{dn}{\dot{p}_0}, \quad (24)$$

wo \dot{p}_0 den Normalstand des Luftdrucks, nämlich 760 mm Q.S. bedeutet. Dabei kann die Voraussetzung gemacht werden, dass die Wärme durch die Rohrwandung weder zu- noch abgeführt wird und dass ferner der Wärmewert der strömenden Luft konstant bleibt. Die Widerstandsziffer λ ist nach Blasius,

$$\lambda = a(Re)^b, \quad (25)$$

wobei a und b Festwerte sind, die man für jedes Rohr besonders bestimmen kann. Für absolut glattes Rohr ergab sich für Blasius

$$a = 0,3164, \quad b = -0,25.$$

Sind ν die kinematische Zähigkeit der Luft (m²/sek) und Q_0 die Luftströmungsmenge (m³/sek) unter dem Luftdruck \dot{p}_0 , dann ist die Reynoldssche Zahl Re

$$Re = \dot{p}_0 \cdot Q_0 \cdot D / \dot{p} \cdot F \cdot \nu, \quad (26)$$

und da

$$\nu = \nu_0 (\dot{p} / \dot{p}_0)^m, \quad (27)^6$$

bekommen wir

$$\lambda = a(4Q_0)^b \dot{p}^{mb+b} / (\pi \nu_0 D)^b \dot{p}_0^{mb+b}. \quad (28)$$

Führt man die Gaskonstante $R=29,27$ für die Luft und die absolute Temperatur T ($^{\circ}\text{K}$) ein, so erhält man die Gleichung für das spezifische Gewicht der Luft

$$\gamma_L = p/RT. \quad (29)$$

Darum wird

$$\lambda u^2 \gamma_L dl / 2gDp_0 = A (p_0/p)^{mb+b+1} dl, \quad (30)$$

wobei

$$A = a(4Q_0)^{2+b} / 2gRT v_0^b \pi^{2+b} D^{6+b} = \text{Konstante.}$$

Nehmen wir zweitens das Verhältnis der Körper- und Luftgeschwindigkeit ϕ als konstant an, wie in Kapitel 2 erklärt, und bezeichnen wir die Anzahl der geförderten Körper pro Sekunde mit N , so erhalten wir

$$\frac{v}{u} = \phi, \quad \frac{dn}{dl} = \frac{N}{\phi} \left(\frac{p}{p_0} \right) \frac{F}{Q_0},$$

und ferner

$$u = p_0 Q_0 / p F,$$

darum wird

$$C \cdot S \gamma_L \cdot (u-v)^2 \cdot dn / 2g \cdot F \cdot p_0 = E \cdot dl, \quad (31)$$

wobei

$$E = C \cdot S \cdot Q_0 \cdot (1-\phi)^2 \cdot N / 2g \cdot R \cdot T \cdot \phi \cdot F^2 = \text{Konstante,}$$

also

$$d \left(\frac{p}{p_0} \right) = \left\{ A \left(\frac{p_0}{p} \right)^{mb+b+1} + E \right\} \cdot dl. \quad (32)$$

Da wir den Wert m gleich (-1) setzen können, wie Tafel 3 zeigt, bekommen wir die Gleichung:

$$mb + b + 1 = 1.$$

Wenn wir nunmehr Gleichung (32) integrieren und $p/p_0 = p_a/p_0$ bei $l=0$ setzen, bekommen wir unter der Bedingung, dass $N \neq 0$ nämlich $E \neq 0$ ist, die Gleichung:

$$l = A^{-1} J^{-2} p_0^{-1} [J(p-p_a) - p_0 \ln \{ (p_0 + pJ) / (p_0 + p_a J) \}], \quad (33)$$

worin $J = E/l$, und p sowie p_a der absolute Druck der Luft an den Anfangspunkten der Konstantgeschwindigkeit des Körpers und an den Endpunkten des Leitungsrohres sind.

Wenn $N=0$ ist, erhalten wir

$$p_L = (p_a^2 + 2Alp_0^2)^{\frac{1}{2}}, \quad (34)$$

worin p_L der Druckabfall im geraden Rohr bei reiner Luft ist.

Vorausgesetzt, dass wir bei p zwei Drucke unterscheiden können, nämlich den durch die Körper allein verursachten Druckabfall p_K und den durch den reinen Luftstrom p_L verursachten, so ergibt p_L mit der Gleichung (34) und für p_K

Tafel 3 Wert von ν_0 und m .

t °C	ν_0 m ² /sek	m
-10	$1,2396 \times 10^{-5}$	-1,00035
-5	1,2824	-1,00055
0	1,3261	-1,00079
5	1,3708	-1,00113
10	1,4167	-1,00157
15	1,4639	-1,00218
20	1,5125	-1,00300
25	1,5629	-1,00410
30	1,6154	-1,00550
35	1,6704	-1,00729
40	1,7283	-1,00960

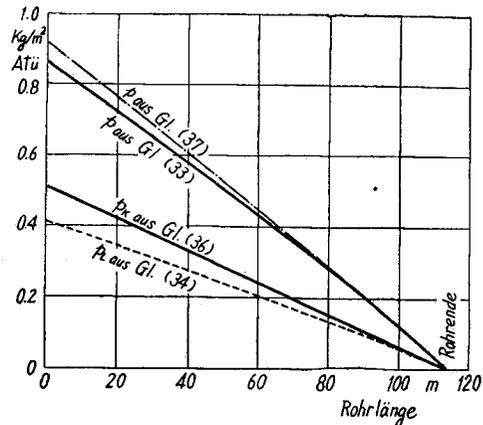


Abb. 14 Das Verhältnis zwischen der Rohrlänge zu dem Druckabfall, wenn die ganze Förderungsstrecke als die Konstantgeschwindigkeitszeit angenommen.

$$d\left(\frac{p}{p_0}\right) = E \cdot dl . \quad (35)$$

Wenn wir nunmehr Gleichung (35) integrieren und $p=p_a$ bei $l=0$ und $p=p_K+p_a$ bei $l=l$ setzen, erhalten wir

$$p_K = p_0 E l . \quad (36)$$

$$\therefore p = p_L + p_K = p_0 E l + (p_a^2 + 2Alp_0^2)^{\frac{1}{2}} \quad (37)$$

Die Gleichung (37) ist eine Vereinfachung der Gleichung (33).

3.4.3 Anwendung des Analyseresultats.

Das gewonnene Analyseresultat soll auf die Berechnung des für die Körperförderung nötigen Druckabfalls bei grosser Rohrlänge wie folgt angewandt werden. Zuerst berechnet man die Geschwindigkeit des einzelnen Körpers am Auslass des Rohrs in derselben Weise, als hätte der Körper den durchschnittlichen reduzierten Durchmesser und wäre unter einem bestimmten Luftverbrauch gefördert worden, indem man die der Leitungsrohrlänge entsprechende Druckveränderung in der Leerleitung berücksichtigt und nach der im Kapitel 2 erwähnten Methode verfährt. Dann bestimmt man als das Verhältnis des also erhaltenen Wertes zu der Luftgeschwindigkeit am Auslass des Rohrs den Wert des Koeffizienten ϕ . Nach der Bestimmung des letzteren sucht man den für die Förderung der vorgelegten Körpergruppe nötigen, imaginären Druckabfall p_{Kc} , indem man den über die ganze Strecke des Leitungsrohrs bewegten Körper mit der Konstantgeschwindigkeitszeit betrachtet und die Gleichung (33) oder (37) anwendet.

Dann handelt es sich um die Berechnung des Druckabfalls in der Beschleunigungszeit mittels der Gleichung (17). Hierbei müssen aber zwei Voraussetzungen gemacht werden.

Voraussetzung 1. Der Durchschnittsdruck während der Beschleunigung wird als der soeben bestimmte Wert p_{Kc} angesehen. Obigem Beispiel in Abb. 9 gemäss teilt man die ganze Förderungsstrecke in die Länge von Konstantgeschwindigkeitszeit und Beschleunigungszeit und verlängert die der geraden Linie der Rohrachse entsprechende Druckveränderung in der Konstantgeschwindigkeitszeit bis an die Aufgabestelle, d.h. bis an den Punkt, wo sich eben diese Linie und die Längesachse kreuzen. Dann findet man den Druckabfall, der, bei Annahme der ganzen Förderungsstrecke als Länge der Konstantgeschwindigkeitszeit, erhalten wird, und sieht, dass dieser Wert dem Durchschnittsdruck in der Beschleunigungszeit ungefähr gleich ist. Das hier angeführte Beispiel setzt zwar eine kurze Förderungsstrecke voraus, scheint aber auch in betreff einer grossen Leitungsrohrlänge ohne bedeutende Abweichung Gültigkeit zu besitzen.

Voraussetzung 2. Es wird angenommen, dass die Beschleunigungszeit solange dauert, bis die Körpergeschwindigkeit $v_b=90\%$ von dem erreicht, was sich aus Abzug des B/A von der Stromgeschwindigkeit u_b unter dem imaginären Druck p_{Kc} ergibt, d.h.

$$v_b=0,9(u_b-B/A).$$

Die zeitliche Strecke der Beschleunigungszeit t_b stellt sich in der folgenden Gleichung dar.

$$t_b = \frac{1}{2AB} \ln \frac{A(u_b - v_b) + B}{A(u_b - v_b) - B} \cdot K.$$

Diese Voraussetzung scheint auch aus den in Kapitel 2 erwähnten Gründen annehmbar zu sein.

Wenn der Druckabfall und die Länge während der Beschleunigung unter dieser Voraussetzung bestimmt worden sind, lässt sich der für die Körpergruppenförderung nötige Druckabfall in der Beschleunigungszeit p_b ebenfalls erhalten.

Der Druckabfall in der Konstantgeschwindigkeitszeit p_c stellt sich, wenn die ganze Förderungsstrecke mit l und die räumliche Strecke der oben bestimmten Beschleunigungszeit mit l_b bezeichnet werden, durch die Gleichung dar :

$$p_c = p_{Kc}(l - l_b)/l.$$

Also ergibt sich der Druckabfall bei der Körpergruppenförderung aus der Gleichung :

$$p = p_b + p_c.$$

3.4.4 Nachprüfung des Analyseresultats mittels des Experimentalresultats.

Infolge der Analyse oben ergeben sich die Gleichungen (33) und (37) als die Berechnungsgleichungen, die den für die Körpergruppenförderung nötigen Druckabfall in der Konstantgeschwindigkeitszeit darstellen. Doch bleibt noch die Frage, in welchem Grade sich die beiden Resultate voneinander unterscheiden, wenn man diese beiden Gleichungen anwendet und deren Werte berechnet, und in welchem Masse die nämlichen Resultate den Experimentalresultaten entsprechen.

(i) Vergleich der Gleichung (33) mit der Gleichung (37) an Hand der aufgestellten Beispiele der Berechnungsergebnisse.

Unter folgender Bedingung soll die Berechnung angestellt werden: Das Rohr von 4 cm im Durchmesser und von 2000 kg/m³ spezifischen Gewichts wird durch ein waagerechtes Leitungsrohr von 150 mm Durchmesser und der Widerstandsziffer 0,03 des Rohrs in der Rate von 133 ton/hr mittels der Luft von 3800 m³/hr 114 m lang gefördert. Dabei wird der Atmosphärendruck als 10330 kg/m² angesetzt und die Temperatur als 27°C. Unter dieser Bedingung sind: $Q_0=1,06$ m³/sek, $u_0=60$ m/sek, $F=1,767 \times 10^{-2}$ m², $T=300$ °K, $N=544$, $d=0,04$ m, $D=0,15$ m, $l=114$ m, $\lambda=0,03$. Angenommen, dass $C=1,2$, $\mu=0,41$, so ist $\phi=0,60$, wie es sich in Kapitel 2 bei dem praktischen Experiment (ii) ergab. Daher

$$A=4,18 \times 10^{-3}, E=4,31 \times 10^{-3},$$

$$\therefore J=1,03 .$$

Da es sich bei dieser Aufstellung der Berechnungsbeispiele um den Vergleich der Gleichung (33) mit der Gleichung (37) handelt, darf man hier die ganze Leitungsrohrstrecke als die Konstantgeschwindigkeitszeit ansehen. So ergibt sich für den Druckabfall aus der Gleichung (33) 1,9 atü und aus (37) 1,95 atü, die Differenz zwischen den beiden beträgt 0,05 atü, d.h. nur etwa 6% von dem Druckabfall. Ausserdem ist der Wert, der sich aus der einfachen Berechnung mittels der Gleichung (37) ergibt, etwas grösser, als derjenige, den man durch die komplizierte Behandlung der Gleichung (37) erreicht. Für derartige Berechnungen ist daher die Gleichung (37) vorzuziehen. Unter denselben Bedingungen, unter denen man das Berechnungsbeispiel oben erhielt, stellt sich das Verhältnis zwischen der Rohrlänge und dem Druckabfall, wenn die ganze Förderungsstrecke als Konstantgeschwindigkeitszeit angesehen wird, so dar, wie es Abb. 14 zeigt. Mit diesen Resultaten erweisen sich also die Voraussetzungen (iii) in 3.1.1 als annehmbar.

(ii) Vergleich des Berechnungsergebnisses mit dem Experimentalresultat von Georg Peter und Carl Albert.

Um das in diesem Kapitel angegebene Analyseresultat in Hinsicht auf die Leitungsrohrlänge entsprechende Druckveränderung mit dem Experimentalresultat

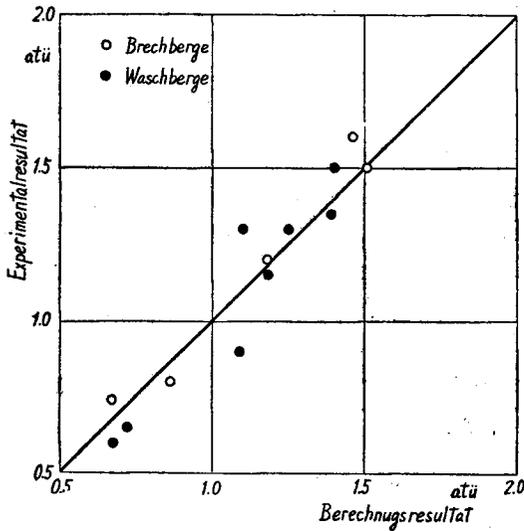


Abb. 15 Das Berechnungsresultat des Druckabfalls im Vergleich zum Experimentalresultat von G. Peter und C. Albert.

zu vergleichen, ist eine mit langem Leitungsröhr versehene Experimentalanlage nötig. Wir konnten aber keine Anlage herstellen, die eine solche Bedingung erfüllt. Deshalb wendet Albert das 1951 und Peter das 1952 in der Zeitschrift Glückauf veröffentlichte Experimentalresultat zur Nachprüfung des besagten Analyseresultats an. Das betreffende Experiment fand in der Anlage statt, die in Abb. 5 in Umrissen angegeben ist und die der in Kapitel 2 erwähnten Anlage gleicht. Als Förderungsmaterial wurden Waschberge von $\gamma_K=1900 \text{ kg/m}^3$ und Brechberge von 2000 kg/m^3 benutzt; der Luftverbrauch und die Blasleistung haben sich in ziemlich weitem Umfang verbreitet,

wie das Resultat in Tafel 4 zeigt. Nun muss man mittels dieser angegebenen Experimentalresultate von Luftverbrauch und Blasleistung die Berechnung des Druckabfalls vornehmen. Wie in 3.4.3 (i) erwähnt, darf man für die Berechnung

Tafel 4 Das Experimentalresultat des Druckabfalls von G. Peter und C. Albert im Vergleich zum Berechnungsresultat.

Verbrauchte Luftmenge (m^3/h)	Blasleistung (ton/h)	Experimental- druckabfall (atü)	Berechneter Druckabfall (atü)	p_K (kg/m^2)	p_L (kg/m^2)
2950	134	1,15	1,18	9650	2600
3600	126	1,30	1,25	9240	3700
3300	112	1,30	1,10	8130	3200
3800	99	0,90	1,09	7260	4050
4340	144	1,35	1,54	10650	5250
4010	136	1,50	1,40	10020	4430
3180	62,4	0,65	0,72	4500	2960
3100	56,0	0,66	0,68	4030	2940
4094	147	1,50	1,51	10900	4700
3790	112	1,20	1,18	8210	4000
3481	47	0,74	0,67	3420	3480
3348	77	0,80	0,86	5560	3300
2977	175	1,60	1,46	12500	2600

des Druckabfalls in der Konstantgeschwindigkeitszeit die Gleichung (37) gebrauchen. Somit berechnet man mittels der Gleichung (17) und (37) nach der in 3.4.3 dargestellten Methode den Druckabfall bei der Körpergruppenförderung und kommt zu dem in Tafel 4 gezeigten Resultat. Wenn das Experimentalresultat auf der Längsachse und das Berechnungsresultat auf der Querachse dargestellt werden, bemerkt man eine ziemlich gute Deckung beider Resultate. (Siehe Abb. 15). Die Werte von λ , μ und C sind bei dieser Berechnung als $\lambda=0,03$, $\mu=0,41$, $C=1,2$ angesetzt. Was den Durchmesser des Förderungskörpers betrifft, wird angenommen, dass $d=0,04$ m. Der so erhaltene Wert des Druckabfalls ist aber fast dem gleich, der sich aus der Berechnung unter der anderen Annahme ergibt, dass $d=0,02$ m sei. Es wird demnach klar, dass einige Fehler in der Mutmassung des Durchmessers der Förderungskörpergruppe, was die Berechnung in diesem Kapitel betrifft, das Resultat wenig beeinflussen.

4. Druckverlust an der Krümmerstelle des Leitungsrohrs.

4.1 Modellexperiment.

4.1.1 Messung der Geschwindigkeitsverminderungsrate des Einzelkörpers an der Krümmungsstelle.

Um den Druckverlust an der Krümmerstelle bei der Körpergruppenförderung zu bestimmen, ist es vor der Feststellung der Berechnungsmethode zunächst wichtig, die Geschwindigkeitsveränderungsrate des Einzelkörpers an der Krümmerstelle, d.h. das Verhältnis zwischen den Geschwindigkeiten am Auslass und am Einlass der Krümmung zu erhalten.

Die Experimentalanlage zeigt Abb. 16. Eine Glasröhre von 22 mm Durchmesser ist in der Horizontale 8,2 m lang angelegt, an ihrem Ende sind drei verschiedene 90°-Krummröhre angeschlossen, die je einen Kümungsradius von 5 cm, 15 cm und 25 cm haben und in das 1,5 m lange

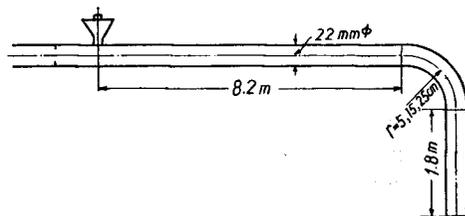


Abb. 16 Die Experimentalanlage.

waagrecht gerade Rohr enden. Quarzkörper von $-4+8$ Tyler Masche wurden für dieses Experiment gebraucht. Die Körpergeschwindigkeit am Einlass des Krümmers haben wir durch Berechnung erhalten, unter Annahme, dass der Körper über den Leitungsrohrboden gleitend gefördert wird, wie in Kapitel 2 beschrieben. Die Körpergeschwindigkeit am Auslass des Rohrs wurde durch eine Stroboskop-Aufnahme gemessen. Das Resultat ist als Durchschnittswert des etwa zwanzig-

maligen Experiments in Tafel 5 angegeben. Aus dem Resultat geht hervor, dass die Geschwindigkeitsveränderungsrate umso grösser wird, je kleiner der Krümmungsradius ist.

Tafel 5 Messungsergebnis der Geschwindigkeitsverminderungsrate v_A/v_E des Einzelquarkörpers an der Krümmungsstelle.

Luftgeschwindigkeit u (m/sek)	Körpergeschwindigkeit am Einlass der Krümmung v_E (m/sek)	Körpergeschwindigkeit am Auslass der Krümmung v_A und v_A/v_E						Tyler Masche des Körpers
		Krümmungsradius r						
		25 cm		15 cm		5 cm		
		$\frac{v_A}{m}$ sek	$\frac{v_A}{v_E}$	$\frac{v_A}{m}$ sek	$\frac{v_A}{v_E}$	$\frac{v_A}{m}$ sek	$\frac{v_A}{v_E}$	
10,79	4,90	4,41	0,90	3,45	0,70	3,45	0,70	4~6
9,95	5,15	4,57	0,89	3,81	0,74	3,81	0,74	6~8
im Mittel			0,90		0,72		0,72	

4.1.2 Experiment und Druckabfallberechnung hinsichtlich des 90°-Krümmers.

Wie oben erwähnt, muss der Körper nach seiner Fahrt durch den Krümmer, wo sich seine Geschwindigkeit vermindert, so beschleunigt werden, dass er wieder die frühere Geschwindigkeit erreiche. Der Druckverlust, der bei der Körpergruppenförderung gleich nach dem Krümmer verursacht wird, ist daher, wie wir uns vorstellen können, grösser als der an anderen geradlinigen Stellen und nähert sich demjenigen an der Aufgabestelle. Die durchgezogene Linie in Abb. 17 stellt beispielsweise den der Rohrlänge entsprechenden Druckveränderungszustand dar, der sich aus der

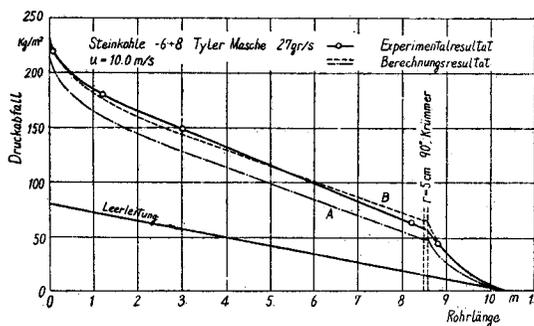


Abb. 17 Druckverlauf in einer 22er Leitung mit einem Krümmer im Leerlauf und bei Belastung.

Messung mittels eines Steinkohlenkörpers von -6+8 Tyler Masche bei der Experimentalanlage in Abb. 16 ergeben hat. Wenn wir die durch dieses Experiment bestimmten Werte von Blasleistung und Luftverbrauch anwenden, die Körpergeschwindigkeit am Auslass des Krümmers als 72% (Siehe Tafel 5) von derjenigen am

Einlass desselben Krümmers annehmen und mittels der in Kapitel 3 genannten Gleichung (12), die der Rohrlänge entsprechende Druckverbreitung berechnen, bekommen wir das Resultat, das sich als die gestrichelte Linie A in Abb. 17

ausdrückt und aus dem sich ergibt, dass der Berechnungswert ein wenig kleiner ist, als der praktische Messungswert. Dieselbe Tendenz beobachten wir immer, wenn wir in Hinblick auf manch andere Resultate der praktischen Messung Berechnungen anstellen. Es ist nämlich bewiesen, dass die Geschwindigkeitsverminderungsrate im Inneren des Krümmers bei der Körpergruppenförderung grösser ist, als bei der Einzelkörperförderung. Wieviel grösser sie dabei ist, können wir durchaus nicht im voraus wissen, und auch wenn wir es wissen, stehen wir dann äusserst schwierigen Berechnungen gegenüber. Wir nehmen daher jetzt versuchsweise die Körpergeschwindigkeit am Auslass des Krümmers als Null an. Daraus ergibt sich, dass das erhaltene Resultat, wie die gestrichelte Linie B in Abb. 17 zeigt, dem praktischen Messungsergebnisse näher ist, als das vorige Berechnungsergebnis. In Abb. 18 haben wir das praktische Messungsergebnis auf

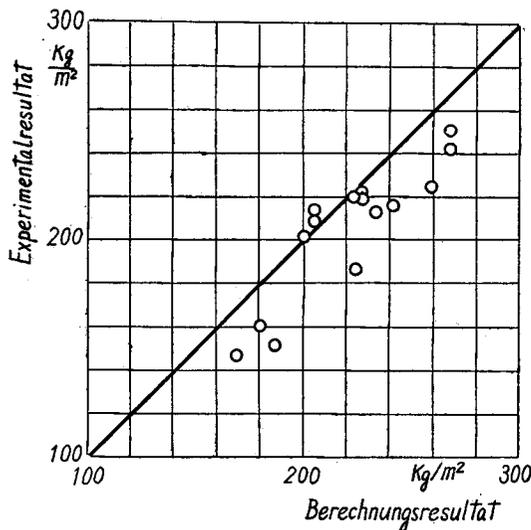


Abb. 18 Das Berechnungsergebnis des Druckabfalls mit einem Krümmers in Abhängigkeit vom Experimentalergebnis.

der Längsachse und das Berechnungsergebnis, das unter der Annahme, die Körpergeschwindigkeit am Auslass des Krümmers sei Null, gewonnen ist, auf der Querachse dargestellt, um beide miteinander zu vergleichen. Da die Werte des Berechnungsergebnisses, wie diese Abbildung zeigt, ein wenig grösser sind als diejenigen des praktischen Messungsergebnisses, ist die nämliche Annahme für den Entwurf der praktischen Anlagen ungefährlich.

So haben wir aus den Ergebnissen bei den Modellexperimentalanlagen geschlossen. In welchem Grade dieser Schluss aber auch bei den praktischen

Anlagen gilt, das müssen wir erst durch weitere Nachprüfungen feststellen.

4.2 Das praktische Experiment und die Vergleichung des Experimental- mit dem Berechnungsergebnis.

4.2.1 Für das kurze Leitungsrohr.

Die Verfasser stellten am 10. Okt. 1952 in der Yanahara-Pyritgrube ein praktisches Experiment an und untersuchten das Verhältnis zwischen Blasleistung und Druckverlust in Hinsicht auf den Fall, dass sich ein 90° Krümmers von 0,7 m

im Krümmungsradius im Leitungsrohr befand. Wie Abb. 19 darstellt, wurden ein Eisenrohr von 150 mm im Durchmesser als Leitungsrohr, die Öffnungstypus-Aufgabe in Abb. 12 als Aufgabemaschine, und Brechberge von 3 cm im reduzierten Durchmesser und von 2500 kg/m³ spezifischen Gewichts als Fördermaterial in Gebrauch genommen. Das Resultat steht in Tafel 6. Wenn wir nach dem Resultat dieser praktischen Messung den Druckabfall berechnen, indem wir die Körpergeschwindigkeit am Auslass des Krümmers als Null annehmen, dafür aber den Druckverlust im Inneren des Krümmers ignorieren, so erhalten wir das Resultat, das in der nämlichen Tafel, oder in Abb. 20 dargestellt ist. Das Berechnungsergebnis zeigt zwar gegenüber dem Resultat der praktischen Messung ein wenig grössere Werte, aber wir dürfen dennoch sagen, dass sich beide Ergebnisse ziemlich gut decken. Die im letzten Absatz erwähnte Methode, den Druckabfall in Rücksicht auf den vorhandenen Krümmer zu berechnen, erweist sich also als auf die Praxis anwendbar.

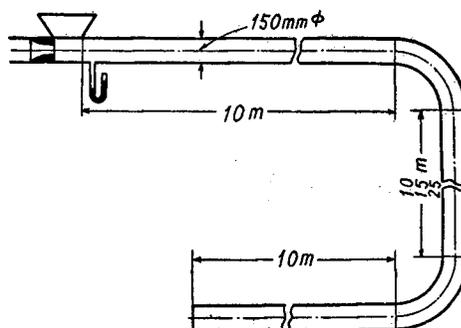


Abb. 19 Versuchsanlage.

Wir dürfen auch annehmen, dass der Druckabfall für eine Krümmerstelle etwa demjenigen für eine Aufgabestelle gleich ist, soweit die Veränderungen des spezi-

Tafel 6 Das Experimentalresultat des Druckabfalls in der Yanahara Pyritgrube im Vergleich zum Berechnungsergebnis hinsichtlich der 90° Krümmern.

Verbrauchte Luftmenge (m ³ /h)	Blasleistung (ton/h)	Experimentaldruckabfall (mm Q.S.)	Berechneter Druckabfall (mm Q.S.)	p_K (mm Q.S.)	p_L (mm Q.S.)	Zustand des Leitungsrohrs
3000	16,5	120	119,8	80,6	39,2	10m + ∠ R + 10m
3000	15,3	110	114,0	74,8	39,2	
3000	12,0	90	97,8	58,6	39,2	
3000	14,7	120	126,9	78,0	48,9	10m + ∠ R + 15m
3000	13,5	120	120,5	71,6	48,9	
3000	10,8	110	106,3	57,4	48,9	
3000	10,5	120	130,1	61,6	68,5	10m + ∠ R + 25m
3000	9,75	120	125,7	57,2	68,5	
3000	7,75	110	114,0	45,5	68,5	
3000	7,50	130	133,4	74,8	58,6	10m + ∠ R + 10m + ∠ R + 10m
3000	6,00	120	118,4	59,8	58,6	
3000	5,25	100	111,0	52,4	58,6	

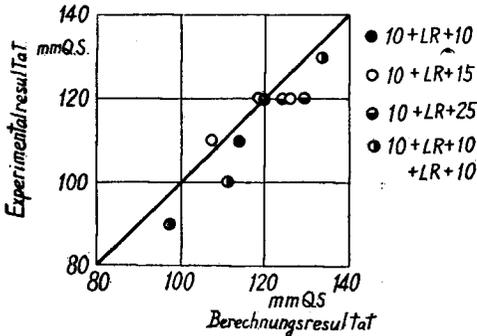


Abb. 20 Das Berechnungsergebnis des Druckabfalls mit Krümmern in Abhängigkeit vom Experimentalresultat.

kg/m³ spezifischen Gewichts durch ein Leitungsrohr von 150 mm im Durchmesser horizontal 40 m lang gefördert wird, ist der Zusammenhang zwischen der Stelle des Krümmers und dem Druckabfall p_K , der nur für die Körpergruppenförderung nötig ist, so darzustellen, wie Abb. 21 zeigt. Aus dieser ergibt sich, dass der grösste Druckabfall entsteht, wenn sich der Krümmer in der Mitte der Leitungsrohrstrecke befindet. Bei der Anwendung des Krümmungsrohrs ist es also vorteilhaft, den Krümmer fern von der Leitungsrohrstrecke und wo möglich nah an den Auslass des Rohrs zu legen. Was nur den Druckabfall betrifft, darf sich der Krümmer auch in der Nähe der Aufgabe befinden, aber in solchem Falle, wo sich die Stellen, mit kleiner Körpergeschwindigkeit einander nähern, wird die Gefahr eines Rohrverschlusses vermehrt.

fischen Gewichts der Luft und der Luftgeschwindigkeit, die durch die Druckveränderungen im Inneren des Rohrs verursacht werden, ausser acht zu lassen sind.

Auf Grund obiger Beobachtungen wollen wir den Zusammenhang zwischen der Stelle des Krümmers und dem Druckabfall der ganzen Leitung untersuchen. Wenn z. B. Brechberge von 3 cm im reduzierten Durchmesser und von 2500

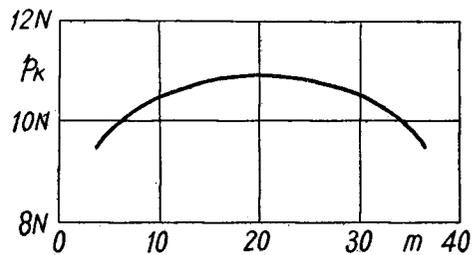


Abb. 21 Der Zusammenhang zwischen der Stelle des Krümmers und dem Druckabfall p_K .

4.2.2 Für das lange Leitungsrohr.

Wir können uns leicht vorstellen, dass der Druckabfall bei grosser Länge des Leitungsrohrs und bei dem Vorhandensein des 90°-Krümmers auch nach der in der letzten Hälfte des Kapitel 3 erwähnten Berechnungsmethode zu bestimmen ist, wenn wir die Körpergeschwindigkeit am Auslass des Krümmers wie gesagt als Null ansehen und dafür die Druckveränderung im Inneren des Krümmers ignorieren. Hier wird die Berechnung aber etwas komplizierter als bei der kleinen Länge des Leitungsrohrs, und das Berechnungsergebnis muss daher mit dem Resultat der praktischen Messung verglichen werden, um sich als gültig zu

bewähren. Für diese Vergleichung benutzten nun die Verfasser, da sie das heir erforderliche Experiment nicht anstellen konnten, das Resultat der praktischen Messung von Georg Peter. In den Experimentalanlagen in Abb. 22 und mittels des Brechberges von 4 cm im reduzierten Durchmesser und von 2000 kg/m³ im spezifischen Gewicht hat er das Resultat in Tafel 7 erhalten. Wenn wir die heir angegebenen Werte von Luftverbrauch pro Stunde und Blasleistung anwenden und den Druckabfall berechnen, so fällt

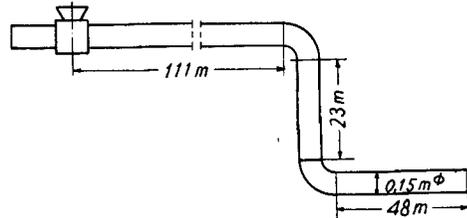


Abb. 22 Versuchsanlage.

das Berechnungsergebnis, wie Tafel 7 zeigt mit dem Resultat der praktischen Messung zusammen. In Abb. 23 befinden sich das Resultat der praktischen Messung und das Berechnungsergebnis der Vergleichung halber auf den beiden Achsen. Also ist die praktische Nutzbarkeit der von den Verfassern vorgestellten Methode der Druckabfallberechnung auch im Falle einer grossen Leitungsrohrlänge und des Vorhandenseins des Krümmers bewiesen.

Es interessiert uns weiter, dass die Druckverminderung, die die Krümmung verursacht, bei der grossen Rohrlänge wegen der Luftdichtdifferenz im Innern des Rohrs nach der Stelle dieser nämlichen Krümmung an Menge verschieden ist. Man hat nämlich anzunehmen, dass der Druckverlust für die Krümmerstelle in dem kurzen Leitungsrohr demjenigen an der Aufgabestelle etwa gleich ist, bei einer grossen Rohrlänge aber grösser wird, als der letztere. Unter der Abb. 24 angegebenen Bedingung z. B. beträgt der Druckabfall auf der Strecke, die etwa als die Beschleunigungszeit des Körpers anzusehen ist, d.h. auf der Strecke 32 m

Tafel 7 Das Experimentalresultat des Druckabfalls von G. Peter im Vergleich zum Berechnungsergebnis hinsichtlich der 90° Krümmern.

Verbrauchte Luftmenge (m ³ /h)	Blasleistung (ton/h)	Experimental-druck-abfall (atü)	Berechneter Druckabfall (atü)	p_K (kg/cm ²)	p_L (kg/cm ²)	Zustand des Leitungs rohrs
3575	140	1,68	1,91	1,58	0,40	111m + ∠R + 23m
3547	108	1,32	1,55	1,22	0,39	
3301	63	1,13	1,01	0,70	0,35	
3079	52	0,80	0,83	0,56	0,30	
3289	63	1,40	1,56	1,14	0,48	111m + ∠R + 23m + ∠R + 48m
3117	115	2,15	2,38	2,03	0,43	
3103	104	2,06	2,18	1,83	0,43	

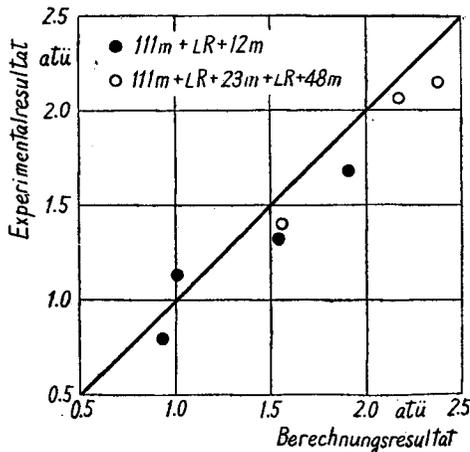


Abb. 23 Die Vergleich des Resultats der praktischen Messung und das Berechnungsergebnis.

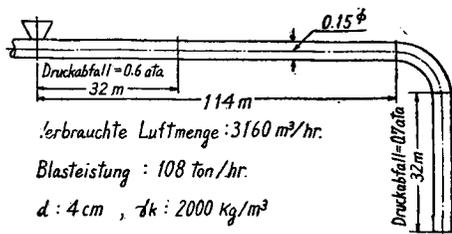


Abb. 24 Bedingung für die Berechnung.

stromabwärts von der Aufgabestelle 6000 kg/m² und auf der gleichen stromabwärts von dem Auslass des Krümmers 7000 kg/m². Der letztere Wert zeigt somit gegenüber dem ersteren einen grösseren Druckverlust. Dies trifft mit dem erfahrungsmässig gewonnenen Hinweis Georg Peters zusammen.

5. Schlusswort.

In dieser Abhandlung geben die Verfasser eine Methode an, nach der der Druckabfall bei der Körpergruppenförderung im Leitungsrohr bestimmt werden kann. Auf Grund der Resultate des Modellexperiments und der praktischen Messung wird bewiesen, dass diese Methode einfache Berechnungen ermöglicht und zugleich eine praktischen Anforderungen genügende Genauigkeit verschafft. Mit anderen Worten, das bisher nicht bekannte Verhältnis zwischen Luftverbrauch, Blasleistung, Rohrlänge und Druckabfall wurde festgestellt und die dafür nötige Berechnungsmethode gefunden.

Schrifttum

- 1) Gasterstädt, H.: Die experimentelle Untersuchung des pneumatischen Fördervorganges. Forsch. Arb. Ing.-Wes. Nr. 265, Berlin 1924.
- 2) Deuschl, E.: Untersuchungen über den Luftverbrauch beim Blasversatzverfahren Glückauf, Jan. 1931.
- 3) Albert, C.: Die energietechnischen Vorgänge beim Versatzblasen. Glückauf, Jahrgang 87, Heft 51/52. 1951
- 4) Peter, G.: Messungen an Blasversatzmaschine, zur Klärung der Zusammenhänge zwischen Blasleistung, Leitungslänge, Luftmenge und Luftdruck. Glückauf, Jahrgang 88, Heft 31/32. 1952.
- 5) Mikumo, E., und Kokado, J.: On the Basic Study of Pneumatic Stowing. Trans. of the Japan Society of Mechanical Eng., Vol. 19, No. 85, 1953.
- 6) Mikumo, E., und Kokado, J.: On the Basic Study of Pneumatic Stowing. (2nd Report). Trans. of the Japan Society of Mechanical Eng., Vol. 20, No. 89, 1954.