

Inhalt: *Trückverlust von Schmelzstoffen,
Apparat Kieselgel.*

Technischer Prüfstand.

Nr. 301.

Bericht von *Dipl.-Ing. Lehmann.*
vom *21. Januar* 1936.

I 49

Gesehen von der Direktion *[Signature]*

Zur Kenntnis an:

Empfänger	Ein- gang	Weiter	Unterschrift
		28253	

B e r i c h t

über

Druckverlust in Schüttstoffen, Oppauer Kieselgel.

Im Nachfolgenden wird das Resultat der Auswertung des Zährenmaterials des Berichtes Nr. 1168 vom 14.2.1931 des Oppauer Ammoniaklaboratoriums über den "Widerstand von Kieselgel gegen strömende Gase" mitgeteilt. Die Auswertung des Versuchsmaterials obigen Berichtes geschah auf Wunsch der Maschinentechnischen Abteilung des Ammoniakwerkes Merseburg (Schreiben vom 17.7.35).

Die Druckverlustmessungen waren an eng- und weitporige Kieselsäuregel verschiedener Körnung, wie sie in Oppau für Trocknungs- und Adsorptionsprozesse hergestellt werden, angestellt worden. Das engporige Gel adsorbierte bei 18°C ca. 31 Gew.-% Benzol aus mit Benzoldampf gesättigtem Gas und ca. 22 Gew.-% aus mit 1 Vol% Benzol beladenem Gas, während die weitporigen Gele 80 bzw. 7 Gew.-% aufnahmen.

Das Versuchrohr hatte einen Innendurchmesser von 55 mm bei 1,0; 1,5 und 2,0 m Schütthöhe. Die Körnungen betragen 0,5 - 1,0 mm, 1,0 - 2,0 mm, 2,0 - 4,0 mm, 4,0 - 6,0 mm und 6,0 - 10,0 mm. Das Versuchresultat des Berichtes bestand in einer schaubildlichen Darstellung des Druckverlustes (mm H₂O-Säule) als Funktion von der stündlichen Luftmenge.

Rechnungsgrundlagen:

Der weiteren Auswertung obiger Resultate liegt die allgemeine Gleichung zu Grunde:

$$\Delta p = \alpha \frac{h}{f} \cdot \frac{c^2}{2g} \cdot \gamma \cdot c_1,$$

wobei $\alpha = f(Re)$ und

$$Re = \frac{f \cdot c}{\nu} \cdot c_2$$

Hierin bedeuten:

f mittlere Korngröße des Schüttstoffes [m]

h Höhe des Schüttgutes [m]

g Erdbeschleunigung [9,81 m/sec²]

γ_k Raugewicht des einzelnen Kornes [kg/m³]

γ_m " " geschichteten Stoffes [kg/m³]

γ_s " " strömenden Gases "

η Zähigkeit " " [kg·sec / m²]

ν kinemat. Zähigkeit " " [m²/sec] ; $\nu = \eta \cdot s / \gamma_s$

ζ Volumen der Zwischenräume je Raumeinheit (m³/m³); $\zeta = \frac{\gamma_k - \gamma_m}{\gamma_k}$

c mittl. Strömungsgeschwindigkeit im freigedachten Rohrquerschnitt (m/sec)

c_1 mittl. Strömungsgeschwindigkeit im Querschnitt der Kornzwischenräume (m/sec); $c_1 = c / \zeta$

α Widerstandsbeiwert.

c_1, c_2 Konstanten.

Re Reynoldssche Kennziffer.

Für vorliegende Verhältnisse ist:

$c_1 = \frac{1-\zeta}{\zeta^3}$; $c_2 \approx 1$, da $c_2 = \frac{1}{4\zeta(1-\zeta)}$ und ζ praktisch zwischen 0.35 und 0.65 schwankt.

C_1 berücksichtigt den Einfluß des in der Praxis stark veränderlichen Zwischenvolumens der Schichtungen. Da im Bericht Nr.1168 keinerlei Temperatur- und Barometerstand-Angaben zu finden waren, werden noch folgende Festsetzungen getroffen:

- 1.) Die Gastemperatur (Luft) beträgt 20°C und der Barometerstand 760 mm Hg an den Versuchstagen.
- 2.) Das jeweilige spezifische Gewicht der Luft für die einzelnen Versuche errechnet sich zu:

$$\gamma_s = \gamma_{760,20} \cdot \frac{760 + 2 \cdot \frac{\Delta p}{27,2}}{760} = 1,2 \frac{760 + 2 \cdot \frac{\Delta p}{27,2}}{760} = 0,00158 (760 + \frac{\Delta p}{27,2})$$

- 3.) Die jeweilige kinematische Zähigkeit bestimmt sich zu:

$$\nu = \frac{1,83 \cdot 9,81 \cdot 760}{10^6 \cdot 1,2 (760 + \frac{\Delta p}{27,2})} = \frac{0,01137}{760 + \frac{\Delta p}{27,2}} \quad +)$$

Außerdem ergab sich, daß praktisch γ_m unabhängig von der Körnung ist.

Für engporiges Gel ist:

Für weitporiges Gel ist:

$$\gamma_k = 1175 \text{ kg/m}^3; \quad \gamma_m = 720 \text{ kg/m}^3; \quad \gamma_k = 710 \text{ kg/m}^3; \quad \gamma_m = 400 \text{ kg/m}^3;$$

$$\zeta = 0,3872 \qquad \qquad \qquad \zeta = 0,436$$

Somit errechnet sich der Widerstandsbeiwert α aus der allgemeinen Gleichung zu:

Für engporiges Gel:

Für weitporiges Gel:

$$\alpha_c = \frac{\Delta p}{2} \cdot \frac{f}{h} \cdot \frac{1177,2}{760 + \frac{\Delta p}{27,2}}$$

$$\alpha_w = \frac{\Delta p}{2} \cdot \frac{f}{h} \cdot \frac{1826}{760 + \frac{\Delta p}{27,2}}$$

Aus der stündlich durch das Versuchsrohr gejagten Luftmenge Q errechnet sich die mittlere Strömungsgeschwindigkeit c im frei-

+) Es kamen nur die Untersuchungen an Schichten von 2,0 m Höhe zur Auswertung.

gedachten Rohrquerschnitt (55,8 mm) zu:

$$c = \frac{Q}{8,553} \text{ (m/sec).}$$

Die modifizierte, auf den mittleren Korndurchmesser f (m) und die oben ermittelte Geschwindigkeit c [m/sec] bezogene Reynoldsche Zahl errechnet sich zu:

$$Re = \frac{c \cdot f (760 + \frac{\Delta P}{2})}{0,01137}$$

Ergebnis:

Aus 79 einzelnen Messungen sind α_c - und α_w -Werte als Funktion von Re dargestellt, und zwar für verschiedene Korndurchmesser f . Im gleichen Schaubild sind 3 weitere Kurven gezeichnet, die Untersuchungen von Esser und Barth, Wagner und Hohlschuh, Ramsin und den Amerikanern Chilton und Colburn entstammen. Es zeigt sich zunächst, daß der Verlauf der 9 gewonnenen Kieselgel-Kurven mit dem Verlauf der anderen Forscher recht gut übereinstimmt.

Die Höhenlage der 9 Kieselgel-Kurven dagegen ist nicht eindeutig erklärbar. Die oberste Vergleichskurve I (Esser-Barth Wagner-Hohlschuh) gilt nur für Körper mit scharfen Kanten, wie Koks, Erz usw., und ist daher mit den Kieselgel-Kurven nicht vergleichbar, was aus dem Schaubild bis auf die weitporige 8 mm - Kieselgel-Kurve eindeutig bestätigt wird. 5 Kieselgel-Kurven (weitporig, Korngröße 1,5; 3,0; 5,0mm sowie engporig, Korngröße 3,0 und 5,0 mm) liegen zwischen den Vergleichskurven II (Ramsin) und III (Chilton und Colburn). Diese beiden Vergleichskurven sind an abgerundeten Körpern (Mais, Weizen, Mohn, Anthra

zeit, Schrotkugeln, Kieselsteinen, Raschig-Ringen, Metallschrot und eingebaute Wirbelkörper) gewonnen worden und dürften, was die Oberflächenbeschaffenheit anbelangt, mit dem Kieselgel vergleichbar sein. Sehr geringe α -Werte wurden an engporigem Kieselgel bei den mittleren Korndurchmessern von 0,75-1,5 und 8,0 mm gefunden.

Ein Vergleich der Kieselgel-Kurven untereinander läßt ohne weiteres erkennen, daß bei gleichgroßem Re das engporige Gel kleineren Druckverlust verursacht als das weitporige Gel. Es ist wohl anzunehmen, daß das weitporige Gel eine andere Oberflächenausbildung besitzt als das engporige, die in der Auswertung nicht berücksichtigt werden konnte. Eine eindeutige Korndurchmesser-Abhängigkeit des α -Wertes für weit- und engporiges Gel kann aus den bisherigen Unterlagen nicht festgelegt werden. Hierzu müßten schärfer erfaßt werden:

- 1.) Der mittlere wirksame Korndurchmesser einer bestimmten Siebfraktion. Hierzu ist jeweils die Sieb-kurve nötig, da Angaben wie Korngröße 6-10 mm ein Korngemisch darstellen.
- 2.) Das Porenvolumen χ . Bei Stoffmischungen verschiedener Korngröße sind verschiedene Schichtungen möglich, die alle mehr oder weniger stabil sind.

Es wäre zu begrüßen, falls es gelänge, an Großapparaturen die noch fehlenden Unterlagen zu beschaffen und ^{liesse} /zugänglich zu machen.

⁺) Nach dem Resultat der Untersuchungen der anderen Forscher (Vergleichskurven I-III) sollte man annehmen, daß die Untersuchungen für das eng- und weitporige Gel je einen Kurvenzug ergeben.

Für Vergleichskurve I haben Esser und Barth eine Näherungsformel für α angegeben, die einen Re-Bereich von 0,1 bis 10 000 deckt:

$$\alpha = \frac{490}{Re} + \frac{100}{\sqrt{Re}} + 5,85$$

Wir haben für die Vergleichskurven II und III sowie für die 9 Kieselgel-Korngrößen ebenfalls Näherungsgleichungen aufgestellt, die mit den Versuchspunkten recht gut im Einklang stehen und in der Tabelle I zusammengestellt sind.

Um einen Überblick zu erhalten, wie sich die Widerstandsbeiwerte für verschiedene Korngrößen, aber bei gleichen Geschwindigkeiten verhalten, ist Schaubild 2 beigegeben. Aus ihm sind für die einzelnen Korngrößen f bei gleichbleibendem Re die zugehörigen Geschwindigkeiten c zu entnehmen, oder bei gleichen Geschwindigkeiten c für die einzelnen Korngrößen f die entsprechenden Re- und damit die zugehörigen α_z -Werte oder α_w -Werte. Schaubild 2 gilt nur für Luft oder für Gas mit einer kinematischen Zähigkeit von $10^6 \nu = 14,62$.

Zur allgemeinen praktischen Ermittlung der Reynoldsschen Zahl Re für gasförmige wie auch tropfbare Flüssigkeiten aus den Werten c , d , γ_g , resp. γ_{fl} , η und g oder den Werten G , d und η ist ganz allgemein das Schaubild Blatt 3 entworfen worden. Ihm liegt folgende Beziehung zu Grunde:

$$Re = \frac{c \cdot d \cdot \gamma}{\eta \cdot g} = \frac{G}{d} \cdot \frac{1}{27750}$$

Hierin bedeuten:

- d Durchmesser des leeren Rohres [m]
- G strömendes Flüssigkeitsgewicht [kg/h]

Sind ganz allgemein gesehen d , ρ_g oder ρ_l , η und c gegeben, so findet man Re nach Liniensug "Beispiel 1"; sind das strömende Flüssigkeitsgewicht ρ , d , η und ρ_g oder ρ_l gegeben, so kann man erstens Re nach dem Liniensug "Beispiel 2" und zweitens die Geschwindigkeit c nach Liniensug "Beispiel 2" bis zum Punkt "A" und Liniensug "Beispiel 3" finden.

Dieses Diagramm ist auch für die Ermittlung der modifizierten Reynoldsschen Zahl $Re = \frac{c \cdot f \cdot \rho_g}{\eta \cdot g}$ bei Strömung von Gasen durch mit Schüttstoffen angefüllte Rohre anwendbar. Setzt man, ausgehend von dem oben ermittelten c -Wert, für d nun die Korngröße f ein und verfährt in Sinne des Liniensuges "Beispiel 1", so gewinnt man die "modifizierte" Reynoldssche Zahl für strömende Gase in Schüttstoffen.

der Gebrauch

Es sei an Zahlenbeispielen/der Schaubilder Blatt 1-3 erläutert.

Beispiel 1: Wie groß ist bei gleicher Luftgeschwindigkeit c m/sec der α -Wert und wie hoch stellt sich der Druckverlust für eine Schichthöhe von 1 m für die verschiedenen Korngrößen ?

Gegeben: $c = 0,15$ m/sec; $\eta = 1,83 \cdot 10^{-3} \left[\frac{\text{kg} \cdot \text{sec}}{\text{m}^2} \right]$; $\rho = 1,27$ kg/m³;
 $C_{1e} = 10,55$; $C_{1w} = 6,8$.

Aus Schaubild Blatt 2, das nur für obiges η und ρ gilt, ergeben sich für die gegebenen f -Werte nachfolgende Re -Werte, aus Schaubild Blatt 1 für die gefundenen Re -Werte nachfolgende α_e - und α_w -Werte.

<u>gegeben:</u>	f mm	0,75	1,5	3,0	5,0	8,0
<u>gesucht:</u>	Re	7,75	15,5	31,5	51,5	82,0
"	α_e	23,0	16,0	23,3	17,3	9,6
"	α_w	-	35,0	20,0	20,0	21,1
ΔP_e mm H ₂ O		472	164	119	53,0	18,4
ΔP_w mm H ₂ O		-	231	66,1	39,6	26,1

Beispiel 2:

Wie groß ist der Druckverlust für ein Rohr mit einem inneren Durchmesser von $d = 50$ mm, das mit $3,33 \text{ m}^3/\text{h}$ Luft beschickt wird, und das mit Kieselgel von der Korngröße $f = 5$ mm 1 m hoch gefüllt ist?

gegeben: $d = 0,050 \text{ m}$; $V = 3,33 \text{ m}^3/\text{h}$; $\rho_g = 1,2 \text{ kg/m}^3$; $f = 5 \text{ mm}$;
 $\eta = 1,85 \cdot 10^{-6} \frac{\text{kg} \cdot \text{sec}}{\text{m}^2}$; $C_{1e} = 10,55$; $C_{1w} = 6,8$.

Aus V und ρ_g errechnet sich das stündlich durch das Rohr strömende Luftgewicht zu $G = 4 \text{ kg/h}$. Mit Hilfe von Schaubild Blatt 3 ergibt sich für G , d und ρ_g gemäß Liniensug "Beispiel 2 und Beispiel 3" eine Strömungsgeschwindigkeit von $c = 0,47 \text{ m/sec}$. Mit dieser Geschwindigkeit aus dem gleichen Schaubild ergibt sich gemäß Liniensug "Beispiel 1" und $d = f = 5 \text{ mm}$ sowie $\eta = 1,85 \cdot 10^{-6} \frac{\text{kg} \cdot \text{sec}}{\text{m}^2}$ eine modifizierte Reynoldssche Zahl $Re = 158$.

Aus Schaubild Blatt 1 ergibt sich weiter für $Re = 158$
bei $f = 5$ mm für engporiges Gel $\alpha_e = 10,1$, für weitporiges
Gel $\alpha_w = 11,7$.

Mit Hilfe der allgemeinen Gleichung errechnet sich dann

Δp_e zu 290 mm W.S.

Δp_w zu 216 mm W.S.

Anlagen: 1 Tabelle
3 Schaubilder.

Pohmann

Zum Bericht: Druckverlust in Schüttstoffen, Oppauer Kieselgel,
vom 21. Januar 1936.Kf.

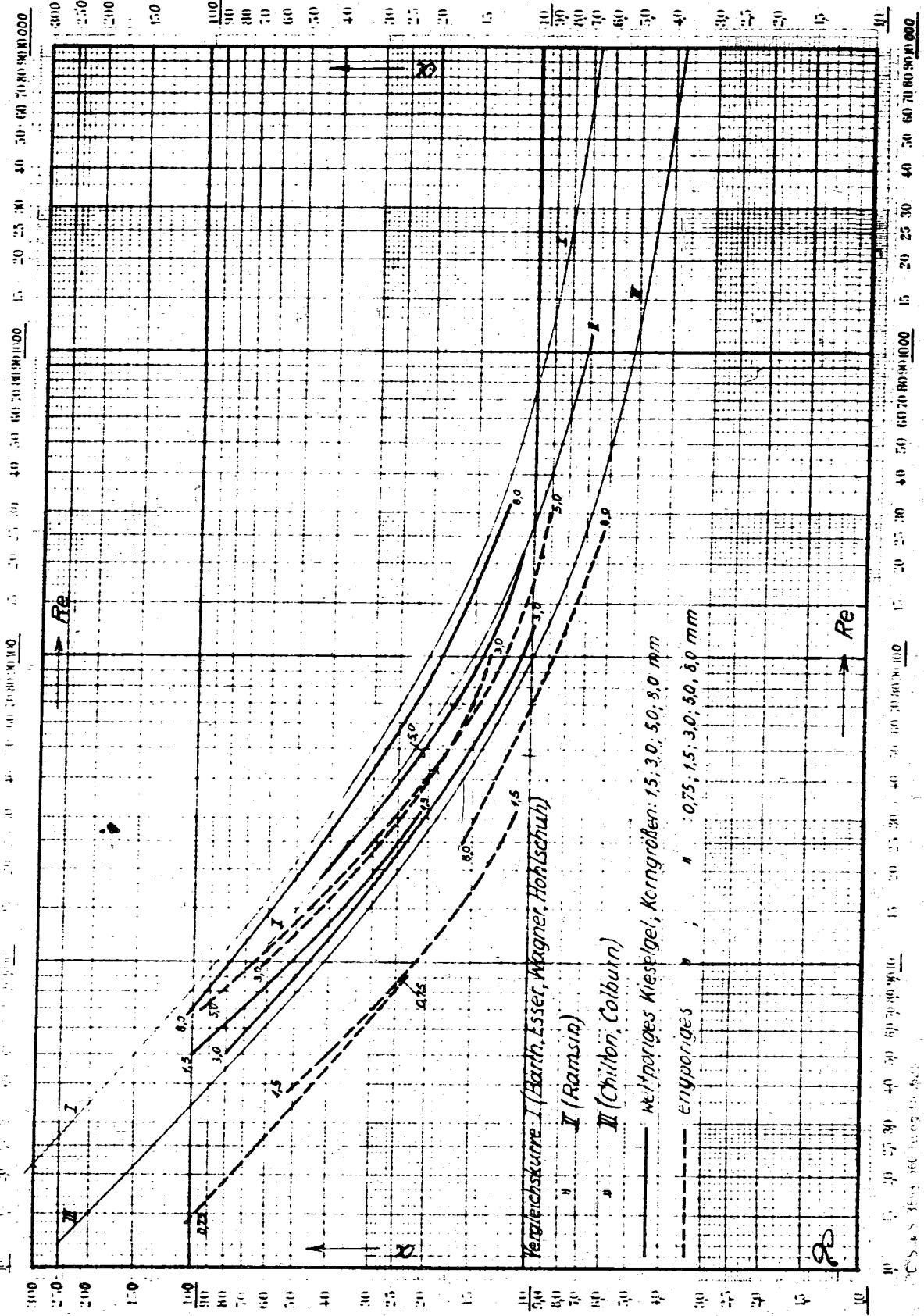
T a b e l l e I.

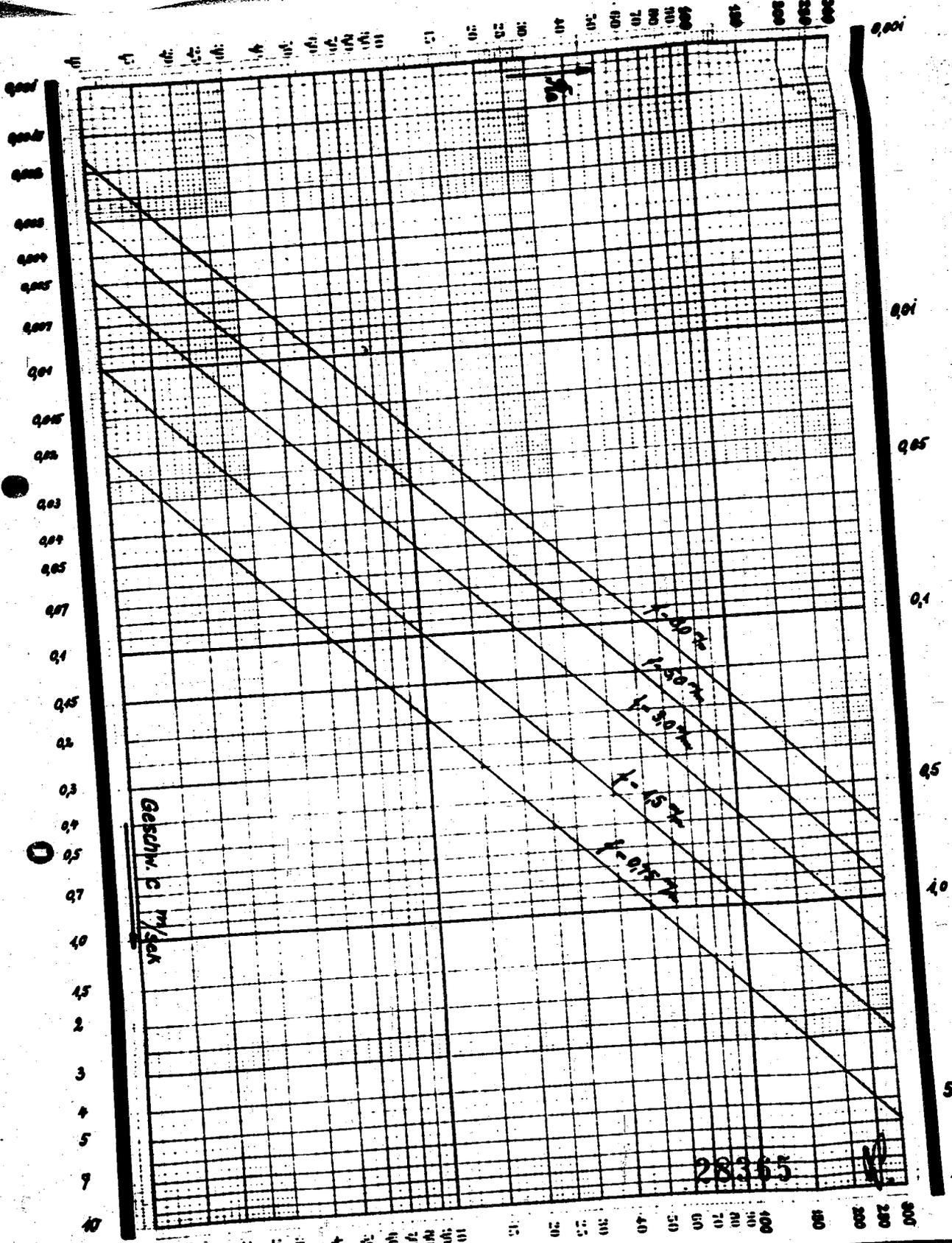
Engporiges Gel. 2,00 m langes Rohr, 55 mm ϕ -

Mittlere Korngröße mm	Versuchsbereich Re	Gleichung: $\alpha = \frac{A}{Re} + \frac{B}{\sqrt{Re}} + C$	Bemerkungen:
0,75	2-9	$\frac{90}{Re} + \frac{49,7}{\sqrt{Re}} - 3,2$	<u>Barth u. Esser:</u> 52,5 mm ϕ scharfkantige Stoffe <u>Wagner, Hohlschuh,</u> <u>Barth:</u> Erzstaub 0,07-1,0 mm Minette. <u>Ramsin:</u> Mais, Weizen, Mohn. Anthrazit 2-19,5 mm Schrot 5-7,6 mm.
1,5	4-35	$\frac{218}{Re} - \frac{28,3}{\sqrt{Re}} + 9,2$	
3,0	12-80	$\frac{700}{Re} - \frac{59,7}{\sqrt{Re}} + 13,5$	
5,0	25-200	$\frac{657,3}{Re} - \frac{24,4}{\sqrt{Re}} + 8,2$	
8,0	35-250	$\frac{50,7}{Re} + \frac{59,4}{\sqrt{Re}} + 2,3$	

Weitporiges Gel. 2,00 m langes Rohr, 55 mm ϕ -

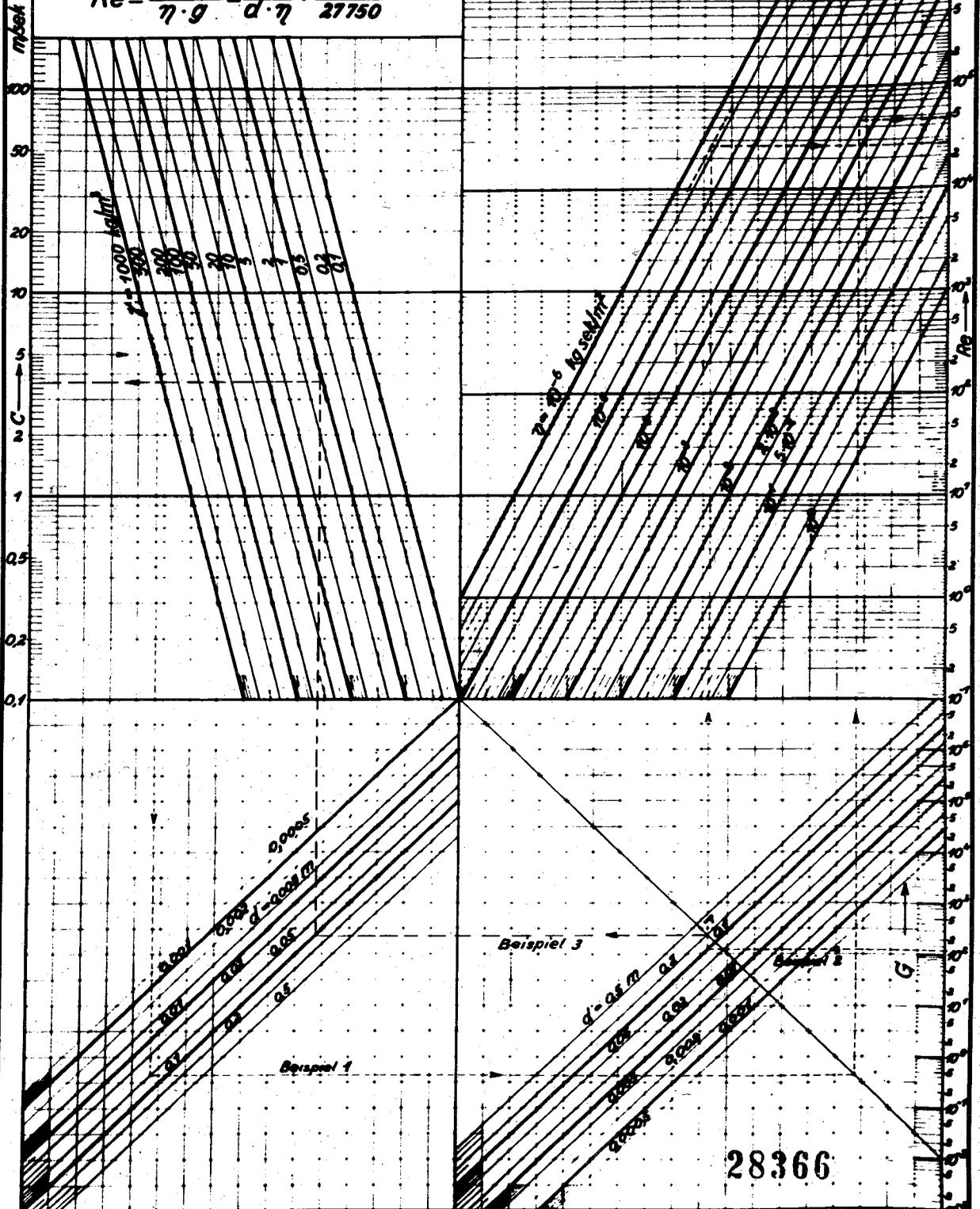
1,5	4,5-30	$\frac{590}{Re} - \frac{77,5}{\sqrt{Re}} + 16,7$	<u>Gilten u. Colburn:</u> Stückige Stoffe; Kugeln 3-25 mm. Kieselsteine, Raschig-Ringe, Metallschrot. Länge 1,15; 0,46 m. Rohr- ϕ 35,75 mm. Winkelvorrichtungen. Schrauben aus flachem Stahlband, auf einen Kern in Schrauben aufgewickelter Kupferband, propellerartige Scheiben aus Messing.
3,0	6-100	$\frac{297,2}{Re} + \frac{37,4}{\sqrt{Re}} + 4,2$	
5,0	20-190	$\frac{644,5}{Re} + \frac{0,636}{\sqrt{Re}} + 7,76$	
8,0	20-250	$\frac{419,2}{Re} + \frac{101}{\sqrt{Re}} + 4,97$	
Barth-Esser Wagner-Hohlschuh, Barth	0,2-40 1000-10000	$\frac{490}{Re} + \frac{100}{\sqrt{Re}} + 5,65$	
Ramsin	15-1100	$\frac{410}{Re} + \frac{67,8}{\sqrt{Re}} + 4,32$	
Gilten u. Colburn	1,3-10000	$\frac{246}{Re} + \frac{40,4}{\sqrt{Re}} + 3,6$	





Ermittlung der Reynoldsschen Zahl

$$Re = \frac{c \cdot d \cdot \tau}{\eta \cdot g} = \frac{G}{d \cdot \eta} \cdot \frac{1}{27750}$$



28366

TLD 1046 keln