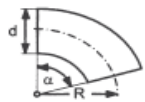


**Boru Bağlantı Elemanları  
Basınç kayıp katsayıları**

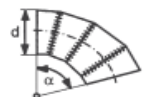
**Tabelle 4.** Druckverlustbeiwerte  $\zeta$  von Formstücken und Rohrbögen

a) Kreisbogenkrümmer



R/d=1	$\alpha$	glatt					rau
		15°	22,5°	45°	60°	90°	90°
2	$\zeta$	0,03	0,04	0,14	0,19	0,21	0,51
4		0,03	0,04	0,09	0,12	0,14	0,3
6		0,03	0,04	0,08	0,10	0,11	0,23
10		0,03	0,04	0,07	0,09	0,09	0,18
		0,03	0,04	0,07	0,07	0,11	0,20

b) Segmentkrümmer



$\alpha$	15°	22,5°	30°	45°	60°	90°
Anzahl der Rundnähte	1	1	2	2	3	3
$\zeta$	0,06	0,08	0,1	0,15	0,2	0,25

c) Faltenrohrbogen 90°



$\zeta=0,40$

d) Zusammengesetzte Krümmer aus 2-90°

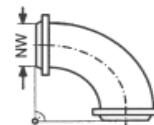


$\zeta_{180^\circ}=2\zeta$

$\zeta_{RK}=3\zeta$

$\zeta_{DK}=4\zeta$

e) Gusskrümmer 90°



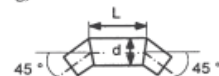
NW	50	100	200	300	400	500
$\zeta$	1,3	1,5	1,8	2,1	2,2	2,2

f) Kniestücke



$\delta$	22,5°	30°	45°	60°	90°
glatt $\zeta$	0,07	0,11	0,24	0,47	1,13
rauh $\zeta$	0,11	0,17	0,32	0,88	1,27

g) Kniestücke



l/d	0,71	0,943	1,174	1,42	1,86	2,56	6,25
glatt $\zeta$	0,51	0,35	0,33	0,28	0,29	0,36	0,40
rauh $\zeta$	0,51	0,41	0,38	0,38	0,39	0,43	0,45

h) Kniestücke



l/d	1,23	1,67	2,37	3,77
glatt $\zeta$	0,16	0,16	0,14	0,16
rauh $\zeta$	0,30	0,28	0,26	0,24

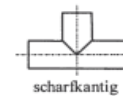
i) Kniestücke



l/d	1,76 ... 6,0	
glatt $\zeta$	0,15 ... 0,2	
rauh $\zeta$	0,3 ... 0,4	

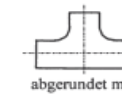
**Tabelle 5.** Druckverlustbeiwerte  $\zeta$  von Rohrverzweigungen und Drosselgeräten

T-Stücke  
(Stromtrennung)



scharfkantig

$\zeta=1,2$



abgerundet mit  
geradem Boden

$\zeta=0,87$



kugelförmig mit nach  
innen abgerundetem Hals

$\zeta=0,73$

Abzweigstücke

Die  $\zeta$ -Werte beziehen sich auf den Querschnitt vor der Trennung bzw. Vereinigung

$\dot{V}$  = Gesamtvolumenstrom

$\dot{V}_a$  = ab- bzw. zufließender Volumenstrom

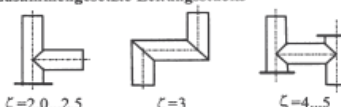
$\zeta_d$  = Widerstand im Hauptrohr

$\zeta_a$  = Widerstand im Abzweigrohr

Minuszeichen bedeutet Druckgewinn

$\dot{V}_a / \dot{V}$	Trennung				Vereinigung			
	$\zeta_a$	$\zeta_d$	$\zeta_a$	$\zeta_d$	$\zeta_a$	$\zeta_d$	$\zeta_a$	$\zeta_d$
0	0,95	0,04	0,90	0,04	-1,2	0,04	-0,92	0,04
0,2	0,88	-0,08	0,88	-0,06	-0,4	0,17	-0,38	0,17
0,4	0,89	-0,05	0,50	-0,04	0,08	0,30	0,00	0,19
0,6	0,95	0,07	0,38	0,07	0,47	0,41	0,22	0,09
0,8	1,10	0,21	0,35	0,20	0,72	0,51	0,37	-0,17
1,0	1,28	0,35	0,48	0,33	0,91	0,60	0,37	-0,54

Zusammengesetzte Leitungstücke

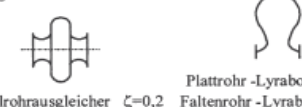


$\zeta=2,0...2,5$

$\zeta=3$

$\zeta=4...5$

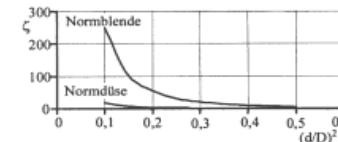
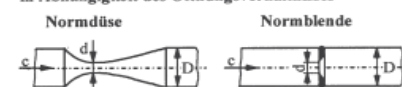
Ausgleichsstücke



Wellrohrausgleicher  $\zeta=0,2$

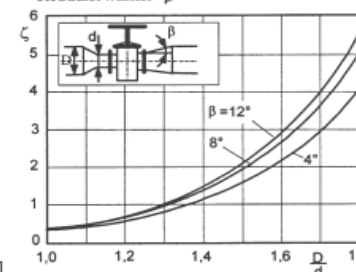
Plattrohr-Lyrbogen  $\zeta=0,7$   
Faltenrohr-Lyrbogen  $\zeta=1,4$

Druckverlustbeiwerte für Normdüsen und Normblenden in Abhängigkeit des Öffnungsverhältnisses



d/D	0,32	0,39	0,45	0,50	0,55	0,63	0,71	
(d/D) <sup>2</sup>	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,4	0,5	
Normdüse	$\zeta$	17	7	3	2	1	0,5	0,3
Normblende	$\zeta$	249	102	53	31	19	9	4

Absperrschieber mit Reduzierstücken in Abhängigkeit vom Durchmesser Verhältnis und vom Reduzierwinkel  $\beta$



Drosselgeräte in Abhängigkeit des Öffnungsverhältnisses

$\Delta p'$ =Wirkdruck							
(d/D) <sup>2</sup>	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
(p1-p2)/ $\Delta p'$	0,90	0,81	0,65	0,52	0,42	0,33	0,27
$\zeta$	360	81	16,3	5,8	2,6	1,3	0,75

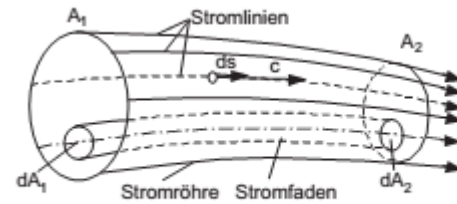
## Hidro-Dinamik Formüllerin Tanımı

### Formelzeichen und Einheiten<sup>1)</sup> zur Hydro- und Gasdynamik

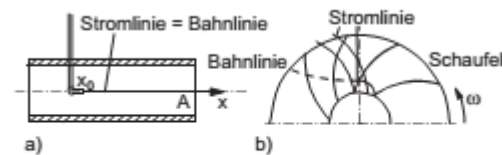
$A$	$m^2$	Strömungsquerschnitt	$r$	$m$	Radius
$a$	$\frac{m}{s}$	Schallgeschwindigkeit	$So$	$1$	Sommerfeldzahl
$Bi$	$1$	Binghamzahl	$Sr$	$1$	Strouhalzahl
$c$	$\frac{m}{s}$	Strömungsgeschwindigkeit	$St$	$1$	Stokeszahl
$c_p$	$\frac{J}{kg \cdot K}$	isobare spezifische Wärmekapazität	$t$	$s$	Zeit
$c_v$	$\frac{J}{kg \cdot K}$	isochore spezifische Wärmekapazität	$u$	$\frac{J}{kg}$	spezifische innere Energie
$c_w$	$1$	Widerstandsbeiwert	$v$	$m^3$	Volumen
$Eu$	$1$	Eulerzahl	$\dot{V}$	$\frac{m^3}{h}$	Volumenstrom
$F$	$N$	Kraft	$\alpha$	$^\circ$	Winkel
$F_G$	$N$	Gewichtskraft	$\alpha$	$1$	Durchflusszahl bei Blenden
$Fr$	$1$	Froudezahl	$\beta$	$^\circ$	Winkel
$g$	$\frac{m}{s^2}$	Fallbeschleunigung	$\theta$	$^\circ$	Diffusoröffnungswinkel
$H$	$m$	Bernoulli'sche Konstante	$\zeta$	$1$	Druckverlustbeiwert
$h$	$\frac{J}{kg \cdot K}; m$	spezifische Enthalpie; Höhe	$\delta$	$m$	Grenzschichtdicke
$Ha$	$1$	Hagenzahl	$\delta_U$	$m$	laminare Unterschicht
$He$	$1$	Helmholtzzahl	$\delta^*$	$m$	Verdrängungsdicke
$I$	$\frac{kg \cdot m}{s}$	Impuls	$\delta''$	$m$	Impulsverlustdicke
$L$	$m$	Länge, Rohrlänge	$\eta$	$Pa \cdot s$	dynamische Viskosität
$m$	$kg$	Masse	$\kappa$	$1$	Isentropenexponent
$\dot{m}$	$\frac{kg}{s}$	Massenstrom	$\lambda$	$1$	Rohrreibungsbeiwert
$M$	$1$	Machzahl	$\nu$	$\frac{m^2}{s}$	kinematische Viskosität; $\nu = \eta/\rho$
$p$	$Pa$	Druck	$\rho$	$\frac{kg}{m^3}$	Dichte
$p_0$	$Pa$	Ruhedruck	$\sigma$	$1$	Kavitationszahl
$p_t$	$Pa$	Totaldruck	$\tau$	$\frac{N}{m^2}$	Schubspannung
$Pr$	$1$	Prandtlzahl	$\tau_w$	$\frac{N}{m^2}$	Wandschubspannung
$R$	$\frac{J}{kg \cdot K}$	Gaskonstante			
$Re$	$1$	Reynoldszahl			
$Ro$	$1$	Rosbyzahl			

Indizes	
$\emptyset$	Ruhezustand
① ②	Grenzwerte
*	kritischer Zustand
$\wedge$	Zustandsgrößen nach Verdichtungsstoß

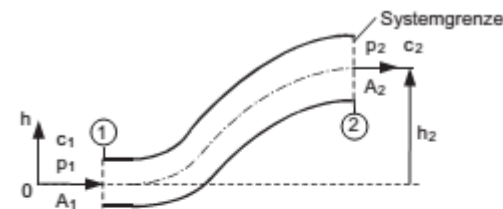
## Bernoulli-Torricelli ve Debi Formülleri



**Bild 1.** Stromröhre mit Stromfäden und Stromlinien



**Bild 2.** Stromlinie und Bahnlinie bei  
a) stationärer Rohrströmung  
b) Laufradströmung im Absolutsystem

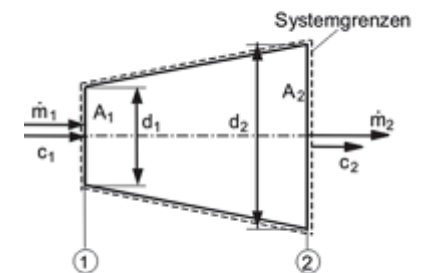


**Bild 5.** Diffusorförmiges Rohr mit Systemgrenzen

Die Bernoulli-Gleichung lautet für das diffusorförmig erweiterte Rohr im Bild 5 bei reibungsfreier Strömung

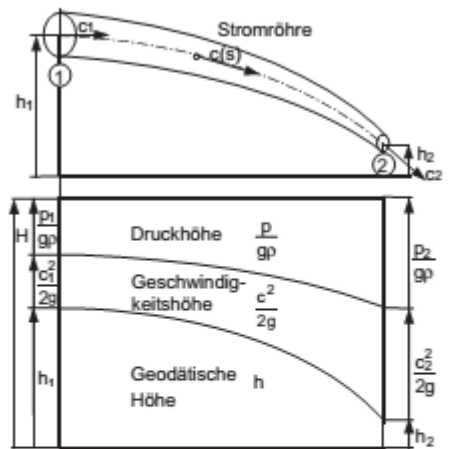
$$\frac{c_1^2}{2} + \frac{p_1}{\rho} + g h_1 = \frac{c_2^2}{2} + \frac{p_2}{\rho} + g h_2 \quad \frac{c}{\frac{m}{s}} \left| \frac{p}{Pa} \right| \left| \frac{\rho}{\frac{kg}{m^3}} \right| \left| \frac{g}{\frac{m}{s^2}} \right| \left| \frac{h}{m} \right| \left| \frac{H}{m} \right| \quad (6)$$

$$\dot{m}_1 = \rho \dot{V}_1 = \rho c_1 A_1 = \dot{m}_2 = \rho \dot{V}_2 = \rho c_2 A_2$$



**Bild 3.** Diffusor mit Systemgrenzen

$$\frac{\rho}{2} c_1^2 + p_1 + g \rho h_1 = \frac{\rho}{2} c_2^2 + p_2 + g \rho h_2 \quad (7)$$



**Bild 6.** Graphische Darstellung der Höhenanteile der Bernoulli-Gleichung

$$\frac{c_1^2}{2g} + \frac{p_1}{g\rho} + h_1 = \frac{c_2^2}{2g} + \frac{p_2}{g\rho} + h_2 \quad (8)$$

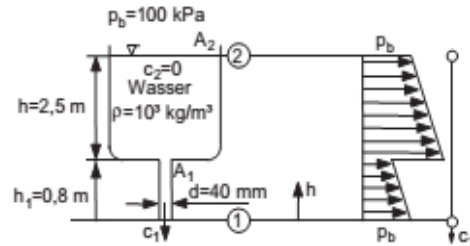
Wird die Bernoulli-Gleichung (Gl. 8) für einen offenen Behälter mit konstantem Flüssigkeitsspiegel und Ausfluss (Bild 7) aufgeschrieben, erhält man die Ausflussgleichung von Torricelli  $c = \sqrt{2gh}$ .

<sup>1)</sup> s. Seite B3

## Hidro-Dinamik bir problem

### ■ Beispiel 1:

Zu bestimmen ist die Ausflussgeschwindigkeit  $c_1$  aus einem offenen Behälter der Höhe  $h = 2,5$  m und der Ausflussrohrlänge von  $h_1 = 0,8$  m bei konstantem Wasserspiegel mit  $c_2 = 0$  für  $A_2/A_1 \gg 1,0$ . Rohrdurchmesser  $d = 40$  mm, Dichte  $\rho = 1000$  kg/m<sup>3</sup>.



**Bild 7.** Ausfließen aus einem offenen Behälter  
( $h_2 = h + h_1$ )

### Lösung:

Aus der Bernoulli-Gleichung Gl. 8 folgt:

$$\frac{c_1^2}{2g} = h_2 \rightarrow c_1 = \sqrt{2g h_2} = \sqrt{2 \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 3,3 \text{ m}} = 8,046 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Torricelli denklemleri kullanılarak çıkış hızı bulunmuştur.

Diese Gleichung stellt die Ausflussgleichung von Torricelli dar. Die Ausflussgeschwindigkeit ist gleich der Fallgeschwindigkeit einer Kugel nach der Fallhöhe  $h_2$ .

Ausflussvolumenstrom:

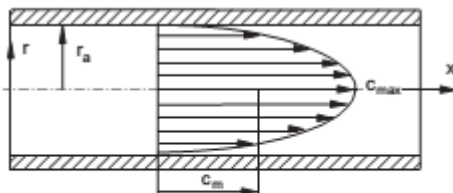
$$\dot{V} = c_1 A_1 = 8,046 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot \left(\frac{\pi}{4}\right) \cdot 0,04^2 \text{ m}^2 = 0,01 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Hacimsel debi

## Problem Çeviri;

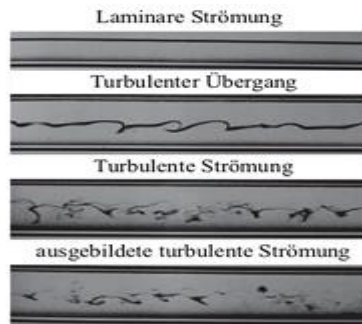
Yukarıdaki problemde açık bir tank bulunmakta, tank akışkan yüksekliği 2.5 m ve akışkan çıkış boru uzunluğu 0.8 m'dir. Tank içindeki akışkan hızı 0'dır. Akışkan çıkış boru çapı 40 mm ve akış yoğunluğu 1000 kg/m<sup>3</sup> tür.

## Laminer Akış

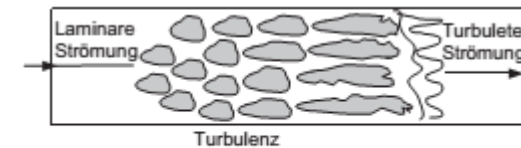


**Bild 17.** Geschwindigkeitsprofil der laminaren Rohrströmung

## Laminer ve Türbülanslı Akış

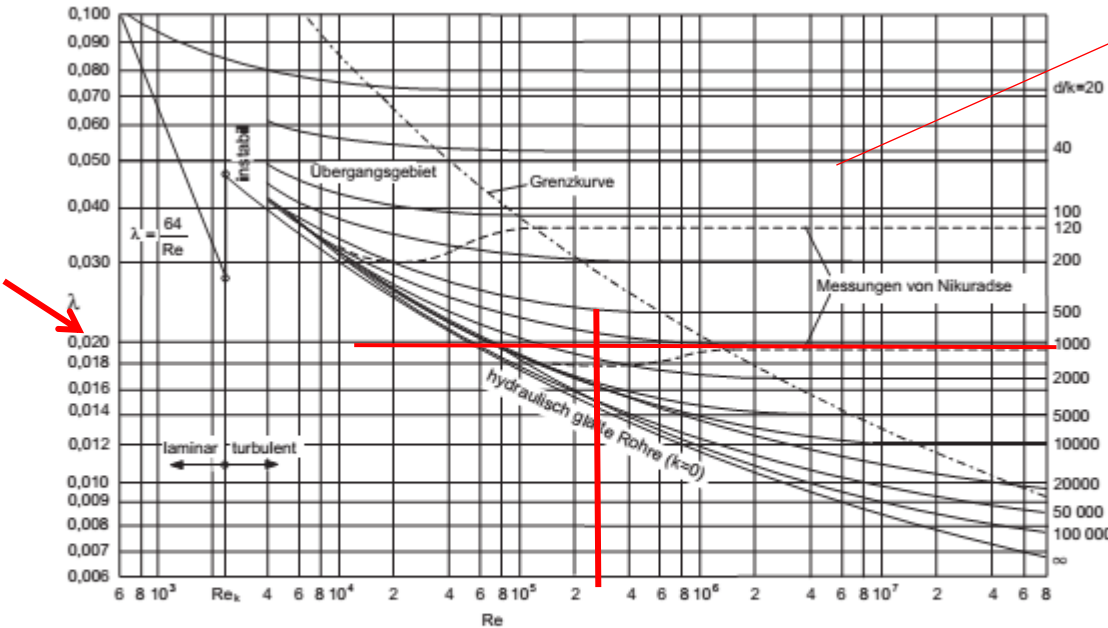


**Bild 18.** Darstellung laminarer und turbulenter Strömung in einem Rohr mittels Farbstoffsonden nach M. Van Dyke 2007 [21]



**Bild 19.** Übergang der laminaren in die turbulente Strömungsform

Reynold sayısı-Sürtünme katsayısı-Boru boyutları(d/k)



Grafik fonksiyonu

$$\lambda = f(Re, d/k)$$

Basınç kayıp katsayısı

4.6.4 Druckverlustbeiwerte

In Rohrbögen, Rohrverzweigungen, Ventilen, Schiebern und anderen Armaturen treten neben den Wandreibungsverlusten auch Umlenkverluste und Sekundärströmungsverluste auf, die nicht vom Rohrreibungsbeiwert  $\lambda$  erfasst werden. Deshalb werden für diese Bauelemente die experimentell bestimmten Druckverlustbeiwerte  $\zeta$  angegeben. Der Druckverlustbeiwert stellt den Druckverlust  $\Delta p_v$  bezogen auf den Staudruck der charakteristischen Geschwindigkeit  $\rho c^2/2$  dar.

$$\zeta = \frac{\Delta p_v}{\frac{\rho}{2} c^2} \quad (45)$$

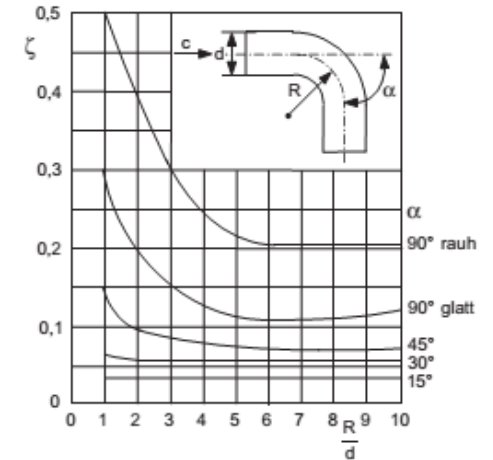


Bild 23. Druckverlustbeiwert von Rohrbögen mit kreisförmigem Querschnitt

Für Rohrleitungen beträgt der Druckverlustbeiwert  $\zeta = \lambda L/d$ . Im Bild 23 und in den Tabellen 4 und 5 sind die Druckverlustbeiwerte von Rohrbögen und von Rohrverzweigungen bei Fluidstromtrennung und Fluidzusammenführung und von weiteren Rohrleitungselementen dargestellt. Weitere Werte findet man z.B. bei Wagner [6].

Bild 21. Colebrook-Diagramm zur Bestimmung der Rohrreibungsbeiwerte  $\lambda$

Die mittleren Geschwindigkeiten in Rohrleitungen sind stoffabhängig und sie sollen betragen:

Flüssigkeiten	$c = 0,5 \dots 3,2 \text{ m/s}$
Flüssigkeits-Feststoffgemische	$c = 0,4 \dots 2,0 \text{ m/s}$
Luft und technische Gase	$c = 15 \dots 40 \text{ m/s}$

Yüzey pürüzlülüğü "k"

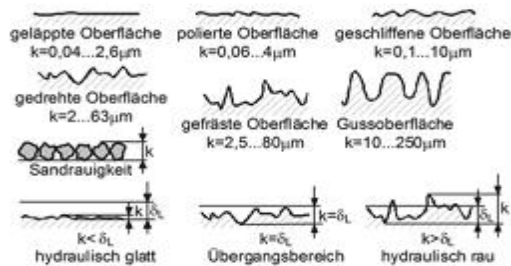


Bild 22. Beispiele technischer Oberflächenrauigkeiten

Sürtünme Katsayısı

4.6.3 Ermittlung des Rohrreibungsbeiwertes  $\lambda$

Bei laminarer Strömung nimmt die Rohrrauigkeit keinen Einfluss auf den Rohrreibungsbeiwert. Er beträgt für kreisrunde Rohre

$$\lambda = \frac{64}{Re} \quad (38)$$

Basınç kayıp katsayısı ile sürtünme katsayısı arasındaki ilişki formülü

## Boru hattı ile ilgili bir problem;

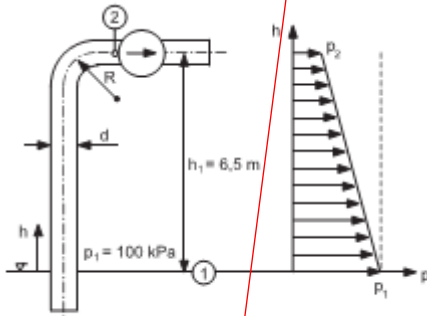


Bild 24. Saugrohrleitung einer Pumpenanlage

### Beispiel 3.

Für die Saugleitung der NW 120 einer Pumpenanlage mit der geodätischen Saughöhe  $h_1 = 6,5$  m und einem Rohrbogen  $R/d = 2,5$ , mit dem Druckverlustbeiwert  $\zeta = 0,26$  und der Rohrrauigkeit  $k = 0,1$  mm für ein neues gezogenes Stahlrohr ist für den Wasservolumenstrom von  $\dot{V} = 120$  m<sup>3</sup>/h,  $\rho = 1000$  kg/m<sup>3</sup> und  $\nu = 10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s der Pumpe für die reibungsbehaftete Strömung entsprechend Bild 24 der absolute statische Druck vor der Pumpe zu berechnen.

### Problem Çeviri;

Dikey yöndeki boru 90° lik bir dirsekle yatay boru ile bağlanmıştır. Emiş yüksekliği 6.5 metre olan bir pompa hattının çapı NW 120=0.12 m'dir. Dirsek merkez çapı ile boru çapının birbirine oranı R/d=2.5'tir. Boru dirseği basınç kaybı katsayısı 0.26 olup boru pürüzlülük katsayısı 0.1'dir. Suyun hacimsel debisi 120 m<sup>3</sup>/saat, yoğunluğu 1000 kg/m<sup>3</sup> ve kinematik viskozitesi 10<sup>-6</sup> m<sup>2</sup>/s dir.

Geschwindigkeit:

$$c = \frac{\dot{V}}{A} = \frac{4 \dot{V}}{\pi d^2} = \frac{4 \cdot 0,0333 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{\pi \cdot 0,12^2 \text{m}^2} = 2,944 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Reynoldszahl:

$$Re = \frac{c d}{\nu} = \frac{2,944 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 0,12 \text{m}}{10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}} = 353280$$

Rohrreibungsbeiwert aus Colebrook-Diagramm:

$$\lambda = f\left(Re, \frac{d}{k}\right) = 0,022 \text{ aus Colebrook-Diagramm, Bild 21}$$

Druckverlust im Saugrohr:

$$\Delta p_{pV} = \lambda \left(\frac{l}{d}\right) c^2 \frac{\rho}{2} = 0,022 \cdot 54,1 \cdot 2,944^2 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} \cdot \frac{1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{2} = 5157,8 \text{ Pa}$$

Druckverlust im Rohrbogen:

$$\Delta p_{pVR} = \zeta c^2 \frac{\rho}{2} = 0,26 \cdot 2,944^2 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} \cdot \frac{1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{2} = 1126,73 \text{ Pa}$$

Gesamtdruckverlust:

$$\sum \Delta p_{pV} = \Delta p_{pV} + \Delta p_{pVR} = 5157,8 \text{ Pa} + 1126,73 \text{ Pa} = 6284,53 \text{ Pa}$$

Mit Bernoulli-Gleichung Gl. 5

$$p_2 = p_1 - g \rho h_1 - \frac{\rho c^2}{2} - \sum \Delta p_{pV} = 25,62 \text{ kPa}$$

$$p_2 > p_1 = 2,46 \text{ kPa Dampfbildungsdruck für Wasser bei } t = 20 \text{ °C}$$

Hız

Reynold sayısı

4. sayfada yer alan Colebrook diyagramı baz alınarak değerlere ve kesişim noktasına karşılık gelen sürtünme katsayısı olarak 0.022 değeri bulunmuştur. Kırmızı şeritlerle belirtilmiş olup,  $d/k=120/0.1=1200$  değeri ve reynold sayısı da grafik üzerinde belirtilmiştir.

Emiş borusundaki basınç kaybı

Boru dirseğindeki basınç kaybı

Çeviren

Ahmet OVEN ahmetoven@gmail.com

Yıldız Teknik Üniversitesi Makine Fakültesi Makine Dinamiği ABD