



IfH
≡

Institut für Hydromechanik
Universität Karlsruhe

HYDRAULIK VON ROHRSYSTEMEN

Übungsumdruck

Prof. Gerhard H. Jirka, Ph.D.

Dipl.-Ing. M. Detert

Ausgabe 11/2002

zu Kap. 1: Einsatz, Materialien und Rohrverbindungen

- 1.1) Welcher Rohrwerkstoff wird bei der unten dargestellten Baustelle verwendet und warum? Nennen Sie weitere mögliche Rohrwerkstoffe und ihre Einsatzbereiche.

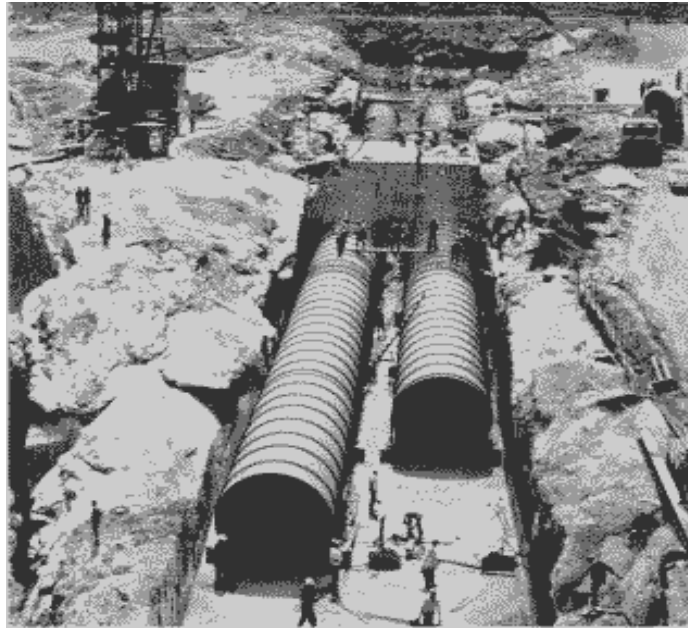


Abb. 1.1: Wasserbaustelle

- 1.2) Was ist DN, was ist PN? Nennen Sie Beispiele.
1.3) Wieviel mWS entspricht 1 bar? Wieviel mWS entspricht 1 Pa?
1.4) Welche Arten von Rohrleitungselementen kenne Sie? Nennen sie jeweils drei Beispiele.
1.5) Welche Größen sind bei der Rohrleitungsplanung zu berücksichtigen?

zu Kap. 2: Strömungswiderstand, Rohre, Armaturen

- 2.1) Was ist der Unterschied zwischen Bernoulli- Gleichung und Arbeits-/ Energiegleichung?
2.2) Wie können die Reibungsverluste bei gleichförmigen Rohrströmungen berechnet werden?
2.3) Nennen Sie die kinematische Zähigkeit von Wasser und von Luft!
2.4) Gegeben sei ein Rohr mit DN 100, $v = 0,1$ m/s mit dem strömenden Medium Wasser. Handelt es sich um eine turbulente oder laminare Strömung?
2.5) Wofür steht der Beiwert α bei der kinetischen Energiehöhe in der Bernoulli- Gleichung?
2.6) Durch eine Rohrleitung mit 320 mm äußerem Durchmesser und 10 mm Wandstärke strömen 120 t/h Öl mit $\rho_{\text{Öl}} = 0,9$ kg/dm³. Wie groß ist die Strömungsgeschwindigkeit?
2.7) In einem genieteten Stahlrohr ($k=3$ mm) mit $d_i = 30$ cm fließt Wasser. Wie hoch ist der Durchfluß Q , wenn sich auf einer Rohrstrecke von 300 m eine Verlusthöhe $h_v = 6,0$ m einstellt?
2.8) Gegeben: Rohr mit DN 100 und $v_{\text{Wasser}} = 2$ m/s. Wie groß ist die Verlusthöhe h_v auf 1km mit einer sinnvollen Annahme für λ ? Wie ändert sich die Reynoldszahl und die Verlusthöhe bei einem entsprechenden Rechteckquerschnitt von 13 cm x 6 cm? (Anmerkung: $\Delta A = 0,54$ cm²)

- 2.9) Parallel zu einem Vorfluter verläuft ein Hochwasserdamm. Zur Entwässerung verläuft auf der gegenüberliegenden Seite des Dammes ein Graben. Das Wasser, das sich im Graben ansammelt, wird über einen Wasserhebel in den Vorfluter eingeleitet.

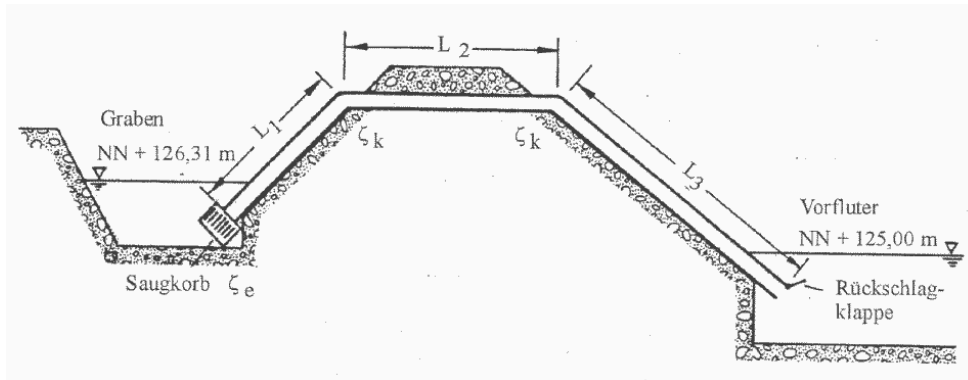


Abb. 2. 1: Seitenschnitt des Dammes mit Entwässerung

geg.:	$L_1 = 15 \text{ m}$	$d = 0,25 \text{ m}$	$\zeta_e = 1,8$
	$L_2 = 10 \text{ m}$	$k = 1 \text{ mm}$	$\zeta_k = 0,15$
	$L_3 = 20 \text{ m}$	$\nu = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$	

- Zeichnen Sie in der Systemskizze (Abb. 2.2) qualitativ unter Angabe signifikanter Werte die Energielinie sowie die Drucklinie des gegebenen Systems.
- Bestimmen Sie den Durchfluß Q .
- Markieren Sie den Punkt P mit der minimalen Druckhöhe. Berechnen Sie die Kote z_P des Punktes P unter der Annahme, daß die minimale Druckhöhe im System $p/\gamma (P) = -6 \text{ m}$ beträgt.

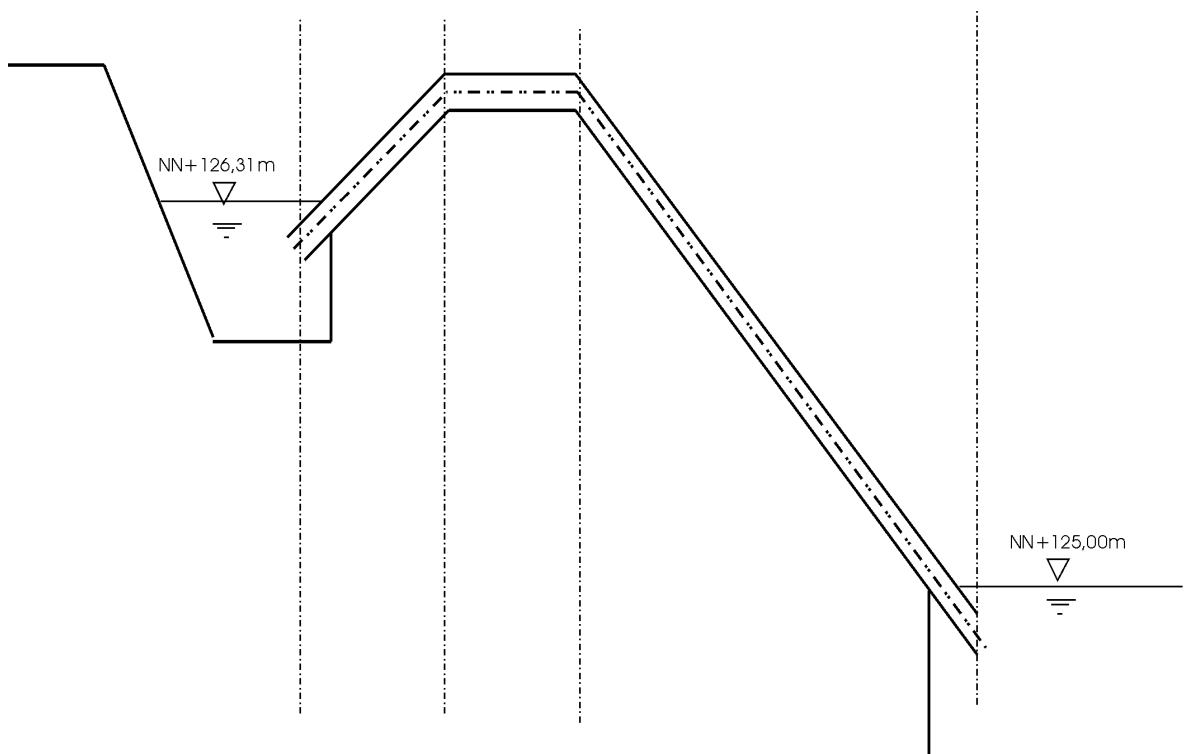


Abb. 2.2: Systemskizze

2.10) In einem Teilstück des Wasserleitungssystems eines Unternehmens (Abb. 2.3) werden der Druck p_i in einem Druckbehälter sowie dessen Füllstand h_{DB} und der Füllstand h_{HB} des zur Atmosphäre hin freien Hochbehälters konstant gehalten. Zur Berechnung der in der Rohrleitung auftretenden Energieverluste stehen Ihnen die Abb. 2.5 zur Verfügung.

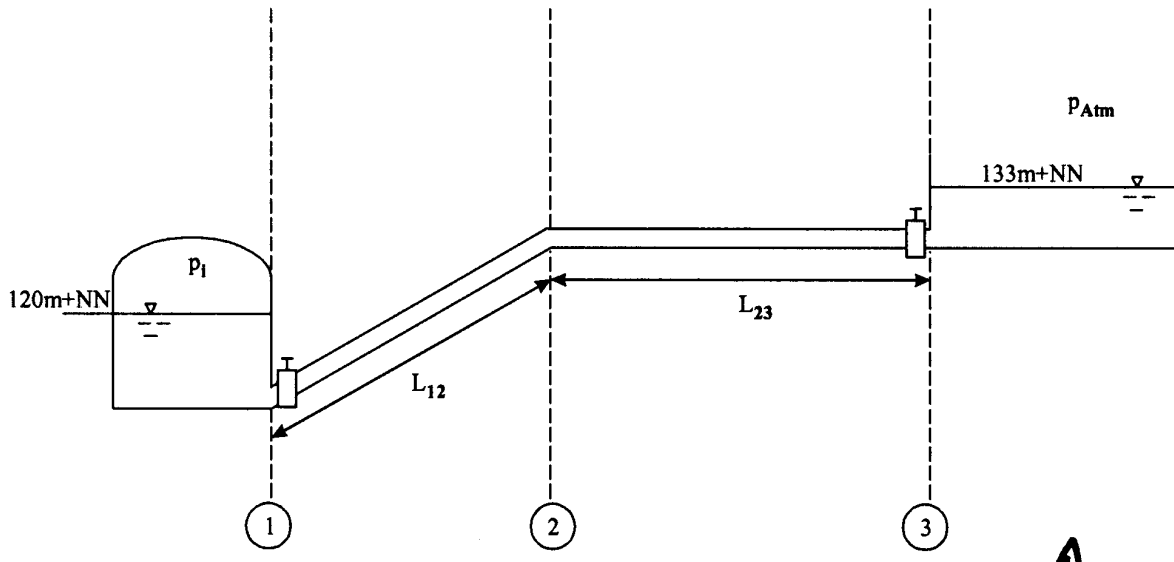


Abb. 2.3: Seitenansicht des Leitungssystems (nicht maßstabsgetreu)

Rohrleitung	$D = 0,5 \text{ m}$ Gusseisenleitung,	$L_{12} = 2 \text{ km}$ stark verrostet	$L_{23} = 3 \text{ km}$ $k = 5,0 \text{ mm}$
Viskosität von Wasser	$\nu = 1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$		
Druckbehälter	$p_i/\gamma = 200 \text{ m}$	$h_{DB} = 120 \text{ m+NN}$	
Hochbehälter	p_{Atm}	$h_{HB} = 133 \text{ m+NN}$	
Schieberverluste	$\zeta_{S,E} = 0,2$ (inkl. Einlauf)		$\zeta_{S,A} = 0,2$ (ohne Auslaufverluste)
Segmentkrümmer	60° mit 3 Nähten		

- Zeichnen Sie bei konstantem Durchfluß qualitativ Energielinie und Drucklinie in Abb. 2.3 ein. Beachten Sie beim Skizzieren die örtlichen Verluste.
- Eine Kontrolle des Durchflusses ergibt, daß die Leitung im Abschnitt 2-3 beschädigt ist. Sie sollen der Sanierungsfirma die Stelle angeben, an der die Leitung freigelegt werden muß (Abb. 2.4). Es wird Ihnen mitgeteilt, daß der Druck p_i sowie die Füllhöhe h_{DB} des Druckbehälters und die Füllhöhe h_{HB} des Hochbehälters konstant geblieben sind und die Durchflüsse $Q_1 = 0,72 \text{ m}^3/\text{s}$ und $Q_3 = 0,48 \text{ m}^3/\text{s}$ gemessen wurden.
 - Wie groß ist die Verlustwassermenge Q_x ?
 - Wie groß ist v_{1x} in Abschnitt L_{1x} und wie groß ist v_{x3} in Abschnitt L_{x3} ?
 - Zeichnen Sie qualitativ die neue Energielinie und neue Drucklinie in Abb. 2.4 ein.
 - Ermitteln Sie die Position L_{1x} der Schadensstelle vom Leitungsbeginn.

Hinweis: Verluste an der Schadensstelle können vernachlässigt werden.

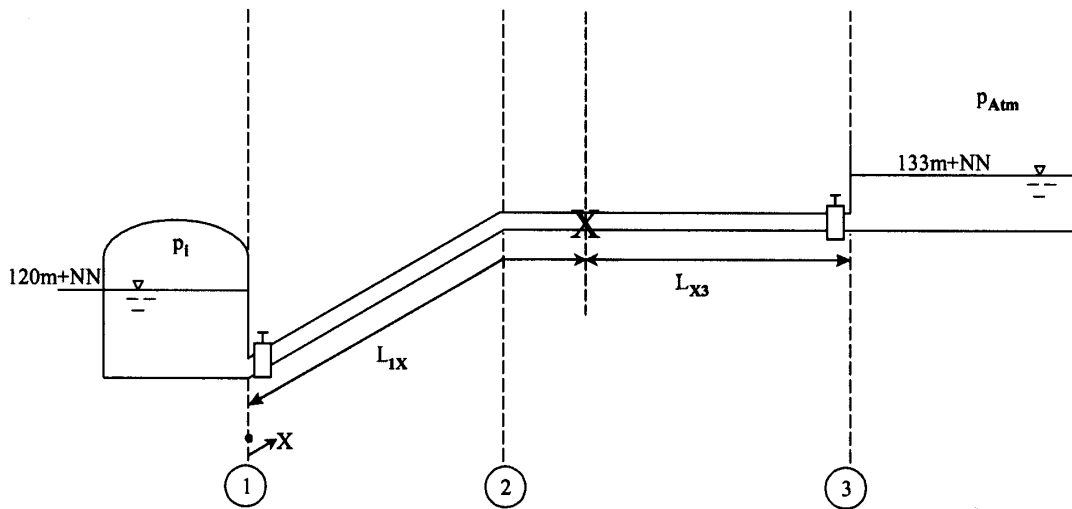
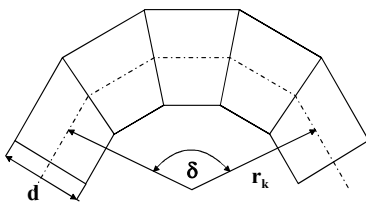


Abb. 2.4: Leitungssystem im Schadensfall (nicht maßstabsgetreu)



δ	15°	22,5°	30°	45°	60°	90°
Anzahl Rundnähte	1	1	2	2	3	3
ζ_{SK}	0,06	0,08	0,1	0,15	0,2	0,25

 Abb. 2.5: Widerstandsbeiwerte ζ für Segmentkrümmen

2.11) Zum Transport von Öl in einem Teilstück einer Pipeline werden die Drücke p_A und p_B in den beiden Druckbehältern ebenso konstant gehalten wie die Füllstände h_A und h_B in den Behältern. Abb. 2.6 gibt das Leitungssystem und alle Ihnen bekannten Daten wieder. Zur Berechnung der in der Rohrleitung auftretenden Energieverluste stehen Ihnen die Abb. 2.7 sowie Abb. 2.5 aus vorheriger Aufgabe zur Verfügung.

Rohrleitung	Durchmesser $D = 1,0 \text{ m}$	Rauheit $k = 1 \text{ mm}$	Länge $L_{AB} = 75 \text{ km}$
Fluid (Öl)	kin. Viskosität $\nu = 4,4 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$		
Druckbehälter A	Behälterdruck $p_A/\gamma = 150 \text{ m}$	Füllhöhe $h_A = 50 \text{ m+NN}$	Einlaufverlust $\zeta_e = 0,2$
Druckbehälter B	Behälterdruck $p_B/\gamma = 40 \text{ m}$	Füllhöhe $h_B = 60 \text{ m+NN}$	
Rohrkrümmen	① 45° Segment-Krümmen mit 2 Nähten	② 90° Rohrbogen mit $R/D = 6$	③ 90° Rohrbogen mit $R/D = 6$

- Zeichnen Sie qualitativ den Verlauf von Druck- und Energielinie in Abb. 2.6 ein.
- Ermitteln Sie den Durchfluß Q in der Pipeline.
- Auf der Leitungsstrecke zwischen den Rohrbögen (2) und (3) ereignet sich an der Stelle (C) ein Leck. Zur Ortung des Lecks wird Ihnen mitgeteilt, daß bei ansonsten konstanten Verhältnissen die Durchflüsse $Q_A = 1,0 \text{ m}^3/\text{s}$ und $Q_B = 0,5 \text{ m}^3/\text{s}$ gemessen wurden. Begründen Sie stichwortartig, wie sich der Verlauf von Druck- und Energielinie im Vergleich zu Teil 1 (qualitativ) verändert. Bestimmen Sie die Entfernung L_{AC} der Schadensstelle vom Leitungsbeginn.

Hinweis: Verluste an der Schadensstelle können vernachlässigt werden.

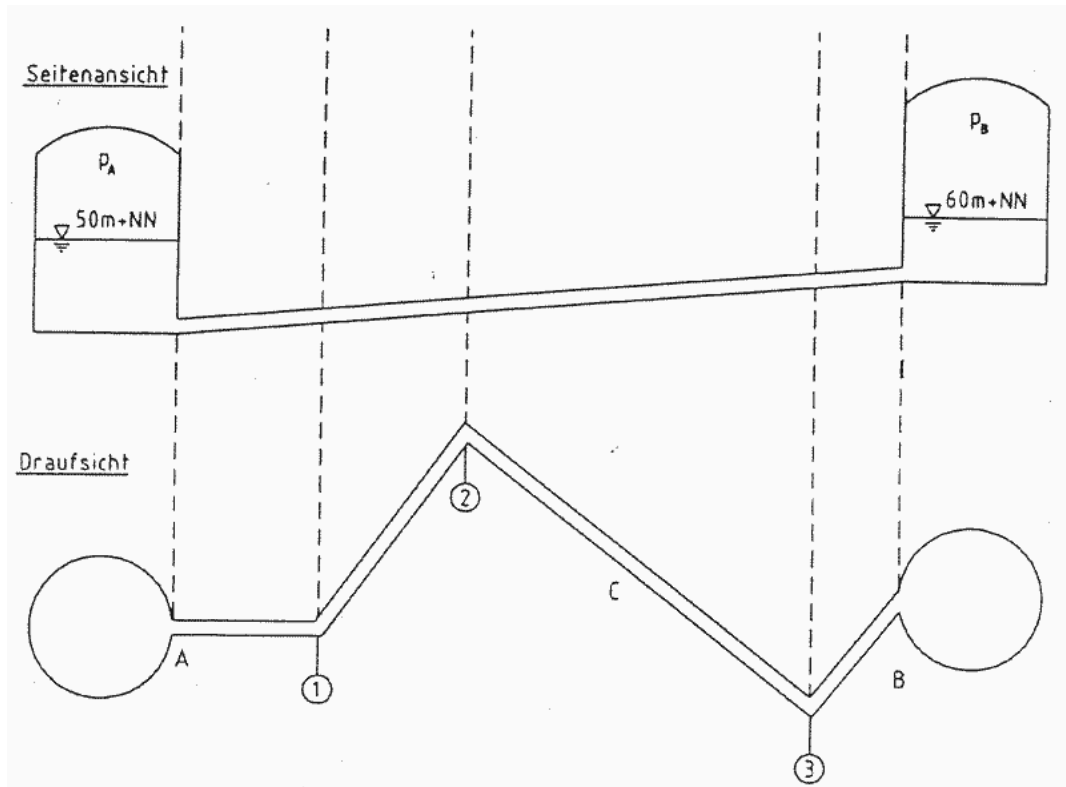
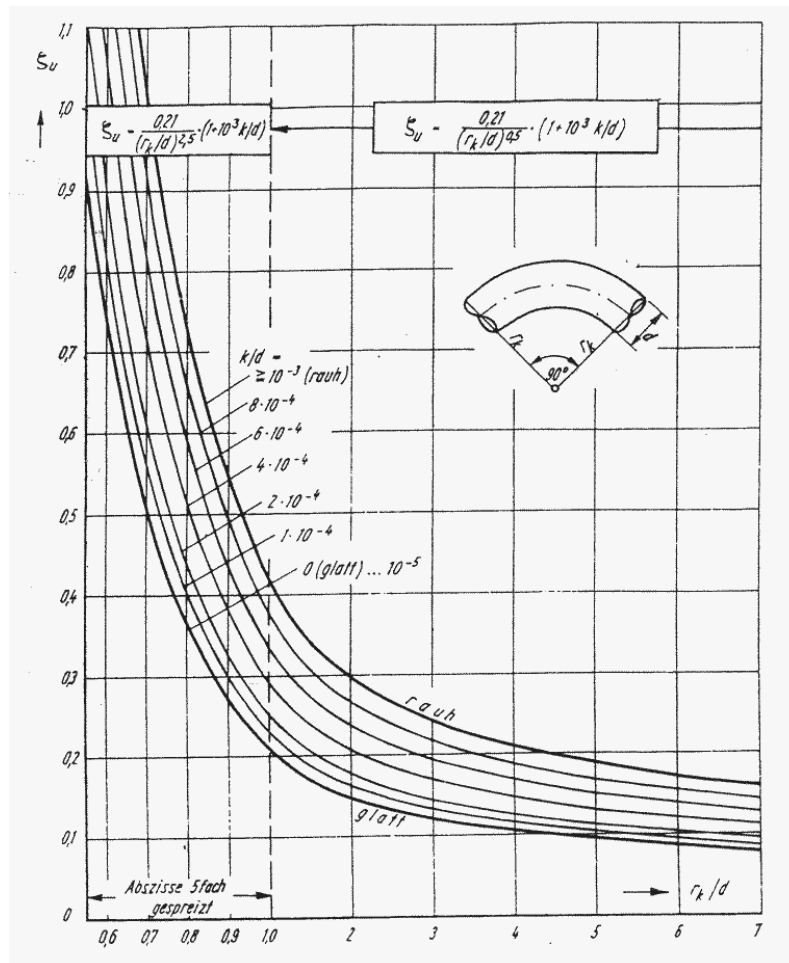
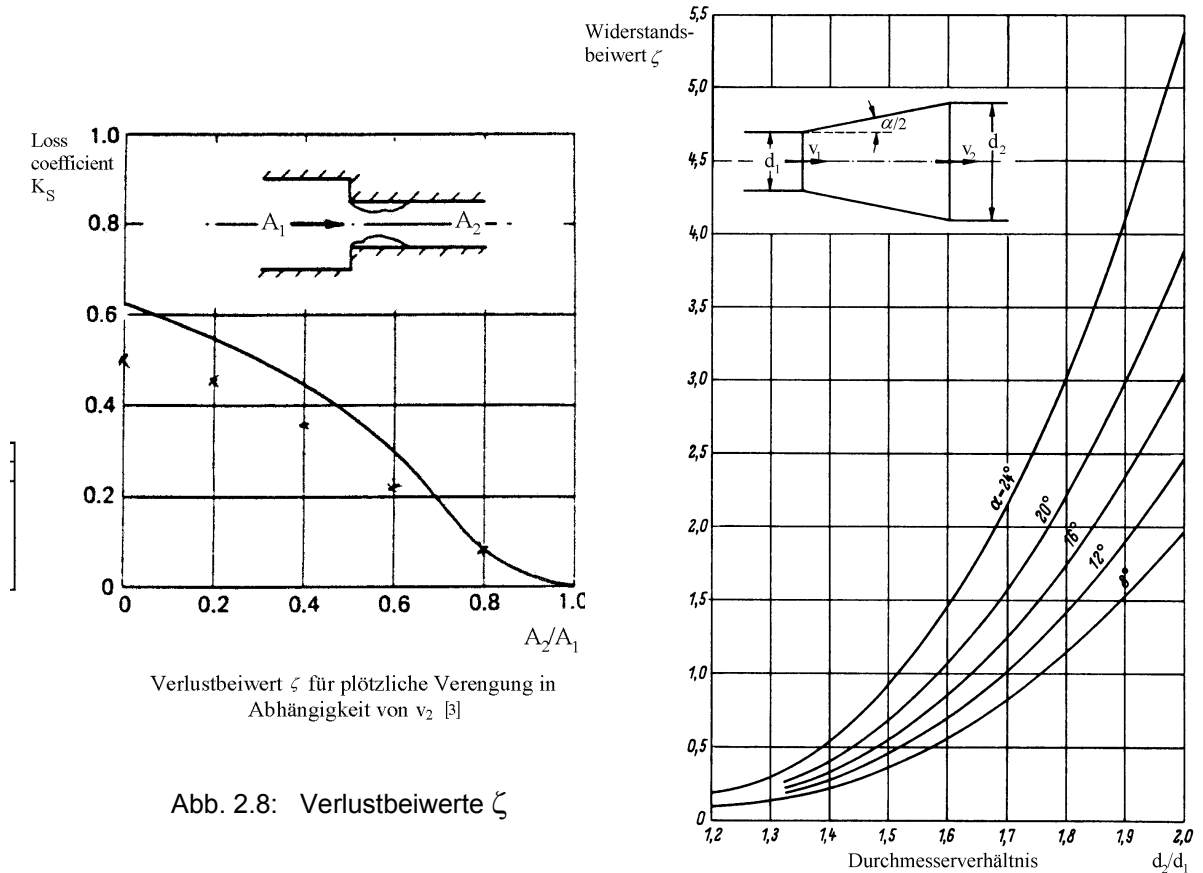


Abb. 2.6: Teilstück der Ölpipeline (oben) Abb. 2.7: Widerstandsbeiwerte ξ für Rohrbögen (unten)



2.12) In einem Rohr kommt es zu einer plötzlichen Querschnittsverengung und etwa 50 Rohrdurchmesser später zu einer allmählichen Aufweitung. Berechne die Verlusthöhen infolge der Verengung bzw. der Aufweitung. Rohrreibungsverluste sind zu vernachlässigen.

geg.: $A_1 = 0,1 \text{ m}^2$, $A_2 = 0,06 \text{ m}^2$, $A_3 = 0,24 \text{ m}^2$, $d_3/d_2 = 2$, $Q_1 = 0,1 \text{ m}^3/\text{s}$, $\alpha = 14,3^\circ$



2.13) Es soll eine konstante Menge Wasser durch ein Rohr einerseits mit dem Querschnitt A_1 und andererseits mit dem Querschnitt A_2 ($A_2 > A_1$) abgeführt werden. Bei welchem Rohr treten höhere Reibungsverluste auf (turbulenter Bereich)? Begründen Sie Ihre Antwort!

2.14) Gegeben seien die gleichen Bedingungen wie in Aufgabe 2.6). Welche Größe muss v erreichen, wenn anstelle von Öl der gleiche Massentransport mit Wasser erreicht werden soll?

2.15) Zwei Rohre unterschiedlicher relativer Rauigkeit (k/D) haben bei turbulenter Strömung nur dann den gleichen Reibungsbeiwert, wenn...

- der Reibungsbeiwert in beiden Rohren unabhängig von der Reynoldszahl ist.
- in beiden Rohren die gleiche Reynoldszahl herrscht.
- die Rauigkeitserhebungen kleiner als die Dicke der laminaren Grenzschicht sind.
- die Fließgeschwindigkeit sehr groß ist.
- die Fließgeschwindigkeit gleich ist.

zu Kap. 3: Pumpen und Turbinen

- 3.1) Wie bzw. wo werden Pumpen sowie Turbinen in der Arbeits-/ Energiegleichung berücksichtigt?
- 3.2) Skizziere den Verlauf von $H = f(Q)$ zweier baugleicher Pumpen in Parallel- und in Serienschaltung.
- 3.3) In einer Rohrleitungsanlage sollen Förderstrom und/ oder Förderhöhe der Pumpe veränderbar sein. Welche Möglichkeit zur Veränderung der Anlagenkennlinie und welche Möglichkeiten zur Veränderung der Pumpenkennlinie gibt es?
- 3.4) Eine Wasserkraftanlage an einem Fluß besitzt eine Turbine (Gefälle 1,5 m). Welche? Ist diese Turbinenart auch für die Energiegewinnung bei einer Hochdruckanlage im Gebirge (Gefälle $H = 1000$ m) geeignet?
- 3.5) Die elektrische Leistungsaufnahme des Motors einer Trinkwasserpumpe beträgt $P_M = 1,2$ kW. Der Wirkungsgrad für den Elektromotor ist mit $\eta_M = 0,80$ und für die Pumpe mit $\eta_P = 0,75$ anzusetzen. Der Austrittsquerschnitt hinter dem Laufrad beträgt $A = 0,0025$ m², die erreichte Förderhöhe H_A wird mit 2,4 m gemessen. Wie groß ist die Austrittsgeschwindigkeit v ?

- 3.6) Bestimme anhand der nebenstehenden Kennlinien einer Kreiselpumpe die Förderhöhe, den Pumpenwirkungsgrad und den Leistungsbedarf des Förderstroms bei $Q = 40$ m³/h (Medium Wasser).

- 3.7) Ist es wirtschaftlich, die Pumpe bei diesem Förderstrom zu betreiben?

- 3.8) Wie ändern sich überschlägig die Förderhöhe, Pumpenwirkungsgrad und Leistungsbedarf bei einem Gemischstrom aus Sand und Wasser mit einer relativen Dichte von 1,2? (Annahme: Zähigkeit bleibt gleich)

- 3.9) Wie groß ist die erforderliche Haltedruckhöhe bei 40 m³/h bzw. bei 130 m³/h? Konsequenz?

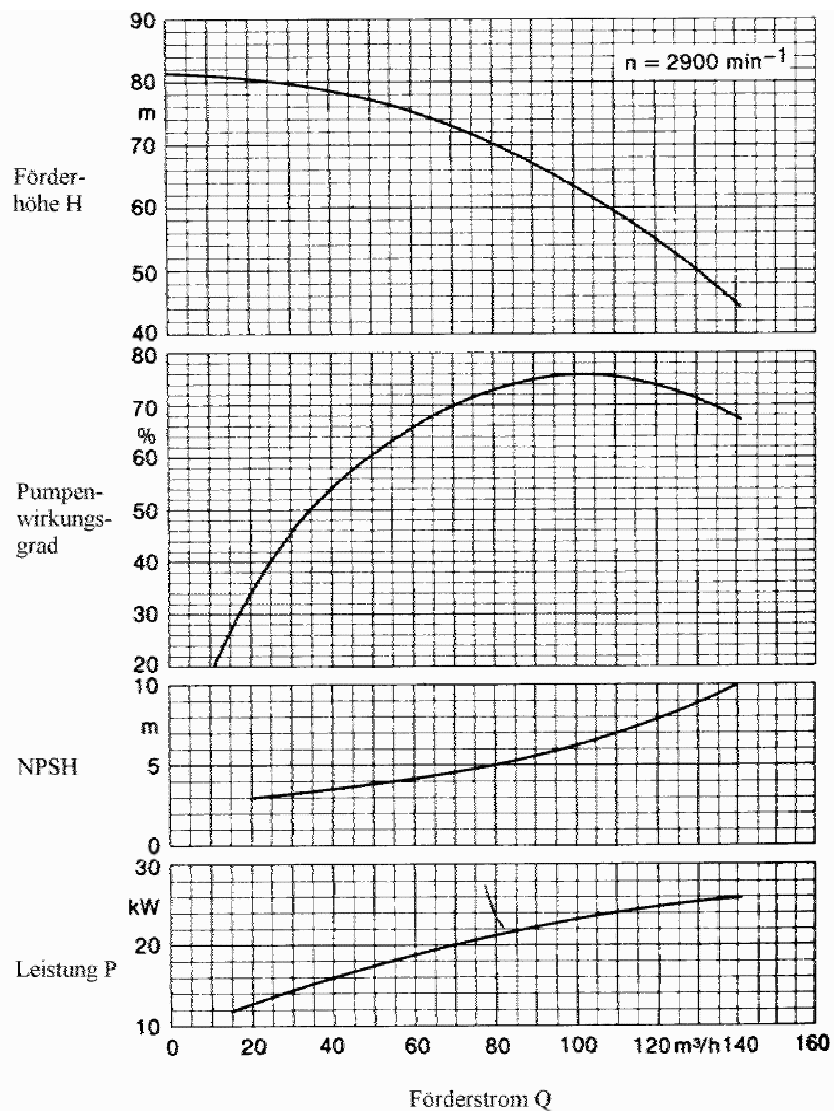


Abb. 3.1: Kennlinien einer Kreiselpumpe

3.10) Für das unten dargestellte System ist zu überprüfen, ob Kavitationsgefahr besteht.

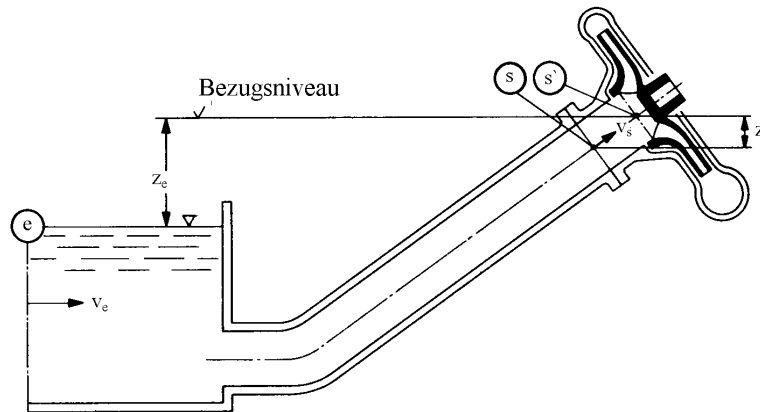


Abb. 3.2: Systemskizze

geg.: $z_s = 0,07 \text{ m}$, $v_s = 1 \text{ m/s}$, $Q = 40 \text{ m}^3/\text{h}$, $p_B = 1,013 \text{ bar}$, $p_D (15^\circ\text{C}) = 0,017 \text{ bar}$, $p_D (40^\circ\text{C}) = 0,074 \text{ bar}$, $p_D (80^\circ\text{C}) = 0,474 \text{ bar}$, $p_S = -0,2 \text{ bar}$, NPSH_R-Wert: siehe Abb. 3.1

3.11) Aus einem großen Wassertank *A* wird mit Hilfe einer Pumpe *P* eine Bewässerungsanlage in 1 km Entfernung versorgt (Abb. 3.3)

Die drei Verteilergräben der Bewässerungsanlage werden je über einen Auslaufstutzen versorgt, an dessen Ende sich ein Schieber befindet. Unmittelbar vor dem ersten Auslaufstutzen befindet sich ein Standrohr, in dem die Wasserspiegelhöhe h_1 gemessen wird.

Alle drei Gräben erhalten die *gleiche* Wassermenge.

- Zeichnen Sie qualitativ den Verlauf von Energie- und Drucklinie in Abb. 3.3 ein.
- Berechnen Sie den Gesamtdurchfluß Q .
- Berechnen Sie bei *vollständig geöffnetem* Schieber 3
 - die Energiehöhen H_3 , H_2 und H_1 im Verteilerrohr an den Stellen (3), (2) und (1),
 - die Geschwindigkeiten V_1 , V_2 und V_3 in den Auslaufstutzen sowie
 - die notwendigen Schieberöffnungen n_1 und n_2 .

Angaben:	Teillängen der Rohrleitung	$L_{A1} = 1000 \text{ m}$	$L_{12} = L_{23} = 150 \text{ m}$
	Durchmesser der Verteilerleitung und der Auslaufstutzen	$D = 300 \text{ mm}$	
	Rohrrauheit	$k = 1,5 \text{ mm}$	
	kin. Viskosität	$\nu = 1,1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$	
	Tankwasserspiegel	$h_A = 120,78 \text{ m} + \text{NN}$	
	Standrohrspeigel	$h_1 = 104,44 \text{ m} + \text{NN}$	
	Pumpenförderhöhe	$H_P = 40 \text{ m}$	
	Einlaufverlust	$\zeta_E = 0,5$	

- Hinweise:**
- Für die Rohrleitung sind die Abzweigungsverluste zu vernachlässigen.
 - Für die Auslaufstutzen sind die Abzweigungs- und Rohrreibungsverluste gegenüber den Schieberverlusten zu vernachlässigen.
 - Auf sämtlichen Teilstücken der Rohrleitung kann ohne Nachweis von hydraulisch rauhen Strömungsverhältnissen ausgegangen werden.
 - Die Schieberkennlinie nach Abb. 3.4 ist zur Lösung der Aufgabe zu benutzen.

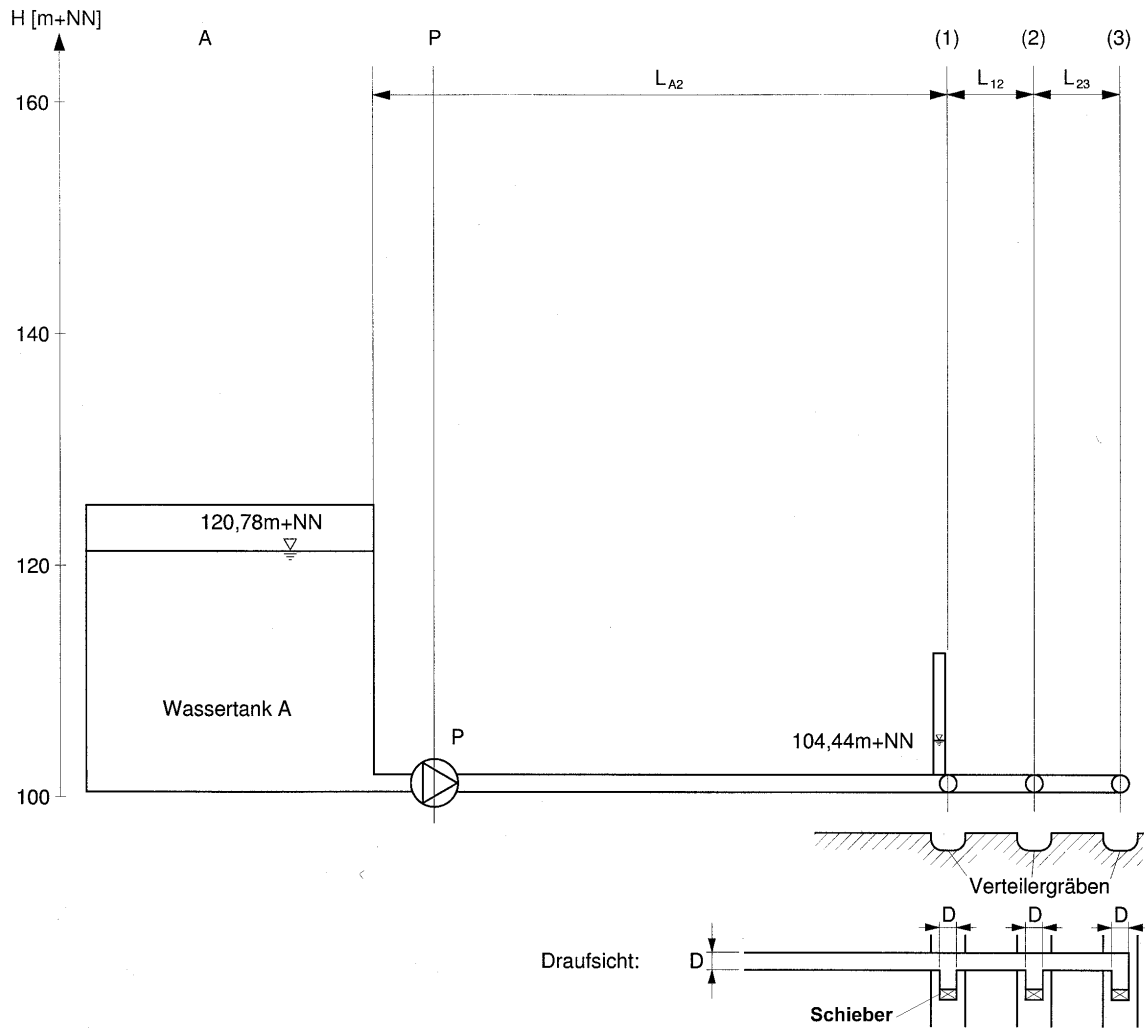
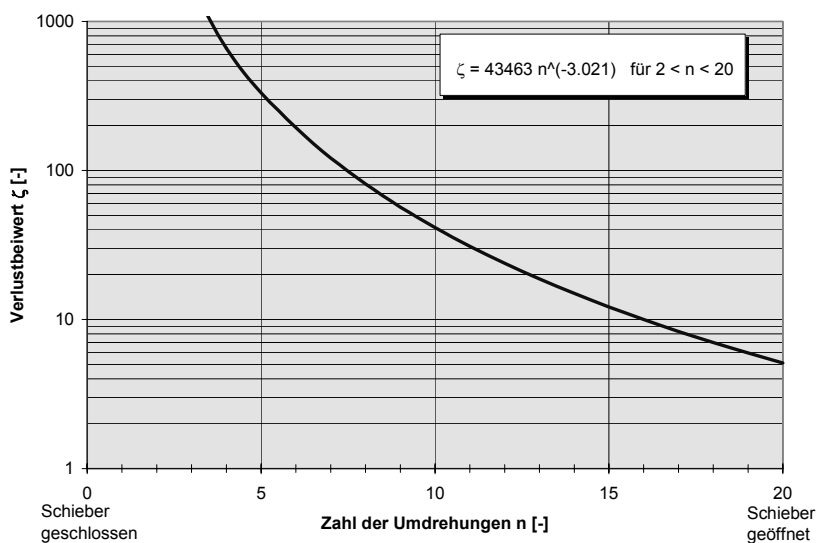


Abb. 3.3: Arbeitsskizze der Bewässerungsanlage (Höhenmaßstab als Orientierungshilfe)



$$\zeta = 43463 \cdot n^{-3.021}$$

$$\Leftrightarrow n = 34,3 \cdot \zeta^{-0.331}$$

für $2 < n < 20$

Abb. 3.4: Schieberkennlinie

- 3.12) Eine Pumpe fördert aus einem offenen Kanal, dessen Wasserspiegel auf der Höhe $z_{WSP} = 113,4 \text{ m} + \text{NN}$ liegt, eine Wassermenge von $Q = 87 \text{ m}^3/\text{h}$ über eine Rohrleitung mit der gesamten Länge $L_{\text{ges}} = 400 \text{ m}$ in einen Druckbehälter. Die Pumpe ist in einer Höhe von $z_P = 116,4 \text{ m} + \text{NN}$ aufgestellt, von der aus die Rohrleitung horizontal in den Druckbehälter führt. Auf Höhe des Anschlusses der Rohrleitung an den Druckbehälter mißt ein Manometer den Behälterinnendruck p_{Beh} .

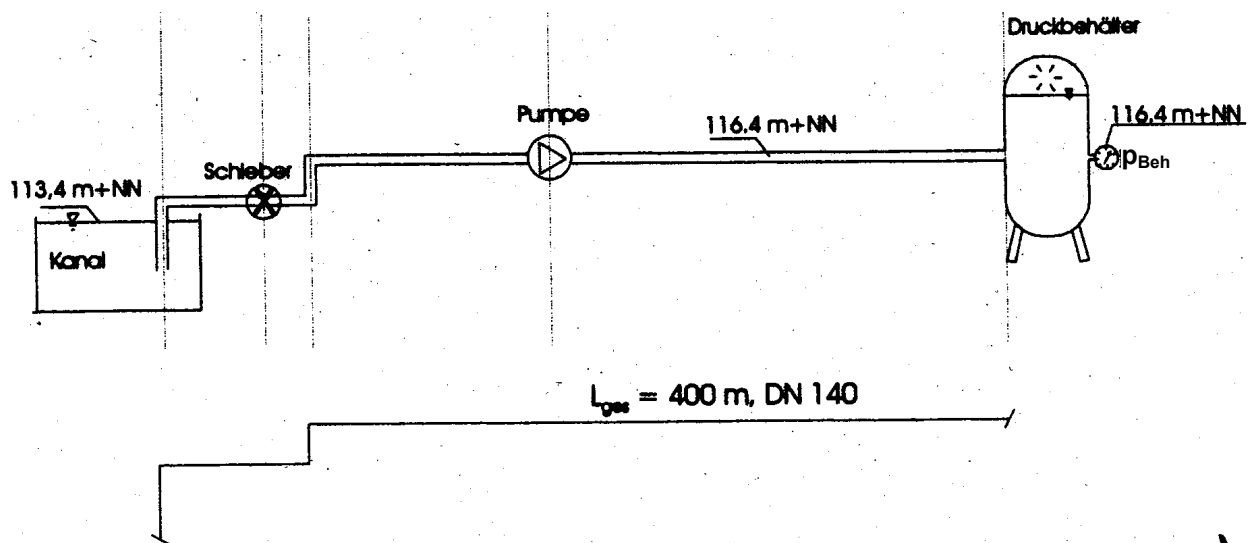


Abb. 3.5: Systemskizze

- Zeichnen Sie den Verlauf von Druck- und Energielinie in obige Skizze ein und benennen Sie die örtlichen Verluste.
- Welche Förderhöhe muß die Pumpe erbringen, um $Q = 87 \text{ m}^3/\text{h}$ bei vollständig geöffnetem Schieber und gemessenem Behälterinnendruck p_{Beh} zu liefern?
- Wird die Rohrleitung im „Reynoldsunabhängigen Bereich“ betrieben?
- Nach etlichen Anfahr- und Abstellvorgängen, die über den eingebauten Schieber geregelt wurden, wird bei Revisionsarbeiten festgestellt, daß die Pumpe Kavitationsschäden aufweist. Welcher konstruktive Mangel des Systems liegt hier offensichtlich vor? Wie würden Sie ihn beheben?

Angaben Rohrleitung:	DN 140 ($D_i = 140 \text{ mm}$) $L_{\text{ges}} = 400 \text{ m}$ Stahlrohr, mit gleichmäßigen Rostnarben nach langem Gebrauch 3 Krümmen und 1 Schieber in Saugleitung Förderhöhe Δz gem. Systemskizze
Angaben Druckbehälter:	$p_{\text{Beh}} = 370 \text{ kPa}$ (= 370 kN/m^2 Überdruck)

Angaben Verlustbeiwerte:	Einlauf	$\zeta_E = 0,3$
	Krümmen	$\zeta_K = 0,15$
	Schieber	siehe Abb. 3.7 Schieberdiagramm
	Verlustbeiwert λ nach Swamee & Jain	
	$\lambda = 0,25 \cdot \left[\lg \left(0,27 \frac{k_s}{D} + 5,74 \text{Re}^{-0,9} \right) \right]^{-2}$	
	mit dem Gültigkeitsbereich $10^{-6} < \frac{k_s}{D} < 10^{-2}$ und $4 \cdot 10^3 < \text{Re} < 10^8$ äq. Sandrauheiten: siehe Abb. 3.6	
Angaben Wasser:	$\rho = 9,81 \text{ kN/m}^3$ $\nu = 1,1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$	

Werkstoff und Rohrart	Zustand	k_s (mm)
Stahlrohre	sauber verzinkt	0.07-0.10
	Handelsübliche Verzinkung	0.10-0.16
Aus Stahlblech geschweißt neu	Typische Walzhaut	0.04-0.10
	Bituminiert	0.01-0.05
	Zementiert	etwa 0.18
Gebraucht	Gleichmäßige Rostnarben	etwa 0.15
	mäßig verrostet, leichte Verkrustung	0.15-0.40
	Mittelstarke Verkrustung	etwa 0.15
	starke Verkrustung	2-4

Abb. 3.6: Äquivalente Sandrauheiten für Rohre

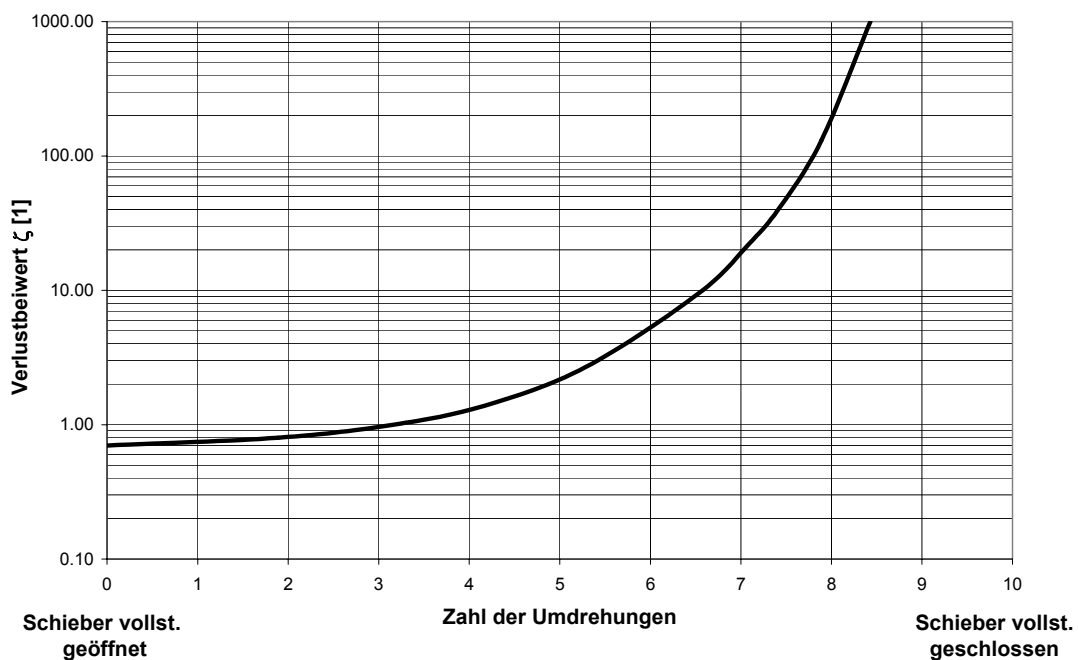


Abb. 3.7: Verlustbeiwerte für Schieber

3.13) Gegeben ist unten dargestelltes Bewässerungssystem. Dabei wird die Pumpe über die Energie angetrieben, die dem Fluß über die Turbine entnommen werden kann.

- Wie groß ist die max. Leistung an der Pumpenwelle?
- Ermitteln Sie die Systemkennlinie.
- Wählen Sie eine Pumpe aus.
- Beurteilen Sie die Kavitationsgefahr.

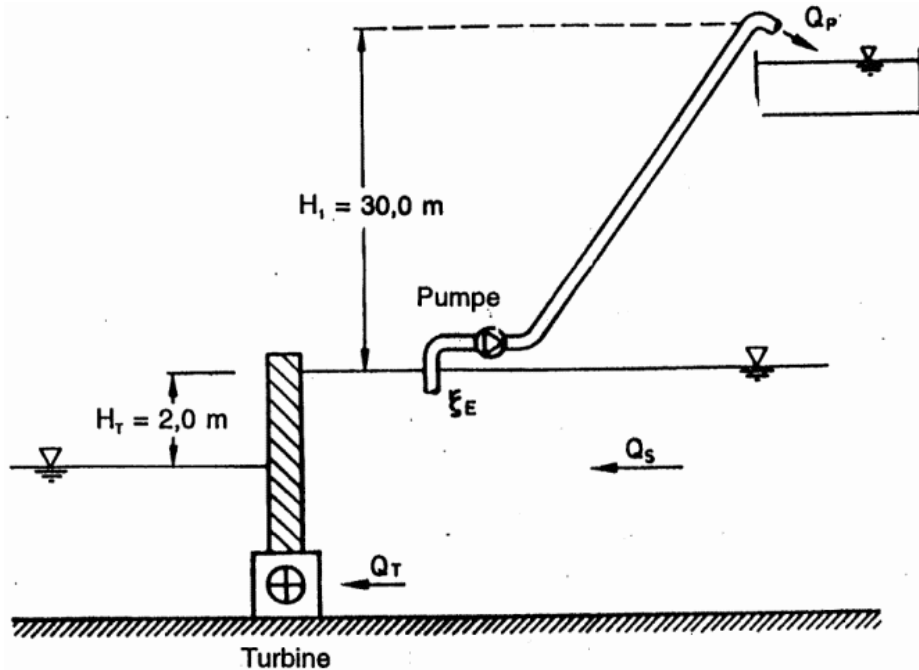


Abb. 3.8: Systemskizze

Angaben:	Turbinendurchfluss	$Q_T = 1.500 \text{ m}^3/\text{h}$
	Turbinenfallhöhe	$H_T = 2,0 \text{ m}$
	Gesamt-Wirkungsgrad	$\eta_T = 0,79$
	Wirkungsgrad Pumpenmotor	$\eta_P = 0,85$
	Rohrleitungsdurchmesser	$D = 0,1 \text{ m}$
	Rohrrauheit	$k = 0,2 \text{ mm}$
	Gesamt-Leitungslänge	$L_{\text{ges}} = 150 \text{ m}$
	Abstand Rohreinlauf-Pumpe	$L_s = 20 \text{ m}$
	Höhendifferenz	$\Delta H_{\text{geod}} = 30 \text{ m}$
	Summe der örtlichen Verluste	$\zeta_{\text{ges}} = 1,2$

Hinweis: Es steht nur eine Pumpe "Etanorm 40-160" oder "Etanorm 40-200" zur Auswahl.

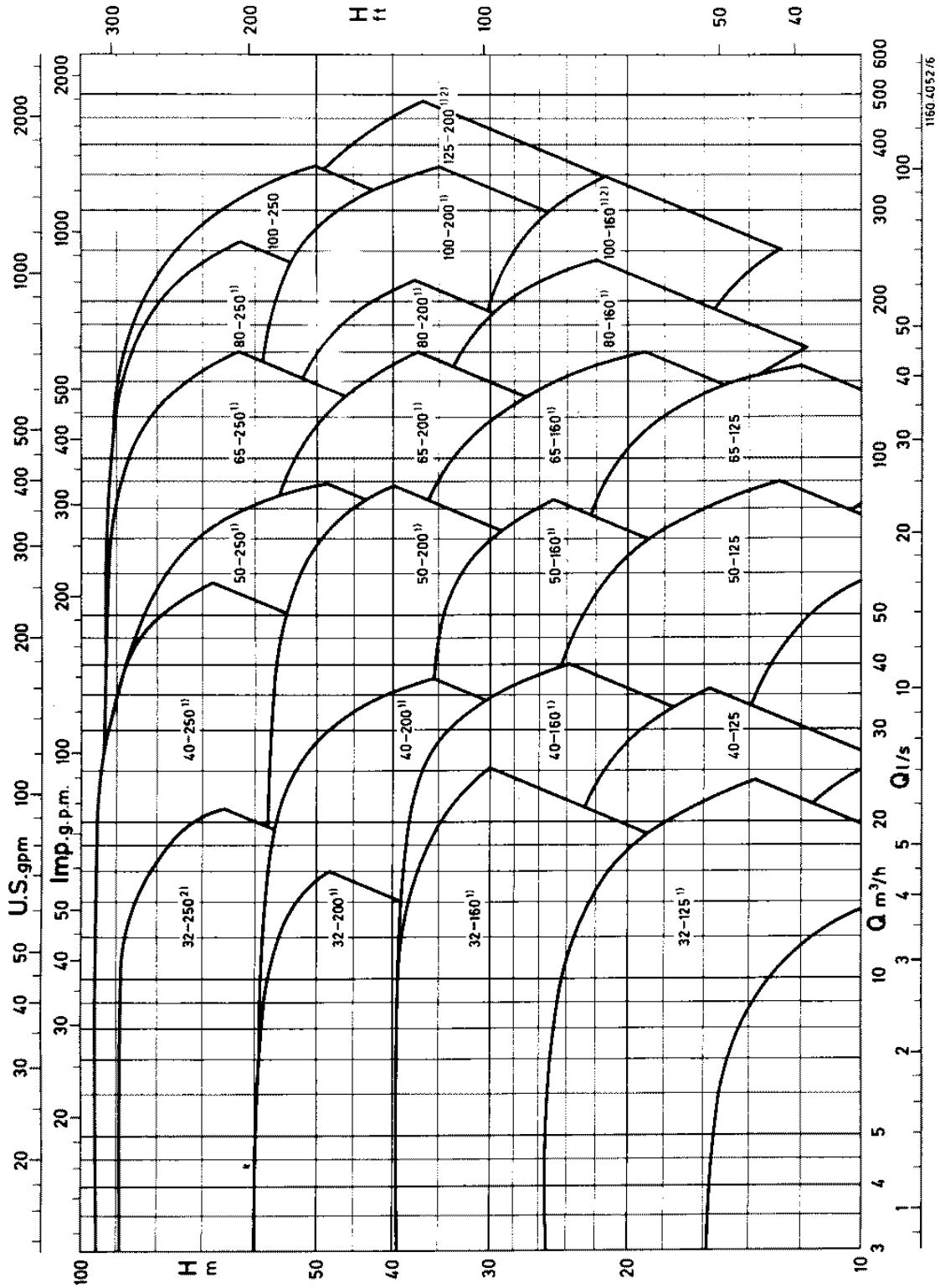
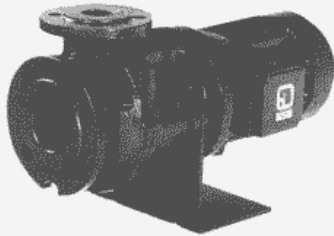
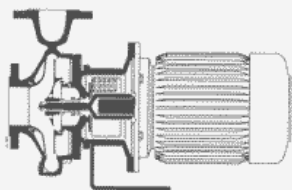
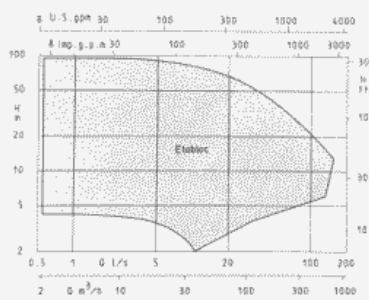
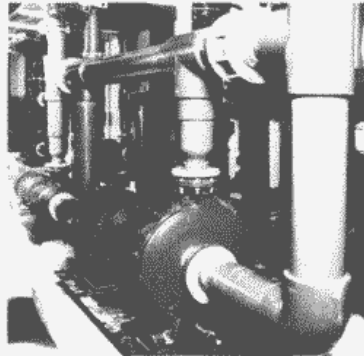


Abb. 3.9: Leistungskennfeld „Etanorm-Pumpen, n = 2.900 1/min“ (nach KSB-AG)

Etabloc[®]


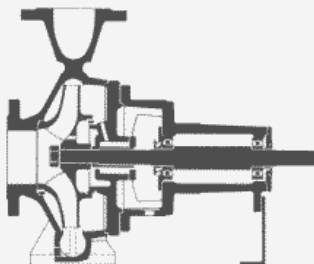
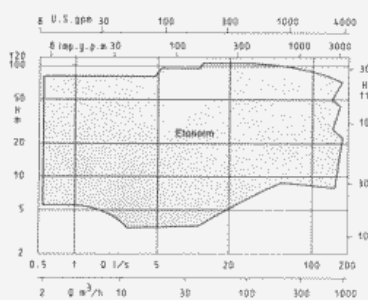
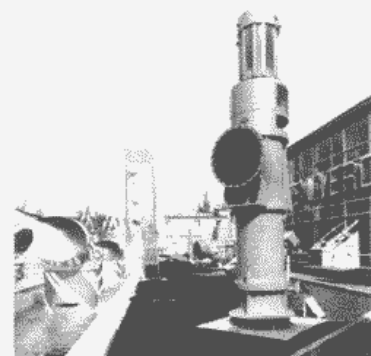
Blockpumpen zur Förderung von reinen und aggressiven Flüssigkeiten ohne abrasive und feste Bestandteile.

DN	25–150
Q l/s	150
H m	100
p bar	16
t °C	-30 +140
n 1/min	3600


Etanorm


Spiralgehäusepumpen nach DIN 24 255, zur Förderung von reinen und aggressiven Flüssigkeiten ohne abrasive und feste Bestandteile.

DN	32–150
Q l/s	194
H m	102
p bar	16
t °C	-30 +140
n 1/min	3600


KAEK


Rohrgehäusepumpe mit Halbaxial-Propeller in 1- oder 2-Flur-Aufstellung. Förderung von reinem bis leicht verschmutztem Wasser mit vorgeschaltetem Rechen. Einsatz in Be- und Entwässerung, allgemeine Wasserversorgung und zur Kühlwasserversorgung.

DN	300–1200
Q l/s	7000
H m	20
p bar	10
t °C	+60
n 1/min	1450

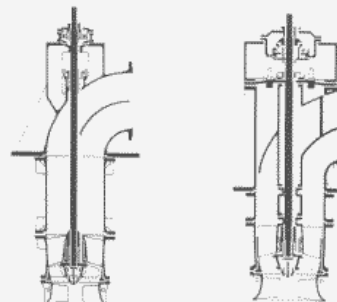
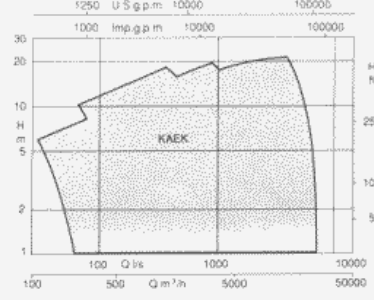
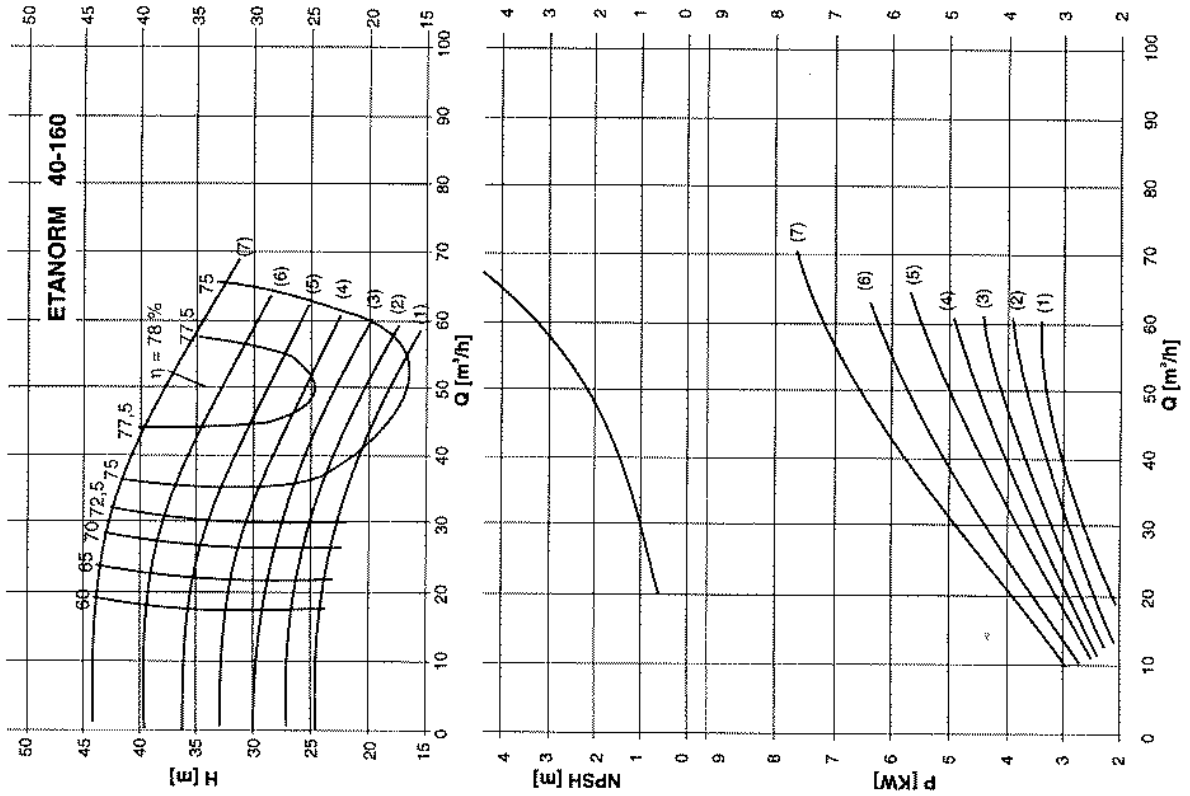
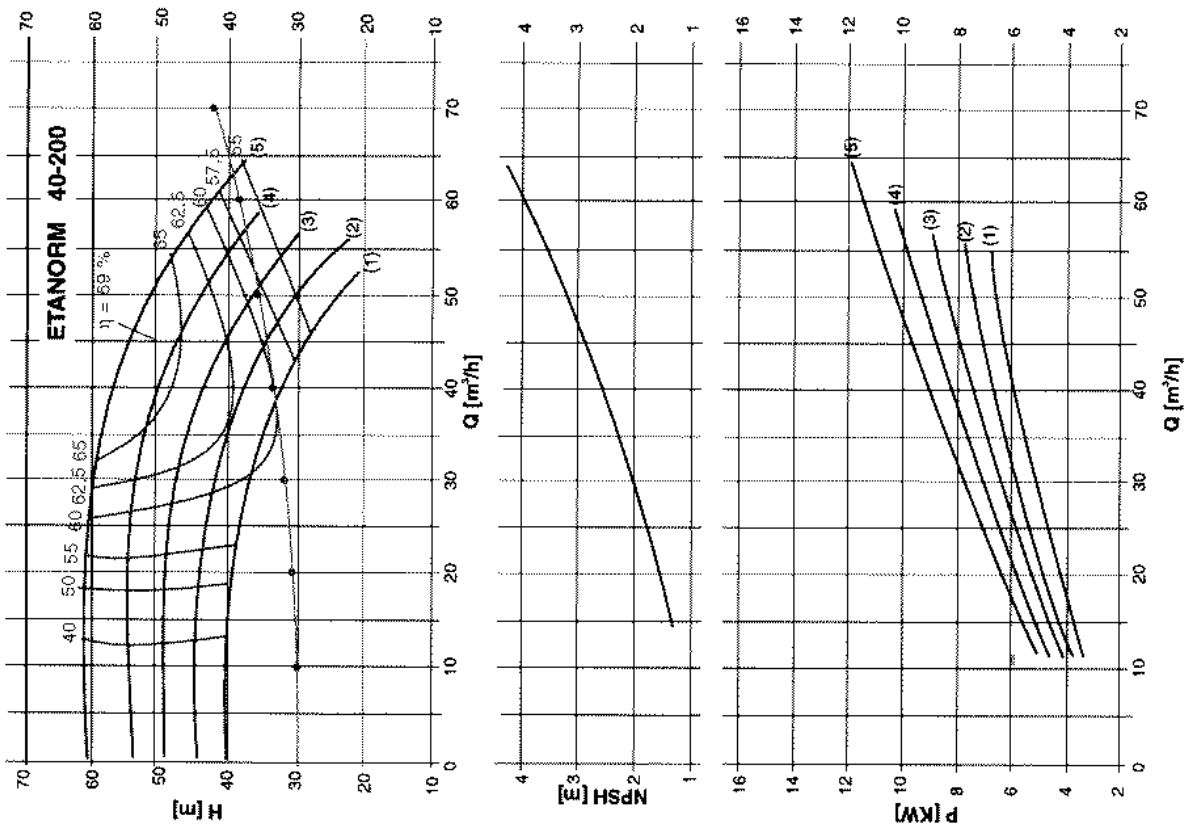


Abb. 3.10: Auszug aus Pumpenprogramm der KSB-AG


 Abb. 3.11: Kennfeld „Etanorm-40-160, $n = 2.900 \text{ 1/min}$ “ (nach KSB-AG)

 Abb. 3.12: Kennfeld „Etanorm-40-200, $n = 2.900 \text{ 1/min}$ “ (nach KSB-AG)

3.14) Sie sollen für eine Baustellenentwässerung eine Unterwasserpumpe auswählen. Geben Sie dazu die Bezeichnung der Unterwasserpumpe sowie Wirkungsgrad η_P und Verlusthöhe H_V an.

Angaben:	$Q_A = 24 \text{ m}^3/\text{h}$ $H_A = 100 \text{ m}$ Brunnen - $\varnothing = 150 \text{ mm}$ $\vartheta_A = 15^\circ\text{C}$ sauberes bis leicht verschmutztes Wasser, die Werkstoffe chemisch und mechanisch nicht angreifend, mit einem Sandgehalt von bis zu $25 \text{ g}/\text{m}^3$
-----------------	--

Übersichts-Diagramm 50 Hz
(Auslage-Bereich)

$n \approx 2820 \text{ 1}$

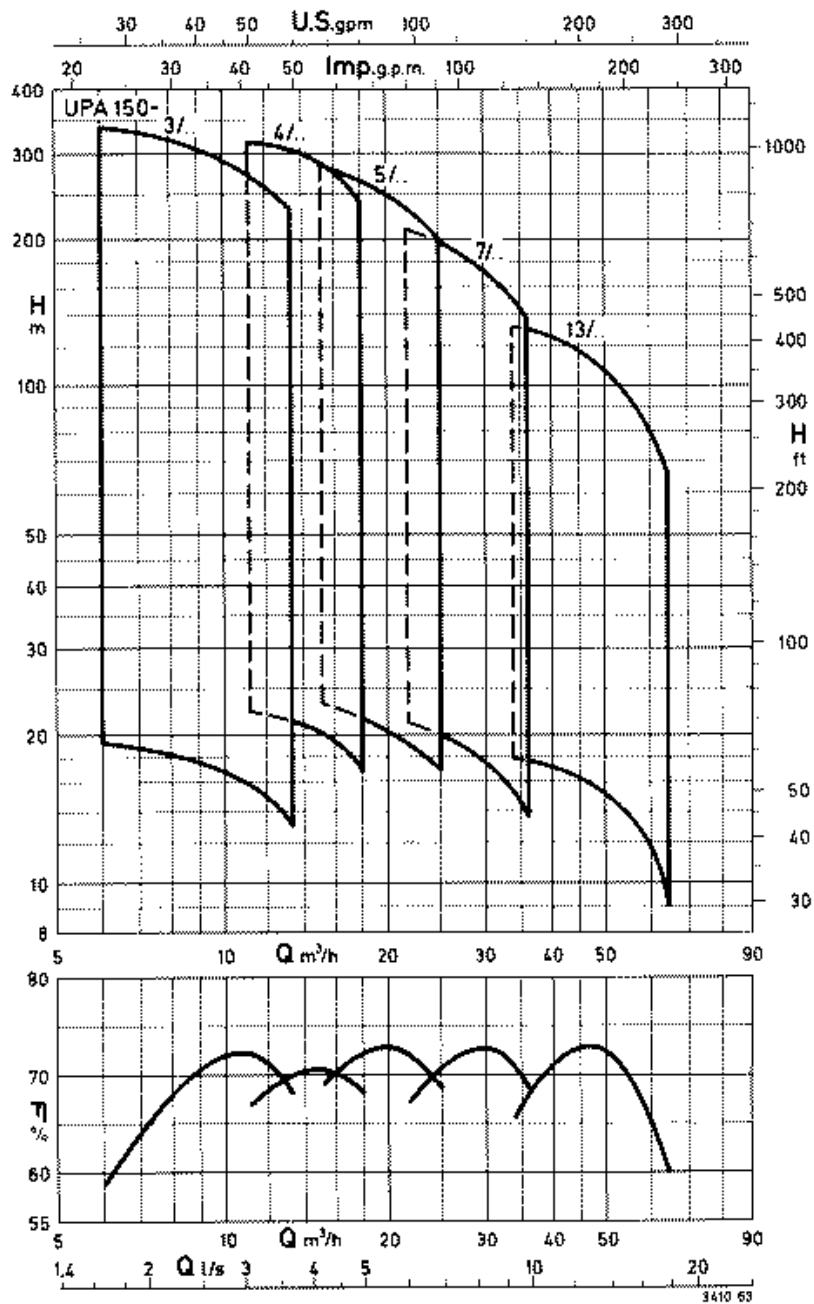


Abb. 3.13: Übersichtsdiagramm Unterwasserpumpe UPA 150 (nach KSB-AG)

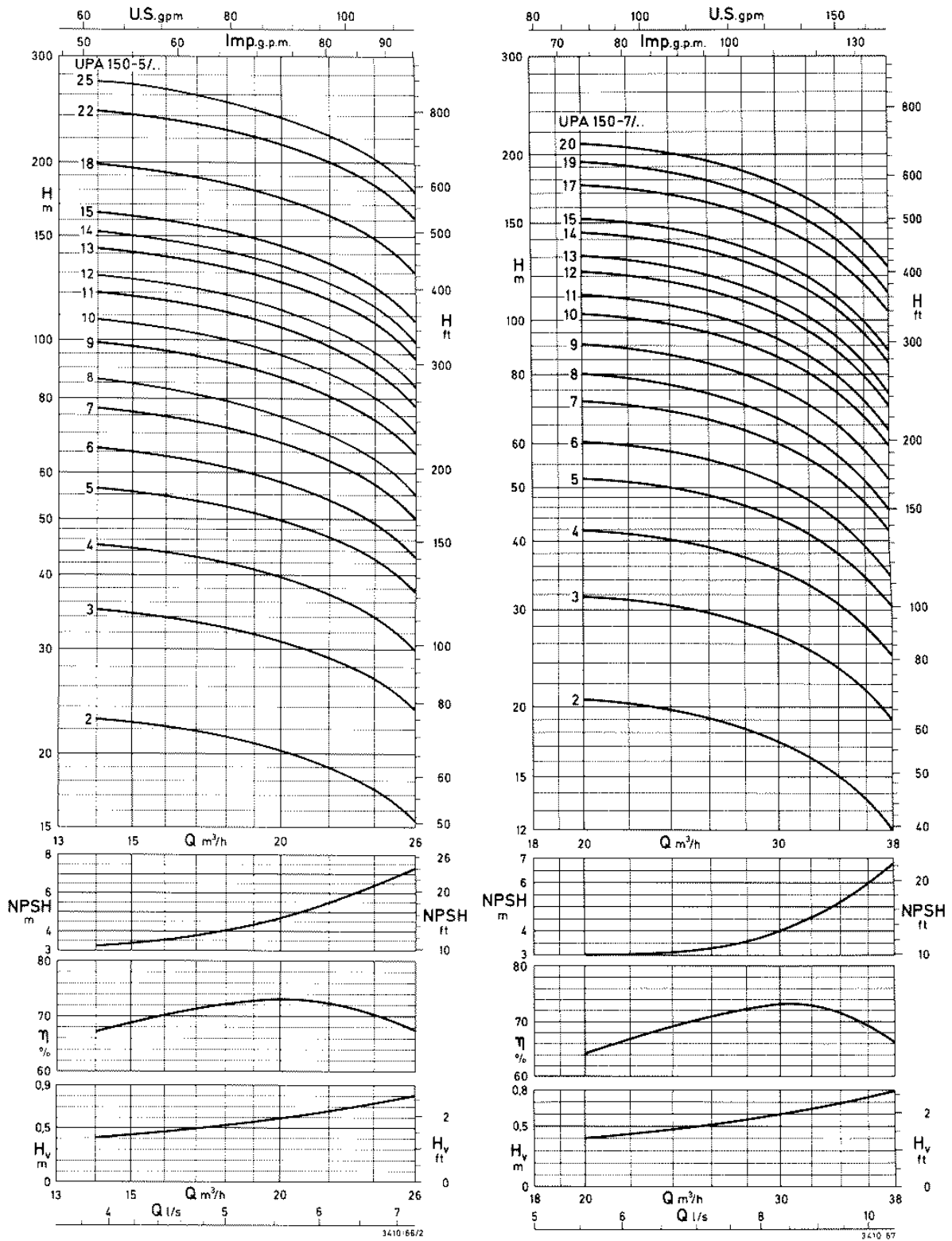


Abb. 3.14: Kennlinien Unterwasserpumpe UPA 150-5 (links) und UPA 150-7 (rechts) (nach KSB-AG)

3.15) Ein Wasserkraftwerk wird in der skizzierten Anordnung betrieben. Ein Druckstollen der Gesamtlänge $L_1 + L_2$ und mit konstantem Durchmesser $D_1 = D_2$ versorgt eine Turbine mit Durchfluß Q . In Punkt (a) der Anlage befindet sich ein Wasserschloß. Vor der Turbine wird das Rohr über eine Länge L_3 auf den Durchmesser D_3 verengt.

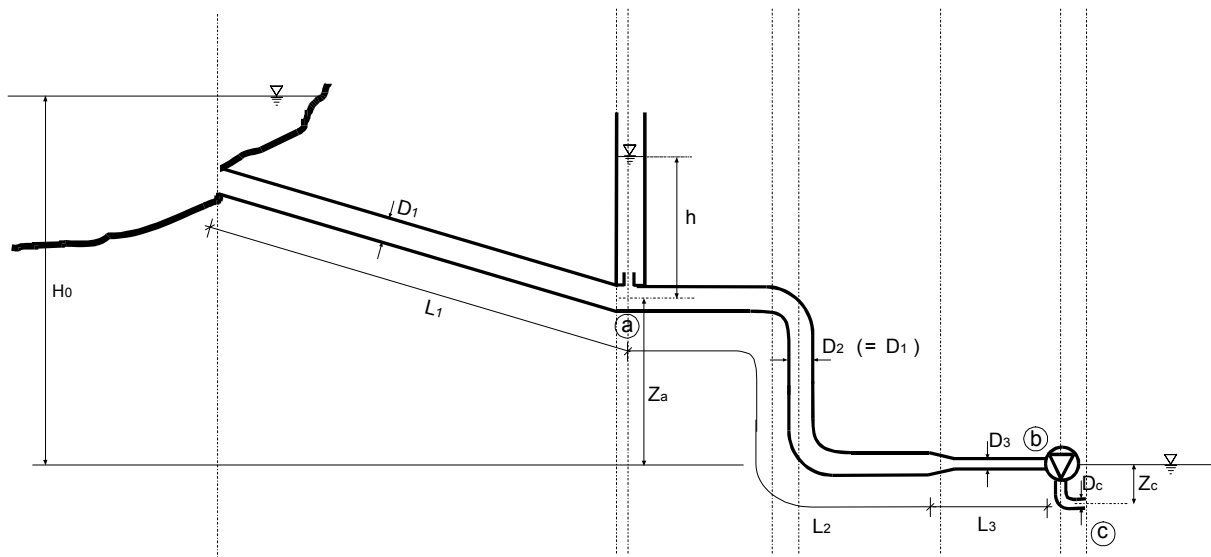
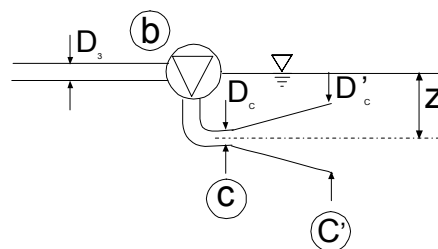


Abb. 3.15: Systemskizze des Wasserkraftwerkes

- Schreiben Sie in allgemeiner Form die Gleichungen für den durch Rauheit verursachten Verlust und für örtlichen Verlust an. Geben Sie mit Hilfe dieser Gleichungen eine Beziehung an zur Ermittlung der äquivalenten Rohrlänge mittels der Verlustbeiwerte λ und ζ .
- Zeichnen Sie für das gegebene System qualitativ den Verlauf von Druck- und Energielinie in Abb. 3.19 ein.
- Maßgebend für die Turbinenleistung ist die Differenz der Energiehöhen an Ein- und Austritt der Turbine. Wie groß ist diese Energiehöhendifferenz, wenn der Turbinenaustritt mit Durchmesser $D_c = D_3 = 1,2$ m in das Unterwasser mündet? Welche Leistung gibt die Turbine ab?
- Um wieviel Prozent kann die Energiehöhendifferenz und somit die Leistung der Turbine erhöht werden, wenn am Turbinenaustritt ein Saugschlauch ("Diffusor") mit Austrittsdurchmesser $D_c' = D_1 = 2,4$ m angebracht wird?



Detailskizze des Saugschlauchs:

- Der Saugschlauch darf vereinfachend als verlustfrei angenommen werden. Der Saugschlauch kann durch Unterdruck Kavitation in der Turbine verursachen. Wie kann in der Planung die Lage der Turbine ggf. geändert werden, um dieser Gefahr entgegenzuwirken? (Kurze Begründung, keine Rechnung!)

Angaben:

Länge $L_1 = 500$ m	Durchmesser $D_1 = 2,4$ m	Rauheit $k_1 = 2$ mm
Länge $L_2 = 100$ m	Durchmesser $D_2 = 2,4$ m	Rauheit $k_2 = 2$ mm
Länge $L_3 = 20$ m	Durchmesser $D_3 = 1,2$ m	Rauheit $k_3 = 1$ mm
$H_0 = 60$ m	$z_a = 50$ m	$z_c = -1$ m
		$Q = 10$ m ³ /s

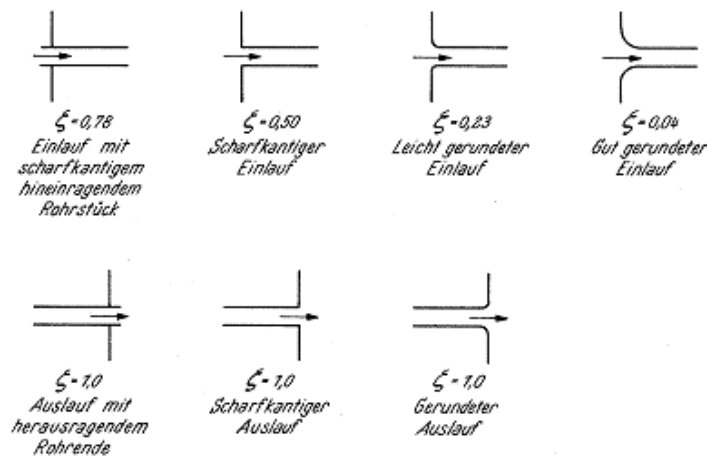
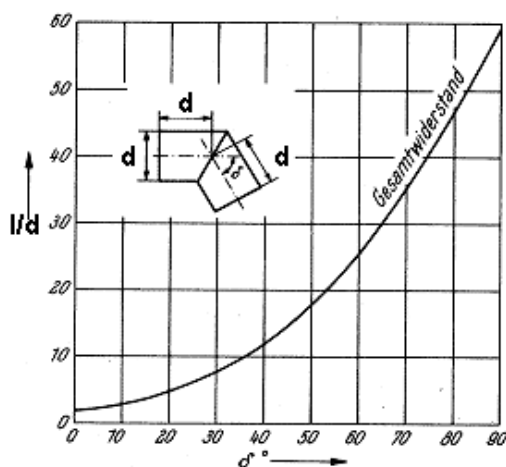
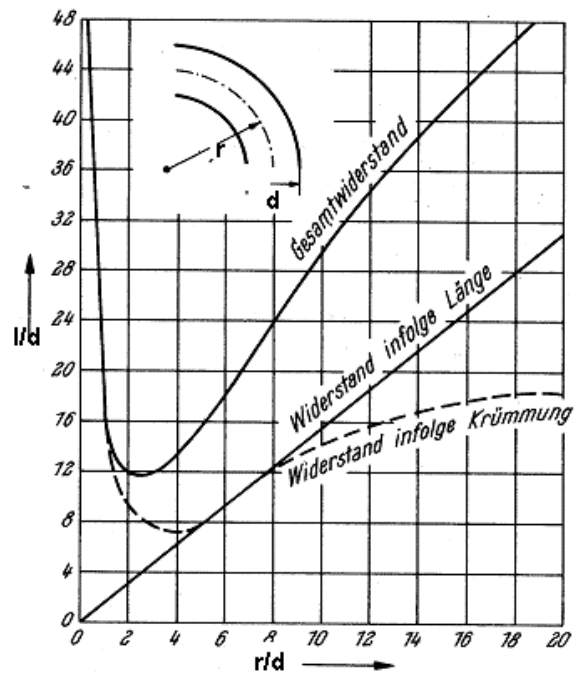
Einlauf: leicht gerundet

Kniestück: 1 Stück mit Winkel $\delta = 30^\circ$

90°-Rohrbogen: 2 Stück mit Krümmungsradius $r = 30$ m, Krümmerlänge in L_2 enthalten.

Rohrverengung: örtliche Verluste sind vernachlässigbar

Turbine (inkl. Austritt): Gesamtwirkungsgrad $\eta = 0,7$ Austrittsdurchmesser $D_c = 1,2$ m


 Abb. 3.16: ζ -Werte für Ein- und Ausläufe

 Abb. 3.17: äquivalente Rohrlänge l über Rohrdurchmesser d für Kniestücke

 Abb. 3.18: äquivalente Rohrlänge l über Rohrdurchmesser d für Rohrbögen

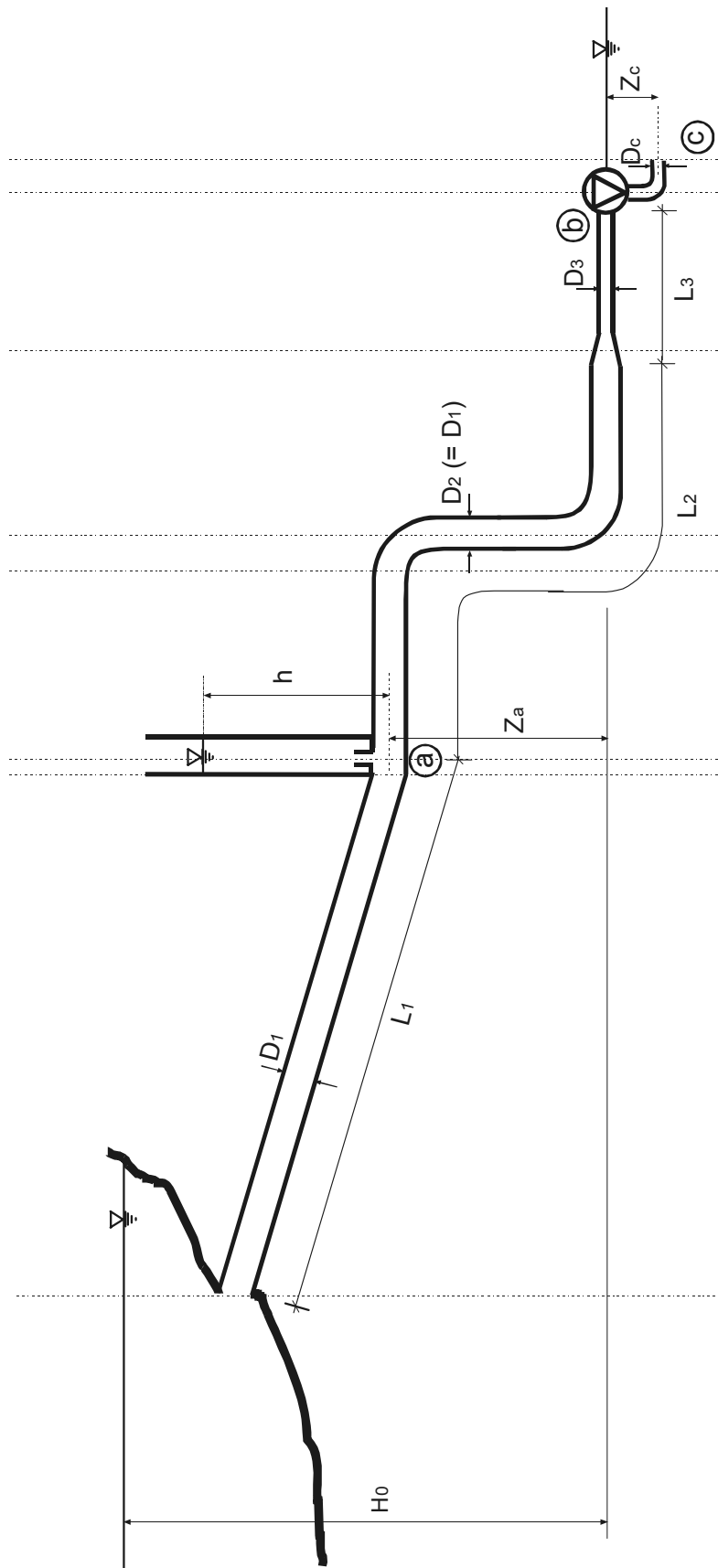


Abb. 3.19: Systemskizze

zu Kap. 4: Stationärer Betrieb von Rohrleitungen: Rohrnetzrechnung

4.1) Berechne den Durchfluß des nachstehenden Rohrleitungssystems:

Stahlrohr: $k_s = 0,4 \text{ mm}$, Annahme "hydraulisch rau"; $Q_{zu} = 1,0 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_{entn} = 0,1 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_{ab} = 0,9 \text{ m}^3/\text{s}$

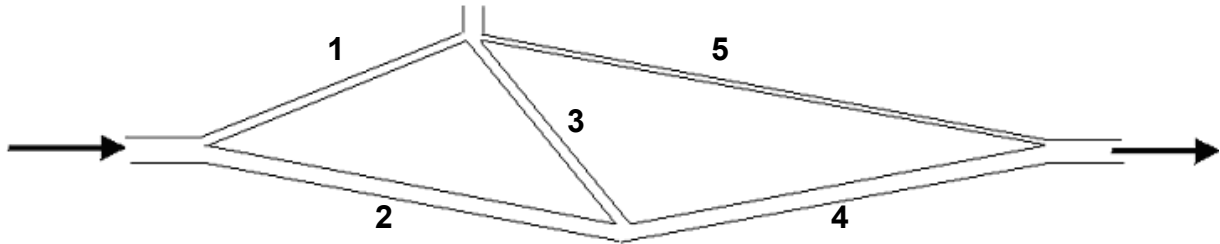


Abb. 4.1: Rohrleitungssystem

Rohrstrang:	L [m]	D [m]	k_s/D [1]	λ [1]	k_i [1]
1	700	0,50			
2	1000	0,40			
3	100	0,40			
4	1000	0,50			
5	1300	0,30			

Abb. 4.2: Parameter Rohrstrang

Iteration Nr.	Q_1 [m ³ /s]	Q_2 [m ³ /s]	Q_3 [m ³ /s]	Q_4 [m ³ /s]	Q_5 [m ³ /s]	Schleife I	Schleife II
						DQ_I [m ³ /s]	DQ_{II} [m ³ /s]
Initialisierung = 0	0,50	0,50	0,20	0,30	0,60		
1							
2							
3							
4							
5							

Abb. 4.3: Iterationsschema

- 4.2) Das nachfolgend gegebene System soll so bemessen werden, daß ein Versorgungsdruck größer 4,0 bar in den Versorgungsgebieten 1 bis 7 gewährleistet ist. Sinnvolle Rohrquerschnitte sind selbständig zu wählen. Druckverluste können Abb. 4.6 entnommen werden ($k_i = 0,4 \text{ mm}$, hier: integrale Rauheit, nicht Gewichte nach Hardy-Cross!). Die Einspeisung am Wasserwerk liegt auf 35 mNN und erfolgt mit 4,5 bar. Weitere Daten zu Rohrnetz und Versorgungsgebieten: siehe Abb.4.4 und 4.5.

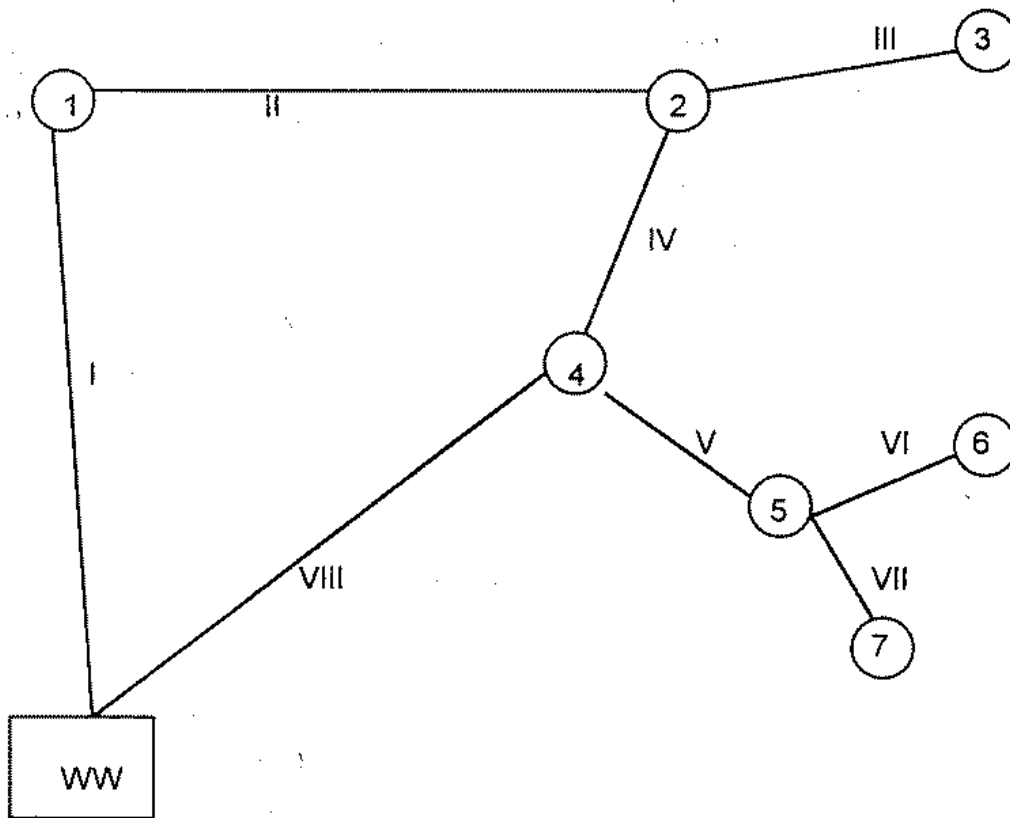


Abb. 4.4: Rohrnetzplan

	Bedarf [l/s]	Geländehöhe [mNN]
Versorgungsgebiet 1	5	30
Versorgungsgebiet 2	0	23
Versorgungsgebiet 3	10	25
Versorgungsgebiet 4	10	30
Versorgungsgebiet 5	0	28
Versorgungsgebiet 6	8	28
Versorgungsgebiet 7	7	30

	Stranglänge [km]
I	4
II	3
III	2
IV	2
V	2
VI	1,5
VII	1
VIII	6

Abb. 4.5: Daten Versorgungsgebiete und Rohrleitungslängen

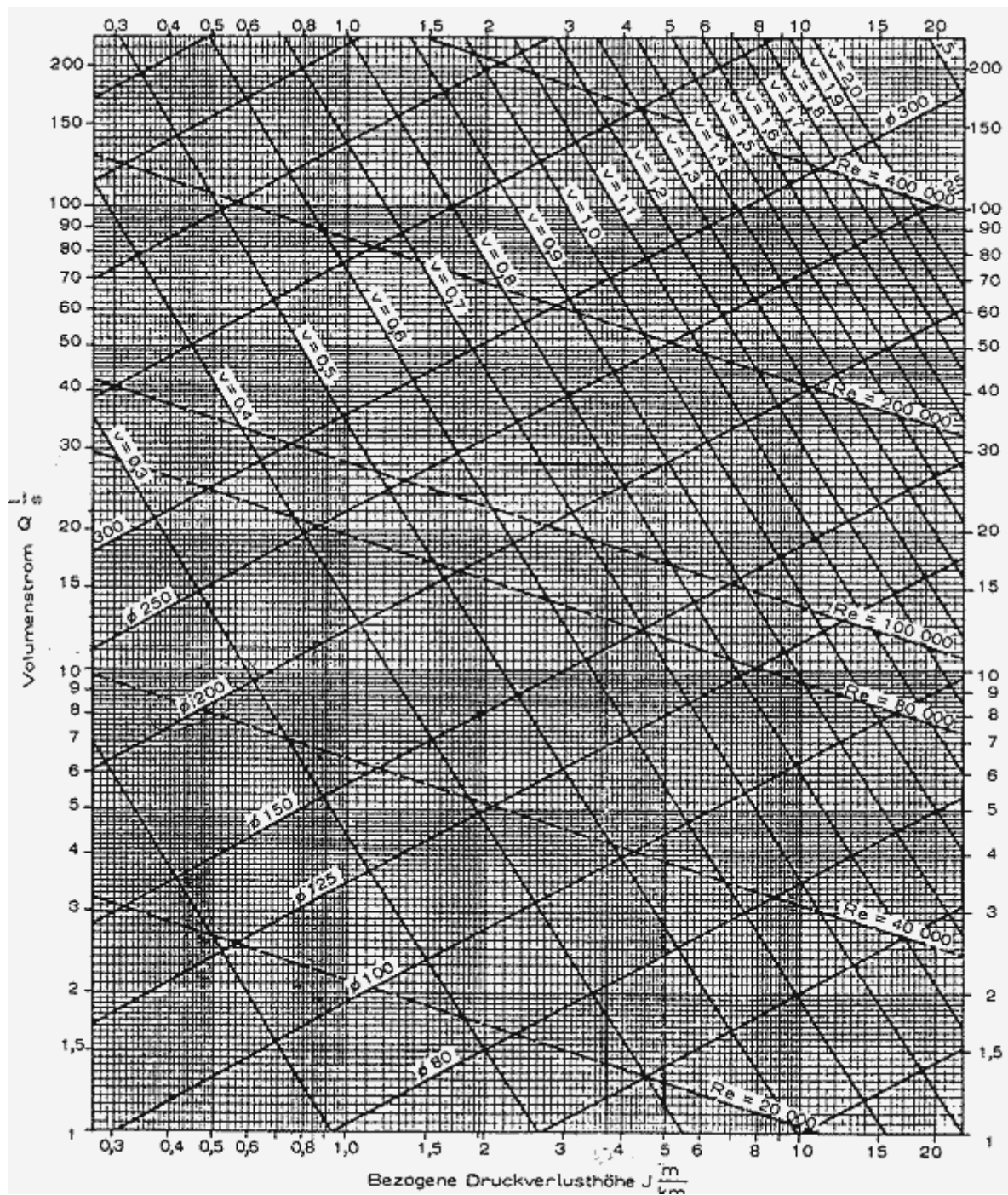


Abb. 4.6: Druckverlusttafel aus DVGW-Arbeitsblatt W 302;
 Integrale Rauheit $k_i = 0,4 \text{ mm}$, v [m/s], \varnothing = lichter Durchmesser

A.) Ringberechnung: ($k_i = 0,4\text{mm}$)

Strang i	DN _i	L _i	Q _i	I _{v,i}	h _{v,i} = I _{v,i} * L _i	h _{v,i} /Q _i	ΔQ ^{*)}	Q' _i = Q _i -ΔQ _i
		[km]	[l/s]	[m/km]	[m]	[m*s/l]	[l/s]	[l/s]
I		4						
II	150	3		1,5				
IV	125	2		-0,76				
VIII		6						
				Σ=				

$$^*) \Delta Q = \Sigma h_{v,i} / 2 / \Sigma (h_{v,i} / Q_i) \ll 1\text{l/s}$$

Iterationsschritt:

Strang i	DN _i	L _i	Q _i	I _{v,i}	h _{v,i} = I _{v,i} * L _i	h _{v,i} /Q _i	ΔQ ^{*)}	Q' _i = Q _i -ΔQ _i
		[km]	[l/s]	[m/km]	[m]	[m*s/l]	[l/s]	[l/s]
I		4						
II	150	3		1,1				
IV	125	2		-1,4				
VIII		6						
				Σ=				

$$^*) \Delta Q = \Sigma h_{v,i} / 2 / \Sigma (h_{v,i} / Q_i) \ll 1\text{l/s}$$

B.) Netzberechnung:

Strang	Endpunkt	DN _i	L _i	Q _i	I _{v,i}	h _{v,i} = I _{v,i} * L _i	Energie- linie	Gelände	Versor- gungsdruck
			[km]	[l/s]	[m/km]	[m]	[mNN]	[mNN]	[mWS]
	WW						80		45
I	1		4						
II	2	150	3						
III	3	200	2						
IV	-	125	2	4	1,4		-	-	-
V	5	200	2	15	1,5			28	
VI	6	150	1,5	8	1,95			28	
VII	7	150	1	7	1,5			30	
VIII	4		6	29	0,66			30	

Abb. 4.7: Ring- und Netzberechnung

4.3) An einem Rohrnetz mit drei Rohrsträngen sind ein Versorger in Knoten „A“ und jeweils ein Verbraucher an den Knoten „B“ und „C“ angeschlossen. Für die aktuell vorliegende Verbrauchersituation mit $Q_B^{verbr} = Q_C^{verbr} = 1 \text{ m}^3/\text{s}$ sollen mittels des Hardy-Cross-Verfahrens die Durchflüsse ermittelt werden.

- a) Formulieren Sie für alle Knoten die Knotengleichungen. (Bilanz der Volumenflüsse am jeweiligen Knoten)
 Formulieren Sie für die vorhandene Schleife I die Schleifenkorrekturgleichung.

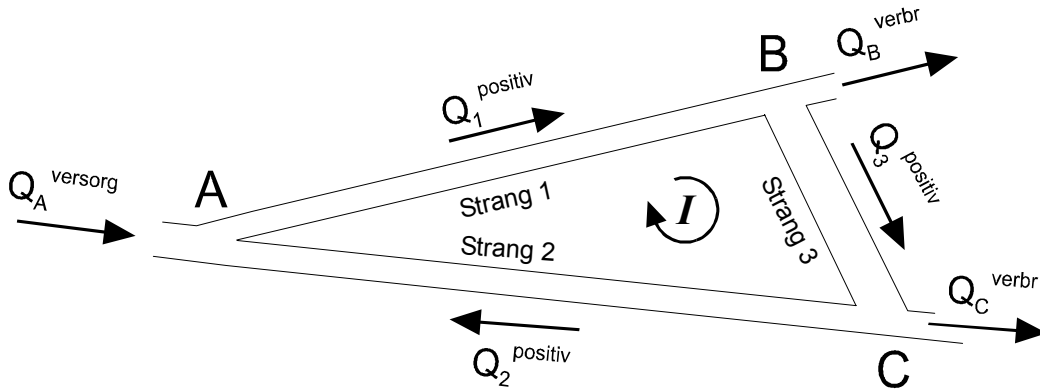


Abb. 4.8: Rohrnetz

Angaben:	Schleifenkorrektur:	$Q_i^{n+1} = Q_i^n + \Delta Q_{Schleife}^n$
mit Schleifenkorrekturgleichung		$\Delta Q_{Schleife}^n = -\frac{1}{2} \cdot \frac{\sum (k_i \cdot \text{sign}(Q_i^n) \cdot Q_i^{n^2})}{\sum (k_i \cdot Q_i^n)}$
	Gewichte:	$k_i = \frac{8}{\pi^2} \cdot \frac{\lambda}{g} \cdot \frac{L_i}{D_i^5}$
	Signumfunktion:	$\text{sign}(x) = \begin{cases} 1, & 0 \leq x \\ -1, & x < 0 \end{cases}$
Bezeichnungskonvention: Rohrstränge i, Iterationsschritte n		

- b) Berechnungen (alle Ergebnisse in untenstehende Tabelle eintragen)
- Berechnen Sie alle notwendigen Gewichte
 - Berechnen Sie $Q_A^{versorg}$ sowie die Startwerte für Iterationsschritt $n = 1$ von Q_1^1 und Q_2^1 bei gegebenem Startwert $Q_3^1 = +0,5 \text{ m}^3/\text{s}$ (auf Vorzeichen achten).
 - Berechnen Sie mit zwei Schritten ($n = 2$ und $n = 3$) die Durchflüsse Q_1^n , Q_2^n , Q_3^n .
 - Beurteilen Sie die Qualität ihrer Berechnung nach dem zweiten Rechenschritt.
- c) Wo erwarten Sie in diesem System örtliche Verluste? Wie können Sie diese in der Rechnung berücksichtigen? Geben Sie eine Formel an.

	Strang 1	Strang 2	Strang 3
L_i [m]	1000	2500	300
D_i [m]	0,5	0,5	0,5
λ_i [1]	0,012	0,012	0,012
k_i [s^2/m^5]			
$Q_A^{versorg}$ [m^3/s]			
Q_i^{Start} [m^3/s]	sign Q_1 · Q_1 	sign Q_2 · Q_2 	sign Q_3 · Q_3 + 1 0,5
$(\Delta Q)^1$ [m^3/s]			
Q_i^2 [m^3/s]	sign Q_1 · Q_1 	sign Q_2 · Q_2 	sign Q_3 · Q_3
$(\Delta Q)^2$ [m^3/s]			
Q_i^3 [m^3/s]	sign Q_1 · Q_1 	sign Q_2 · Q_2 	sign Q_3 · Q_3

Abb. 4.9: Rohrleitungswerte und Berechnungsverlauf

zu Kap. 5: Instationärer Betrieb von Rohrleitungen: Druckstoss

- 5.1) Wodurch werden instationäre Strömungen in hydraulischen Rohrleitungssystemen hervorgerufen?
- 5.2) Von welchen Faktoren ist die Intensität eines Druckstoßes abhängig?
- 5.3) Wozu dienen Rückschlagklappen in Rohrleitungen?
- 5.4) Eine 932 m lange Spannbetonrohrleitung DN 1400 wird am Leitungsende schlagartig geschlossen. Die Rohrwanddicke beträgt $s = 0,10$ m, der Durchfluß $Q(t=0) = 3,08$ m³/s. Wie lange benötigt der Druckschlag bis zum Rohranfang? Wie groß ist theoretisch der max. Druckschlag und an welcher Stelle tritt er auf?
geg.: E (Wasser) = $2,06 \cdot 10^9$ N/m², E (Stahl) = $210 \cdot 10^9$ N/m², E (Beton) = $32 \cdot 10^9$ N/m²
- 5.5) Skizziere kurz das Vorgehen zur Lösung mathematisch-physikalischen Grundgleichungen für instationäre Strömungen in Rohrleitungen nach dem Charakteristiken-Verfahren.
- 5.6) Eine Ventilationsleitung der Länge $2L$ mit Durchmesser D wird von einer Lüftungszentrale mit konstantem Innendruck p_0 gespeist. In der Mitte und am Ende der Leitung sind die Drosselklappen A und B angebracht.

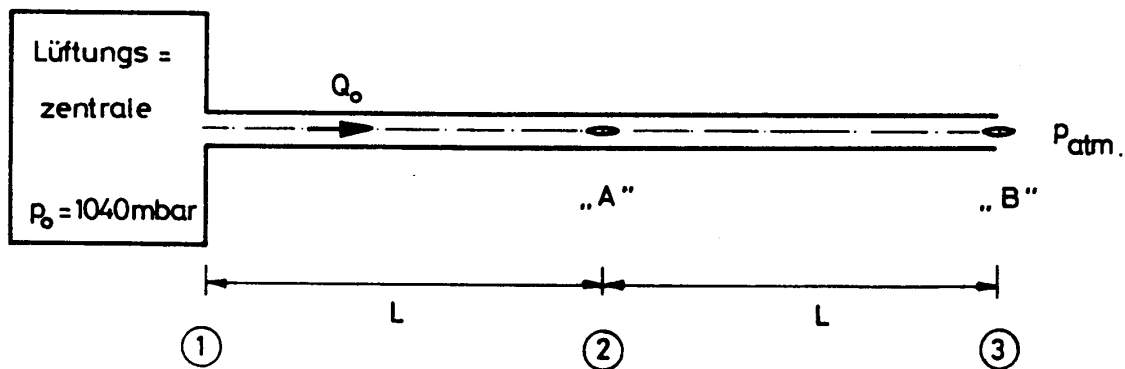


Abb. 5.1: Systemskizze

geg.: $L = 500$ m, Durchmesser $D_i = 0,80$ m, $p_0 = 1040$ mbar (absolut), $p_{atm} = 1000$ mbar (absolut),
 $\Sigma \Delta p_v = 35$ mbar, $c_{Luft} = 330$ m/s, $\rho_L = 1,3$ kg/m³, $\nu_L = 15 \cdot 10^{-6}$ m²/s

- a) Zeichnen Sie in obige Abbildung qualitativ die Druck- und Energielinie der Lüftungsleitung bei qualitativer Berücksichtigung sämtlicher Verluste für den Fall, daß bei geöffneten Klappen die Luft am Ende in die Atmosphäre austritt. Bestimmen Sie den Luftdurchsatz Q_0 wenn in der Leitung zwischen 1 und 3 ein Druckverlust $\Sigma \Delta p_v$ auftritt.
- b) Wie groß sind die Kräfte F_A und F_B auf die beiden Drosselklappen nach deren gleichzeitigem, plötzlichem Abschluß?
- c) Tragen Sie für diesen Fall den zeitlichen Druckverlauf unmittelbar vor und hinter der Drosselklappe A für den Zeitraum $t = 0$ (plötzlicher Abschluß) bis $t = 4 \cdot L/c$ in Abb. 5.2 qualitativ ein. Beachte, daß beide Klappen gleichzeitig geschlossen werden!
- d) Was muß beachtet werden, wenn sich Wasser anstelle von Luft in der Leitung befindet und die Klappe A plötzlich geschlossen wird?

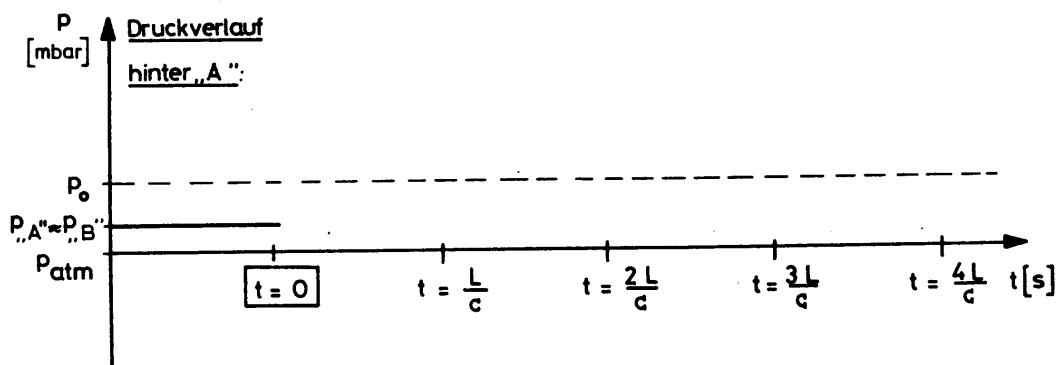
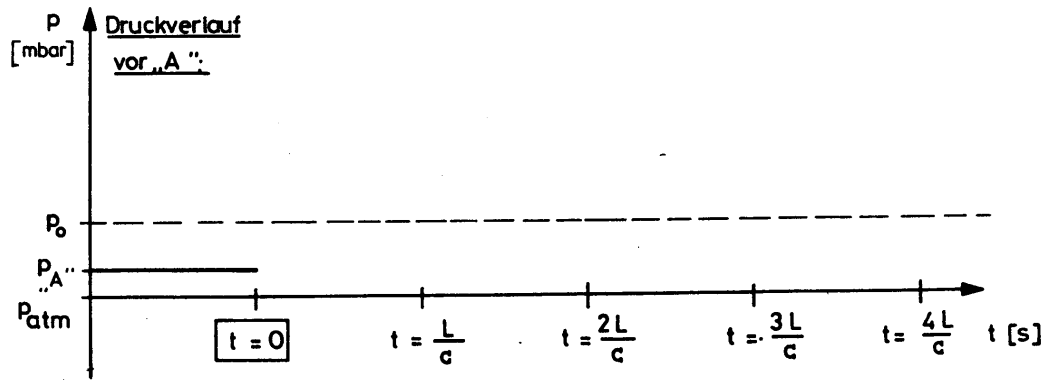


Abb. 5.2: Drucklinien zu verschiedenen Zeitpunkten für stationäre Strömung

- 5.7) Zwei Wasserreservoire 1 und 2 (s. Abb. 5.3) sind über eine Rohrleitung von der Länge $3L$ und vom Durchmesser D miteinander verbunden. Im Punkt B der Rohrleitung befindet sich eine Drosselklappe.

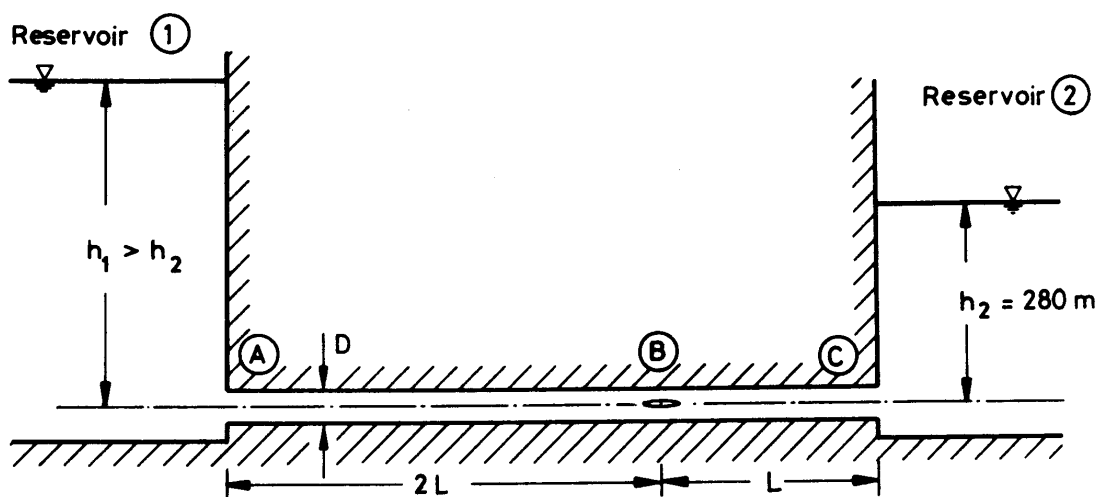


Abb. 5.3: Systemskizze

geg.: $L = 1400 \text{ m}$, $\text{DN } 1500$, Druckwellengeschwindigkeit $a = 1050 \text{ m/s}$, $p_{\text{atm}} = 1013 \text{ mbar}$, $\vartheta_{\text{Wasser}} = 15^\circ\text{C}$

- Zeichnen Sie in Abb. 5.3 qualitativ die Druck- und Energielinie für stationäre Verhältnisse bei geöffneter Drosselklappe ein, unter Berücksichtigung sämtlicher Verluste.
- Bei einem Störfall wird die Drosselklappe im Punkt B zum Zeitpunkt $t_0 = 0$ plötzlich geschlossen. Berechnen Sie die dadurch hervorgerufene Druckhöhenänderung $\Delta p/\gamma$, wenn der Durchfluß vor Abschluß der Klappe $Q = 4,0 \text{ m}^3/\text{s}$ betrug.
- Zeichnen Sie für diesen Fall den Verlauf der Drucklinie in der Rohrleitung A – C nach Abschluß der Klappe für die Zeitpunkte $t_1 = L/c$, $t_2 = 2L/c$, $t_3 = 3L/c$, $t_4 = 7L/c$ in Abb. 5.4 ein. Für diese Teilaufgabe dürfen Verluste unberücksichtigt bleiben!
- Berechnen Sie für den Zeitraum $t_0 \leq t < 2L/c$ die Gesamtbelastung auf die geschlossene Klappe.
- Die tatsächliche Schließzeit der Klappe kann in einem Bereich bis zu 15 s variiert werden. Wie groß muß die Schließzeit mindestens gewählt werden, damit der maximal mögliche Druckstoß vermieden wird?
- Welcher Unterdruck stellt sich unmittelbar unterhalb des Verschlußorgans nach plötzlichem Abschluß ein für den Fall, daß das Reservoir 2 leer ist (ansonsten gleiche Bedingungen wie bei vorheriger Teilaufgabe)?

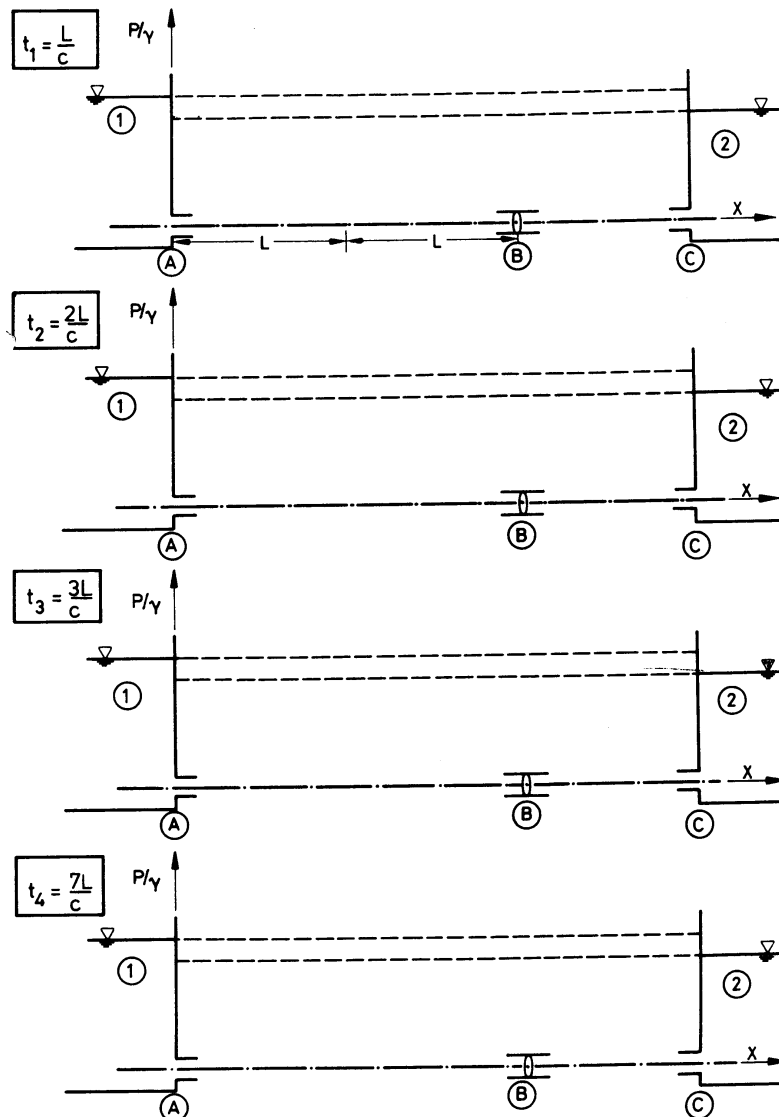


Abb. 5.4: Drucklinien zu verschiedenen Zeitpunkten

- 5.8) Zwei große Wassertanks (A) und (D) sind durch eine Rohrleitung miteinander verbunden, die über unebenes Terrain mit einer Anhebung bei (B) geführt ist. In Punkt (C) befindet sich ein Absperrventil.

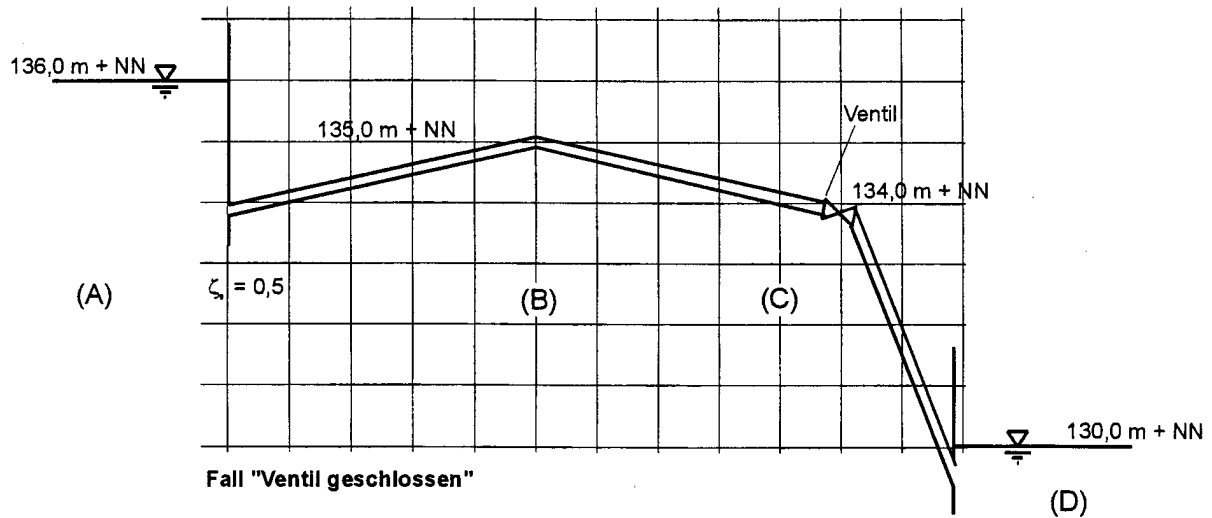


Abb. 5.5: Ventil vollständig geschlossen

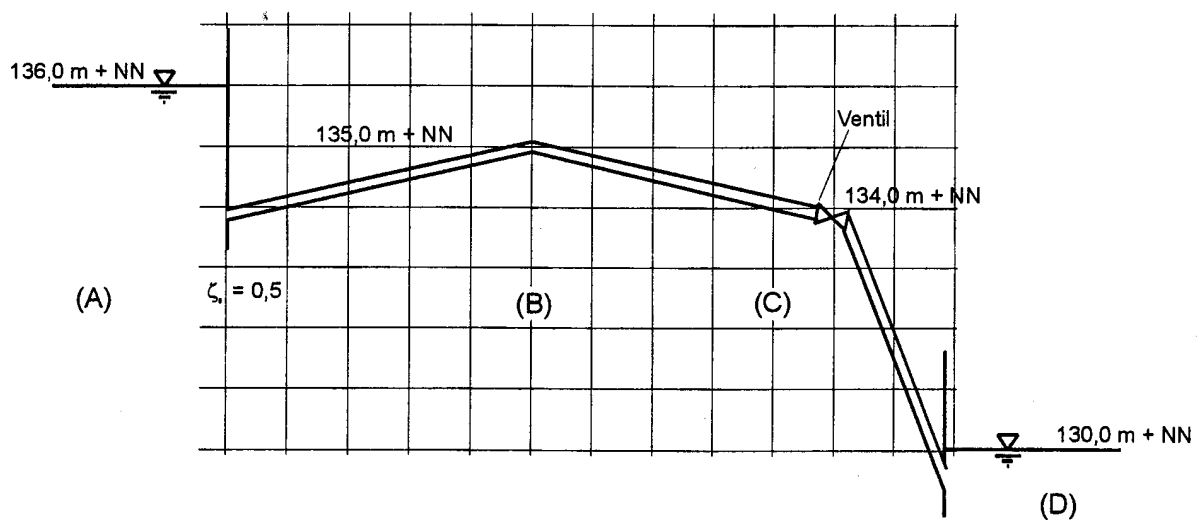


Abb. 5.6: Ventil vollständig geöffnet

geg.: $L_{AB} = L_{BC} = L_{CD} = 50$ m; Rohrdurchmesser $D = 0,2$ m, äquival. Rohrrauheit $k = 1,0$ mm; $h_A = 136,0$ mNN; $h_B = 135,0$ mNN; $h_C = 134,0$ mNN; $h_D = 130,0$ mNN; Einlaufverlust $\zeta_E = 0,5$; Verlust am Knick $\zeta_B = 0,15$; Ventilverluste siehe Abb. 5.7

- Während des Betriebs der Leitung wird das Ventil geschlossen, so daß das Rohr von (A) bis (D) vollständig mit Wasser gefüllt ist. Zeichnen sie für geschlossenes Ventil den Verlauf von Druck- und Energielinie in Abb. 5.5 ein.
- Berechnen Sie für vollständig geöffnetes Ventil die Durchflußmenge Q .
- Zeichnen Sie für diesen Fall den Verlauf von Druck- und Energielinie qualitativ in Abb. 5.6 ein.
- Wie groß ist unmittelbar unterstrom des Ventils die Druckhöhe und der Druck?
- Ist beim Ventil Kavitation zu erwarten? Begründen Sie kurz Ihre Antwort.

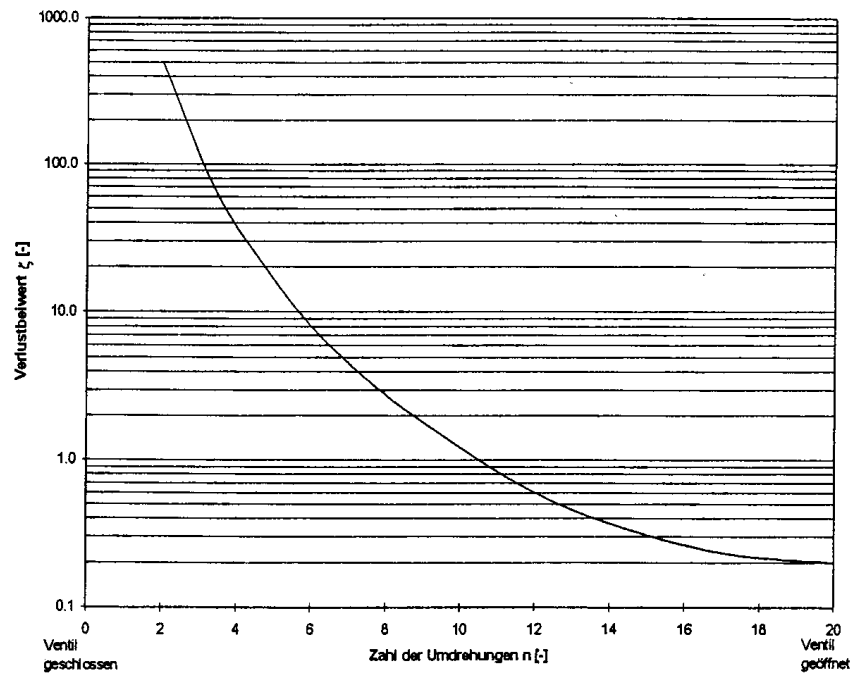


Abb. 5.7: Ventilkennlinie

- 5.9) An einem großen Speicher schließt sich eine elastische Druckrohrleitung mit freiem Auslass an, die mittels eines Schiebers abgeschlossen werden kann.

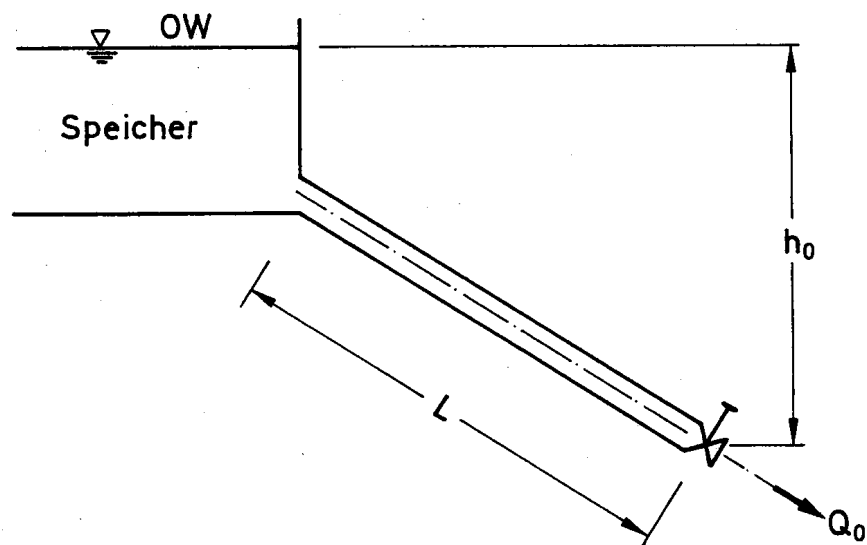


Abb. 5.8: Druckrohrleitung mit freiem Auslaß

geg.: $L = 5000 \text{ m}$; Rohrdurchmesser $D = 3,0 \text{ m}$, Rohrwandstärke $s = 20 \text{ mm}$, $Q_{\text{Stat}} = 12,0 \text{ m}^3/\text{s}$, Druckhöhe $h_{0,\text{stat}} = 200 \text{ m}$, $E (\text{Wasser}) = 2,0 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$, $E (\text{Stahl}) = 212 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$, Rohr-kennzahl $R_S = (c \cdot v_0) / (2g \cdot h_0) = 0,4$

- Berechnen Sie die Druckwellengeschwindigkeit c , die Reflexionszeit t_R sowie die maximale Druckerhöhung Δp_{\max} am Rohrende.
- Welche Schließzeit t_S wird benötigt, um bei linearem Schließen höchstens 25 % von Δp_{\max} zu erhalten? Verwenden Sie zur Lösung Abb. 5.9.
- Zeichnen Sie den zeitlichen Druckverlauf am Rohrende bei allmählichem Abschluss (schematisiert) bis $t = t_S$.
- Beschreiben Sie, wie sich der allmähliche Abschluss des Schiebers bei oben berechneter Schließzeit t_S auf den Druckstoß auswirkt.

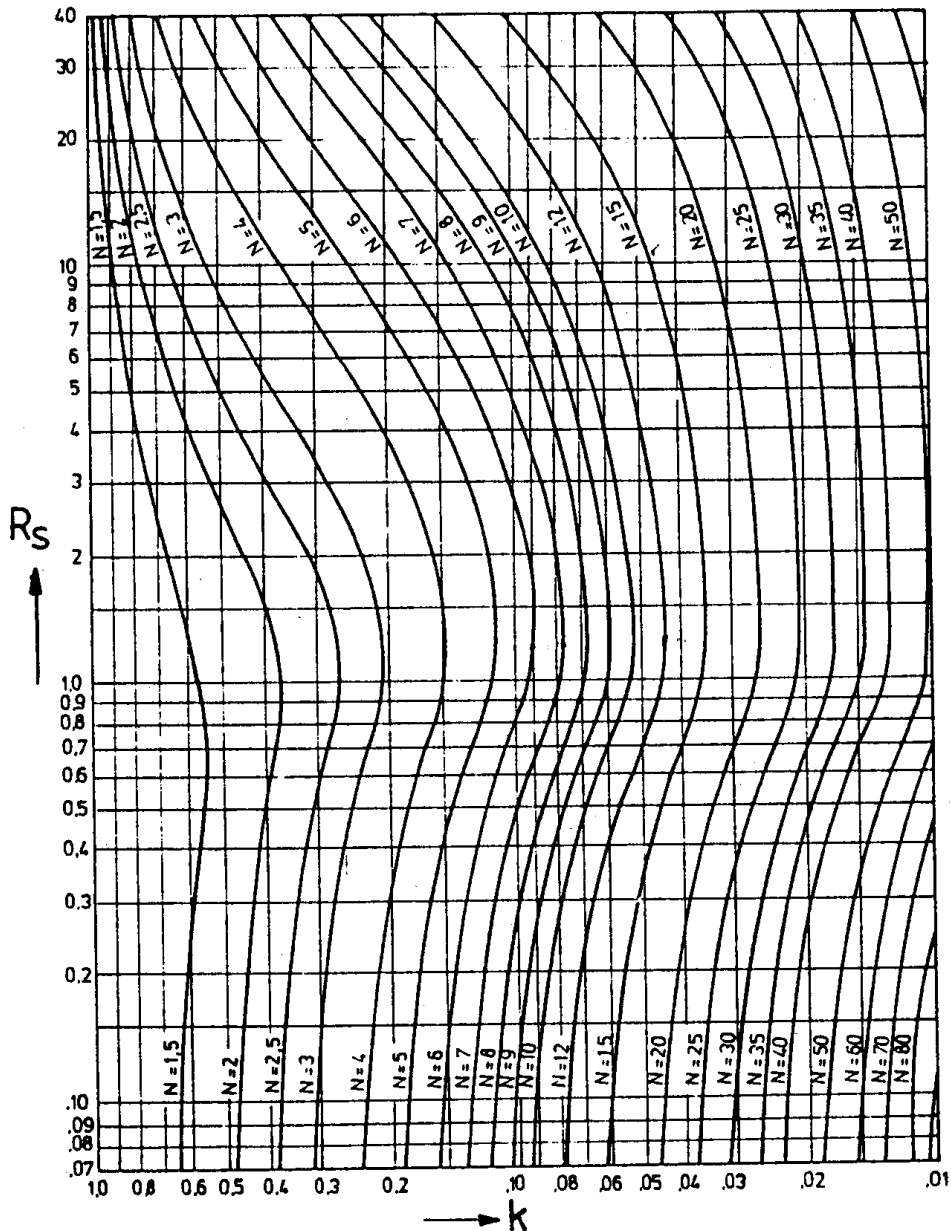


Abb. 5.9: Druckstoßdiagramm für lineares Schließgesetz, mit $N = t_S/t_R$, $k = \text{zul } \Delta p / \Delta p_{\max}$

- 5.10) Aus der Wasserfassung A soll entsprechend Abb. 5.10 über eine Triebleitung T die Wassermenge Q entnommen und durch eine „Widderanlage“ eine Teilmenge Q_T über einen Windkessel K und eine Förderleitung F in den Verbraucherbehälter B gehoben werden. Dieser Hebevorgang läuft nur ab, wenn das Stoßventil V_1 (Abb. 5.11) so schnell schließt, dass der entstehende Überdruck das Steigventil V_2 zu öffnen mag.

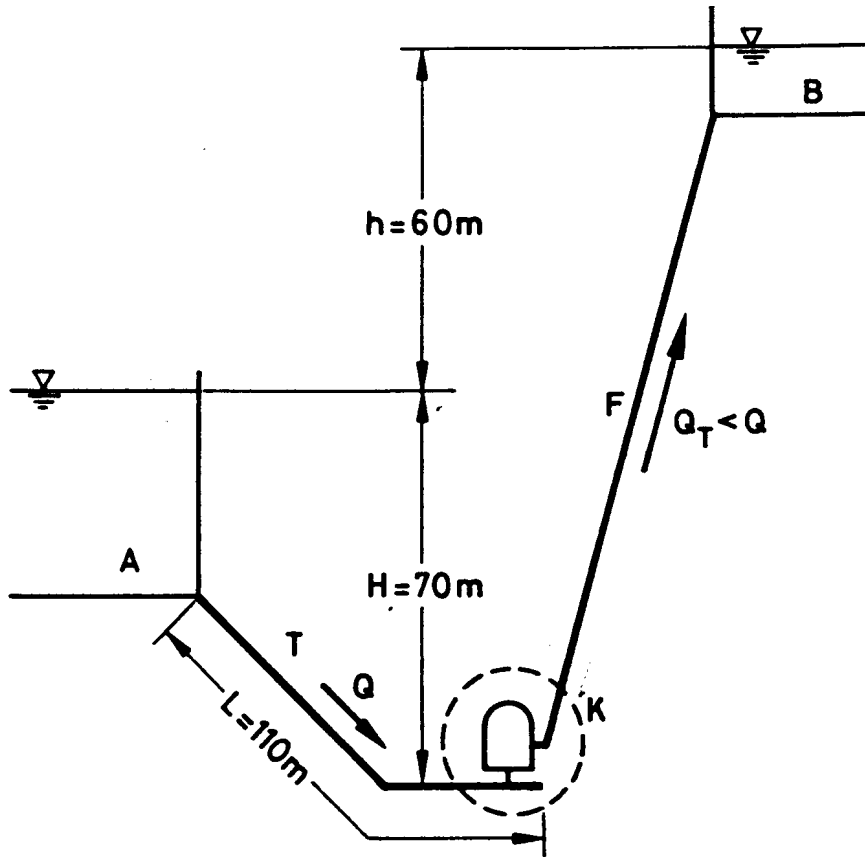


Abb. 5.10: Systemskizze der Widderanlage

geg.: $h = 60 \text{ m}$; $H = 70 \text{ m}$; $L = 110 \text{ m}$; $D = 1 \text{ m}$; $k = 2,5 \text{ mm}$; $g = 9,81 \text{ m/s}^2$; $\nu = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$;
 $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$, $c = 1000 \text{ m/s}$

Triebeinleitungsverluste durch Einlauf und Umlenkung: $\Sigma \zeta = 0,4$

Widerstandsbeiwert der Scheibe bei Ventil V_1 : $c_W = 1,2$

Gestängewiderstand ist vernachlässigbar

- Berechnen Sie die Triebwassermenge Q , wenn das Stoßventil V_1 ganz geöffnet und V_2 geschlossen ist.
- Wie muß die Kraft G ausgelegt sein, damit sich bei diesem Abfluß V_1 gerade zu schließen beginnt?
- Überprüfen Sie, ob nach einem Schließvorgang gemäß Abb. 5.12 der theoretisch größtmögliche Druckanstieg (Joukowsky-Stoß) erreicht werden kann.
- Zu welchem Zeitpunkt nach Beginn des Schließvorgangs öffnet sich V_2 ? (Die Durchflußgeschwindigkeit in der Triebwasserleitung vor dem Ventil V_1 betrage zur Zeit $t=0$: $v_0 = 0,9 \text{ m/s}$. In der Triebwasserleitung kann bei Ventil V_2 die Druckhöhe zu $p/\gamma = H$ angenommen werden.)

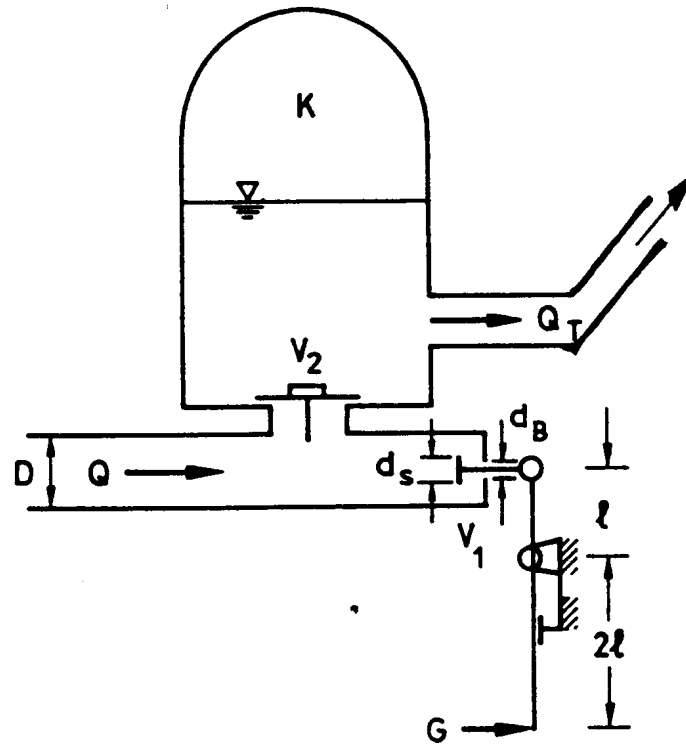


Abb. 5.11: Detailskizze des Widders; $d_s = 0,25 \text{ m}$; $d_B = 0,2 \text{ m}$

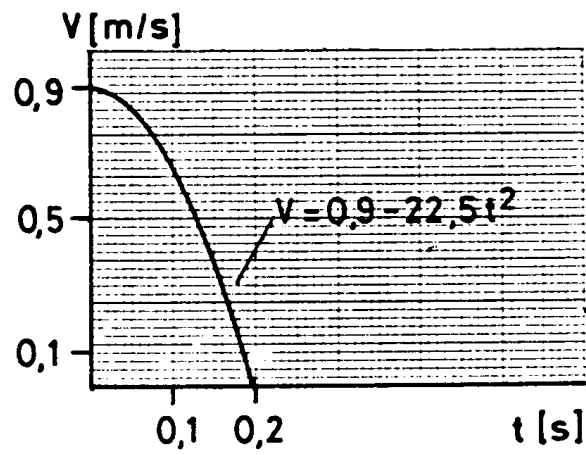


Abb. 5.12: Schließvorgang bei V_1 : $V_{\text{Triebwasser vor Ventil } V_1} = f(t)$

zu Kap. 1: Lösungen

zu 1.4) 1bar ~ 10 mWS; 1Pa ~ 0,1 mmWS (Faustformel für $\rho_w = 1000 \text{ kg/m}^3$ und $g = 10 \text{ m/s}^2$)

zu 1.sonst) siehe Vorlesung und Vorlesungsskript

zu Kap. 2: Lösungen

zu 2.1-3) siehe Vorlesung und Vorlesungsskript

zu 2.4) $Re = 10.000 > 2.000$

zu 2.5) siehe Hydromechanik-Skript S. 96

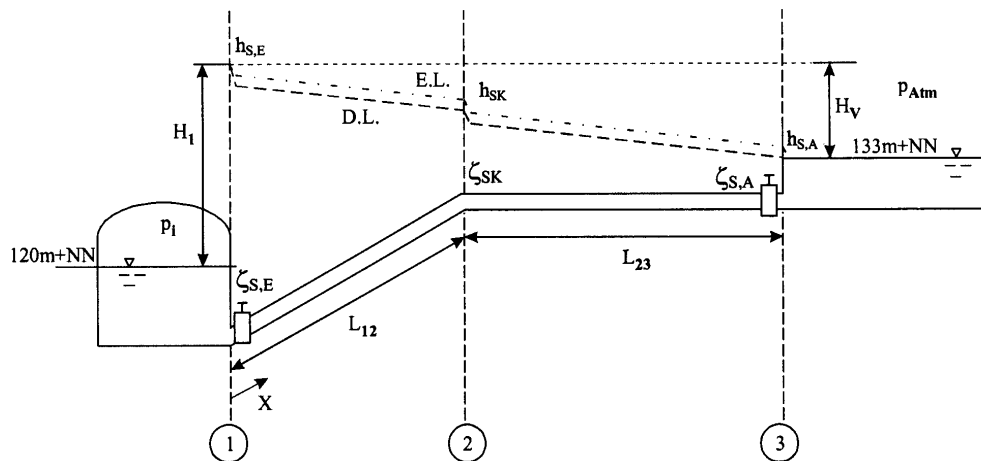
zu 2.6) $v = 0,52 \text{ m/s}$

zu 2.7) $Q = 0,125 \text{ m}^3/\text{s}$

zu 2.8) mit $\lambda_o = 0,02 \rightarrow h_{v0} = 40 \text{ m}$; mit $\lambda_{\square} = 0,0244$ (Swamee & Jain) $\rightarrow h_{v\square} = 61 \text{ m}$

zu 2.9) b: $Q = 0,1 \text{ m}^3/\text{s}$; c: Punkt P im zweiten Knick, $z_P = 130,47 \text{ mNN}$, Berechnung über A-E-Gl.

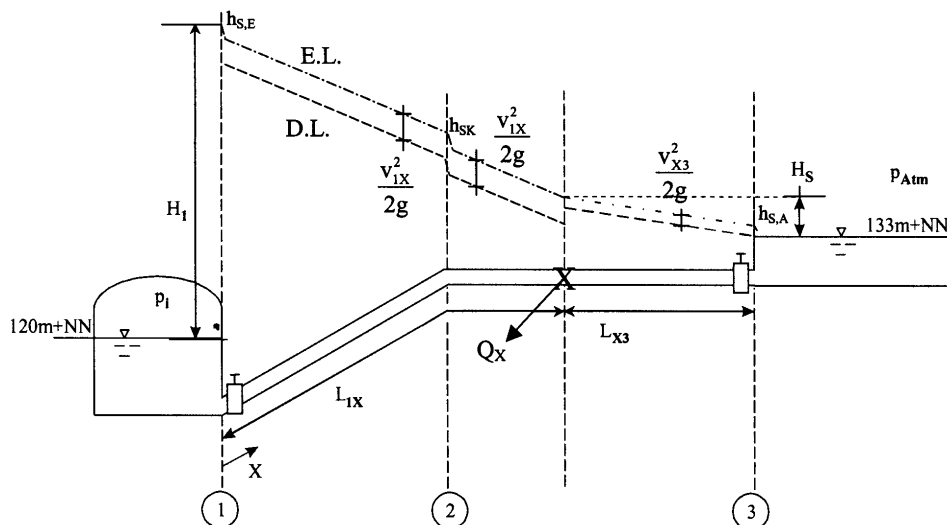
zu 2.10) a:



b1: $DQ = 0,24 \text{ m}^3/\text{s}$

b2: $v_{1x} = 3,67 \text{ m/s}$, $v_{3x} = 2,45 \text{ m/s}$

b3:

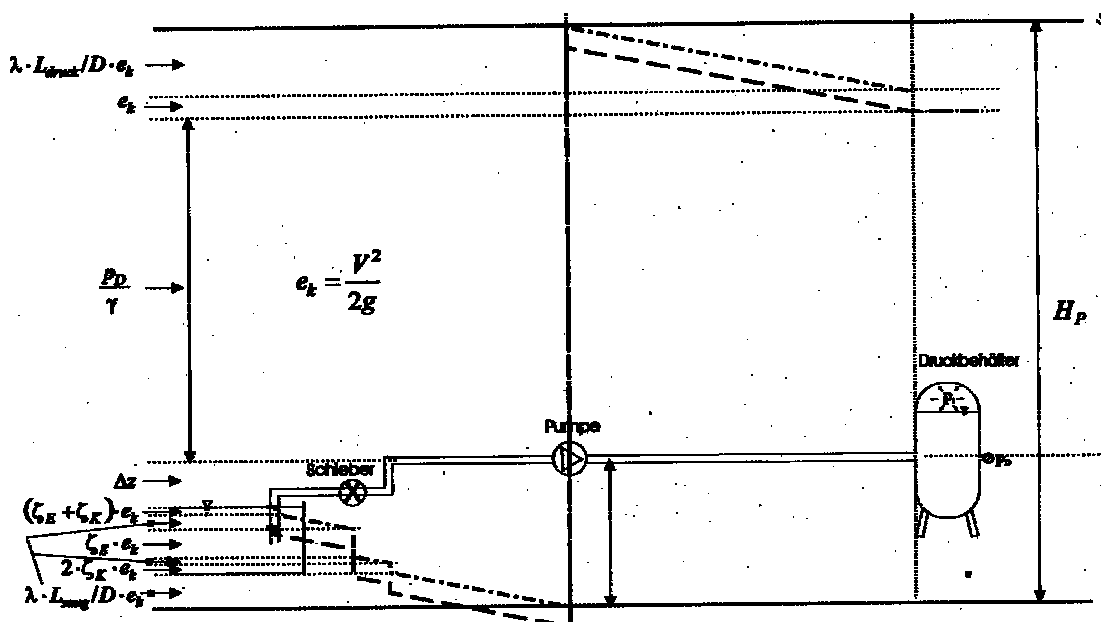


b4: $L_{1x} = 2429 \text{ m}$, Berechnung über A-E-Gl.

- zu 2.11) b: $Q = 0,907 \text{ m}^3/\text{s}$
 c: Q_A bzw. v_A größer als in Teil 1 -> höhere örtl. Verluste, stärkere DL- u. EL- Neigung
 Q_B bzw. v_B kleiner als in Teil 1 -> höhere örtl. Verluste, flachere DL- u. EL- Neigung
 $L_{AC} = 57.300 \text{ m}$
- zu 2.12) $h_{VE} = 0,04 \text{ m}$; $h_{VA} = 0,02 \text{ m}$
- zu 2.13-15) Denk selber nach!

zu Kap. 3: Lösungen

- zu 3.1-3) siehe Vorlesung und Vorlesungsskript
- zu 3.4) Kaplanturbine -> s. z.B. Schaufel vor IWK für Gefälle $H \sim 10\text{m}$ (Niederdruck)
 Pelton turbine -> s. z.B. Freistrah-Laufrad vor IWK für Gefälle $H \sim 600\text{m}$ (Hochdruck)
- zu 3.5) $H = 79 \text{ m}$, $\eta = 54 \%$, $P = 16 \text{ kW}$
- zu 3.6) $v_A = 12 \text{ m/s}$
- zu 3.7) Nein; $Q_{\text{opt}} = 100 \text{ m}^3/\text{h}$ -> $\eta = 76 \%$,
- zu 3.8) entweder gleiche Motorleistung P , dann $H_{\text{Gemisch}} = H / 1,2$
 oder gleiche Förderhöhe H , dann Motorleistung $P_{\text{Gemisch}} = 1,2 \cdot P$
- zu 3.9) $\text{NPSH}_R(40) = 3,5\text{m}$ -> Überprüfung Kavitationsgefahr für Q_{max}
 $\text{NPSH}_R(130) = 9,0\text{m}$
- zu 3.10) $\text{NPSH}_A(40) = (-2,0 + 10,13) + 1^2/20 - 0,07 \cdot 4,74 = 3,37 < (\text{NPSH}_R(40) - 0,5)$
 -> Kavitationsgefahr!
- zu 3.11) a: Beachte Einlaufverlust, Sprung bei (P) um $H_P = 40 \text{ m}$ (nach oben!), bei (1), (2) und (3) Sprung in DL und Knick in EL, danach weiter mit flacheren Neigungen (vgl. 2.10 b3), EL und DL in jedem Abschnitt parallel, da stationärer Betrieb
 b: $v_{A1} = 3,30 \text{ m/s}$ aus A/E-Gl. zw. A und (1), damit $Q = 0,233 \text{ m}^3/\text{s}$
 c1: $H_3 = (1+5,1) \cdot 0,062\text{m} = 0,38\text{m}$; $H_2 = H_3 + 0,03 \cdot 150/0,3 \cdot 0,062\text{m} = 1,31\text{m}$; $H_1 = 5,02 \text{ m}$
 c2: $v_{1-3} = 1,1 \text{ m/s}$
 c3: aus $\zeta_1 = 80 \rightarrow n_1 = 8,1$, aus $\zeta_2 = 20,1 \rightarrow n_2 = 12,8$
- zu 3.12) a:



$$b: H_P = 0,126m \cdot \left(\underbrace{1 + 0,3 + 0,7 + 3 \cdot 0,15}_{\text{Faktor 2,45 für örtl. Verluste}} + \underbrace{0,021 \cdot \frac{400}{0,14}}_{\text{Faktor 60 für kont. Verluste}} \right) + 37,72m + 3,0m = 48,59m$$

c: Nein, da λ für diesen Durchfluß abhängig von der Reynoldszahl ist. (n.b.: v müßte hier für Re-Invarianz ca. 100x größer, also 157 m/s groß sein!

d: Ein Schieber darf nie auf der Saugseite einer Pumpe eingebaut werden.

zu 3.13) a: $P_{\text{Welle}} = 19620 \cdot 0,42 \cdot 0,79 \cdot 0,85 = 5,53 \text{ kW}$

Q [m³/s]	0	10	20	30	40	50	60	70
H _{geo} + h _v [m]	30,3	30,3	31,0	32,3	34,0	36,2	38,9	42,1

c: Etanorm 40-160 (6); $\eta = 77,5 \%$, $Q = 43 \text{ m}^3/\text{h}$; $H = 30 \text{ m} + 5 \text{ m}$; $P_{\text{Welle}} = 5,3 \text{ kW}$: Die angebotene Leistung (5,5 kW) wird nicht voll ausgenutzt ($\Delta P = 0,2 \text{ kW}$), η liegt etwas unter $\eta_{\text{opt}} - > \text{dyn}$. Anteil verringern durch gr. Rohr- \varnothing , d.h. flachere Anlagenkennlinie, damit „doppelte“ Belohnung, $\Delta P \rightarrow 0$ und η wird größer.

d: $7,75 \text{ m} - z_e > 1,8 \text{ m} + 0,5 \text{ m} \Leftrightarrow z_e < 5,45 \text{ m}$, dann keine Kavitationsgefahr

zu 3.14) Alternative 1: UPA 150-5 / 13 mit $\eta = 70,5 \%$

Alternative 2: UPA 150-7 / 11 mit $\eta = 69 \%$

zu 3.15) a: $L = \zeta / \lambda \cdot D$

c: $\Delta H = 53,35 \text{ m}$; $P = 3,66 \text{ kW}$

d: $\Delta P / \rho = 7,0 \%$

e: Tieferer Turbineneinbau bedeutet gr. Druck am Turbinenaustritt ohne Leistungsverlust.

zu Kap. 4: Lösungen

zu 4.1) siehe Vorlesung und Vorlesungsskript

zu 4.2) für Strang I = DN 200 und Strang VIII = DN 300:

Endpunkt	1	2	3	4	5	6	7
Q _i [l/s]	11	6	10	29	15	8	7
Versorgungsdruck [mWS]	46,7	50,4	47,1	46,0	45,0	42,1	41,54

→ Ein Versorgungsdruck von 4-5 bar (~ 40 – 50 mWS) wird eingehalten.

zu 4.3) a:

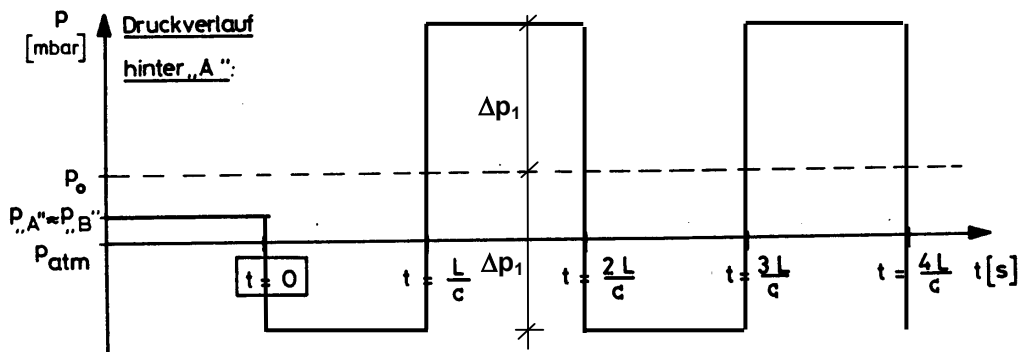
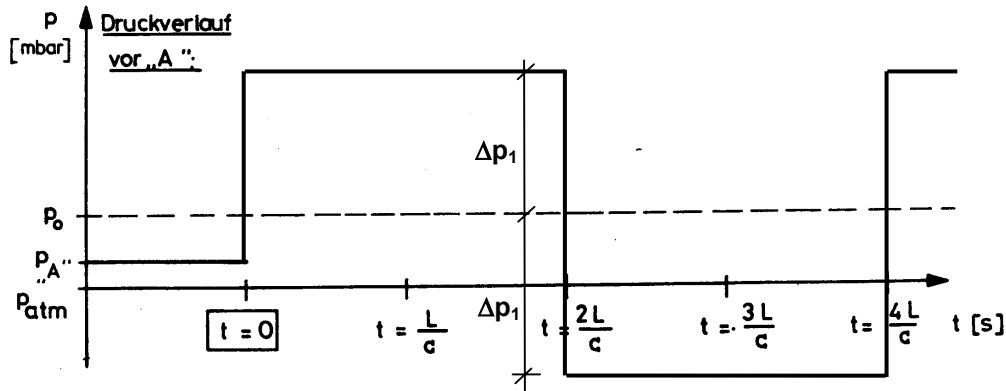
	Strang 1	Strang 2	Strang 3
L _i [m]	1000	2500	300
D _i [m]	0,5	0,5	0,5
λ _i [1]	0,012	0,012	0,012
k _i [s ² /m ⁵]	31,73	79,32	9,52
Q _A ^{versorg} [m ³ /s]	2		
Q _i ^{Start} [m ³ /s]	sign Q ₁ · Q ₁ +1 +1,5	sign Q ₂ · Q ₂ -1 -0,5	sign Q ₃ · Q ₃ +1 0,5
(ΔQ) ¹ [m ³ /s]	-0,2931	-0,2931	-0,2931
Q _i ² [m ³ /s]	sign Q ₁ · Q ₁ +1 +1,2069	sign Q ₂ · Q ₂ -1 -0,7931	sign Q ₃ · Q ₃ +1 +0,2069
(ΔQ) ² [m ³ /s]	+0,0158	+0,0158	+0,0158
Q _i ³ [m ³ /s]	sign Q ₁ · Q ₁ +1 +1,227	sign Q ₂ · Q ₂ -1 -0,7773	sign Q ₃ · Q ₃ +1 +0,227

b: Gleiche Korrektur für alle Flüsse ergibt maximale relative Änderung bezogen auf den kleinsten Fluß: $0,0158/0,227 = 0,069 \cong 7,0 \%$. Die Iteration konvergiert offensichtlich schnell. 7,0 % erscheint aber weder aus ingenieurpraktischer Sicht (aus der man eventuell $\Delta Q / Q < 1,0 \%$ als Abbruchkriterium anwenden würde) noch aus „computerpraktischer“ Sicht ausreichend, da man für ein iterierendes Computerprogramm ca. 10^{-4} bis 10^{-5} (also 0,1 ‰ bis 0,01 ‰) als Abbruchkriterium wählen würde.

c: an den Knoten; durch äquivalente Rohrlängen mit $L_{\text{äq}} = \zeta / \lambda \cdot D$

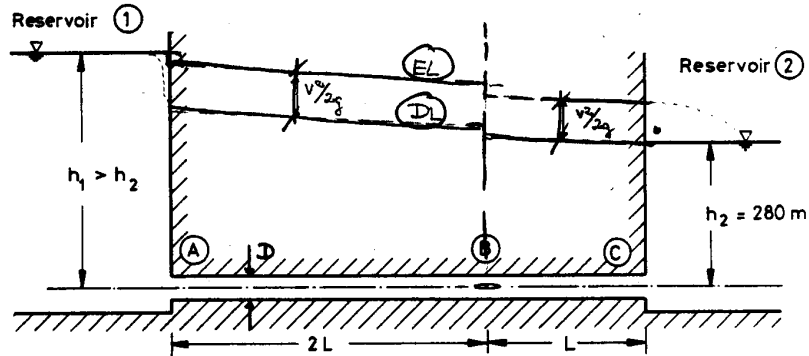
zu Kap. 5: Lösungen

- zu 5.1) Öffnungs- und Schließvorgänge von Armaturen, Leitungsbrüche, als Folge von Kavitation, zu schnelles Füllen einer Leitung, drastische Belastungsänderungen hydr. Maschinen (Pumpenausfall)
- zu 5.2) Intensität Druckstoß = f (Schließzeit der Armaturen, Fließgeschwindigkeit des Fluids, Rohrleitungskonfiguration (Material und Querschnittsgeometrie), zusätzl. Leitungseinbauten (Ventil, Windkessel, Rückschlagklappe), Dämpfungsverhalten im Fluid)
- zu 5.3) Verhindern plötzlicher Strömungsumkehr (Pumpenschutz, Verhindern des Eindringen von Stoffen in nicht dafür vorgesehen Leitungen), Dämpfen von extremer Beanspruchung (Druckschlag) sowie Dämpfen von Geräuschen durch jeweils allmähliches Schließen
- zu 5.4) $a = 932 \text{ m/s}$, $h_{D, \text{max}} = 24,2 \text{ bar}$
- zu 5.5) siehe Vorlesung und Vorlesungsskript, vgl. auch 5.7c
- zu 5.6) a: $\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_0^2 = 5 \text{ mbar} = 500 \text{ N/m}^2 \rightarrow v_0 = 27,74 \text{ m/s} \rightarrow Q_0 = 13,94 \text{ m}^3/\text{s}$
 b: $p_{\text{max}} = 119 \text{ mbar}$; $F_A = 11,9 \text{ kN}$; $F_B = 5,98 \text{ kN}$
 c:



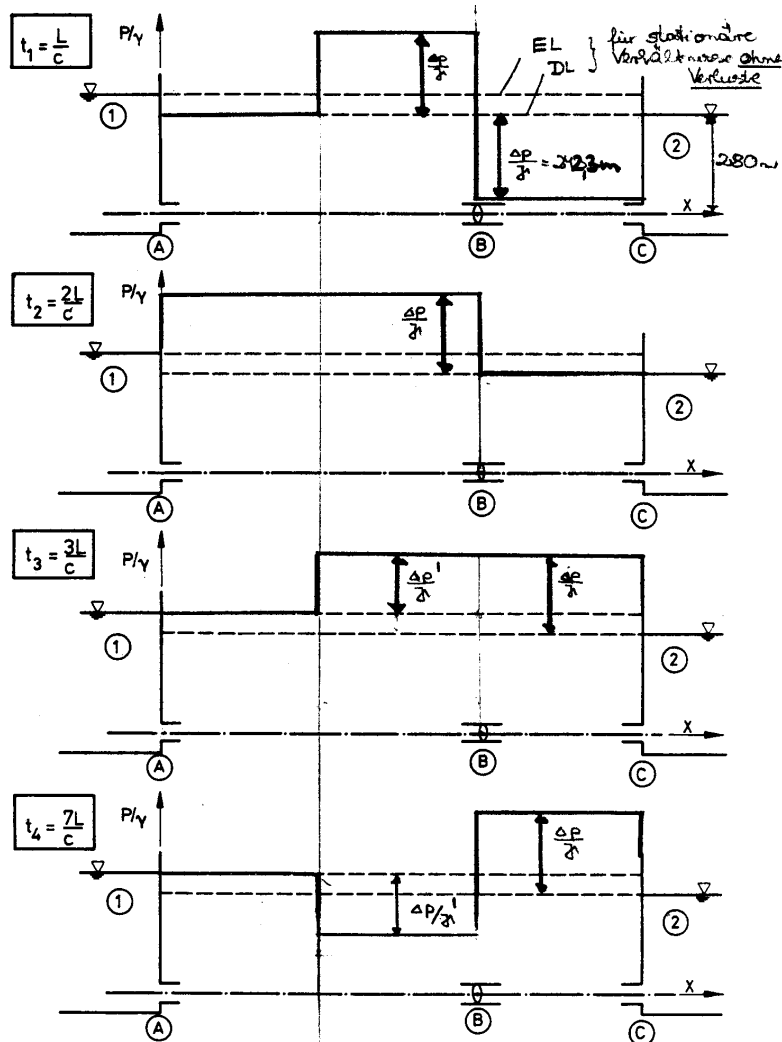
d: Die Wassersäule kann hinter der Klappe abreißen (Kavitation). Extreme Belastungen ergeben sich erst dann, wenn die Wassersäule in den Dampfraum zurückschlägt.

zu 5.7) a: EL- und DL parallel, Sprung bei A (Einlaufverluste), bei B (Verlust durch Klappe) und bei C (Auslaufverluste), Skizze nur qualitativ!



b: $h_{D, \max} = 242,3 \text{ mWS}$

c:

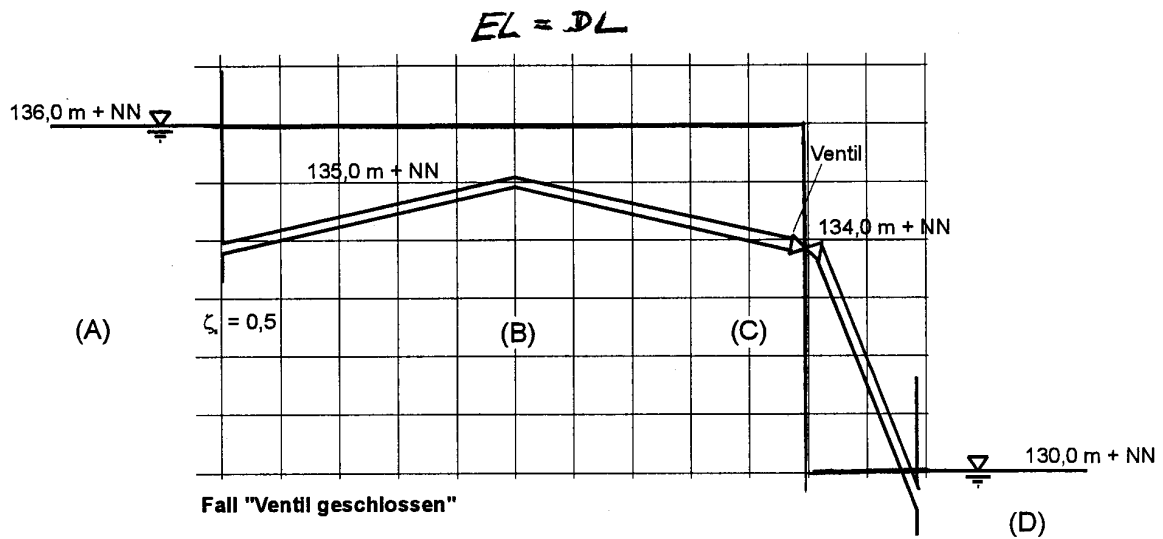


d: $P_{\text{ges}} = 8.400 \text{ kN}$ (~840 VW Käfer)

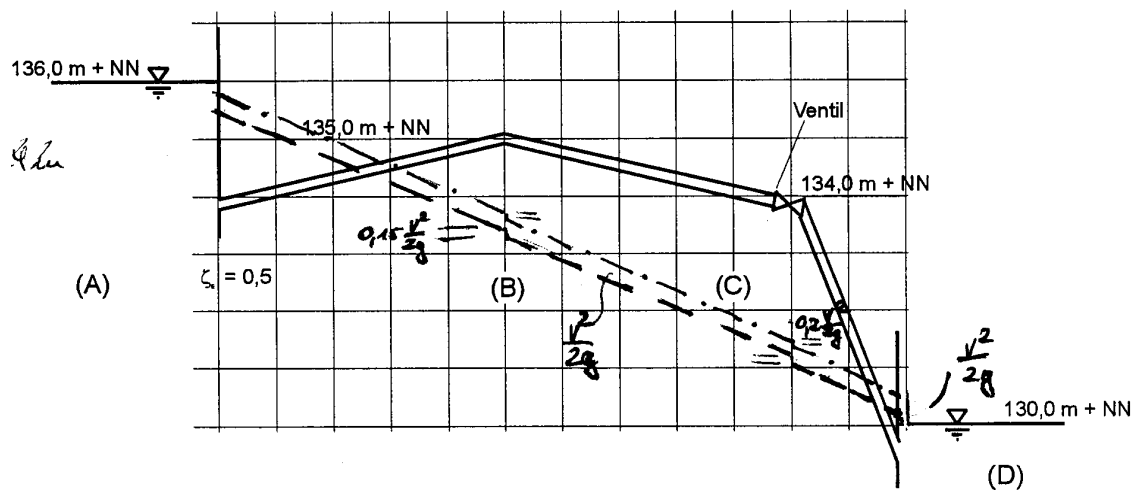
e: $T_{\text{schlie\ss}, \min} = 2 \cdot 2L / c = 5,33 \text{ s}$

f: $p_u = 1013 - 17 = 996 \text{ mbar} = \sim 10 \text{ mWS} = \sim 100 \text{ kN/m}^2 \rightarrow \text{Kavitation!}$

zu 5.8) a:


 b: $Q = 0,068 \text{ m}^3/\text{s}$

c: Anmerkung: Die Darstellung ist längenverzerrt. Deshalb kann die Druckhöhe für einen Punkt im Rohr in dieser Darstellung nicht einfach als Abstand zwischen dem Rohr und der Drucklinie abgegriffen werden, was bei nichtverzerrter Darstellung richtig wäre.

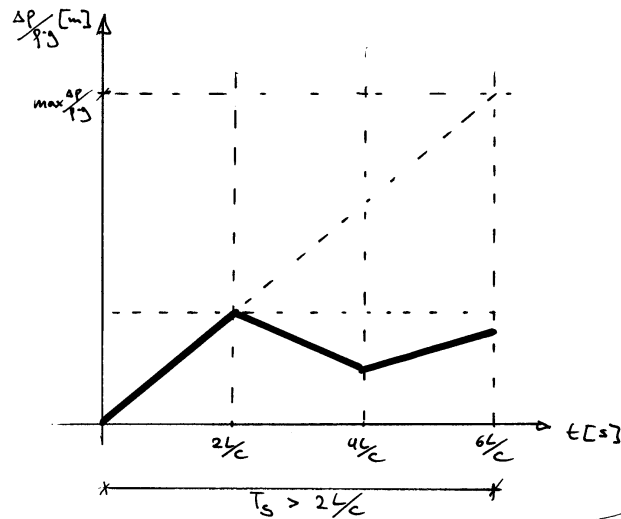

 d: $p_c/\gamma = -2,16 \text{ mWS}$; $p = -21,23 \text{ kPa}$

e: Der Betrag des Unterdrucks am Ventil ist deutlich zu klein, als daß Kavitation auftreten könnte

 zu 5.9) a: $c = 910 \text{ m/s}$; $t_R = 11 \text{ s}$; $\Delta p_{\max} = 1544,9 \text{ kN/m}^2$, $R = 0,4$

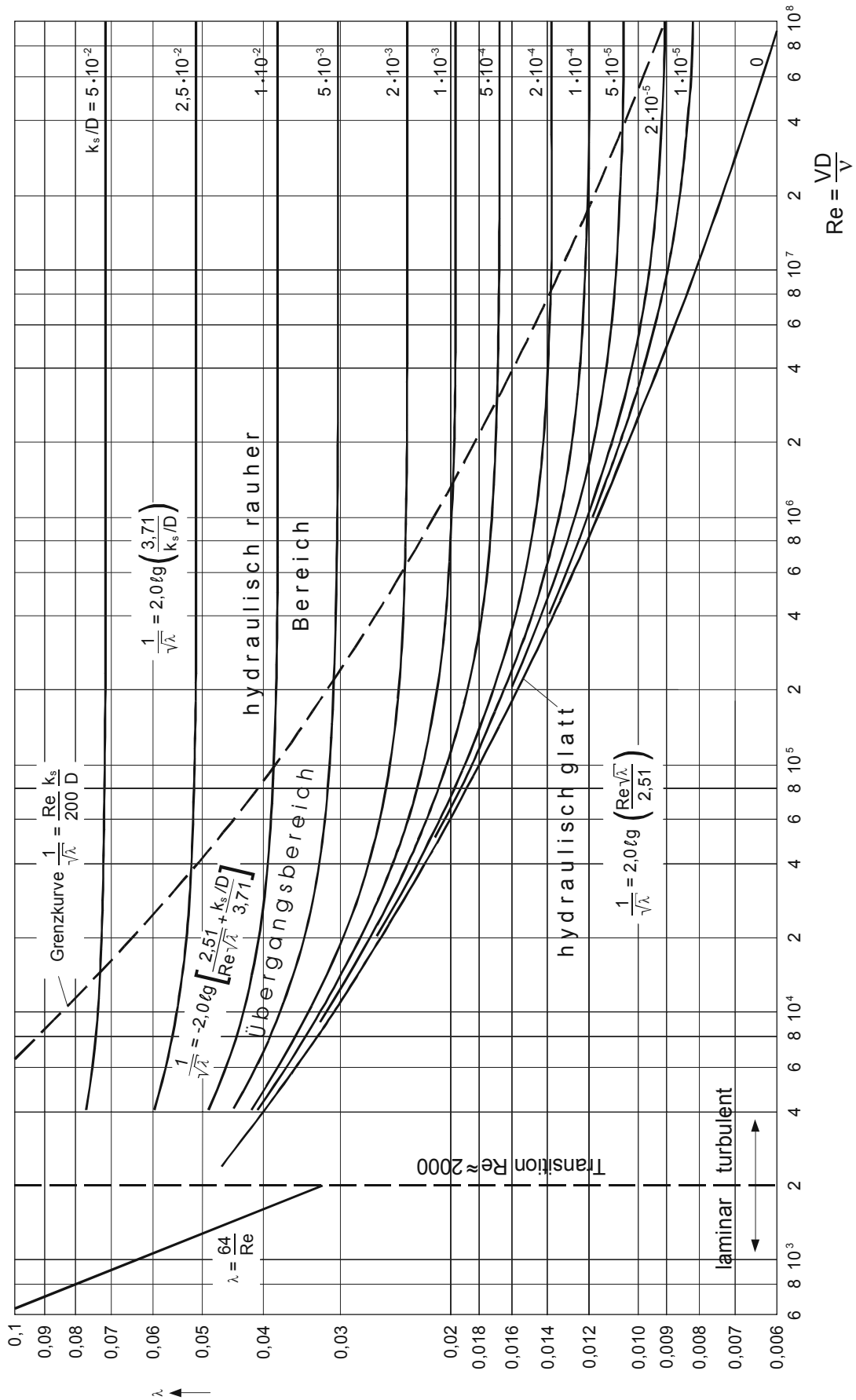
 b: $t_S = 3,2 \cdot 11 \text{ s} = 35 \text{ s}$ ($t_S > t_R$)

c:



d: Erfolgt der Abschluss des Schiebers allmählich, so tritt die Druckerhöhung je nach der Schließfunktion mehr oder weniger allmählich ein - es bilden sich aufeinander folgende Wellen kleiner Amplituden. Für den Fall, dass die Schließzeit t_s größer ist als die Reflexionszeit, trifft am Abschlussorgan bereits die erste Entlastungswelle ein, bevor der Schieber ganz geschlossen ist, d.h. bevor sich der volle Druckanstieg $\Delta p = \rho \cdot v_0 \cdot c$ einstellen kann

- zu 5.10) a: $Q = 0,72 \text{ m}^3/\text{s}$
 b: $G = 12,4 \text{ N}$
 c: $t = 0,22 \text{ s}$
 d: $t_{\text{krit}} = 0,16 \text{ s}$


 Anlage I: Rohrreibungsbeiwerte λ abhängig von Re und k/D (Moody-Diagramm)

Siededruck p_D und Dichte ρ von Wasser in Abhängigkeit von der Temperatur t

t °C	p_D bar	ρ kg/dm ³	t °C	p_D bar	ρ kg/dm ³	t °C	p_D bar	ρ kg/dm ³	t °C	p_D bar	ρ kg/dm ³
0	0,0061	0,9998	40	0,0738	0,9923	80	0,4736	0,9716	155	5,4330	0,9121
1	0,0066	0,9999	41	0,0778	0,9919	81	0,4933	0,9710	160	6,1810	0,9073
2	0,0071	0,9999	42	0,0820	0,9915	82	0,5133	0,9704	165	7,0080	0,9024
3	0,0076	0,9999	43	0,0864	0,9911	83	0,5344	0,9697	170	7,9200	0,8973
4	0,0081	1,0000	44	0,0910	0,9907	84	0,5557	0,9691	175	8,9240	0,8921
5	0,0087	1,0000	45	0,0958	0,9902	85	0,5782	0,9684	180	10,0270	0,8869
6	0,0093	1,0000	46	0,1009	0,9898	86	0,6011	0,9678	185	11,2330	0,8815
7	0,0100	0,9999	47	0,1061	0,9893	87	0,6251	0,9671	190	12,5510	0,8760
8	0,0107	0,9999	48	0,1116	0,9889	88	0,6495	0,9665	195	13,9870	0,8704
9	0,0115	0,9998	49	0,1174	0,9885	89	0,6751	0,9658	200	15,5490	0,8647
10	0,0123	0,9997	50	0,1234	0,9880	90	0,7011	0,9652	205	17,2510	0,8588
11	0,0131	0,9996	51	0,1297	0,9876	91	0,7284	0,9645	210	19,0770	0,8528
12	0,0140	0,9996	52	0,1361	0,9871	92	0,7561	0,9638	215	21,0690	0,8466
13	0,0150	0,9994	53	0,1430	0,9866	93	0,7852	0,9631	220	23,1980	0,8403
14	0,0160	0,9993	54	0,1500	0,9862	94	0,8146	0,9624	225	25,5130	0,8339
15	0,0170	0,9992	55	0,1575	0,9857	95	0,8455	0,9617	230	27,9760	0,8273
16	0,0182	0,9990	56	0,1651	0,9852	96	0,8769	0,9610	235	30,6450	0,8205
17	0,0193	0,9988	57	0,1732	0,9847	97	0,9100	0,9603	240	33,4780	0,8136
18	0,0206	0,9987	58	0,1815	0,9842	98	0,9430	0,9596	245	36,5360	0,8065
19	0,0220	0,9985	59	0,1902	0,9837	99	0,9780	0,9588	250	39,7760	0,7992
20	0,0234	0,9983	60	0,1992	0,9832	100	1,0133	0,9581	255	43,2610	0,7917
21	0,0248	0,9980	61	0,2087	0,9826	102	1,0881	0,9566	260	46,9430	0,7839
22	0,0264	0,9978	62	0,2184	0,9821	104	1,1672	0,9551	265	50,8940	0,7760
23	0,0281	0,9976	63	0,2286	0,9816	106	1,2509	0,9537	270	55,0580	0,7678
24	0,0298	0,9974	64	0,2391	0,9811	108	1,3395	0,9522	275	59,5080	0,7594
25	0,0317	0,9971	65	0,2502	0,9805	110	1,4327	0,9507	280	64,2020	0,7505
26	0,0336	0,9968	66	0,2615	0,9799	112	1,5321	0,9491	285	69,2000	0,7417
27	0,0356	0,9965	67	0,2734	0,9793	114	1,6367	0,9476	290	74,4610	0,7321
28	0,0378	0,9963	68	0,2856	0,9788	116	1,7470	0,9460	295	80,0500	0,7226
29	0,0400	0,9960	69	0,2984	0,9782	118	1,8634	0,9445	300	85,9270	0,7122
30	0,0424	0,9957	70	0,3116	0,9777	120	1,9854	0,9429	305	92,1440	0,7017
31	0,0449	0,9954	71	0,3254	0,9771	122	2,1151	0,9412	310	98,7000	0,6906
32	0,0475	0,9951	72	0,3396	0,9765	124	2,2491	0,9396	315	105,6100	0,6791
33	0,0503	0,9947	73	0,3544	0,9759	126	2,3940	0,9379	320	112,8900	0,6669
34	0,0532	0,9944	74	0,3696	0,9753	128	2,5442	0,9363	325	120,5600	0,6541
35	0,0562	0,9941	75	0,3856	0,9747	130	2,7013	0,9346	330	128,6300	0,6404
36	0,0594	0,9937	76	0,4019	0,9741	135	3,1310	0,9302	340	146,0500	0,6102
37	0,0628	0,9934	77	0,4191	0,9735	140	3,6140	0,9258	350	165,3500	0,5743
38	0,0662	0,9930	78	0,4365	0,9729	145	4,1550	0,9214	360	186,7500	0,5275
39	0,0699	0,9926	79	0,4549	0,9722	150	4,7600	0,9168	370	210,5400	0,4518

 Anlage II: Zustandsgrößen von Wasser (nach www.edur-pumpen.de)