

Hydraulische Bemessung von Freigefälledruckleitungen zum Abwassertransport

Merkblatt

Mai 2003

Merkblatt

Hydraulische Bemessung von Freigefälledruckleitungen zum Abwassertransport

Autor:

Dr.-Ing. habil. Detlef Aigner

Technische Universität Dresden

Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik

01062 Dresden

Tel. (0351) 4633 4725; Fax (0351) 4633 7124; E-Mail: detlef@d-aigner.de

Fachbegleitung:

Dr. Uwe Engelmann

Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie

Referat 31 – Wasserversorgung, Abwasserbeseitigung, Wasserbau

Zur Wetterwarte 11, 01109 Dresden

Tel. (0351) 8928 240; Fax (0351) 8928 245; E-Mail: Uwe.Engelmann@lfug.smul.sachsen.de

Mai 2003

Benutzerhinweis:

Das vorliegende Merkblatt ist im Rahmen eines vom Sächsischen Landesamt für Umwelt und Geologie geförderten Forschungsprojektes zur Untersuchung von Freigefälledruckleitungen zur Abwasserüberleitung (Förderkennzeichen: 13-8802.3522/63) an der Technischen Universität Dresden, Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik, unter Leitung von Privatdozent Dr.-Ing. habil. Detlef Aigner entstanden. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen wurden mit größter wissenschaftlicher Sorgfalt durchgeführt. Das Merkblatt steht jedermann zur Anwendung frei. Eine Pflicht zur Anwendung besteht nicht. Durch die Anwendung dieses Merkblattes entzieht sich niemand der Verantwortung für eigenes Handeln oder für die richtige Anwendung im konkreten Fall. Es wird keine Haftung für Schäden übernommen, die im ersten Anschein aus der Anwendung dieses Merkblattes entstehen.

Alle Rechte, insbesondere die der Übersetzung in andere Sprachen, vorbehalten. Kein Teil dieses Merkblattes darf ohne schriftliche Genehmigung des Herausgebers in irgendeiner Form – durch Fotokopie, Mikrofilm, Scan oder irgendein anderes Verfahren – reproduziert oder übertragen werden.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	4
2	Hydraulische Grundlagen	7
3	Bemessung der Freigefälledruckleitung	9
3.1	<i>Hydromechanische Berechnung der Druckleitung</i>	9
3.2	<i>Selbstentlüftung</i>	11
3.3	<i>Verringerung der Strömung durch Lufteinschluss</i>	13
3.4	<i>Luftaustrag in Abhängigkeit von der Zeit</i>	16
3.5	<i>Abriss der Strömung durch Belüftung am Hochpunkt</i>	18
3.6	<i>Hydromechanische Berechnung von Freispiegel- bzw. Teilfüllungsabfluss</i>	18
3.7	<i>Luftmitnahme und Lufteinmischung an Steilstrecken</i>	20
3.8	<i>Nachweis für den abgelagerungsfreien Transport</i>	21
4	Ablagerungen und Spülungen	22
5	Regelung, Zwischenspeicher, Armaturen	23
6	Literatur	26
7	Zeichen, Einheiten und Begriffe	27

Vorbemerkung:

Dieses Merkblatt zur hydraulischen Bemessung von Freigefälledruckleitungen hat zum Ziel, Erkenntnisse aus wissenschaftlichen Untersuchungen zu dieser Thematik einem größeren Kreis von Fachleuten zugänglich zu machen. Da es sich auf die Arbeitsblätter ATV-A 118 (1999), ATV-DVWK-A 110 (2001) und weitere Grundlagenliteratur bezieht, wird auf viele Begriffsdefinitionen und Definitionsgleichungen zur hydraulischen Berechnung verzichtet. Diese erste Ausfertigung stellt nicht den Anspruch auf Vollständigkeit. Die in diesem Merkblatt eingeflossenen Erkenntnisse sind nicht allumfassend. Hinweise, Verbesserungen, Vorschläge und Ergänzungen zum Merkblatt sind willkommen.

1 Einleitung

Alternativ zur klassischen Form des Abwassertransportes, der Schwerkraftentwässerung über Freispiegelleitungen, wird in diesem Merkblatt die Freigefälledruckleitung vorgestellt. Wenn die Gefällebedingungen für die Ableitung des Abwassers ohne zusätzlichen Energieeintrag ausreichen und andere Gründe gegen den Einsatz einer Freispiegelleitung sprechen, wie z.B. starke Bebauung oder ständig wechselnde Geländebedingungen, kann der Abwassertransport über eine Freigefälledruckleitung erfolgen. Sie vereint die Vorteile einer Druckleitung, weitgehend freie Wahl der Leitungstrasse mit Hoch- und Tiefpunkten, gute Flexibilität beim An treffen von Bodenhindernissen, geringere Baukosten usw., mit denen einer Freispiegel-Kanalisation, wie die Nutzung des Energiegefälles ohne zusätzliche Pumpkosten.

Mit dem Begriff „Freigefälledruckleitung“ wird eine geschlossene Rohrleitung verstanden, in der sich das flüssige Medium sowohl unter Druck als auch mit freiem Wasserspiegel durch Ausnutzung des natürlichen Gefälles ohne zusätzlichen Energieeintrag (Abb. 1) bewegt.

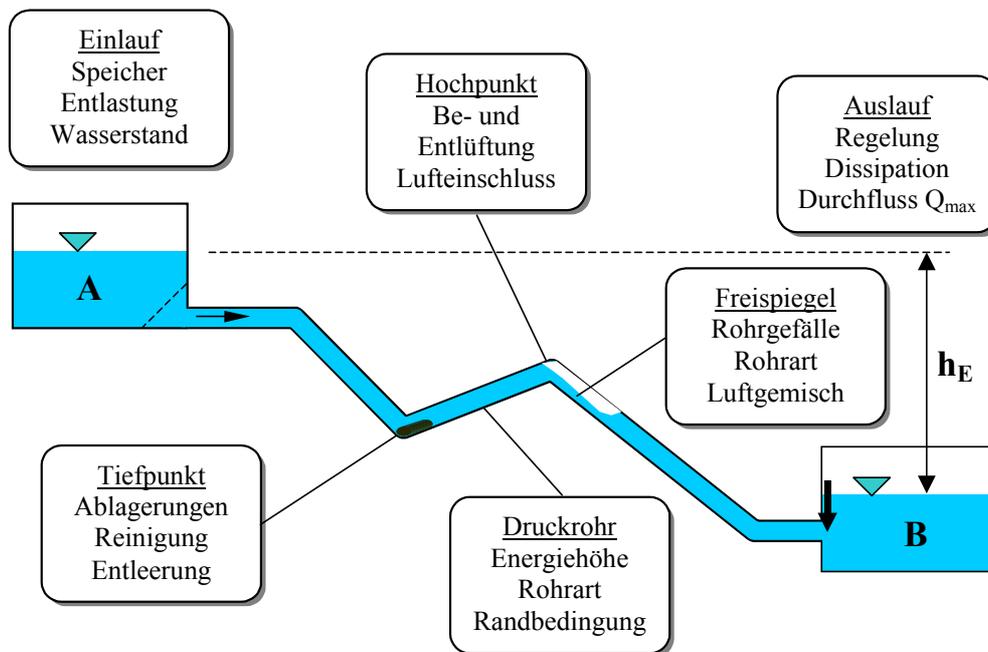


Abbildung 1 Systemskizze Freigefälledruckleitung

Die Abbildung 1 zeigt einige Problemfelder, die in folgenden Absätzen kurz erläutert und für die Lösungen in den weiteren Punkten vorgestellt werden.

Bemessung der Druckrohrleitung

Die Durchflusskapazität der Freigefälledruckleitung ergibt sich aus der zur Verfügung stehenden Energiehöhe und den Leitungsparametern (Durchmesser, Länge, Material). Der Zusammenhang zwischen Durchfluss (z.B. als Randwert vom Betreiber vorgegeben), Energiehöhe (Randwert der örtlichen Verhältnisse), Länge der Überleitung und den Rohrkenntwerten bestimmt deren Bemessung. Rohrkenntwerte und Regelung der Freigefälledruckleitungen stehen in einem engen Zusammenhang. Die Bemessung der Freigefälledruckleitung erfolgt iterativ und ist abhängig von den Randwerten.

Diskontinuierlicher Betrieb

Die Freigefälledruckleitung wird für einen bestimmten Abfluss bemessen und damit im Durchmesser festgelegt. Der diskontinuierliche Wasser- oder Abwasseranfall führt bei Überschreitung dieses Bemessungsabflusses zu einer Überbelastung der Leitung. Bei Unterschreitung kann es an hydraulischen Hochpunkten zur Unterdruckbildung kommen. Wird dieser kleiner als der Dampfdruck, dann reißt die Strömung ab, die Leitung muss belüftet werden und es stellt sich teilweise Freispiegelabfluss ein. Ein ständiger Wechsel zwischen Druck- und Freispiegelabfluss, Luftvermischung, Lufteintrag aber auch Absetzvorgänge durch die geringen Strömungsgeschwindigkeiten bei schwankender Zuführung können zu Problemen führen, die durch eine Regelung der Freigefälledruckleitung vermieden werden können. Die Vergleichmäßigung des diskontinuierlichen Zuflusses erfordert eine Zwischenspeicherung des Wassers bzw. Abwassers.

Regelung

Die Regelung der Freigefälledruckleitung, insbesondere für den Abwassertransport, wird aus mehreren Gründen empfohlen. Wichtigster Grund ist der Ausgleich des diskontinuierlichen Abwasseranfalls. Mit der Regelung können aber auch Spül- bzw. Selbstentlüftungsgeschwindigkeiten erzeugt, Mindestfließgeschwindigkeiten eingestellt oder andere Randbedingungen berücksichtigt werden. Die Regelung des ankommenden Abwasserstromes erfordert eine Zwischenspeicherung des Abwassers im Zulauf der Freigefälledruckleitung. Die Regelung, die in der Regel am Auslauf der Freigefälledruckleitung erfolgt, kann in Abhängigkeit vom Durchfluss durch die Rohrleitung, vom Druck an verschiedenen Punkten der Leitung und vom Wasserstand am Einlauf erfolgen. Bei einer Regelung können am Auslauf hohe Geschwindigkeiten auftreten, was eine Energieumwandlung erforderlich macht. Lufteinschlüsse können fehlerhafte Durchflussmessungen verursachen.

Zwischenspeicherung

Die Zwischenspeicherung der ankommenden Wasser- oder Abwassermenge ist für die Regelung der Freigefälledruckleitung, zum Ausgleich eines diskontinuierlichen Zulaufes oder zum Auffangen von Starkregen in der Mischwasserkanalisation erforderlich. Der Zwischenspeicher muss in Abhängigkeit von der Zuflussganglinie und vom Regelzyklus bemessen werden.

Im Zwischenspeicher sollten Vorkehrungen getroffen werden, um Ablagerungen zu beseitigen.

Einlauf

Vor den Einlauf können sich sperrige Stoffe legen oder es kann Luft eingesaugt werden. Der Einlauf (Abb. 1) sollte so gestaltet sein, das ein Einsaugen von Luft vermieden und das Zusetzen des Einlaufes verhindert wird. Der Einlauf einer Freigefälledruckleitung wird so angeordnet, dass das Abwasser gut in die Leitung gelangt und transportiert werden kann. Er sollte nicht im Sohlbereich des Speichers liegen und genügend überstaut sein. Gitter oder Rechen können grobe Stoffe abhalten. Einläufe sollten regelmäßig kontrolliert werden.

Hochpunkt

Infolge der freien Trassierung einer Freigefälledruckleitung kann es zur Ausbildung von Hochpunkten kommen. An diesen Hochpunkten sammelt sich bei zu geringer Strömungsgeschwindigkeit Luft, die den Abfluss behindern oder ganz verhindern kann. Insbesondere beim Transport von Abwasser muss immer mit dem Transport kleiner Luftblasen gerechnet werden. Ist die Strömung nicht in der Lage, eingeschlossene Luft selbstständig auszutragen, oder kann es durch den Betrieb zu Unterdrücken kommen, dann sollten an den Hochpunkten Be- und Entlüftungsventile vorgesehen werden.

Be- und Entlüftung

Belüftungen an Hochpunkten dienen der Vermeidung von Unterdruck in der Strömung, der bei Unterschreitung des Dampfdruckes zur Kavitation führen kann. Entlüftungen dienen dem Austrag der am Hochpunkt eingeschlossenen Luft. Dafür muss am Hochpunkt Überdruck auftreten. Automatische Be- und Entlüftungsventile sind anfällig gegen Verschmutzungen. Bei Frost besteht die Gefahr der Vereisung. Ist nur die Entlüftung erforderlich, werden für den Betrieb von Freigefälledruckleitungen handbetriebene Ventile empfohlen.

Tiefpunkt

An Tiefpunkten setzen sich bei zu geringer Strömungsgeschwindigkeit die schwereren Inhaltsstoffe ab. Diese Ablagerungen werden zu einem Hindernis, wenn sie sich verfestigen und den Abflussquerschnitt einengen. Ausreichende Strömungsgeschwindigkeit oder regelmäßige Spülungen verhindern diesen Prozess. Der Einbau eines Sandseparators ist möglich. Entleerungen von Freigefälledruckleitungen werden an Tiefpunkten vorgesehen.

Auslauf

Der Wasserstand (Druckhöhe) am Auslauf stellt einen Randwert für die hydraulische Bemessung der Freigefälledruckleitung dar. Am Auslauf der Rohrleitung werden normalerweise die Regeleinrichtungen, Durchfluss- und Druckmessungen vorgesehen. Bei großen Austrittsgeschwindigkeiten muss auf eine schadhlose Umwandlung der Bewegungsenergie des Wassers geachtet werden. Bei Lufteinschlüssen kann es zum stoßartigen Austritt, zu Geräuschen und zu Druckschwankungen mit Rücksaugen des Abwassers kommen.

2 Hydraulische Grundlagen

Die hydraulischen Grundlagen zur Berechnung von Freigefälledruckleitungen orientieren sich am Arbeitsblatt ATV-DVWK-A 110, Hydraulische Dimensionierung und Leistungsnachweis von Abwasserkanälen und -leitungen, vom September 2001. Als Fach- bzw. Lehrbücher für die hydraulischen Grundlagen können die Abwasserhydraulik von Hager (1994) und die Technische Hydromechanik I von Bollrich (2000) empfohlen werden. In diesem Abschnitt werden ausschließlich stationäre Strömungsbedingungen betrachtet. Die Berechnungen beschränken sich auf das Kreisprofil. Die Übertragung auf andere Profilformen ist möglich.

Hier sollen nur die wesentlichen Grundgleichungen genannt werden:

Kontinuität:

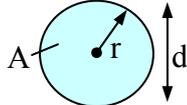
$$Q = v \cdot A \quad (1)$$

mit Q – Durchfluss, auch Abfluss oder Volumenstrom [m^3/s]

v – mittlere Fließgeschwindigkeit [m/s]

A – Fließquerschnitt, auch Abflussquerschnitt [m^2]

Fließquerschnitt:

Kreis:  $A = \pi \cdot r^2 = \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \quad \pi = 3,1416 \quad (2)$

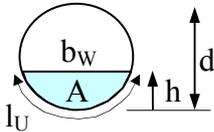
d – Durchmesser, Innendurchmesser [m]

r – Radius des Kreises [m]

r_{hy} – hydraulischer Radius [m]

l_U – benetzter Umfang [m]

$$r_{\text{hy}} = \frac{A}{l_U} = \frac{d}{4} \quad (3)$$

Kreisabschnitt:  h – Wassertiefe [m]
 b_w – Wasserspiegelbreite [m]

$$A = \frac{d}{4} \cdot \left(l_U - b_w \cdot \left(1 - 2 \frac{h}{d} \right) \right) \quad (4)$$

$$\text{mit } b_w = \frac{dA}{dh} = 2 \cdot d \cdot \sqrt{\frac{h}{d} \cdot \left(1 - \frac{h}{d} \right)} \quad \text{und} \quad l_U = d \cdot \arccos\left(1 - 2 \frac{h}{d} \right) \quad (5)$$

$$r_{hy} = \frac{A}{I_U} = \frac{d}{4} \cdot \left[1 - \frac{2 \cdot (1 - 2 \frac{h}{d}) \cdot \sqrt{\frac{h}{d} \cdot (1 - \frac{h}{d})}}{\arccos(1 - 2 \frac{h}{d})} \right] \quad (6)$$

Druckrohrströmung:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\lambda}} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot d \cdot I_R} = \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot h_E}{\lambda \cdot L/d + \sum \zeta}} \quad (7)$$

$$\text{mit: } \lambda = \left[-2 \cdot \lg \left(\frac{2,51 \cdot \nu}{\sqrt{2 \cdot g \cdot d^3 \cdot I_R}} + \frac{k}{3,71 \cdot d} \right) \right]^{-2} \quad (8)$$

$$I_R = \frac{h_V}{L} = \frac{\lambda}{d} \cdot \frac{v^2}{2g} \quad \text{näherungsweise wird gerechnet: } I_R \cong I_E = \frac{h_E}{L} \quad (9)$$

L – Länge der vollgefüllten Leitung [m]

h_E – Energieverlusthöhe oder Fallhöhe (Wasserspiegeldifferenz zwischen Zu- und Ablauf) [m]

I_E – Energiehöhengefälle oder Fallhöhengefälle [m/m]

h_V – Reibungsverlusthöhe [m]

I_R – Reibungsgefälle [m/m]

λ – Reibungsbeiwert [-]

k – absolute hydraulische Rauheit [m]

ζ – örtliche Verlustbeiwert [-]

ν – kinematische Viskosität [m²/s]

g – Erdbeschleunigung [m/s²]

Freispiegelströmung:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\lambda}} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot d_{hy} \cdot I_R} \quad \text{mit } d_{hy} = 4 \cdot r_{hy} \quad (10)$$

$$\text{und } \lambda = \left[-2 \cdot \lg \left(\frac{2,51 \cdot \nu}{\sqrt{2 \cdot g \cdot d_{hy}^3 \cdot I_R}} + \frac{k}{3,71 \cdot d_{hy}} \right) \right]^{-2} \quad (11)$$

Bei stationär gleichförmigem Abfluss entspricht das Reibungsgefälle I_R dem Sohl- bzw. Leitungsgefälle I_S und in den Gleichungen (10) und (11) wird $I_R = I_S$ gesetzt. Die Formbeiwerte in Gleichung (11) für den hydraulisch glatten Bereich (2,51) und den hydraulisch rauen Bereich (3,71) wurden aus Gleichung (8) für Vollfüllung übernommen. Ihre geringen Veränderungen bei Teilfüllung liegen im Toleranzbereich anderer angenommener Werte, wie z.B. der Rauheit k, und können vernachlässigt werden.

Teilfüllungsabfluss:

$$\frac{Q_{\text{Teil}}}{Q_{\text{Voll}}} = \frac{A_{\text{Teil}}}{A_{\text{Voll}}} \cdot \frac{v_{\text{Teil}}}{v_{\text{Voll}}} = \frac{A_{\text{Teil}}}{A_{\text{Voll}}} \cdot \left(\frac{r_{\text{hy,Teil}}}{r_{\text{hy,Voll}}} \right)^{0,625} \quad (12)$$

Q_{Voll} bzw. v_{Voll} werden nach Gleichung (7) und (8) mit $I_R = I_S$ berechnet.

Kennzahlen:

$$\text{Reynoldszahl} \quad \text{Re} = \frac{v \cdot d}{\nu} = \frac{4 \cdot v \cdot r_{\text{hy}}}{\nu} \quad \text{Re}_{\text{laminar}} < \text{Re}_{\text{Krit}} = 2320 < \text{Re}_{\text{turbulent}} \quad (13)$$

$$\text{Froudezahl} \quad \text{Fr} = \frac{v}{\sqrt{g \frac{A}{b_w}}} \cong \frac{Q}{\sqrt{g \cdot d \cdot h^2}} \quad \text{Fr}_{\text{Strömen}} < \text{Fr}_{\text{Krit}} = 1 < \text{Fr}_{\text{Schießen}} \quad (14)$$

$$\text{Grenztiefe} \quad h_{\text{Gr}} \cong \sqrt[4]{\frac{Q^2}{g \cdot d}} \quad (15)$$

$$\text{Boussinesqzahl} \quad \text{Bou} = \frac{v}{\sqrt{g \cdot r_{\text{hy}}}} \quad (16)$$

$$\text{Wandschubspannung} \quad \tau = \rho \cdot g \cdot r_{\text{hy}} \cdot I_R \quad (17)$$

$$\text{Belüftungsgrad} \quad \beta = \frac{Q_{\text{Luft}}}{Q_{\text{Wasser}}} \quad (18)$$

$$\text{Luftkonzentration} \quad c = \frac{Q_{\text{Luft}}}{Q_{\text{Wasser}} + Q_{\text{Luft}}} \quad (19)$$

3 Bemessung der Freigefälledruckleitung**3.1 Hydromechanische Berechnung der Druckleitung**

Die für den Wassertransport in einer Freigefälledruckleitung zur Verfügung stehende Fallhöhe h_E wird in Geschwindigkeit v umgesetzt und durch die Bewegung des Wassers über Reibungsverluste und örtliche Verluste, wie Einlauf, Krümmer, Auslauf u.a., in Wärme umgewandelt. Aus dem Energiegleichgewicht der Strömung (siehe Abb.1) ergibt sich die mittlere Rohrgeschwindigkeit nach Gleichung (7). Das Energiegefälle entspricht der Neigung der Energielinie und ist von der Geschwindigkeitshöhe abhängig. Genaugenommen ist diese Berechnung immer ein Iterationsprozess, kann aber vereinfacht werden, indem das Energie- oder Fallhöhengefälle I_E aus dem Verhältnis der Energieverlust- bzw. Fallhöhe h_E (nicht nur Rei-

bungsverlusthöhe h_v) zur Rohrlänge nach Gleichung (9) und damit der Reibungsbeiwert λ nach Gleichung (8) berechnet wird.

Der Reibungsbeiwert λ ist eine Funktion der Reynoldszahl Re und der relativen hydraulischen Rauheit k/d , wobei k für Abwasserdruckrohrleitungen im allgemeinen zwischen 0,1 bis 0,25 mm bzw. vom Rohrmaterial abhängig angenommen wird.

Die Annahme der absoluten hydraulischen Rauheit k und seine Entwicklung im Betrieb stellt die größte Fehlerquelle in dieser Berechnung dar. Wird λ einerseits mit $k/d=0$ (hydraulisch glatt) und andererseits mit $k=0,003m$ (hydraulisch sehr rau) berechnet, kann man den Bereich abschätzen, indem das Ergebnis bei wechselnder Rauheit variiert. Der Reibungsbeiwert ergibt sich überschlägig für die in der Praxis auftretenden großen Reynolds-Zahlen bei einer relativen Rauheit k/d von etwa 0,1% zu $\lambda = 0,02$. Genauer kann er aus den einschlägigen Gleichungen nach Colebrook/White (Gleichung (8) Bollrich 2000) oder nach Zanke (1993, Gleichung (20)), gilt für den laminaren und turbulenten Bereich) ermittelt werden.

$$\lambda = \frac{64}{Re} \cdot (1-a) + a \cdot \left[-0,868 \cdot \ln \left(\frac{(\ln Re)^{1,2}}{Re} + \frac{k}{3,71 \cdot d} \right) \right]^{-2} \quad (20)$$

$$\text{mit} \quad a = e^{-e^{-(0,0033 \cdot Re - 8,75)}}$$

Zu den örtlichen Verlustbeiwerten zählen z.B. der Einlaufverlustbeiwert (z.B. scharfkantiger Einlauf bei Vollfüllung $\zeta_E = 0,5$), Krümmerverlustbeiwerte (z.B. $\zeta_K = 0,17$ für einen 90° Kniekrümmer $r_K/d = 1,5$), Verluste an Einbauten (z.B. Streckenschieber $\zeta_S = f(s/d)$, s -Schieberöffnungshöhe) und der Auslaufverlustbeiwert. Der Auslaufverlustbeiwert kann allgemein als Quadrat des Verhältnisses von Auslaufgeschwindigkeit v_a zur Rohrgeschwindigkeit v ($\zeta_a = (v_a/v)^2$) definiert werden. Letzterer kann bei Schieberregelung am Ende der Rohrleitung eingesetzt werden. Befindet sich am Ende der Rohrleitung der normale Rohrauslauf, dann wird der Auslaufbeiwert $\zeta_a = 1$.

Beispiel:

Durch eine einfache Freigefälledruckleitung von $L=1000$ m Länge soll ein Höhenunterschied (Wasserspiegel Einlauf - Wasserspiegel Auslauf) von $h_E = 10$ m überwunden werden. Maximal $Q=40$ l/s = $0,04$ m³/s müssen übergeleitet werden.

gewählt: PE-Druckrohrleitung DN 200 $k=0,03$ mm

mit Innendurchmesser $d=0,1876$ m wird $A=0,02764$ m² und $k/d=0,00016$

Verlustbeiwerte: Einlauf $\zeta_e = 0,5$, Auslauf $\zeta_a = 1$

angenommen: $I_R \cong I_E = 10/1000 = 0,01=1\%$; $v = 0,00000131$ m²/s; $g = 9,81$ m/s²

berechnet: Reibungsbeiwert nach Gleichung (8) $\lambda = \left[-2 \cdot \lg \left(\frac{2,51 \cdot v}{\sqrt{2 \cdot g \cdot d^3 \cdot I_R}} + \frac{k}{3,71 \cdot d} \right) \right]^{-2}$

$$\lambda = \left[-2 \cdot \lg \left(\frac{2,51 \cdot 0,00000131}{\sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 0,1876^3 \cdot 0,01}} + \frac{0,00016}{3,71} \right) \right]^{-2} = 0,01668$$

$$\text{Geschwindigkeit nach Gleichung (7)} \quad v = \sqrt{\frac{2g \cdot h_E}{\lambda \cdot L/d + \sum \zeta}}$$

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot 9,81 \cdot 10}{0,01668 \cdot 1000/0,1876 + 0,5 + 1}} = 1,473 \text{ m/s}$$

$$Q = 1,473 \text{ m/s} \cdot 0,02764 \text{ m}^2 = 0,0407 \text{ m}^3/\text{s} = 40,7 \text{ l/s}$$

$$\text{korrigiert: Reibungsgefälle nach Gleichung (9)} \quad I_R = \frac{\lambda}{d} \cdot \frac{v^2}{2g}$$

$$I_R = \frac{0,01668}{0,1876} \cdot \frac{1,473^2}{2 \cdot 9,81} = 0,983\% \quad \lambda = 0,0167 \quad \text{Unterschied vernachlässigbar!}$$

Alternativ würde sich bei einer alten Stahlrohrleitung mit gleichem Innendurchmesser und einem Rauigkeitsbeiwert von $k=1 \text{ mm}$ ein Reibungsbeiwert $\lambda=0,019$ und damit ein Durchfluss von etwa $Q=38,2 \text{ l/s}$ ergeben.

3.2 Selbstentlüftung

Der Einschluss von Luft in Freigefälledruckleitungen ist aus unterschiedlichen Gründen möglich, deshalb ist die Prüfung einer Selbstentlüftung erforderlich. Extremster Fall für Lufteinschluss ist das Füllen einer leeren Freigefälledruckleitung. Reicht die Fließgeschwindigkeit des Wassers in der Freigefälledruckleitung nicht aus, um selbstständig Luft auszutragen, dann kann es zu einer Leistungsreduzierung oder zur vollständigen Verhinderung des Fließprozesses kommen. Ist die Selbstentlüftung nicht gegeben, dann sind Entlüftungsventile an den Hochpunkten vorzusehen. Dieser Fall kann mit Hilfe von Gleichung (21) geprüft werden.

Aus theoretischen Betrachtungen der Bewegung einer Luftblase in einer Druckrohrleitung, gekoppelt mit Modellversuchen, wurde eine Gleichung ermittelt, die eine erforderliche Mindestgeschwindigkeit v_s zum Austrag von Luftblasen berechnet (Aigner/Thumernicht (2002)).

Selbstentlüftungsgeschwindigkeit:

$$v_s = \sqrt{1,5 \cdot g \cdot \frac{d \cdot \sin \alpha}{(1,64 \cdot \sin \alpha + 0,06)}} \quad \alpha - \text{Neigungswinkel der Rohrleitung} \quad (21)$$

Die Ergebnisse dieser Gleichung (21) liefern größere Werte als die von Gandenberger (1957), die im DVGW-Merkblatt W 403 (1988) eingeflossen sind. Sie folgen im unteren Gefällebereich den Werten von Gandenberger und liegen aber ab 15% Gefälle zwischen den Ergebnissen von Wisner et. al. (1975) und Walther/Günthert (1999).

Um den Austrag eingeschlossener Luftblasen nachzuweisen, muss die berechnete Geschwindigkeit v der Rohrströmung gleich oder größer dieser Selbstentlüftungsgeschwindigkeit v_s nach Gleichung (21) sein.

Nachweis zur Selbstentlüftung einzelner Luftblasen:

$$v = \sqrt{\frac{2g \cdot h_E}{\lambda \cdot L/d + \sum \zeta}} \geq v_s \quad (22)$$

Um die Ansammlung kleiner eingetragener oder ausgegaster Luftblasen in der Freigefälledruckleitung zu verhindern, sollte der Nachweis einer Selbstentlüftung erfolgen.

Beispiel:

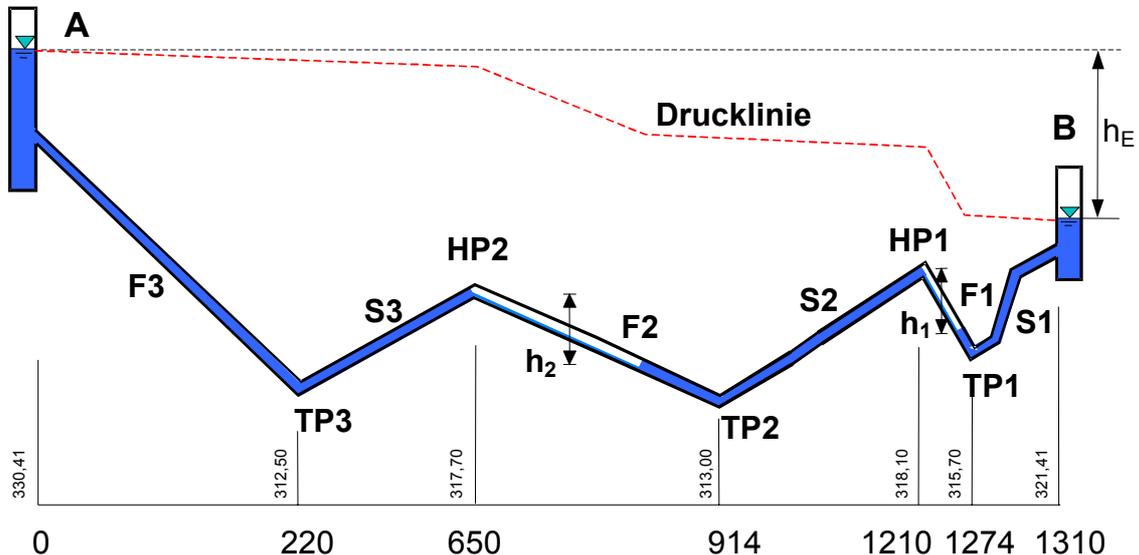


Abbildung 2 Beispiel Freigefälledruckleitung
(Positionsangaben sind wahre Längen in m, Höhenangaben in m üNN)

Die in Abbildung 2 dargestellte Beispielleitung ist $L=1310$ m lang und wird mit einem Durchmesser von $d=0,2$ m geplant. Die zur Verfügung stehende Fallhöhe beträgt $h_E=9$ m. Es sollen örtliche Verlustbeiwerte von insgesamt $\sum\zeta=2,5$ auftreten. Es wird $\lambda=0,02$ angenommen.

Geschwindigkeit bei Vollfüllung nach Gleichung (7):

$$v = \sqrt{\frac{2g \cdot h_E}{\lambda \cdot L/d + \sum\zeta}} = \sqrt{\frac{19,62 \cdot 9}{0,02 \cdot 1310/0,2 + 2,5}} = 1,15 \text{ m/s}$$

Rohrneigung für Strang F1: $\sin\alpha_1 = (318,1-315,7)/(1274-1210) = 0,0375$

Selbstentlüftungsgeschwindigkeit Strang F1 nach Gleichung (21):

$$v_{S1} = \sqrt{1,5 \cdot 9,81 \cdot \frac{0,2 \cdot 0,0375}{(1,64 \cdot 0,0375 + 0,06)}} = 0,953 \text{ m/s}$$

Rohrneigung für Strang F2: $\sin\alpha_2 = (317,7-313,0)/(914-650) = 0,0178$

Selbstentlüftungsgeschwindigkeit Strang F2 nach Gleichung (21):

$$v_{S2} = \sqrt{1,5 \cdot 9,81 \cdot \frac{0,2 \cdot 0,0178}{(1,64 \cdot 0,0178 + 0,06)}} = 0,766 \text{ m/s}$$

In den fallenden Leitungen F1 und F2 wäre eine Selbstentlüftung $v > v_S$ bei voll gefüllter Rohrleitung erreichbar. Es sind keine Entlüftungen erforderlich.

3.3 Verringerung der Strömung durch Lufteinschluss

Sind größere Abschnitte einer fallenden Leitung mit Luft gefüllt, dann verläuft die Drucklinie in diesen Abschnitten parallel zur Rohrleitung, d.h. die Drucklinie steigt parallel zum luftgefüllten Rohr um die Höhe h_L an. Bei mehreren luftgefüllten Abschnitten summieren sich diese Höhen h_L und reduzieren die Energieverlusthöhe h_E . Gleichzeitig wird die Reibungslänge L der Rohrleitung um die Rohrlängen (L_L) der luftgefüllten Abschnitte reduziert.

Nachweis zur Selbstentlüftung bei massivem Lufteinschluss:

$$v = \sqrt{\frac{2g \cdot (h_E - \sum h_L)}{\lambda \cdot (L - \sum L_L) / d + \sum \zeta}} \geq v_s \quad (23)$$

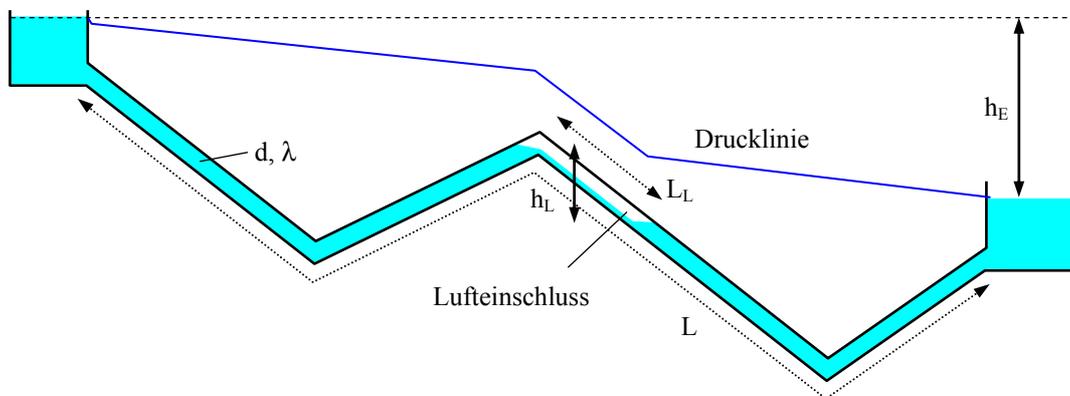


Abbildung 3 Leitung mit Lufteinschluss

Wird eine Freigefälledruckleitung ohne Entlüftungsmöglichkeiten im leeren Zustand gefüllt, dann stellt das den Extremfall für eine Verhinderung der Strömung durch Lufteinschluss dar.

Im einfachsten Fall erfolgt die hydromechanische Berechnung ohne die Berücksichtigung der Luftkompression in der Druckleitung. In diesem Fall bleiben alle fallenden Rohrabschnitte nach dem ersten Rohrabschnitt einer Freigefälledruckleitung bei einer Füllung luftgefüllt und es gilt:

$$\sum h_L = \sum h_F \quad \text{und} \quad \sum L_L = \sum L_F \quad (24)$$

mit h_F Höhendifferenz vom Hochpunkt HP zum Tiefpunkt TP einer fallenden Leitung und L_F Länge der fallenden Leitung.

Da dieser Fall den ungünstigsten Belastungsfall darstellt, wäre bei der Erreichung der Selbstentlüftungsgeschwindigkeit kein weiter Nachweis erforderlich.

Berücksichtigung der Kompressibilität der Luft

Wird die Kompression der Luft über das Boylesche Gesetz berücksichtigt, dann reduzieren sich die Längen luftgefüllter Abschnitte (Höhen entsprechend, siehe Abb. 3) nach folgender Gleichung:

Beispiel:

An Hand des Beispiels aus Kapitel 3.2 (Abbildung 2) soll nachgewiesen werden, ob durch ein langsames Füllen der leeren Leitung ($d=0,2\text{ m}$) ein Zustand erreicht wird, der Entlüftungsventile an den Hochpunkten erforderlich macht oder ob eine Wassergeschwindigkeit erreicht wird, die eine Selbstentlüftung ermöglicht. Es wird angenommen, dass die Leitungen F1 und F2 nach der Füllung vollständig luftgefüllt sind.

$$h_{L1}=h_{F1}=318,1-315,7=2,4\text{ m} \quad L_{L1}=L_{F1}=1274-1210=64\text{ m} \quad \sin\alpha_{F1}=0,0375 \quad v_{SF1}=0,953\text{ m/s}$$

$$h_{L2}=h_{F2}=317,7-313,0=4,7\text{ m} \quad L_{L2}=L_{F2}=914-650=264\text{ m} \quad \sin\alpha_{F2}=0,0178 \quad v_{SF2}=0,766\text{ m/s}$$

Die reduzierte Geschwindigkeit ergibt sich für diesen Ausgangszustand nach Gleichung (23):

$$v = \sqrt{\frac{19,62 \cdot (9 - 2,4 - 4,7)}{0,02 \cdot (1310 - 64 - 264) / 0,2 + 2,5}} = 0,61\text{ m/s}$$

Selbstentlüftung ist mit dieser reduzierten Geschwindigkeit weder am Strang F1 ($v < v_{SF1}$) noch am Strang F2 ($v < v_{SF2}$) zu erwarten.

Wird angenommen, dass bei Beginn der Füllung der Steigleitungen, Luftdruck in den voll mit Luft gefüllten Fallleitungen 1 und 2 herrscht und keine weitere Luft zugeführt wird, dann ergeben sich unter Berücksichtigung der Luftkompression folgende Bedingungen in den fallenden Leitungen:

Da diese Berechnungsschritte iterativ durchzuführen sind, wird nur das Ergebnis dargestellt. Die als Ergebnis ermittelten Werte sind in den vorhergehenden Gleichungen mit „Iteration“ gekennzeichnet. Der Reibungsbeiwert wird hier nicht iterativ ermittelt, sondern mit $\lambda=0,02$ angenommen. Die Druckhöhe für den Luftdruck wird mit $h_{atm}=10\text{ m}$ angenommen.

Strang1:

Druckhöhe am Tiefpunkt nach Gleichung (27):

$$h_{TP1} = 0 + h_{Sx} + \frac{v^2}{2g} \cdot \lambda \cdot \frac{L_{F1} + L_{S1} - L_{L1}}{d}$$

$$h_{TP1} = 0 + (321,41 - 315,7) + \frac{0,92^2_{\text{Iteration}}}{19,62} \cdot 0,02 \cdot \frac{1310 - 1210 - 42,3_{\text{Iteration}}}{0,2} = 5,9\text{ m}$$

Volumenkompression nach Gleichung (26):

$$\frac{\Delta V_1}{V_1} = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{h_{TP1}}{h_{F1}} + \frac{h_{atm}}{h_{F1}} + 1 \right) - \sqrt{\frac{1}{4} \cdot \left(\frac{h_{TP1}}{h_{F1}} + \frac{h_{atm}}{h_{F1}} + 1 \right)^2 - \frac{h_{TP1}}{h_{F1}}}$$

$$\frac{\Delta V_1}{V_1} = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{5,9}{2,4} + \frac{10}{2,4} + 1 \right) - \sqrt{\frac{1}{4} \cdot \left(\frac{5,9}{2,4} + \frac{10}{2,4} + 1 \right)^2 - \frac{5,9}{2,4}} = 0,339$$

Längen- bzw. Höhenkompression der luftgefüllten Leitung nach Gleichung (25):

$$L_{L1} = L_{F1} \cdot \left(1 - \frac{\Delta V_1}{V_1}\right) = 64 \cdot (1 - 0,339) = 42,3 \text{ m} \quad h_{L1} = 2,4 \cdot (1 - 0,339) = 1,59 \text{ m}$$

Druckhöhe in der luftgefüllten Leitung unter Verwendung der Gleichung (25):

$$\frac{p_1}{\rho g} = \frac{p_{\text{atm}}}{\rho g} \cdot \left(\frac{L_{F1}}{L_{L1}} - 1\right) = 10 \cdot \left(\frac{64}{42,3} - 1\right) = 5,13 \text{ m}$$

Strang2:

$$h_{TP2} = 5,13 + (318,10 - 313,0) + \frac{0,92^2_{\text{Iteration}}}{19,62} \cdot 0,02 \cdot \frac{1210 - 650 - 134_{\text{Iteration}}}{0,2} = 12,1 \text{ m}$$

$$\frac{\Delta V_2}{V_2} = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{12,1}{4,7} + \frac{10}{4,7} + 1\right) - \sqrt{\frac{1}{4} \cdot \left(\frac{12,1}{4,7} + \frac{10}{4,7} + 1\right)^2 - \frac{12,1}{4,7}} = 0,494$$

$$L_{L2} = 264 \cdot (1 - 0,494) = 134 \text{ m} \quad h_{L2} = 4,7 \cdot (1 - 0,494) = 2,38 \text{ m}$$

$$\frac{p_2}{\rho g} = 10 \cdot \left(\frac{264}{134} - 1\right) = 9,7 \text{ m}$$

Reduzierte Geschwindigkeit: $v = \sqrt{\frac{19,62 \cdot (9 - 1,58 - 2,38)}{0,02 \cdot (1310 - 42,3 - 134) / 0,2 + 2,5}} = 0,92 \text{ m/s}$

Eine selbstständige Entlüftung wäre nach Berücksichtigung der Luftkompression nur im Strang 2 erreichbar ($v = 0,92 \text{ m/s} > v_{SF2} = 0,766 \text{ m/s}$). Der Luftaustrag im Strang 2 führt bei ausreichend langem Betrieb aber dazu, dass der Strang F2 wieder voll bei der Geschwindigkeitsberechnung berücksichtigt werden kann.

v reduziert durch Luft in F1: $v = \sqrt{\frac{19,62 \cdot (9 - 2,4)}{0,02 \cdot (1310 - 64) / 0,2 + 2,5}} = 1,01 \text{ m/s}$

Das bedeutet, dass damit die Geschwindigkeit auf etwa einen Meter pro Sekunde ansteigt und die Voraussetzung zum selbstständigen Luftaustrag auch in Leitung 1 gegeben sind. Damit ist nachgewiesen, dass ohne weitere Zuführung von Luftblasen ein Luftaustrag möglich ist.

3.4 Luftaustrag in Abhängigkeit von der Zeit

Das Beispiel im vorhergehenden Abschnitt hat gezeigt, dass auch für den Extremfall, der Füllung einer leeren Freigefälledruckleitung, ein selbstständiger Austrag der Luft bei ausreichender Energiehöhe erreicht werden kann. Wie lange dieser Prozess dauert, soll nun behandelt werden. Der Zeiteinfluss beim Austrag von Lufteinschlüssen spielt insbesondere bei geregelten Freigefälledruckleitungen eine Rolle, da hier die Betriebszeiten relativ kurz sein können und damit nur ein begrenztes Luftvolumen in einem Regelzyklus ausgetragen werden kann.

Bei Untersuchungen im Hubert-Engels-Labor der TU Dresden wurde an einer fast 23 m langen Plexiglasleitung mit einem Innendurchmesser von 190 mm ein Luftvolumenausstrag pro Zeit gemessen (Aigner/Thumernicht 2002). Ermittelt wurden folgende Gleichungen zur Berechnung des relativen Luftvolumenstromes $\beta = Q_L / Q_W$ in einer Freigefälledruckleitung.

$$\beta = \frac{Q_L}{Q_W} = 0,004 \cdot \left(\frac{v}{\sqrt{g \cdot d}} \right)^4 \quad (28)$$

mit Q_L -Luftvolumenstrom, Q_W –Wasservolumenstrom

- Gleichung (28) gilt bis zur dimensionslosen Geschwindigkeit $v/\sqrt{g \cdot d} < 0,75$ für kleinere und größere Lufteinschlüsse und alle Neigungen,
- Gleichung (28) gilt ab $v/\sqrt{g \cdot d} \geq 0,75$ nur für größere Luftblasen mit einem dimensionslosen Volumen $n = \frac{4 \cdot V_{\text{Blase}}}{\pi d^3} \geq 10$ und bei einer größeren Rohrneigung $\alpha > 3^\circ$.

Bei flacheren Rohrneigungen und kleineren Luftvolumina fehlt der Fließwechsel und damit das turbulente Einschlagen von Luftblasen am Ende der Lufttasche. Dadurch verringert sich der Lufttransport. Hier kann nur noch nach Gleichung (29) der Luftaustrag abgeschätzt werden. Diese Gleichung gilt nur für größere Fließgeschwindigkeiten ab $v \geq v_s$. Auch diese Gleichung beschränkt sich auf die Randbedingungen o.g. Untersuchungen, da keine Vergleichswerte bekannt sind.

$$\beta = \frac{Q_L}{Q_W} = 0,3 \cdot \sin \alpha \cdot \left(\frac{v - v_s}{\sqrt{g \cdot d}} \right) \quad (29)$$

Da keine anderen Untersuchungen der zeitlichen Abhängigkeit des Luftaustrages in Druckleitungen vorlagen, konnte deren Allgemeingültigkeit nicht überprüft werden.

Die Gleichungen (28) und (29) sollten nur zur Abschätzung verwendet werden.

Beispiel:

Verfolgen wir das Beispiel des vorhergehenden Abschnittes weiter und versuchen die Zeit zu ermitteln, die der Strang F1 (Abbildung 2) für seinen selbstständigen Luftaustrag benötigt (Strang F2 ist bereits entlüftet und damit sei F1 vollständig mit Luft gefüllt).

$$h_{F1} = 2,4 \text{ m} \quad L_{F1} = 64 \text{ m} \quad d = 0,2 \text{ m} \quad V_{F1} = A_{F1} L_{F1} = 2,01 \text{ m}^3 \quad \alpha_{F1} = 2,15^\circ \quad v_{sF1} = 0,953 \text{ m/s}$$

$$\text{Geschwindigkeit: } v = 1,15 \text{ m/s} \quad \text{reduziert: } v = \sqrt{\frac{19,62 \cdot (9 - 2,4)}{0,02 \cdot (1310 - 64) / 0,2 + 2,5}} = 1,01 \text{ m/s}$$

Da die Neigung der Rohrleitung kleiner als 3° ist, die Geschwindigkeit aber über der Selbstentlüftungsgeschwindigkeit von $0,935 \text{ m/s}$ liegt, wird Gleichung (29) verwendet.

$$\beta = \frac{Q_L}{Q_W} = 0,3 \cdot 0,0375 \cdot \left(\frac{(1,01 \dots 1,15) - 0,953}{\sqrt{9,81 \cdot 0,2}} \right) = 0,458 \dots 1,58 \cdot 10^{-3}$$

Damit ergibt sich ein Luftvolumenstrom Q_L von $1,45 \dots 5,7 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ und eine Entlüftungszeit für den luftgefüllten Strang F1 mit $t = Q_L / V_{F1}$ zwischen $9,8$ und $38,5$ Stunden.

3.5 Abriss der Strömung durch Belüftung am Hochpunkt

Wird ein Hochpunkt belüftet und die Strömung der folgenden fallenden Leitung reißt ab, d.h. es liegt eine sogenannte hydraulische Trennung vor, dann werden die einzelnen Rohrleitungsabschnitte (bis zur Belüftung bzw. ab der Belüftung) getrennt berechnet. Der Durchfluss durch die Rohrleitung wird aus der hydraulischen Berechnung des ersten Rohrabschnittes bis zum belüfteten Hochpunkt ermittelt. Er gilt bei stationären Bedingungen für den gesamten Rohrabschnitt und bestimmt als Randwert die Neigung der Energielinie der anderen Abschnitte. Bei instationärer Betrachtung können sich unterschiedliche Durchflüsse im Zusammenhang mit dem Füllen oder Entleeren einzelner Rohrabschnitte einstellen. Daraus ergeben sich Druck- und Durchflussschwankungen.

Beispiel:

Nehmen wir an, eine Rohrleitung ähnlich der in Abbildung 3 wird durch die Belüftung am Hochpunkt hydraulisch getrennt, dann ergibt sich die Energiehöhe für den ersten Abschnitt $h_{EI} = \text{Zulaufhöhe} - \text{HP}$. Der sich daraus nach Gleichung (7) und (1) ergebende Durchfluss gilt dann als Randwert für den zweiten Abschnitt und bestimmt dort die Neigung der Energielinie. Der Schnittpunkt des am Wasserspiegel des Auslaufbehälters endenden und mit I_R geneigten Reibungsgefälles mit dem Rohr bestimmt den Beginn des Druckabflusses.

Abschnitt 1: $h_{EI} = (\text{Wasserspiegel am Zulauf}) - (\text{Höhe am Hochpunkt}) = 5 \text{ m}$

Rohrleitungslänge bis zum HP: $L_1 = 500 \text{ m}$ und

$d = 0,2 \text{ m}$, $\lambda = 0,02$. Summe Verlustbeiwerte $\sum \zeta_1 = 1,5$

$$v = \sqrt{\frac{2g \cdot h_{EI}}{\lambda \cdot L/d + \sum \zeta_1}} = \sqrt{\frac{19,62 \cdot 5}{0,02 \cdot 500/0,2 + 1,5}} = 1,38 \text{ m/s}$$

$$Q = v \cdot A = 1,38 \cdot \pi/4 \cdot 0,2^2 = 0,0433 \text{ m}^3/\text{s}$$

Abschnitt 2: Rohrleitung wie Abschnitt 1, örtliche Verluste vernachlässigt, stationärer Druckabfluss

$$I_R = \frac{\lambda}{d} \cdot \frac{Q^2}{2g \cdot A^2} = \frac{0,02 \cdot 0,0433^2}{0,2 \cdot 19,62 \cdot (\pi/4 \cdot 0,2^2)^2} = 0,97\%$$

3.6 Hydromechanische Berechnung von Freispiegel- bzw. Teilfüllungsabfluss

Stellt sich in einer fallenden Leitung durch die Belüftung am Hochpunkt ein Freispiegelabfluss oder durch einen größeren Lufteinschluss ein Teilfüllungsabfluss ein, d. h. der Wasserabfluss füllt den Rohrquerschnitt nur noch zum Teil, dann kann diese Abhängigkeit zwischen dem Abfluss Q bzw. der Geschwindigkeit v und dem Füllungsgrad h/d für einen stationären Zustand aus einer Teilfüllungskurve nach Gleichung (12) ermittelt werden.

Wichtig ist dabei, dass der Abfluss bzw. die Geschwindigkeit bei Vollfüllung wie bei Teilfüllung mit dem Gefälle I_S der Rohrleitung ermittelt wird. Bei stationär gleichförmigem Freispiegelabfluss entspricht das Rohrgefälle I_S dem Reibungsgefälle I_R . Da bei vorgegebenem Abfluss der Wasserstand im teilgefüllten Rohr nicht bekannt ist, kann er einfach aus dieser Teilfüllungskurve (Abbildung 5) abgelesen werden. Da bei einem Teilfüllungsgrad von mehr

als 85% durch kleinste Störungen die Leitung zuschlagen kann, gelten diese Kurven nur bis $h/d \cong 0,85$.

Setzt man die Gleichung (2) und (4) sowie (3) und (6) in Gleichung (12) ein, kann man diese Abhängigkeit in Abbildung 5 selbst ermitteln.

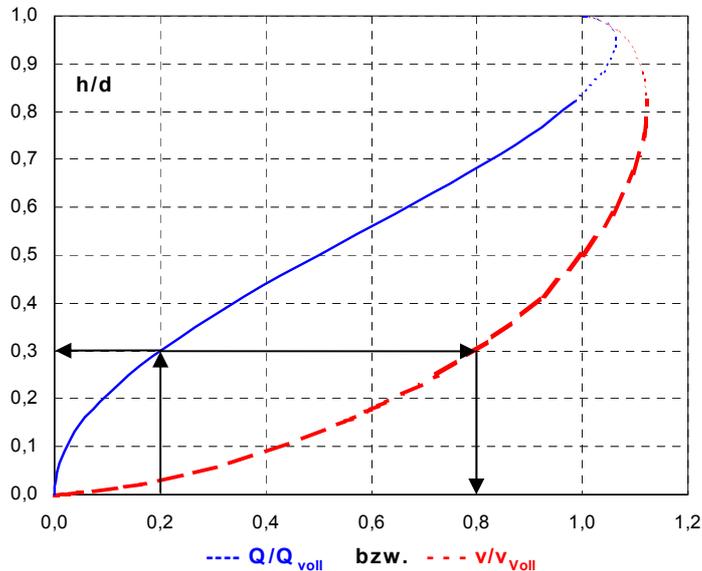


Abbildung 5 Teilfüllungskurven Kreisprofil

Beispiel:

Nehmen wir an, dass die Beispielleitung im Abschnitt 3.1 ($Q=40,7$ l/s) wegen eines Hochpunktes steiler als 1% verlegt werden muss, z.B. 20%, dann würde die dort berechnete Energielinie die Rohrleitung möglicherweise unterschneiden, d.h. es tritt unter diesen Bedingungen Unterdruck auf. Durch Belüftung am Hochpunkt stellt sich ein Teilfüllungsabfluss ein, der folgendermaßen berechnet werden kann.

angenommen: $I_R=0,2$ mit $L=1000$ m fällt die Leitung 200 m,

$$d=d_{hy}=0,1876 \text{ m, } k/d = 0,00016$$

berechnet: Vollfüllung (ohne örtliche Verluste) Gleichung (8) und (7) bzw. (11) und (10)

$$\lambda = \left[-2 \cdot \lg \left(\frac{2,51 \cdot 0,00000131}{\sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 0,1876^3 \cdot 0,2}} + \frac{0,00016}{3,71} \right) \right]^{-2} = 0,0145$$

$$v_{\text{voll}} = \frac{1}{\sqrt{\lambda}} \sqrt{2 \cdot g \cdot d_{hy} \cdot I_R} = \frac{1}{\sqrt{0,0145}} \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 0,1876 \cdot 0,2} = 7,13 \text{ m/s}$$

$$Q_{\text{voll}} = v \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d^2 = 7,13 \text{ m/s} \cdot 0,02764 \text{ m}^2 = 0,1971 \text{ m}^3/\text{s} = 197,1 \text{ l/s}$$

Mit $\frac{Q_{\text{Teil}}}{Q_{\text{Voll}}} = \frac{40,7}{197,1} = 0,2$ ergibt sich aus der Abbildung 5 ein $h/d=0,3$ und eine Teilfüllungsgeschwindigkeit $v_{\text{Teil}}=0,8 \cdot 7,13 \text{ m/s} = 5,7 \text{ m/s}$.

3.7 Luftmitnahme und Lufteinmischung an Steilstrecken

In steilen Rohrabschnitten kommt es durch die schnelle Wasserströmung zum Mitreißen der Luft. Die Scherwirkung zwischen Wasseroberfläche und Luft induziert eine Luftbewegung in Strömungsrichtung. Kann die eingetragene Luft am Beginn der Steilstrecke nicht eintreten oder am Ende der Steilstrecke nicht austreten, dann führt diese Scherwirkung nur zu einer turbulenten Luftbewegung innerhalb des luftgefüllten Abschnittes. Kann die Luft am Hochpunkt ungehindert eintreten und am Ende wieder austreten, dann reißt die Wasserströmung diese Luft mit. Erreicht die turbulente Grenzschicht die Wasserspiegeloberfläche, dann kommt es laut Volkart (1978) ab einer Boussinesq-Zahl von 6 ($Bou > 6$, Gleichung (16)) zur Einmischung von Luft in das Wasser, was zu einem Anstieg des Abflussfläches führt, es entsteht eine Wasser-Luft-Gemischströmung. Die Luftkonzentration (Gleichung (19)) wird nach Volkart mit Gleichung (30) folgendermaßen berechnet:

$$c = 1 - \frac{1}{0,02 \cdot (Bou - 6)^{1,5} + 1} \quad (30)$$

Die Geschwindigkeit der Wasser-Luft-Gemischströmung v_G errechnet sich in Abhängigkeit von der Luftkonzentration c und der Wassergeschwindigkeit v_W der Teilfüllung zu:

$$v_G = v_W \cdot (1 - c^2) \quad (31)$$

Die mittlere Gemischabflussfläche $A_{G\text{mittel}}$ bzw. die maximale Gemischabflussfläche $A_{G\text{max}}$ werden in Abhängigkeit vom Luftanteil und der Abflussfläche A_W bei reiner Wasserströmung bei Teilfüllung mit Gleichung (32) und (33) berechnet.

$$A_{G\text{mittel}} = A_W \cdot \frac{1}{(1 - c^2) \cdot (1 - c)} \quad (32)$$

$$A_{G\text{max}} = A_W \cdot \left(2 \cdot \ln\left(\frac{1}{1 - c}\right) + 1 \right) \quad (33)$$

Abgeschätzt werden kann das Verhältnis der Wassertiefen aus Gemischabfluss h_G für den mittleren oder den maximalen Wert und aus reinem Wasserabfluss h_W zu:

$$\frac{h_G}{h_W} = \left(\frac{A_G}{A_W} \right)^{\frac{3}{4}} \quad (34)$$

Der Luftvolumenstrom ermittelt sich zu: $Q_L = Q_W \cdot \frac{c}{1 - c}$ (35)

Verringert sich am Ende einer Steilstrecke das Rohrgefälle, dann kann es zum Fließwechsel und zum Zuschlagen der Leitung kommen. Die dabei im Wasser-Luft-Gemisch vorhandene Luft wird dann vollständig oder teilweise weitertransportiert. Durch Luftkompression kann es zu stoßartigen Luftbewegungen oder Luftaustritten auch entgegen der Fließrichtung kommen. Es ist für eine ausreichende Entlüftung an solchen Punkten zu sorgen.

Beispiel:

In der Beispielleitung aus Abschnitt 3.1 wurde im Abschnitt 3.6 bei einem Gefälle von 20% das Wasser mit einer Geschwindigkeit von $v_w=5,7$ m/s bei einer Teilfüllung von 30% abgeführt. Der hydraulische Radius nach Gleichung (6) wird zu

$$r_{hy} = \frac{0,187}{4} \cdot \left[1 - \frac{2 \cdot (1 - 2 \cdot 0,3) \cdot \sqrt{0,3 \cdot (1 - 0,3)}}{\arccos(1 - 2 \cdot 0,3)} \right] = 0,046 \text{ m}$$

und damit die Boussinesq-Zahl nach Gleichung (16) etwa:

$$Bou = \frac{5,7}{\sqrt{9,81 \cdot 0,046}} \approx 8,5$$

Da $Bou > 6$, wird sich das Wasser mit Luft vermischen. Die Luftkonzentration kann aus Gleichung (30) berechnet werden:

$$c = 1 - \frac{1}{0,02 \cdot (8,5 - 6)^{1,5} + 1} = 7,33\%$$

Die Gemischgeschwindigkeit wird nur geringfügig geringer, die mittlere Abflussfläche dieses Gemisches erhöht sich allerdings um etwa 8,5% (Gleichung (32)) und der Wasserstand damit um etwa 6,3% (Gleichung (34)). Der Luftabfluss beträgt damit etwa 7,9% des Wasserabflusses (Gleichung (35)). Neben dem Transport der eingeschlagenen Luft kommt da noch ein reiner Luftvolumenstrom im luftgefüllten Teil der Leitung hinzu.

3.8 Nachweis für den ablagerungsfreien Transport

In Flachstrecken oder an Tiefpunkten kann es zu Ablagerungen von Inhaltsstoffen im Abwasser oder im Mischwasser kommen. Nach dem Arbeitsblatt ATV-DVWK-A 110 (2001) sollte eine Wandschubspannung von $\tau=1$ N/m² nicht unterschritten werden. Die vorhandene Schubspannung wird aus Gleichung (17) ermittelt. Ersetzt man in dieser Gleichung das Energiegefälle mit Gleichung (10), dann erhält man die bekannte Gleichung (36) für die Schubspannung (dynamischer Druck p_D mal ein Viertel des Reibungsbeiwertes λ).

$$\tau = \rho \cdot g \cdot r_{hy} \cdot I_R = \rho \cdot \frac{v^2}{2} \cdot \frac{\lambda}{4} = p_D \cdot \frac{\lambda}{4} \quad (36)$$

Im Arbeitsblatt ATV-DVWK-A 110 (2001) werden für den Freispiegelabfluss für eine Betriebsrauheit von $k=0,25$ mm bis $k=1,5$ mm Grenzgefälle I_C , Grenzgeschwindigkeiten v_C und Grenzschubspannungen τ_C als Tabellen für den Mischwasser- sowie Schmutzwasserkanal angegeben. Es wird darauf hingewiesen, dass die Zeit für die Bildung von Ablagerungen (Schubspannung ist kleiner als kritischer Wert) nicht länger als das Doppelte der Zeit ohne eine Gefahr von Ablagerungen (Schubspannung ist größer als kritischer Wert) sein sollte.

Die Tabellenwerte für das kritische Gefälle I_C des Arbeitsblattes ATV-DVWK-A 110 (2001) wurden durch folgende Gleichungen (37) und (38) für Misch- und Schmutzwasserkanal mit ausreichender Genauigkeit angenähert. Die kritische Schubspannung τ_C kann aus dem kritischen Gefälle berechnet werden.

Mindestwerte: $\tau_C \geq 1 \text{ N/m}^2$ $I_C \geq 1/d$ mit d in mm
bei $h/d > 0,5$ gilt $h/d = 0,5$

Mischwasserkanal

$$I_C = (1,5 - \frac{h}{d} + \frac{0,05}{h \cdot \sqrt{d}}) / 1000 \quad \text{mit } h \text{ und } d \text{ in m} \quad (37)$$

Schmutzwasserkanal

$$I_C = (1,3 - \frac{h}{d} + \frac{0,05}{h \cdot \sqrt{d}}) / 1000 \quad \text{mit } h \text{ und } d \text{ in m} \quad (38)$$

Der Nachweis für den ablagerungsfreien Betrieb erfolgt nun direkt durch den Vergleich der vorhandenen Gefälle mit dem Grenzgefälle oder durch den Vergleich der vorhandenen Schubspannung τ mit der Grenzs Schubspannung τ_C , die unter Verwendung der Gleichungen (37) und (38) für das Grenzgefälle I_C berechnet wird. Der hydraulische Radius ist dabei ebenfalls eine Funktion der relativen Wassertiefe h/d und wird nach Gleichung (6) berechnet.

$$\tau = \rho \cdot g \cdot r_{hy} \cdot I_R \geq \tau_C = \rho \cdot g \cdot r_{hy} \cdot I_C \quad (39)$$

Der Nachweis für Druckleitungen erfolgt mit den ermittelten Grenzwerten I_C für $h/d=0,5$ durch den Vergleich mit der vorhandenen Energielinie oder der Schubspannung nach Gleichung (36).

Beispiel:

Die vorhandene Schubspannung des im Abschnitt 3.5. berechneten gefüllten Rohrabschnittes bei belüftetem Hochpunkt beträgt nach Gleichung (36)

$$\tau = 1000 \cdot \frac{1,38^2}{2} \cdot \frac{0,02}{4} = 4,76 \text{ N/m}^2.$$

Die kritische Schubspannung wird für diese voll gefüllte Rohrleitung (Mischwasserkanal) aus dem kritischen Gefälle I_C nach Gleichung (37) (Vollfüllung $h/d = 1$, da $h/d > 0,5$ wird $h/d = 0,5$ gesetzt) ermittelt:

$$I_C = (1,5 - 0,5 + \frac{0,05}{0,5 \cdot 0,2^{1,5}}) / 1000 = 0,00211$$

$$\text{und } \tau_C = 1000 \cdot 9,81 \cdot 0,2 / 4 \cdot 0,00211 = 1,035 \text{ N/m}^2$$

Die vorhandene Schubspannung von $4,76 \text{ N/m}^2$ ist also bedeutend größer als die kritische von $1,035 \text{ N/m}^2$. Es besteht keine Gefahr, dass sich Ablagerungen bilden.

4 Ablagerungen und Spülungen

Ablagerungen können durch die Einhaltung von Mindestfließgeschwindigkeiten vermieden werden. Zunächst ist ein mögliches Auftreten von Ablagerungen, deren Zusammensetzung und Menge zu prüfen. Zwischenspeicher oder Rückhaltebecken vor der Einleitung in eine Freigefälledruckleitung wirken durch die Verringerung der Fließgeschwindigkeit wie Sand

fänge, was zur Trennung von Inhaltsstoffen aus dem Wasser führt. Die Freigefälledruckleitung sollte so dimensioniert sein, dass die Ausnutzung der gesamten zur Verfügung stehenden Energiehöhe Fließgeschwindigkeiten ermöglicht, die für eine Spülung oder die Verhinderung von Ablagerungen erforderlich sind. In der DIN EN 1671 werden dafür 0,6 bis 0,9 m/s angegeben. 0,7 m/s sollten dabei mindestens einmal in 24h erreicht werden. Allgemein wird für Abwasserleitungen von einer Mindestfließgeschwindigkeit von 0,5 m/s ausgegangen. Zur Aktivierung von Ablagerungen bzw. zur Spülung werden 1 m/s gefordert. Die bei der Regelung in der Leitung erzeugte Unruhe wirkt sich positiv auf die Verhinderung von Ablagerungen aus.

Die Einhaltung von Mindestfließgeschwindigkeiten bzw. die Erzeugung von Spülgeschwindigkeiten kann durch eine intelligente Regelung am Ende der Freigefälledruckleitung erreicht werden.

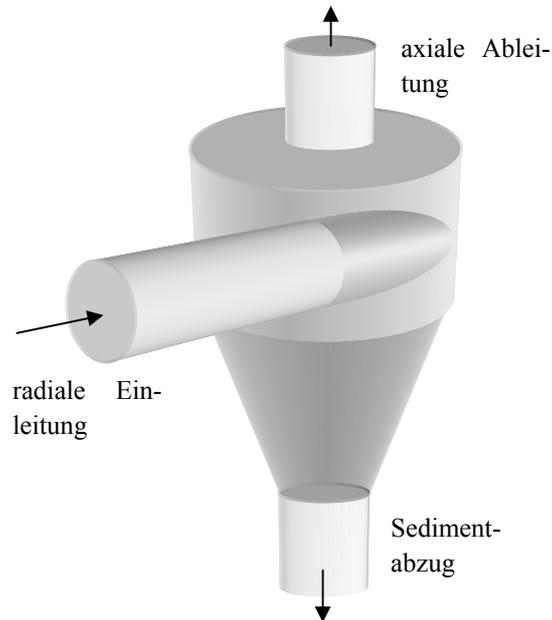


Abbildung 6 Prinzipskizze eines Drucksandfanges

Ist es in Freigefälledruckleitungen nicht möglich, Ablagerungen an den Tiefpunkten ganz zu verhindern, dann können dort Drucksandfänge nach dem Prinzip des Wirbelsandfanges eingesetzt werden. Die Wasserzuführung erfolgt radial, die Weiterleitung des Wassers oben zentral und der Abzug der Ablagerung an der Unterseite der Konstruktion.

Weiterhin ist es möglich, eine sogenannte Druckluftspülung vorzusehen. Diese soll hier nicht näher erläutert werden. Es wird auf die Literatur und das Arbeitsblatt ATV-A 116 „Besondere Entwässerungsverfahren“ (September 1992) bzw. das geplante Arbeitsblatt ATV-DVWK-A 116/Teil 3 „Druckluftgespülte Abwassertransportleitungen“ verwiesen. Bei der Druckluftspülung werden Geschwindigkeiten von bis zu 6 m/s erreicht. Hier wird die Leitung regelrecht ausgeblasen. Dieses System erfordert eine zusätzliche Investition für die Druckluftstation.

5 Regelung, Zwischenspeicher, Armaturen

Ein diskontinuierlicher Abwasseranfall erfordert eine Regelung des Volumenstromes. Da die Freigefälledruckleitung für einen festgelegten Durchfluss, meist den mittleren Durchfluss, dimensioniert wird, dieser aber im Tageszyklus unter- oder überschritten werden kann, wird eine Regelung empfohlen. In Abhängigkeit von der Zuflussganglinie und vom Regelzyklus ist dann ein Zwischenspeicher erforderlich.

Die Regelung von Freigefälledruckleitungen erfolgt meist automatisch. Dazu werden folgende Messgeräte bzw. Sensoren benötigt:

- Wasserstands- bzw. Drucksensoren am Ein- und Auslauf,

- Durchflussmessung am Auslauf,
- Schieberstellung für die Regelung,
- Zeitmessung.

Als Randbedingungen für die Regelung des Abwasserstromes sind die Wasserstands- bzw. Druckmaxima bzw. -minima, die Durchflüsse bei Normalbetrieb, zur Spülung oder als maximale Grenzwerte z.B. für die Kläranlagenbelastung und die Zeitvorgaben für die Regel- bzw. Spülzyklen erforderlich. Gleichzeitig können ansteigende Druckverluste als Signal für erforderliche Spülungen dienen.

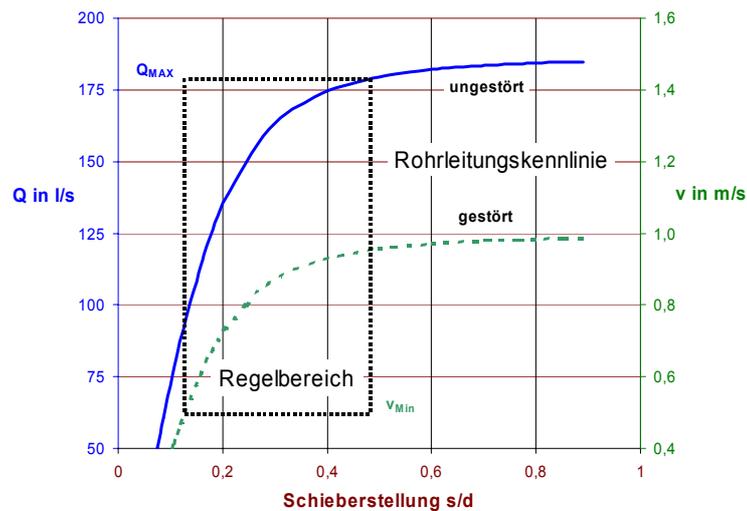


Abbildung 7 hydraulische Randbedingungen für die Regelung

Um geforderte Randbedingungen einzuhalten, macht sich eine Regelung der Freigefälledruckleitung erforderlich (Abbildung 7). Der dafür notwendige Regelkreis schließt die Randbedingungen Mindestfließgeschwindigkeit, maximaler Durchfluss, Wasserstände am Zulauf (Zwischenspeicher) und eventuelle feste Spülzeiten oder Überschreitungen bei Regenereignissen sowie andere Randbedingungen mit ein.

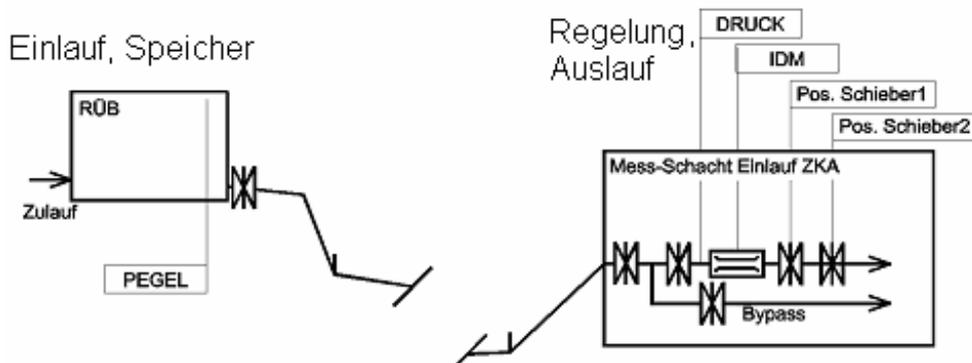


Abbildung 8 Beispiel für den Einbau von Armaturen und Messgeräte

Veränderungen der Rohrleitungskennlinie, z.B. ein erhöhter Fließwiderstand infolge Ablagerungen oder Lufteinschlüsse, führen zur Veränderung des Regelbereiches und können über den Zusammenhang zwischen gemessenen Durchfluss- und Druckwert kontrolliert werden.

Neben den Messsensoren und den Regelarmaturen ist der Einbau weiterer Sicherheits- und Absperrarmaturen erforderlich (Abbildung 8).

Bei Klarwasserüberleitungen, bei Abwasser mit sehr geringem Feststoffanteil oder bei relativ konstanten Überleitungsmengen ist diese Regelung nicht notwendig. Hier würde auch die Zwischenspeicherung zu Beginn der Überleitung entfallen. Eine nicht geregelte Freigefälledruckleitung erfordert zur Vermeidung von Unterdruck eine genaue Überprüfung notwendiger Be- und Entlüftungen an hydraulischen Hochpunkten.

6 Literatur

Aigner, D.: Freigefälledruckleitungen zur Abwasserüberleitung, KA Korrespondenz Abwasser 47 (2000) Nr. 6, S. 876-881, Info siehe: www.d-aigner.de

Aigner, D.: Studie zu den Einsatzmöglichkeiten von Gefälledruckleitungen zur Abwasserüberleitung, LFUG - TU Dresden, November 1998 (unveröffentlicht)

Aigner, D.; Thumernicht, S.: Untersuchung von Freigefälledruckleitungen zur Abwasserüberleitung. Forschungsbericht im Auftrag des Sächsischen Landesamtes für Umwelt und Geologie, Dresden 2002

Aigner, D.; Thumernicht, S.: Geregelt Freigefälledruckleitungen zur Abwasserüberleitung. Wasserbauliche Mitteilungen Heft 21, TU Dresden, 2002

Arbeitsbericht ATV-Arbeitsgruppe 1.1.6 Besondere Entwässerungsverfahren: Druckluft-gespülte Abwassertransportleitungen - Planungs-, Bau- und Betriebsgrundsätze. KA Korrespondenz Abwasser 34 (1987) Nr. 1, S. 70-76

ATV-A 118: Hydraulische Bemessung und Nachweis von Entwässerungssystemen. Arbeitsblatt der Abwassertechnischen Vereinigung, November 1999

ATV-A 116: Besondere Entwässerungsverfahren Unterdruckentwässerung - Druckentwässerung. Arbeitsblatt der Abwassertechnischen Vereinigung, September 1992

ATV-A 200: Grundsätze für die Abwasserentsorgung in ländlich strukturierten Gebieten. Arbeitsblatt der Abwassertechnischen Vereinigung, Mai 1997

ATV-DVWK-A 110: Hydraulische Dimensionierung und Leistungsnachweis von Abwasserkanälen und -leitungen. Regelwerk, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall, September 2001

Bollrich, Gerhard: Technische Hydromechanik I, 5. Auflage. Verlag für Bauwesen Berlin 2000

DIN EN 752-4: Entwässerungssysteme außerhalb von Gebäuden. Teil 4: Hydraulische Planung und Umweltschutzaspekte. Deutsche Norm November 1997

DIN EN 1671: Druckentwässerungssysteme außerhalb von Gebäuden. 1997

Dippold, W. ; Kleinschroth, A.: Die pneumatisch gespülte Abwasserleitung. KA Korrespondenz Abwasser 24 (1977) Nr. 7, S. 207

DVWG-Merkblatt W 403: Planungsregeln für Wasserleitungen und Wasserrohrnetze. Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V. Eschborn Jan. 1988

Gandenberger, W.: Über die wirtschaftliche und betriebssichere Gestaltung von Fernwasserleitungen, GWF Wasser, Abwasser 1957 Nr. 4, S. 206

Hager, W. H.: Abwasserhydraulik Theorie und Praxis, 1994

Kleinschroth, A.; Dippold, W.: Anwendung der pneumatischen Spülung bei geschlossenen Abwasserleitungen. Abwassertechnik 30 (1979) Nr. 4, S. 6

Knippschild, M.: Be- und Entlüftungsventile in Abwasserdruckleitungen. 3-R International 37 (1998) Nr. 9

NRW: Abwassersammlung und Abwassertransport im ländlich strukturierten Gebiet der Eifel. Ein Leitfaden für kostenminimierende Bauweise. Pilotprojekt. Ministerium für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft des Landes Nordrhein-Westfalen, 1995

Schmalzl, Klaus: Berechnung der Rohrkennlinie für Abwasserdruckleitungen unter Berücksichtigung von Lufteinschlüssen mit dem Tabellenkalkulationsprogramm Excel 97, Wasserwirtschaftsamt Rosenheim, 1999 unveröffentlicht

Schütz, Michael: Beitrag zur Bemessung steiler Abwasserkanäle mit Lufteintrag. KA Korrespondenz Abwasser 43 (1996) Nr. 8, S. 1372

Volkart, Peter: Hydraulische Bemessung steiler Kanalisationsleitungen unter Berücksichtigung der Luftaufnahme. Mitt. Nr. 30 der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH Zürich, 1978

Wackernagel, G.; Schmidt, H.; Aigner, D.; Thumernicht, S.: Geregelt Freigefälledruckleitung zur Abwasserüberleitung. KA - Wasserwirtschaft, Abwasser, Abfall 48 (2001) Nr.6, S. 844-847, Info siehe: www.d-aigner.de

Walther, G. ; Günthert, F. W. : Neue Untersuchungen zur Selbstentlüftungsgeschwindigkeit in Trinkwasserleitungen. gwf Wasser-Abwasser, 139 (1998) Nr. 8, S. 475-481. www.bauv.unibw-muenchen.de

Wisner, P.E. et al.: Removal of air from water lines by hydraulic means, Journ. of the hydraulic division, Proc. ASCE 101 HY2, 1975, S. 243-257

Zanke, U.: Zur Berechnung von Strömungs-Widerstandsbeiwerten. Wasser und Boden 45 (1993) Nr. 1, S. 14-16, Hamburg, Verlag Paul Parey

7 Zeichen, Einheiten und Begriffe

α	[°]	Neigungswinkel der Rohrleitung
β	[-]	Belüftungsgrad
λ	[-]	Rohrreibungsbeiwert
π	[-]	Kreiszahl
ρ	[kg/m ³]	Dichte des Wassers
ν	[m ² /s]	kinematische Viskosität
σ	[N/m ²]	Oberflächenspannung
τ	[N/m ²]	Schubspannung
τ_c	[N/m ²]	kritische Schubspannung für Ablagerungsfreiheit
ζ	[-]	örtlicher Verlustbeiwert
a	[-]	Sprungzahl
A	[m ²]	Fließquerschnittsfläche, Abflussquerschnittsfläche
A_w	[m ²]	Abflussfläche des reinen Wassers
Bou	[-]	Boussinesq-Zahl
b_w	[m]	Wasserspiegelbreite
c	[-]	Luftkonzentration
d	[m]	Innendurchmesser des Rohres

d_{hy}	[m]	hydraulischer Durchmesser
e	[-]	Basis des natürlichen Logarithmus 2,71828...
Fr	[-]	Froudezahl
g	[m/s ²]	Erdbeschleunigung
h	[m]	Wasserhöhe
h_L	[m]	Höhe der luftgefüllten Leitung
h_E	[m]	Energieverlusthöhe, Fallhöhe
h_F	[m]	Höhensprung der fallenden Leitung
h_G	[m]	Höhe des Gemischabflusses Wasser und Luft
h_{Gr}	[m]	Grenztiefe, kritische Tiefe
h_S	[m]	Höhenanstieg der steigenden Leitung
h_V	[m]	Reibungsverlusthöhe
h_W	[m]	Höhe des Wasserabflusses
I_E	[-]	Energiehöhengefälle bzw. Fallhöhengefälle
I_R	[-]	Reibungsgefälle
I_S	[-]	Rohrgefälle, Leitungsgefälle
I_C	[-]	kritisches Rohrgefälle für Ablagerungen
k	[mm]	absolute hydraulische Rauheit
k_{St}	[m ^{1/3} /s]	Manning-Strickler-Beiwert
L	[m]	Länge
L_L	[m]	Länge der luftgefüllten Leitung
L_F	[m]	Länge der fallenden Leitung
L_S	[m]	Länge der steigenden Leitung
l_U	[m]	benetzter Umfang
n	[-]	dimensionsloses Blasenvolumen
p	[N/m ²]	Druck
p_{atm}	[N/m ²]	Atmosphärendruck, Luftdruck
Q	[m ³ /s]	Volumenstrom, Durchfluss, Abfluss
Q_L	[m ³ /s]	Volumenstrom der Luft
Q_W	[m ³ /s]	Volumenstrom des Wassers
r	[m]	Innenradius des Kreisrohres
r_{hy}	[m]	hydraulischer Radius
Re	[-]	Reynoldszahl
t	[s]	Entlüftungszeit
v	[m/s]	Geschwindigkeit, mittlere Geschwindigkeit der Wasserströmung
v_C	[m/s]	kritische Geschwindigkeit
v_S	[m/s]	Selbstentlüftungsgeschwindigkeit
V_L	[m ³]	Luftvolumen
V_F	[m ³]	Inhaltsvolumen der fallenden Leitung
ΔV	[m ³]	Änderung des Luftvolumens infolge Druck
x	[-]	Laufvariable