Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria
Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
Band: 79 (1987)
Heft: 11-12

Artikel: Abflussverhältnisse in Umleitstollen und Durchlässen
Autor: Raemy, Félix
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-940681

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 11.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Abflussverhältnisse in Umleitstollen und Durchlässen

bei Vollfüllung mit freiem Auslauf

Félix Raemy

Zusammenfassung

Wenn der Durchmesser eines vollaufenden Stollens nicht wesentlich kleiner als die vorhandene Energiehöhe ist, wird die Kenntnis der effektiven Drucklinienlage im Rohrendquerschnitt bei der Berechnung des Oberwasserstandes meistens von grosser Bedeutung. Unzutreffende Annahmen können zu einer Reduktion der hydraulischen Sicherheit sowie der Wirtschaftlichkeit des Bauwerkes führen.
Praktische Hinweise aus der Literatur wurden zusammengestellt und hier am Beispiel des Umleitstollens respektive der Drosselstrecke unterhalb eines Regenüberlaufes erläutert. Dem projektierenden Ingenieur sollten damit die erforderlichen Dimensionierungsgrundlagen zur Verfügung stehen.

Résumé: Conditions d'écoulement dans des conduites en charge à tête aval dénoyée

Lorsque le diamètre d'une galerie sous pression à tête aval dénoyée est comparable à la charge totale disponible, la connaissance de la position effective de la ligne piézométrique dans la section terminale est nécessaire à la détermination correcte du plan d'eau à l'amont de l'entrée. L'utilisation d'hypothèses simplificatrices inexactes peut conduire à une réduction sensible de la sécurité hydraulique et de la rentabilité des ouvrages.
Quelques données pratiques tirées de la littérature sont présentées et discutées dans des exemples de calcul concernant la galerie de dérivation provisoire, respectivement le tronçon d'étranglement d'un déversoir d'orage. Une base de dimensionnement est ainsi mise à la disposition de l'ingénieur hydraulicien.

Summary: Flow conditions in full conduits with free outlet

If the diameter of a conduit flowing full is comparable in magnitude with the operating head, then the knowledge of the effective level of the hydraulic grade line at the outlet is important in determining the water level upstream of the entrance. Some practical guidelines from the available literature are presented and discussed for the examples of a diversion tunnel and the throttle culvert of a rain-overflow structure.

1. Einleitung

Während der Erstellung einer Talsperre ist die einwandfreie Ableitung auftretender Hochwasser für die Sicherheit der Baustelle von grosser Bedeutung. Meistens erfüllen Umleitstollen oder auch Baubreschen diese Funktion.
Der Umleitstollen wird gewöhnlich für eine Bemessungswassermenge dimensioniert, die aufgrund der vorgesehenen Bauzeit und der beobachteten jährlichen Hochwasserspitzen zu ermitteln ist. Bei dieser Menge herrscht normalerweise Vollfüllung im Stollen, und die Rückgabe am Auslauf erfolgt frei, d. h. ohne Einstau durch das Unterwasser. In dieser Situation darf der am Einlauf aufgestaute Fluss die Kronenkote des oberwasserseitigen Fangdamms nicht erreichen. Erst beim Überschreiten dieser Bemessungswassermenge, deren Wahrscheinlichkeit statistisch erfassbar ist, könnte die Baustelle durch Überflutung bedroht sein.
Obwohl die hydraulischen Berechnungsmethoden eines vollaufenden Rohres längst bekannt sind, wird der projektierende Ingenieur immer noch mit speziellen Problemen konfrontiert. Hier stellt sich insbesondere die Frage nach der Lage der Drucklinie im Auslaufquerschnitt eines solchen Rohres. In den letzten Jahren wurden bedeutende Objekte mit hohen Abfuhrkapazitäten gebaut. Als Beispiel soll der Umleitstollen der Anlage El Cajón in Honduras erwähnt werden, bei welchem der maximale Durchfluss 2300 m^3/s und der Rohrdurchmesser 13 m betrugen (Bild 1). Da das Verhältnis zwischen der Energielinienhöhe vor dem Einlauf H und dem Durchmesser D relativ klein bleibt (hier $H/D < 3$), ist es bei der Berechnung des Rückstaus am oberen Fangdamm wichtig zu wissen, ob am Auslauf das massgebende Druckniveau im Querschnittmittelpunkt, im Scheitel oder irgendwo dazwischen angenommen werden darf. Je nach der getroffenen Wahl kann die Abweichung beim berechneten Oberwasserstand, d. h. bei der erforderlichen Fangdammkote, einige Meter ausmachen. Einerseits wäre eine Erhöhung der Überflutungsgefahr bei zu niedrigem Fangdamm zu erwarten, andererseits könnte eine Überdimensionierung desselben die Wirtschaftlichkeit der Wasserhaltung beeinträchtigen.
Im folgenden werden einige Dimensionierungsgrundlagen präsentiert, die aus der vorhandenen Literatur und aus einigen Modellversuchen [12, 13] gesammelt wurden. Da ähnliche Probleme sich bei der Bemessung der Drosselstrecke unterhalb eines Regenüberlaufes stellen können, wird anschliessend ein solches Beispiel ebenfalls behandelt.

2. Abflussverhältnisse im vollaufenden Durchlass mit freiem Auslauf

Der Abfluss in einem genügend langen, vollaufenden Durchlass mit freiem Auslauf wird durch drei verschiedene Zonen charakterisiert: die Einlaufzone, in der die Grenzschichtdicke mit dem Weg entlang der Achse wächst, bis sie die Rohrmitte erreicht hat; die Zone der ausgebildeten Strömung, die eine hydrostatische Druckverteilung und eine mit der Entfernung vom Einlauf gleich bleibende Geschwindigkeitsverteilung aufweist; anschliessend die Auslaufzone, die wegen der Krümmung der austretenden Stromfäden

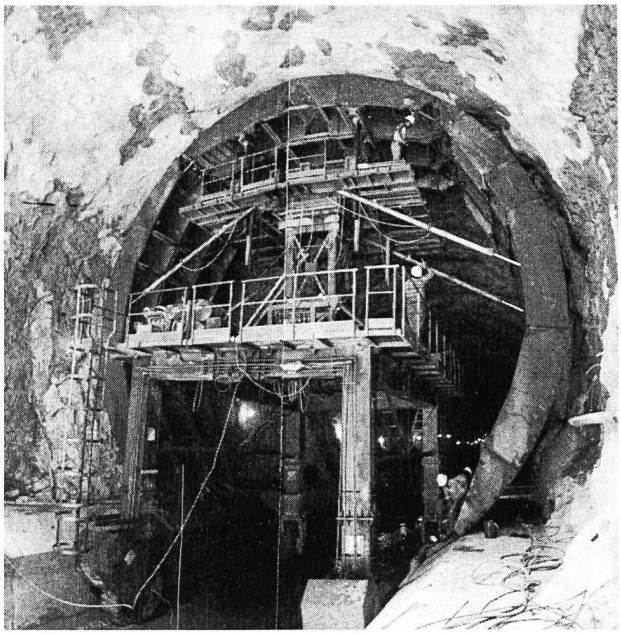


Bild 1. Umleitstollen der Anlage El Cajón, Honduras. Der Durchmesser beträgt 13 m. Auslauf. Diese Aufnahme wurde freundlicherweise durch die am Bau beteiligte Firma Losinger AG zur Verfügung gestellt.

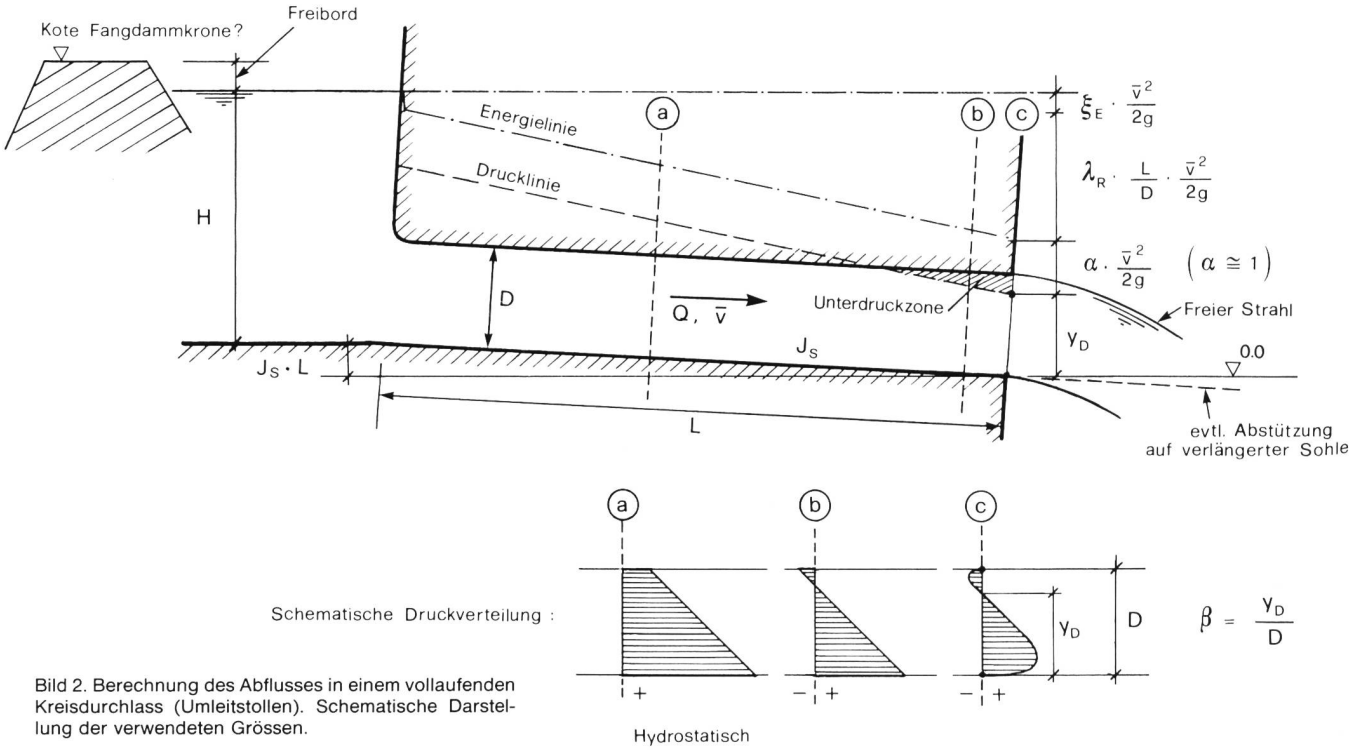


Bild 2. Berechnung des Abflusses in einem vollaufenden Kreisdurchlass (Umleitstollen). Schematische Darstellung der verwendeten Grössen.

durch eine nicht-hydrostatische Druckverteilung und eine Asymmetrie der Geschwindigkeitsprofile gekennzeichnet ist. Da diese Stromfädenkrümmung im Endquerschnitt unbekannt ist, kann der dadurch erzeugte Unterdruck kaum berechnet werden. Die Lage der Drucklinie unter dem Stollenscheitel hängt von der tatsächlichen Druckverteilung am Auslauf, von den Rohrcharakteristiken, von der eventuellen Abstützung des Austrittstrahles auf die verlängerte Rohrsohle und endlich von der Durchflussmenge ab.

Mehrere Autoren (siehe Literaturangaben) haben sich mit diesem Problem befasst. Obwohl einige analytische Näherungslösungen vorliegen [6], werden in der Praxis eher die zahlreichen Resultate experimenteller Arbeiten verwendet. Als erste Approximation wird die Höhe des Druckniveaus am Auslaufende durch den Schnittpunkt, mit dem Rohrendquerschnitt, der verlängerten, in der ausgebildeten Strömungszone gemessenenen Drucklinie bestimmt. Hier wird diese Höhe mit y_D bezeichnet. Wie üblich in der Literatur wird somit der Faktor $\beta = y_D/D$ definiert, wobei D den Rohrdurchmesser darstellt (Bild 2).

Aus dem anhand Piezometerablesungen und mittels einer Regression gewonnenen Druckliniengradient lassen sich y_D und also β experimentell ermitteln. Durch die Anwendung des Bernoulli-Satzes wird die Energielinienhöhe H vor dem Rohreinlauf durch den folgenden Ausdruck gegeben (Bild 2):

$$H_{[m]} = y_D + \frac{\bar{v}^2}{2g}\left(\alpha + \lambda_R \frac{L}{D} + \xi_E\right) - J_s L \qquad (1)$$

wobei

$\bar{v} = \frac{4Q}{\pi \cdot D^2}$ = mittlere Durchflussgeschwindigkeit im Rohrquerschnitt [m/s]

Q = Durchflussmenge [m³/s]
L = gesamte Rohrlänge [m]
J_s = Sohlengefälle [–]
g = Erdbeschleunigung [m/s²]
λ_R = Reibungskoeffizient nach Darcy-Weisbach [–]
ξ_E = Einlaufbeiwert [–]
α = Beiwert der Geschwindigkeitsverteilung [–] (meistens wird $\alpha = 1$ gesetzt)
y_D = Druckhöhe im Rohrendquerschnitt [m]

In dieser Betrachtung wurde vereinfachend angenommen, dass nur Eintritts- und Reibungsverluste vorhanden sind. Alle zusätzlichen Sonderverluste wären gegebenenfalls auch zu berücksichtigen. Ferner wurden die Zulaufgeschwindigkeit v_o bzw. der Beitrag $v_o^2/2g$ vernachlässigt.

Wenn die Bemessungswassermenge $Q = Q_{max}$, die Abmessungen sowie die Reibungscharakteristiken des Rohres gegeben sind und insofern Erfahrungswerte für β vorliegen, kann die maximale Wasserspiegelkote am Einlauf vernünftig berechnet werden. Diese ist dann für die Bestimmung der zulässigen Höhe des oberen Fangdammes massgebend.

3. Lage der Drucklinie im Auslaufquerschnitt

Bei der Dimensionierung von vollaufenden Stollen und Durchlässen wird gewöhnlich die Lage der Drucklinie im Mittelpunkt des Auslaufquerschnittes angenommen. Ohne nähere Informationen über die Strahlgeometrie und über die Gestaltung des Gerinnes unmittelbar nach dem Auslauf wird implizit mit dem Wert $\beta = 0{,}5$ gerechnet. Aus den vorhandenen Versuchsergebnissen zeigt sich aber, dass β meistens wesentlich grösser ist. Durch die getroffene Annahme wird somit ein Fehler in Kauf genommen, der bei abnehmendem Verhältnis H/D immer bedeutender wird.

Drei verschiedene Auslaufkonfigurationen sind dabei zu berücksichtigen:

- Keine Abstützung der Stromfäden unterhalb des Auslaufquerschnittes durch das Vorhandensein einer Sohle oder von Seitenwänden. Der Strahl ist frei, d.h. allseitig belüftet. In diesem Fall ist die Stromfädenkrümmung am grössten und die Drucklinie kann tief unter dem Stollenscheitel liegen (kleine β-Werte).
- Geringe Abstützung des Strahles durch eine ebene Sohle unterhalb des Auslaufs. Dieser Fall betrifft primär den

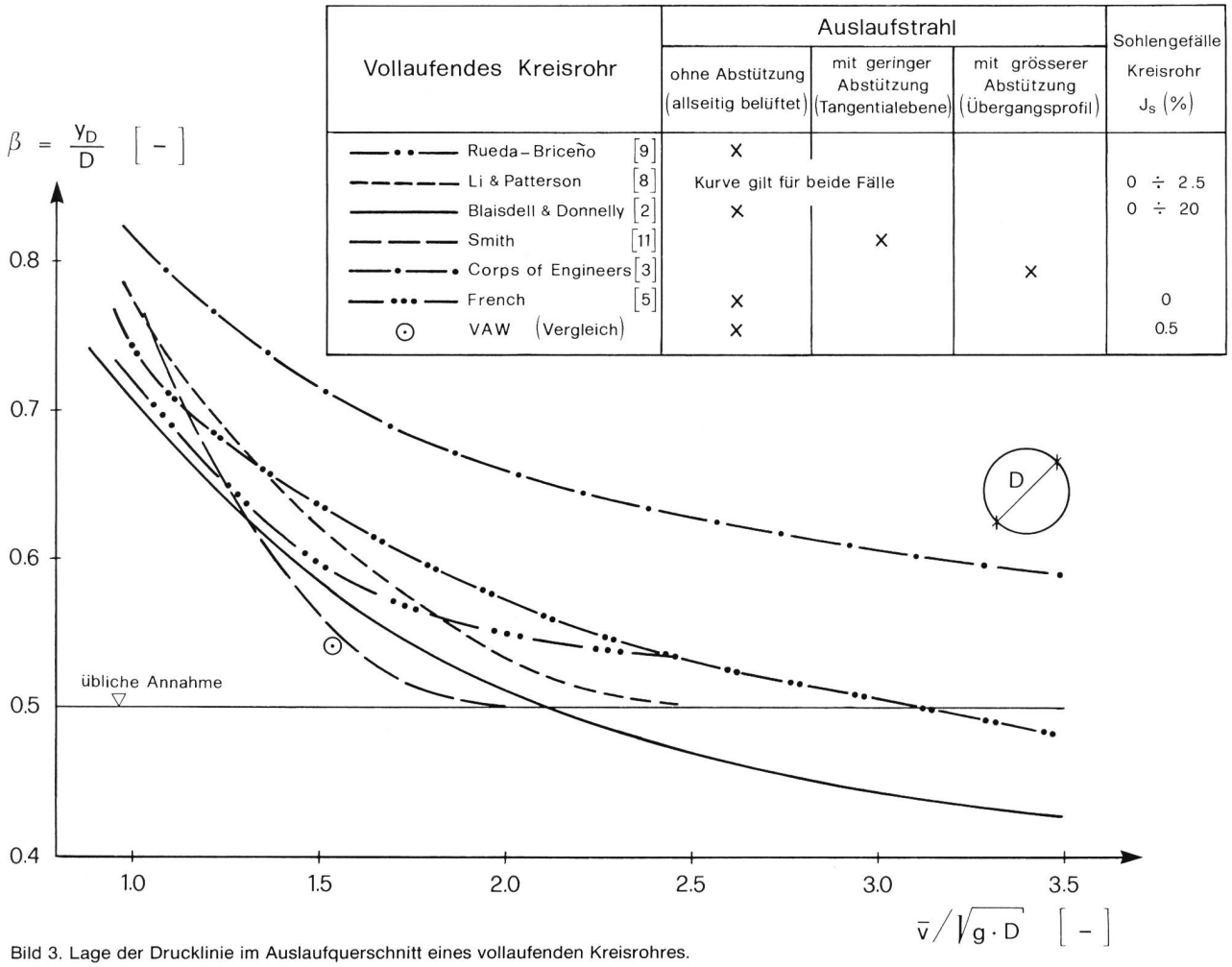


Bild 3. Lage der Drucklinie im Auslaufquerschnitt eines vollaufenden Kreisrohres.

kreisförmigen Stollenquerschnitt, der nur in einem Punkt durch die ebene Sohle berührt wird. Die Strahlausbreitung bleibt ausgeprägt und β ist klein.

- Grössere Abstützung des Strahles durch ein entsprechendes Übergangsprofil (z.B. parabelförmig, trapezförmig mit vertikalen oder geneigten Wänden). Die Strahlausbreitung ist hier wesentlich eingeschränkt. Die Drucklinie rückt näher an den Stollenscheitel (grössere β-Werte).

In der Literatur wird β meistens in Abhängigkeit vom dimensionslosen Faktor $\bar{v}/\sqrt{g \cdot D}$ präsentiert [3, 7, 8, 9]. Es handelt sich um eine Froude'sche Zahl, die aber hier beim vollaufenden Stollen nicht die übliche Bedeutung nach der Hydraulik offener Gerinne besitzt. Diese Darstellungsart wird in den folgenden Diagrammen beibehalten. Der ebenfalls oft verwendete Faktor $Q/D^{5/2}$ [1, 2, 6] hat den Nachteil, mit Dimensionen behaftet zu sein.

Die Zusammenstellung vorhandener Resultate betreffend das vollaufende Kreisrohr ist im Bild 3 ersichtlich. Die gezeigten Kurven $\beta = f(\bar{v}/\sqrt{g \cdot D})$ sind jeweils als Mittelung aus den zahlreichen Messwerten zu betrachten. Obwohl eine zu erwartende Abweichung zwischen diesen Kurven vorliegt, lässt sich das Verhalten von β für verschiedene Auslaufkonfigurationen und Durchflussverhältnisse klar erkennen.

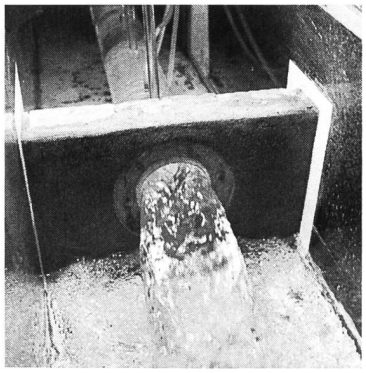
Beim allseitig belüfteten Auslaufstrahl ist β für $\bar{v}/\sqrt{g \cdot D}$ <ca. 2,1 (Kurve [2]) wesentlich grösser als der mit 0,5 üblich angenommene Dimensionierungswert. Eine Zunahme von $\bar{v}/\sqrt{g \cdot D}$ bewirkt eine Reduktion des β-Wertes, der dann sogar unter 0,5 liegen kann.

Aus den Resultaten von *Li* und *Patterson* [8] geht hervor, dass der Einfluss auf β einer geringen Abstützung des Auslaufstrahles bei kreisförmigen Stollenquerschnitten unwesentlich ist. Ferner ist nach *Blaisdell* und *Donnelly* [2] der Einfluss des Sohlengefälles erst bei $J_s >$ ca. 20% von Bedeutung. Diese letzten Versuche wurden in einem Rohr mit $L = 110\,D$ (20 D bei *Li* und *Patterson*), d.h. bei vollausgebildeter Strömung und unter breiter Variation der Parameter Q und J_s durchgeführt. Die entsprechende Kurve [2], Bild 3, scheint für den Fall des allseitig belüfteten Auslaufstrahles repräsentativ zu sein und könnte somit als Dimensionierungsgrundlage gelten.

Zum Vergleich wurde das Ergebnis eines VAW-Versuches ebenfalls ins Diagramm eingetragen. Der erhaltene Wert liegt recht im Streuungsbereich der vorgeschlagenen Kurve (siehe [2]). Die Bilder 4 und 5 zeigen das Modell der untersuchten Rohrleitung mit verschiedenen Auslaufkonfigurationen.

Wenn der Auslaufstrahl eine grössere Abstützung erfährt, was baulich auch der Normalfall sein sollte, nimmt β erheblich zu. Die Kurve [3] wird durch das «US-Corps of Engineers» empfohlen. Diese berücksichtigt die Resultate von Modell- respektive Prototypmessungen an mehreren Entlastungsbauwerken mit Kreisprofil. Sie gilt angenähert für die verschiedensten Formen der Übergangsstrecke (Sohle und Wände) unterhalb des Stollenendquerschnittes und sollte deshalb in der Praxis eine breite Verwendung finden.

Bei kleineren Durchflussmengen besteht die Möglichkeit, dass der allseitig belüftete Auslaufstrahl sich auf eine gewisse Länge oberhalb des Endquerschnittes vom Stollen-



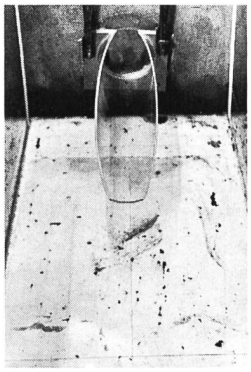


Bild 4, links. Modellversuch. Rohr mit allseitig belüftetem Auslaufstrahl.

Bild 5, rechts. Modellversuch. Übergangsprofil zur Abstützung des Auslaufstrahles.

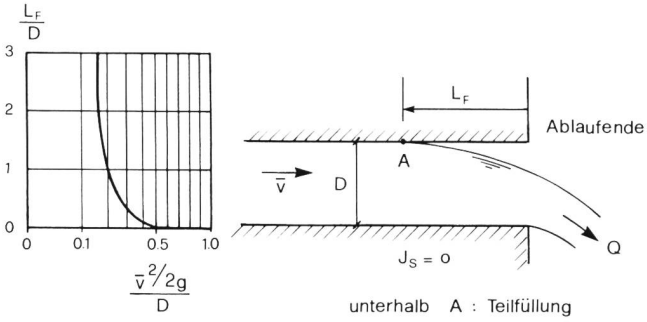


Bild 6. Kreisrohr. Teilfüllungsstrecke oberhalb des Auslaufquerschnittes bei kleinen Durchflussmengen (Diagramm nach *Blaisdell* und *Donnelly* [2]).

scheitel löst. *Blaisdell* und *Donnelly* [2] haben für das Kreisrohr eine Grenzkurve angegeben, mit welcher diese Teilfüllungsstrecke bestimmt werden kann (Bild 6). In einer dimensionslosen Darstellung wird L_F/D in Funktion von $\bar{v}^2/2gD$ aufgetragen, wobei dieser letzte Ausdruck einfach gleich $0{,}5\,(\bar{v}/\sqrt{g\cdot D})^2$ ist.

Teilfüllung tritt somit bei $\bar{v}/\sqrt{g\cdot D} \leqq$ ca. 1 auf. In diesem Bereich wurden die Werte der Kurve [2], Bild 3, durch die Verlängerung bis zum Auslaufquerschnitt der für die Strecke mit Vollfüllung massgebenden Drucklinie ermittelt.

Die Druckverhältnisse am Auslauf eines vollaufenden quadratischen Rohres wurden ebenfalls experimentell untersucht. Anstelle von D und $y_D = \beta D$ treten hier die Grössen B und βB auf. Bild 7 zeigt die Variation von β mit $\bar{v}/\sqrt{gB}$ für ein horizontales Rohr. Aus dem Vergleich der Bilder 3 und 5 lässt sich kein markanter Unterschied zwischen den Kurven feststellen. Beim quadratischen Querschnitt liegen die Werte nach *Li* und *Patterson* [8] etwas höher als beim Kreisrohr. Hingegen ist die Abstützung des Auslaufstrahles durch die einfache Verlängerung der ebenen Sohle wesentlich wirksamer.

Der Einfluss der Sohlenneigung auf β bleibt bis $J_s \leqq$ ca. 2,5 % unbedeutend. Bei $J_s = 5\,\%$ und besonders für den abgestützten Strahl wird eindeutig eine Erhöhung der Drucklinie feststellbar (Bild 8).

4. Bestimmung von β: Vergleiche

Beispielsweise soll der Wert β für einen kreisförmigen Umleitstollen ermittelt werden, der ähnliche Charakteristiken wie derjenige von El Cajón aufweist (siehe Abschnitt 1). Mit $D = 13$ m und beim maximalen Durchfluss $Q = 2300$ m³/s läuft der Stollen voll. Die mittlere Geschwindigkeit $\bar{v}$ beträgt somit 17,3 m/s und $\bar{v}/\sqrt{g\cdot D} = 1{,}53$.

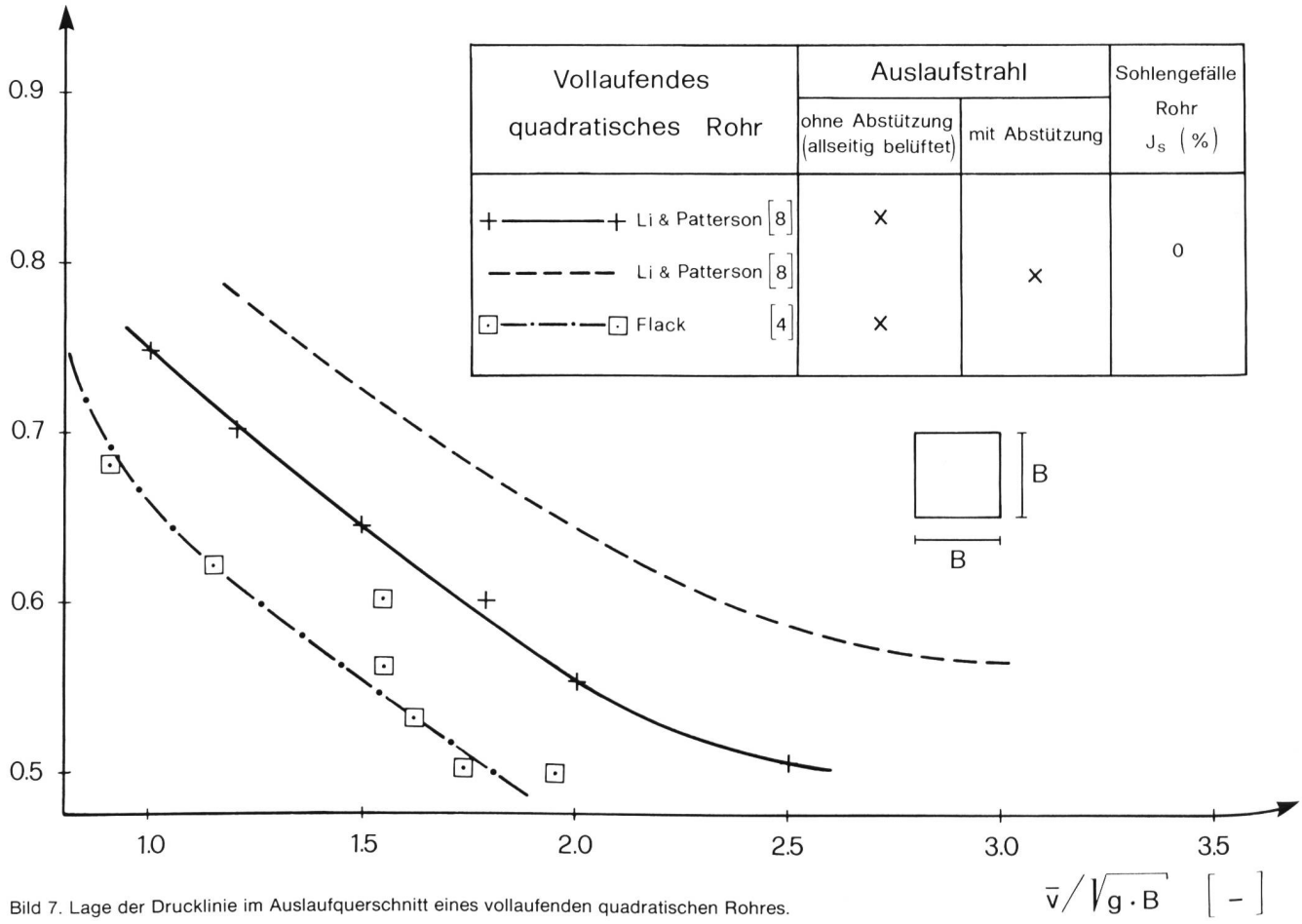


Bild 7. Lage der Drucklinie im Auslaufquerschnitt eines vollaufenden quadratischen Rohres.

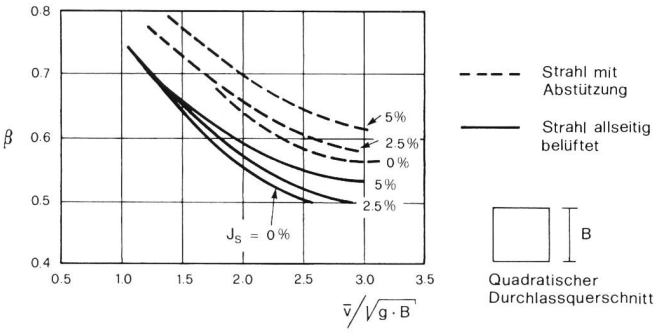


Bild 8. Quadratisches Rohr. Einfluss der Sohlenneigung auf β (Nach *Li* und *Patterson* [8]).

Unter der Annahme eines freien, allseitig belüfteten Auslaufstrahles wird nach *Blaisdell* und *Donnelly* $\beta = 0{,}58$ (Bild 3, Kurve [2]). Wenn aber der Strahl durch die Sohle und die Wände unterhalb des Endquerschnittes gut abgestützt ist, wird $\beta = 0{,}71$ (Kurve [3]). Diese Resultate unterscheiden sich wesentlich vom oft verwendeten Wert $\beta = 0{,}5$ und lassen für das gewählte Beispiel Abweichungen gemäss Tabelle 1 bei der effektiven Höhe der Drucklinie y_D am Stollenende erkennen.

Tabelle 1. Abweichungen bei der effektiven Höhe der Drucklinie y_D am Stollenende.

	β_{eff} [-]	$y_D = \beta_{eff} \cdot D$ [m]	$0.5 \cdot D$ [m]	$\Delta = (\beta_{eff} - 0.5) \cdot D$ [m]
Allseitig belüfteter Strahl				
- Blaisdell und Donnelly [2]	0.58	7.54	6.50	+ 1.04
Als Vergleich:				
- Rueda-Briceno [9]	0.63	8.19	6.50	+ 1.69
- French [5]	0.59	7.67	6.50	+ 1.17
Strahl mit grösserer Abstützung				
- Corps of Engineers [3]	0.71	9.23	6.50	+ 2.73

Die mit $y_D = 0{,}5\ D$ statt $\beta_{eff}\ D$ durchgeführte Berechnung des maximalen Rückstaus im Oberwasser würde in diesem Fall eindeutig zu tiefe Werte liefern, die die Sicherheit der Baustelle gegen eine allfällige Überflutung ungünstig beeinflussen könnten.

5. Drosselstrecke unterhalb eines Regenüberlaufes

Der Regenüberlauf mit anschliessender Drosselstrecke ist einer der Standardbauwerke der Kanalisationstechnik und als solcher gut bekannt [7, 10]. Bei der Dimensionierung der Drosselstrecke, respektive des Überlaufes oberhalb derselben, kann ähnlich wie bei Umleitstollen und Durchlässen die genauere Kenntnis der Druckverhältnisse im Auslaufquerschnitt von Bedeutung sein. Als Beispiel soll hier die Bestimmung der erforderlichen Wehrschwellenhöhe an einem Streichwehr mit hochgezogener Schwelle in Betracht gezogen werden. Als Grundlage wird dabei die SIA-Dokumentation 40, Regenüberlauf Typ b benutzt [10].

Die Anlage dient der Regenwasserentlastung bei Mischkanalisationen und soll die Zuflussmengen $Q_o \leqq Q_{krit}$ zur Kläranlage führen, ohne dass der seitliche Überlauf anspringt (Bild 9a). Das Bild 9b zeigt der Betriebsfall mit $Q_o > Q_{krit}$. Beim maximalen Zufluss $Q_{o_{max}}$, der ein Vielfaches von Q_{krit} darstellt, kann trotz der Entlastung über die

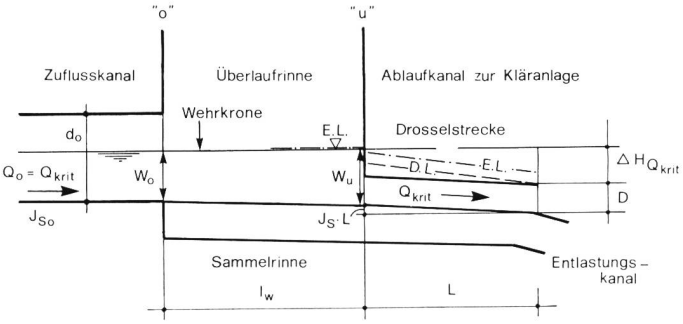


Bild 9a. Regenüberlauf: Längsschnitt. Abfluss von Q_{krit}. Die Drosselstrecke läuft voll, ohne Entlastung über die Wehrkrone ($Q_w = 0$).

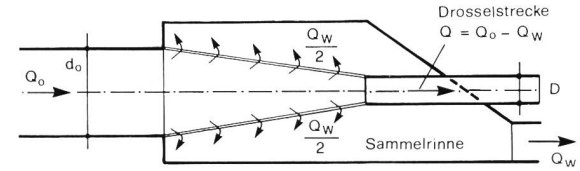


Bild 9b. Regenüberlauf: Grundriss. $Q_o > Q_{krit}$.

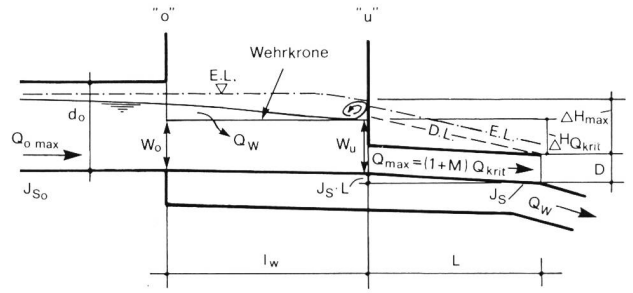


Bild 9c. Regenüberlauf unter extremen Randbedingungen. Maximaler Zufluss $Q_{o_{max}}$. Abfluss der maximalen Klärwassermenge $Q = Q_{max}$. Entlastung von Q_w über die Wehrkrone.

Wehrkrone nicht verhindert werden, dass eine Mehrbelastung der Kläranlage vorkommt. Statt Q_{krit} wird unter diesen extremen Bedingungen $Q = Q_{max} = (1 + M)\ Q_{krit}$ abgeführt. Die Mehrbelastung M ist je nach dem vorhandenen Regenüberlauftyp verschieden. Sie soll aber möglichst klein gehalten werden (Bild 9c).

In diesen Bildern bedeuten:

J_{so}, d_o	Sohlenneigung bzw. Durchmesser des Zulaufkanals
w_o, w_u	Streichwehrhöhen
l_w	*Wehrlänge*
J_s, D	Sohlenneigung bzw. Durchmesser des Ablaufkanals (Drosselstrecke)
$\Delta H_{Q_{krit}}$	Energiehöhe bei Q_{krit}
ΔH_{max}	Energiehöhe bei Q_{max}

Für Q_{krit} läuft die Drosselstrecke unter Druck. Wenn die Grössen D, J_s, L und der Rauhigkeitsbeiwert λ_R (oder $k_{Strickler}$) ebenfalls bekannt sind, kann die Streichwehrhöhe w_u nach Bernoulli bestimmt werden. Wie unter 2 bemerkt, soll aber die effektive Lage der Drucklinie im Auslaufquerschnitt dabei berücksichtigt werden. In der SIA-Dokumentation 40 [10] wird diese im Scheitel des Ablaufkanals angenommen (siehe Bild 9a). Es folgt, ähnlich wie bei Gleichung (1), Abschnitt 2 und mit $y_D = D$:

$$w_u + J_s \cdot L = D + \Delta H_{Q_{krit}}$$

und daraus

$$w_{u\,[m]} = D + \frac{\bar{v}^2}{2g}\left(\alpha + \lambda_R \frac{L}{D} + \xi_E\right) - J_s \cdot L \qquad (2)$$

wo

$$\bar{v} = \frac{4 \cdot Q_{krit}}{\pi \cdot D^2} \text{ und } \alpha \cong 1$$

Die hier getroffene Annahme $y_D = D$, d. h. $\beta = 1$ setzt voraus, dass das Druckniveau im Auslauf durch den Unterwasserstand bestimmt wird. Sobald aber der austretende Strahl sich einigermassen ausbreiten kann oder sogar ganz frei läuft, liegt zwangsweise die Drucklinie unterhalb des Stollenscheitels. Für β sollten dann die Angaben des Bildes 3 gelten. Die nach der Gleichung (2) bestimmte Streichwehrhöhe w_u ist möglicherweise um den Betrag $\triangle = D - y_D \equiv D(1-\beta)$ zu hoch. Die Drosselstrecke kann infolgedessen eine Menge $Q_{eff} > Q_{krit}$ abführen, bevor der seitliche Überlauf beansprucht wird. Aus dem durchgeführten Dimensionierungsbeispiel (siehe [10], 3.2.4) mit $Q_{krit} = 0{,}180\,m^3/s$, $J_s = 5‰$, $l_w = 35$ m, $D = 0{,}35$ m, $\beta = 1$, werden $w_u = 0{,}84$ m und $\triangle H_{Qkrit} = 0{,}665$ m. Unter Berücksichtigung der Stromfädenkrümmung am Auslauf der Drosselstrecke und mit der Annahme eines freien, nicht abgestützten Strahles lassen sich vergleichsweise die Grössen gemäss Tabelle 2 aus dem Bild 3 bestimmen (Kurve [2] nach *Blaisdell* und *Donnelly*).

Tabelle 2. Die wichtigsten Grössen im Dimensionierungsbeispiel für die Drosselstrecke.

$\bar{v} = \frac{4Q_{krit}}{\pi \cdot D^2}$ [m/s]	$\frac{\bar{v}}{\sqrt{g\,D}}$ [-]	β [-]	$\Delta = D(1-\beta)$ [m]	$w_{u_{erf}}$ [m]	$\frac{\lvert w_{u_{erf}} - w_u \rvert}{w_u}$ [%]	$\frac{Q_{eff}}{Q_{krit}} = \sqrt{\frac{\Delta H_{Q_{krit}} + \Delta}{\Delta H_{Q_{krit}}}}$ [-]
1.87	1.01	0.705	0.10	0.74	12	1.07

In diesem Fall führt die Wahl von $\beta = 1$ zu einer um ca. 12% zu hohen Streichwehrkrone, und die Mehrbelastung vor dem Anspringen des Überlaufes beträgt ca. 7%.
Wenn zum Beispiel die Lage der Drucklinie mit $\beta = 0{,}5$ im Mittelpunkt des Auslaufquerschnittes angenommen würde, wäre dann $w_{u\,gerechnet}$ kleiner als $w_{u\,erforderlich}$. Der Überfall wäre schon in Betrieb, bevor Q_{krit} erreicht ist.

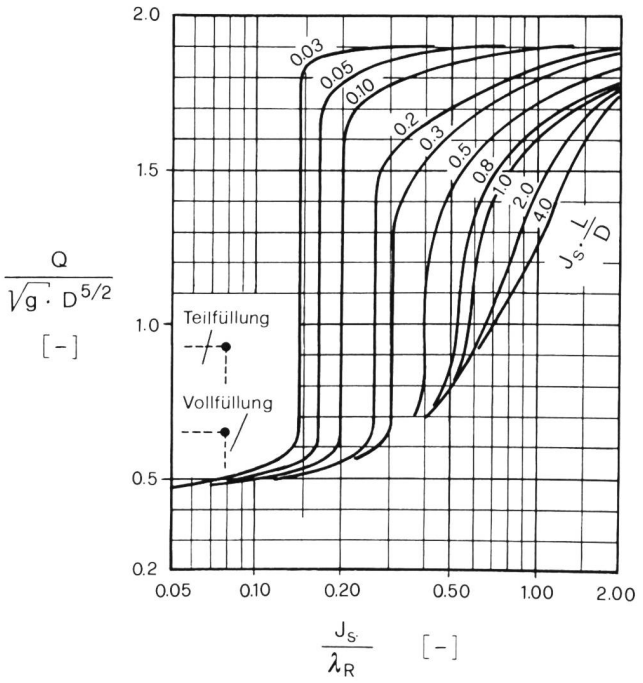


Bild 10. Bedingungen für ein selbsttätiges Füllen der Drosselstrecke, [7] [8].

In den oberen Betrachtungen wird ein stabiles Vollaufen der Drosselstrecke bei Q_{krit} vorausgesetzt. Als Beurteilungsgrundlage kann das Diagramm des Bildes 10 nach *Li* und *Patterson* [8], respektive *Kallwass* [7], benutzt werden. Dieses gilt für kreisförmige Röhre mit scharfkantigem Einlauf und erlaubt die Kontrolle, ob ein selbsttätiges Füllen bei den jeweils gegebenen Charakteristiken Q, D, L, J_s und λ_R stattfindet.

6. Schlussfolgerungen

Die genauere Kenntnis der Drucklinienlage im Auslaufquerschnitt eines vollaufenden, vom Unterwasser nicht rückgestauten Stollens ist erforderlich, wenn bei kleineren Verhältnissen H/D die Wasserspiegelkoten oberhalb des Einlaufes mit genügender Sicherheit bestimmt werden sollen. Erfahrungswerte $\beta = f(\bar{v}/\sqrt{g \cdot D})$ liegen vor (Bilder 2, 3 und 7). Bei der Wahl des entsprechenden β-Wertes ist neben den hydraulischen und geometrischen Charakteristiken des Stollens auch noch die Konfiguration der Strecke unmittelbar unterhalb des Auslaufes massgebend. Dabei ist abzuklären, ob der austretende Strahl frei, d. h. allseitig belüftet ist oder ob eine wesentliche Abstützung durch die Sohle und die Seitenwände im Übergangsprofil gewährleistet wird.

Literatur

[1] *Blaisdell, F. W.*, «Hydraulics of Closed Conduit Spillways – Part I – Theory and Its Application». University of Minnesota, Saint Anthony Falls, Hydraulic Laboratory, Technical Paper No. 12, Series B, January 1952, revised February 1958

[2] *Blaisdell, F. W., and Donnelly, C. A.*, «Hydraulics of Closed Conduit Spillways. Part X – The Hood Inlet.» University of Minnesota, Saint Anthony Falls Hydraulic Laboratory, Technical Paper No. 20, Series B, April 1958

[3] Corps of Engineers «Hydraulic Design Criteria», U.S. Army Engineer, Waterways Experiment Station, Vicksburg, 1959, Sheet 225-1, revised 1964

[4] *Flack, J. E.*, Discussion of «Free outlets and self-priming action of culverts» by *Li, W. H.* and *Patterson, C.*, (see ref [8], Proc. ASCE, 1957, HY 1

[5] *French, J. L.*, «Second Progress Report on Hydraulics of Culverts, Pressure and Resistance Characteristics of a Model Pipe Culvert.» National Bureau of Standards, U.S. Department of Commerce, Washington, D.C., Report 4911, October 29, 1956

[6] *French, J. L.*, Discussion of «Free outlets and self-priming action of culverts» by *Li, W. H.* and *Patterson, C.*, (see ref. [8]), Proc. ASCE 1957, HY 1

[7] *Kallwass, G. J.*, «Beitrag zur hydraulischen Berechnung gedrosselter seitlicher Regenüberläufe», Diss. TH Karlsruhe, 1964

[8] *Li, W. H.* and *Patterson, C.*, «Free outlets and self-priming action of culverts». Proc. ASCE, 1956, HY 3, Paper 1009

[9] *Rueda-Briceno, D.*, «Pressure conditions at the outlet of a Pipe». M. S. thesis submitted to the State University of Iowa, February 1954

[10] SIA (Schweiz. Ingenieur- und Architekten-Verein)-Dokumentation 40: «Sonderbauwerke der Kanalisationstechnik I, Hydraulische Berechnungsgrundlagen und konstruktive Hinweise», 2. Auflage, 1982

[11] *Smith, C. D.*, «Hydraulic Design for an outlet Structure». Rivers 76, Vol. II. Symposium ASCE, Fort Collins, 1976

[12] VAW «Regenauslässe Riehenstrasse, Basel» Bericht Nr. 757 über hydraulische Modellversuche, März 1980 (nicht veröffentlicht)

[13] VAW «Projet El Cajón, Galerie de dérivation». Rapport des essais hydrauliques complémentaires effectués, mai 1980 (nicht veröffentlicht)

Adresse des Verfassers: Dr. *Félix Raemy*, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH-Zentrum, CH-8092 Zürich.