Zeitschrift: Schweizer Ingenieur und Architekt
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 103 (1985)
Heft: 20

Artikel: Vereinfachte hydraulische Berechnung von Sammelkanälen
Autor: Hager, Willi H.
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-75789

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: 07.01.2026

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

Der Korrosionsschutz besteht aus 2×40-µ-Zweikomponenten-Zinkstaubanstrich mit 40 bis 50-µ-Zweikomponenten-Glimmerfarbe. Den Deckanstrich brachte der Bauunternehmer auf der Baustelle auf.

Fabrikation und Transport

Die Fabrikation der Stahlkonstruktion bot, abgesehen von den knappen Terminen, keine Probleme, die das Mass einer normalen Stahlkonstruktion übersteigen. Zu erwähnen ist, dass die Werkstattpläne für beide Turbinenhallen bei Geilinger AG gezeichnet wurden, dass jedoch die Fabrikation je bei einer der beiden Partnerfirmen erfolgte.

Ursprünglich war vorgesehen, die zwei ersten Lose der Turbinenhalle A, die erste Hälfte des Schaltgebäudes und einige kleine Gebäude mit Lastwagen, den Rest mit Schiffen zu transportieren. Aus Termingründen musste dann auch das dritte Los der ersten Turbinenhalle auf dem Landweg spediert werden.

Folgende Transporte wurden demzufolge abgewickelt:

- 56 Lastwagen mit etwa 300 t Stahlkonstruktion, Blechen und Isolationsmaterial (Bild 21),
- 13 Seetransporte mit etwa 3900 t Stahl und Blechen.

Für die Montage wurden Offerten der Firmen Geilinger AG und Giovanola SA eingeholt. Aus verschiedenen Gründen - Giovanola SA hatte bereits die Kraftwerkanlage Riyadh 5 Erweiterung montiert und war im Konsortium mit Buss AG als Montagefirma für die Kamine bereits auf der Baustelle - hat sich das Konsortium GZM für eine Untervergabe an die Firma Giovanola SA entschieden.

Ab Montagebeginn wurden während der ersten Monate pro Woche 100 bis 150 t Stahl fertig montiert und rund 1000 m² Profilbleche als Schalung für die Verbunddecken verlegt. Für diese Arbeiten wurden etwa 8 Europäer und 8 bis 10 Inder eingesetzt. Auftretende Probleme konnten dank der guten Zusammenarbeit mit der Bauleitung von IP4, die während langer Zeit den für die Statik verantwortlichen Ingenieur auf der Baustelle hatte, immer rasch und kooperativ gemeistert werden.

Zusammenfassung und Aussichten

Ende November 1983 haben die letzten Monteure des Konsortiums GZM die Baustelle verlassen. Rückblickend kann gesagt werden, dass das Projekt, trotz verschiedener Spezialfälle, vor allem in administrativer Richtung, ohne nennenswerte Probleme abgewickelt werden konnte. Dies vor allem dank guter Zusammenarbeit mit dem Auftraggeber, BBC Baden, und dem Planer IP4. Dank gebührt aber auch allen Beteiligten in den Bereichen Konstruktion, Fabrikation, Transportadministration und Finanz- und Rechnungswesen.

Leider sind die Aussichten für weitere derartige Projekte für Stahlbauunternehmungen nicht sehr vielversprechend. Die Gründe, die den Export z.B. nach Saudi-Arabien erschweren, sind:

- Verknappung der Mittel, selbst bei den reichsten Ländern unserer Erde,
- harte Konkurrenz aus dem Fernen Osten,
- protektionistische Massnahmen zum Schutz der einheimischen Stahlbauindustrie.

Es bleibt zu hoffen, dass sich auch für die Schweizer Stahlbauindustrie baldmöglichst der vielzitierte Silberstreifen am Export-Horizont einstellt. Dadurch könnte der Druck auf dem Schweizer Markt etwas abgebaut und der ruinöse Konkurrenzkampf reduziert werden.

Adresse des Verfassers: *Bruno Simioni*, dipl. Ing. ETH/SIA, Leiter der technischen Büros Bülach des Stahlbaudepartementes, Geilinger AG, 8180 Bülach
Hansjörg Zingg, Bau-Ing. HTL, Interplan-4-AG-Partnerbüro Plüss + Meyer Bauingenieure AG, Grendelstrasse 5, 6004 Luzern.

Vereinfachte hydraulische Berechnung von Sammelkanälen

Willi H. Hager, Lausanne

Mittelwertbetrachtungen erlauben die vereinfachte, hydraulische Berechnung von stetigen Abflüssen in Sammelkanälen aufgrund des Impulssatzes. Durch Einführung eines Ersatzquerschnitts gelten die Resultate für beliebige Profile. Das Berechnungsverfahren wird durch Beispiele erläutert; es wird vorteilhaft tabellarisch durchgeführt. Der prismatische Sammelkanal weist geringe mechanische Energieverluste sowie kleine Wasserspiegeländerungen über die Einleitungsstrecke auf.

Application of the momentum equation in the flow direction yields the hydraulic flow features in channels with spatially increasing discharge and arbitrary cross-section. The computation procedure is best performed in a tabulated scheme and is illustrated by examples. The prismatic channel is characterized by minimum energy dissipation and by the smallest change of the flow depths.

1. Einleitung

Sammelrinnen sind Vereinigungsbauwerke mit relativ grosser Längsausdehnung; sie nehmen Flüssigkeit aus Becken und parallel liegenden Kanälen seitlich auf. Diese Zuflussverteilung ist nahezu uniform je Längeneinheit und bezüglich der Einleitungsrichtung ungefähr senkrecht zur Achse der Sammelrinne.

Die Grundlagen zur Berechnung von Sammelkanälen stammen von *Favre* [1]; seine experimentellen und theoretischen Untersuchungen beziehen sich auf stetige Abflüsse mit zu- und abnehmendem Durchfluss. Als Resultat erhält er eine erweiterte Gleichung der Stau- und Senkungskurven mit örtlich variablem Durchfluss, die für Spezialfälle einfach lösbar ist. Weitere Forschungsbeiträge sind hauptsächlich von Italienern erzielt worden. Eine Zusammenstellung der bisher gefundenen Resultate ist aus [3] ersichtlich.

2. Anwendung des Impulssatzes

Bild 1 zeigt die möglichen Wasserspiegel in der prismatischen Sammelrinne nach *de Marchi* [4]. Sie lassen sich aus Differentialgleichungen berechnen, die in [3] ausführlich diskutiert und gelöst sind.

In den folgenden Untersuchungen werden praxisorientierte Lösungen gesucht. Gegenüber den erwähnten, die den örtlichen Verlauf des Wasserspiegels als Resultat ergeben, betrachten wir lediglich die beiden Begrenzungsquerschnitte der Sammelrinne. Nach [2] lässt sich für überschlägige, hydraulische Berechnungen ein rechteckiges Ersatzprofil anstelle des effektiven Querschnitts einführen. Bezeichnen h und F die Wassertiefe und die Querschnittsfläche an einer beliebigen Stelle x, so gilt im Ersatzprofil

(1) $$h_{ersatz} = h,$$

(2) $$b_{ersatz} = F/h,$$

wobei die Ersatzbreite im folgenden mit b bezeichnet wird.

Wir betrachten nun eine rechteckige, nichtprismatische Sammelrinne mit der Länge L und dem Sohlengefälle J_s. Mit dem Impulssatz erhalten wir eine Beziehung zwischen den Wassertiefen im Zu- und Ablauf der Sammelrinne. Die beiden Begrenzungsquerschnitte werden mit o und u, also oben und unten bezeichnet. Bild 2 zeigt Ansicht und Grundriss des Berechnungsmodells mit J als reduziertem Gefälle.

Der seitliche Zufluss übe keinen Impulsanteil in Fliessrichtung aus, er sei also bezüglich der Sammelrinne nicht eingestaut und besitze beim Auftreffen auf die Wasseroberfläche keine Geschwindigkeitskomponente in der Richtung der Kanalachse.

Wie das Bild 2 zeigt, sind dann die folgenden Impulsanteile zu berücksichtigen:

- Stützkräfte im Zu- und Auslauf der Sammelrinne,
- Wandreaktion in Fliessrichtung x,
- Bodenreaktion in Fliessrichtung infolge des Gewichts der Flüssigkeit,
- Wandreibungskraft.

Die Stützkraft S im Ersatzprofil beträgt

(3) $$S = \rho g \left(\frac{bh^2}{2} + \frac{Q^2}{gbh} \right) .$$

Die drei restlichen Kräfte sind ausführlich in [2] hergeleitet und hier ohne Ableitung angegeben. Für die Wandreaktion folgt $W = \rho g\,(b_u - b_o)\,h_m^2/2$ mit h_m als massgebende Abflusstiefe längs der Einleitungsstrecke. Näherungsweise gilt für $h_m^2 = (h_o^2 + h_u^2)/2$, womit

(4) $$W = \rho g\,(b_u - b_o) \left(\frac{h_o^2 + h_u^2}{4} \right) .$$

Das Gewicht G des Wasserkörpers im Sammelkanal beträgt $G = (b_o + b_u)\,(h_o + h_u)\,\rho g L/4$; als Horizontal-Komponente Z für den relativ schwach geneigten Kanal folgt $Z = GJ_s$. Die Wandreibungs-Komponente R in Fliessrichtung schliesslich ist $R = J_{r,m}\,F_m$ mit

$J_{r,m} = (J_{r,o} + J_{r,u})/2$ als mittlerem Wandreibungs-Gradienten

und $F_m = (b_o + b_u)\,(h_o + h_u)/4$ als mittlerem Querschnitt. Bezeichnet man die Differenz von Sohlen- und mittlerem Reibungsgefälle mit $J = J_s - J_{r,m}$, so ergibt sich für die Differenz $D = Z - R$ der Ausdruck

(5) $$D = \rho g \frac{J(b_o + b_u)\,(h_o + h_u)}{4} L .$$

Der Impulssatz, angewandt auf die Sammelrinne zwischen den Schnitten «o» und «u», besagt

(6) $$S_o - S_u + W + D = 0 .$$

Mit den dimensionslosen Parametern

(7) $$y = h_o/h_u ,\ \beta = b_o/b_u ,\ f = Q_u^2 / (g b_u^2 h_u^3) ,$$
$$q = Q_o/Q_u ,\ j = JL/h_u$$

entsteht dann die Beziehung

(8) $$y^3\beta\,(1+\beta) + j\beta y^2\,(1+\beta) + \beta y\,[(j-1)\,(1+\beta) - 4f] + 4fq^2 = 0 .$$

Die Unbekannte y ist darin in Abhängigkeit der vier Parameter β, f, q und j als Polynom dritten Grades dargestellt. Mit den beiden Substitutionen

(9) $$p = q^2/\beta ,\ r = \frac{2f}{1+\beta}$$

folgt

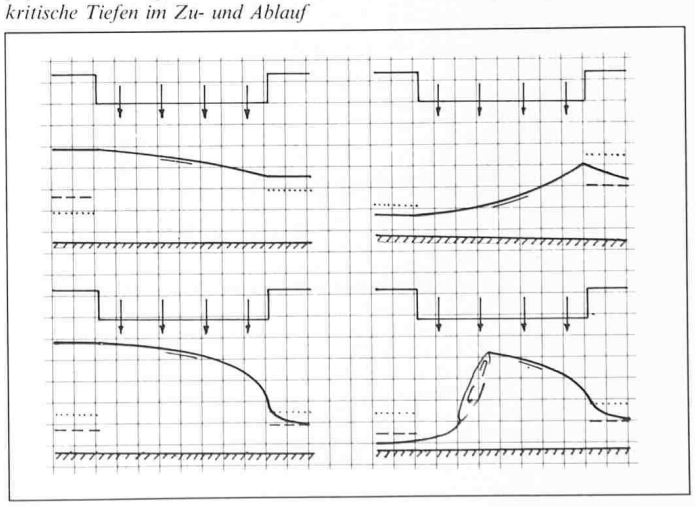
(10) $$y^3 + jy^2 - y(1 - j + 2r) + 2pr = 0 .$$

Für vorgegebene Werte von j, p und r ergeben sich für y entweder eine oder drei reelle Lösungen. Sie werden unten diskutiert. J_s und $J_{r,m}$ liegen meistens in der Grössenordnung von einigen Promillen bis zu wenigen Prozenten. Da Sammelrinnen durchwegs mit positivem Sohlengefälle ausgebildet sind, wird der Betrag von J immer kleiner als J_s oder $J_{r,m}$; normalerweise folgt für $|J| \ll 1$. Da in Beziehung (10) der Zusammenhang zwischen vier voneinander unabhängigen Parametern beschrieben wird, eine zeichnerische Auswertung aber lediglich denjenigen zwischen drei zulässt, setzen wir näherungsweise $J = 0$ und erhalten dann Bild 3.

Gemäss den eingeführten Substitutionen lässt sich Gleichung (10) auf unterwasserseitig strömende Abflüsse anwenden. Für den umgekehrten Fall führen wir überstrichene Parameter ein

(11) $$\bar{y} = h_u / h_o ,\ \bar{\beta} = b_u / b_o ,\ \bar{f} = Q_o^2/(g b_o^2 h_o^3) ,$$
$$\bar{q} = Q_u/Q_o ,\ \bar{j} = JL/h_o .$$

Bild 1. Klassifikation der Wasserspiegel in der prismatischen Sammelrinne nach [4]. Fliessrichtung von links nach rechts. · · · · · Normalabflusstiefen, — — — — kritische Tiefen im Zu- und Ablauf



Durch die Transformationen $\beta \to \beta$, $\bar{y} \to y$, $\bar{q} \to q$ und $\bar{j} \to -j$ sowie

$$\bar{p} = \bar{q}^2/\bar{\beta}\ ,\ \bar{r} = 2\bar{f}/(1+\bar{\beta}) \tag{12}$$

entsteht direkt Gleichung (10). Somit sind die Resultate nach Bild 3 für strömenden und schiessenden Abfluss direkt anwendbar. Je nach Berechnungsrichtung, strömendem Abfluss entgegen und schiessendem Abfluss in Fliessrichtung, müssen deshalb die Parameter (7) oder (11) verwendet werden. Bei schiessendem Zufluss zur Sammelrinne ist nur das Vorzeichen von j in $-\bar{j}$ zu ändern; anstelle von Gleichung (8) entsteht dann

$$\bar{y}^3\,\bar{\beta}(1+\bar{\beta}) - \bar{j}\bar{\beta}\bar{y}^2(1+\bar{\beta}) - \bar{\beta}\bar{y}[(1+\bar{j})\,(1+\bar{\beta})+4\bar{f}\,] + 4\bar{q}^2\bar{f} = 0\ . \tag{13}$$

3. Diskussion der Resultate

Die Diskussion der Resultate lässt sich am einfachsten für den Fall $J=0$ durchführen. Das mittlere Reibungsgefälle entspricht dann dem Sohlengefälle der Sammelrinne. Aufgrund der direkten Korrelation der Parameter bezüglich des Ober- und Unterwasser-Begrenzungsquerschnitts der Sammelrinne lassen sich die verschiedenen Abflüsse allein mit Bild 3 diskutieren.

Die übersichtlichste Diskussion ergibt sich für die *prismatische Sammelrinne*, $\beta=\bar{\beta}=1$, womit $p=q^2<1$ und $r=f<1$, resp. $\bar{p}=\bar{q}^2>1$ und $\bar{r}=\bar{f}>1$. Die beiden Linien $p=1$, entsprechend

$$y = 1 \text{ und } y = \left(\sqrt{1+8r} - 1\right)/2 \tag{14}$$

unterteilen das Diagramm in vier Sektoren; $q=\beta=1$ entspricht dem Abfluss im prismatischen Kanal mit konstantem Durchfluss, (14) beschreibt deshalb die identische Lösung $y=1$ sowie die konjugierte Abflusstiefe für den Wassersprung. Das Diagramm lässt folglich die Berechnung des Verhältnisses y für gleichbleibenden und ändernden Abflusszustand entlang der Einleitungsstrecke zu.

Für *strömenden Abfluss im Unterwasser*, $r<1$, wird die Forderung $p<1$ nur in den Sektoren links oben und rechts unten erfüllt, für vorgegebene Werte r und p wird entweder $y>1$ oder $y<p$. Es lässt sich zeigen [3], dass die erste Lösung dem durchgehend strömenden, die zweite dem Abfluss mit Wassersprung auf der Einleitungsstrecke, also oberwasserseitig schiessendem, unterwasserseitig strömendem Abflusszustand entspricht.

Für *schiessenden Abfluss im Oberwasser*, $\bar{r}>1$, gilt $\bar{p}>1$, eine Forderung, die lediglich im Sektor oben rechts erfüllt wird. Für $\bar{y}$ entstehen, je nach der Grösse von $\bar{p}$, keine, eine oder zwei Lösungen. Die Kurven $\bar{r}(\bar{y})$ weisen einen Minimalwert in Abhängigkeit von $\bar{p}$ auf, die zugehörige Kurve $\bar{y}_{min}(\bar{r})$ lässt sich durch Differentiation von Beziehung (8) berechnen und genügt der Bedingung

$$\bar{p} = 2\bar{y}_{min}^3/(3\bar{y}_{min}^2 - 1)\ ; \tag{15}$$

sie ist gestrichelt in Bild 3 eingetragen. Wie sich wiederum anhand der Auswertungen in [3] nachweisen lässt, stellt sich für $\bar{y}<\bar{y}_{min}$ durchwegs schiessender, für $\bar{y}>\bar{y}_{min}$ jedoch ein Fliesswechsel von schiessendem zu strömendem Abfluss entlang der Einleitungsstrecke ein.

In beiden Fällen resultieren für gegebene Werte p und r, resp. $\bar{p}$ und $\bar{r}$, maximal zwei verschiedene Lösungen für y bzw. $\bar{y}$. Die effektive Lösung berücksichtigt die jeweiligen Ober- und Unterwasser-Zustände, infolge derer sich unter Umständen Fliesswechsel einstellen. Typische Anwendungen werden mit Hilfe von Beispielen erklärt.

Infolge des örtlich zunehmenden Abflusses sind lediglich sich verbreiternde Sammelrinnen von praktischem Interesse. Im *nichtprismatischen Sammelkanal* wird deshalb $\beta<1$, resp. $\bar{\beta}>1$. Ohne die Diskussion ausführlich durchzuführen, lässt sich zeigen, dass für den allgemeinen Fall entsprechende Kriterien gelten. Insbesondere treten immer zwei einander zugeordnete Abflusstiefen y, resp. $\bar{y}$ auf, die anhand derselben Bedingungen den effektiven Verhältnissen angepasst werden.

4. Der Verlustbeiwert

Der Energieinhalt einer Strömung wird durch die Energiehöhe H ausgedrückt. Infolge des seitlichen Zuflusses, des Sohlengefälles und der Kanalgeometrie verändert sich die Ober-

Bild 2. Berechnungsmodell für die Sammelrinne. Kontrollvolumen im Längsschnitt (oben) und im Grundriss (unten), begrenzt durch die Ersatzquerschnitte o und u, die Seitenwände, den Gerinneboden und die Wasseroberfläche.

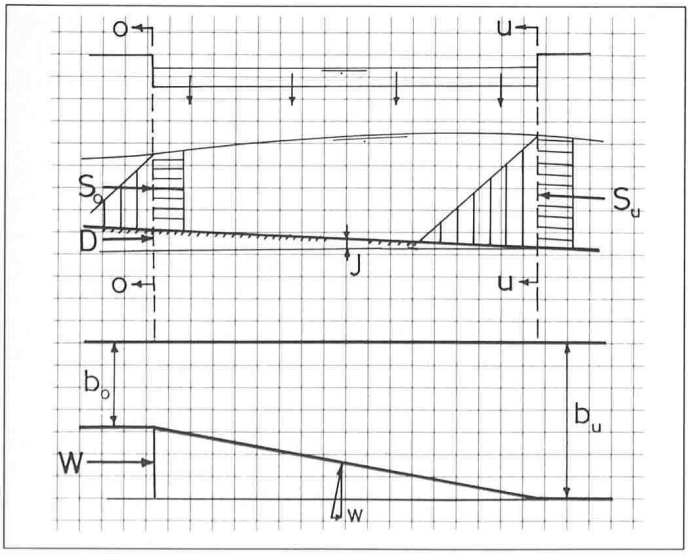
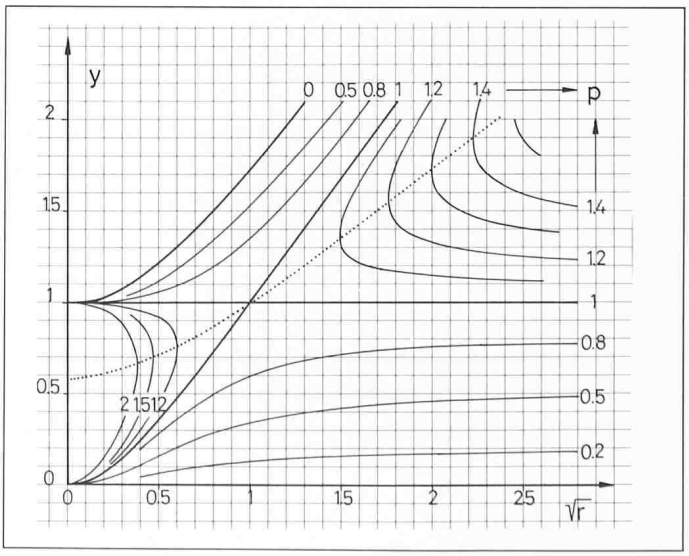


Bild 3. Auswertung der Beziehung (10) für $J=0$. Verhältnis $y=h_o/h_u$ der Randabflusstiefen in Funktion von p und r, vgl. (9)



wasser-Energiehöhe H_o entlang der Einleitungsstrecke auf den Wert H_u. Einerseits findet eine Umformung von potentieller in kinetische Energie (oder umgekehrt) statt, zudem wird ein Teil der mechanischen Energie dissipiert. In der Hydraulik bezeichnet man die Differenz $\Delta H = H_o - H_u$ als Energieverlust, der sich auch in der Form $\Delta H = \xi v^2/(2g)$ mit ξ als Verlustbeiwert beschreiben lässt. Entsprechend der Belastung der Sammelrinne, $Q_o = 0$ und $Q_u > Q_o$, wird ξ vorteilhaft auf die Unterwasser-Geschwindigkeit v_u bezogen, womit

$$\Delta H = \xi v_u^2/(2g) \ . \tag{16}$$

Die Energiehöhe H definiert man als Summe von geodätischer Höhe z, Abflusstiefe h und Geschwindigkeitshöhe $v^2/(2g)$

$$H = z + h + v^2/(2g) \ . \tag{17}$$

Für Abflüsse mit lokal variablem Durchfluss beträgt der Energiefluss $E = HQ$, [2], durch Bilanzierung folgt deshalb für ξ

$$(h_o + JL + v_o^2/2g)Q_o = (h_u + v_u^2/2g(1+\xi))Q_u \ . \tag{18}$$

Gleichung (18) gilt unter der Voraussetzung, dass der seitlich zukommende Energiefluss vollständig durch den Aufprall auf das Wasserpolster dissipiert wird. Mit (7) folgt weiter

$$q(y + j + \frac{q^2 f}{2\beta^2 y^2}) = 1 + \frac{f}{2}(1+\xi) \ . \tag{19}$$

Gegenüber der traditionellen Berechnung des ξ-Wertes, die auf der Beziehung $H_o = H_u + \xi v_u^2/2g$ basiert, ist (19) auf der linken Seite mit der Konstanten q multipliziert. Um die bestehenden Konventionen nicht zu ändern, können wir deshalb auch die reduzierte Gleichung

$$y + j + \frac{q^2 f}{2\beta^2 y^2} = 1 + \frac{f}{2}(1+\xi) \tag{20}$$

betrachten.

Wird f aus (8) und (20) eliminiert, so folgt für

$$\xi = \frac{p}{\beta y^2} - 1 + \frac{8(y-p)\,(y+j-1)}{y(1+\beta)\,(y^2+jy+j-1)} \tag{21}$$

und für den Spezialfall $j = 0$

$$\xi(j=0) = \frac{p}{\beta y^2} - 1 + \frac{8(y-p)}{y(1+\beta)\,(1+y)} \ . \tag{22}$$

Im prismatischen Kanal, $\beta = 1$, gilt weiter

$$\xi(j=0,\ \beta=1) = (q/y)^2 - 1 + \frac{4(y-q^2)}{y(1+y)} \ ; \tag{23}$$

fliesst der Sammelrinne vom Oberwasser schliesslich kein Zufluss zu, $q = 0$, so ergibt sich

$$\xi(j=0, \beta=1, q=0) = \frac{3-y}{1+y} \ . \tag{24}$$

Mit Hilfe des Verlustbeiwerts ξ lässt sich der Energiehaushalt der Strömung in der Sammelrinne untersuchen. Besonders interessiert nun der Vergleich der ξ-Werte für den prismatischen und nicht-prismatischen Sammelkanal. Um einfache Resultate zu erzielen, betrachten wir den Spezialfall $q = 0$, $j = 0$ für $\beta = 1$ und $\beta < 1$, also

$$\Delta\xi = \xi(\beta) - \xi(\beta = 1) \tag{25}$$

und erhalten nach Einsetzen

$$\Delta\xi = \frac{4}{1+y}\left(\frac{2}{1+\beta} - 1\right). \tag{26}$$

Voraussetzungsgemäss gilt für β der Wertebereich $0 \leq \beta \leq 1$. Nach Beziehung (26) folgt deshalb immer $\Delta\xi > 0$, was bedeutet, dass der sich verbreiternde Sammelkanal bei gleichem Wert y grössere mechanische Energieverluste aufweist. Der prismatische Sammelkanal ist aus diesem Grunde, falls nicht konstruktive Argumente vorliegen, der sich verbreiternden Sammelrinne vorzuziehen. Dieser Sachverhalt gilt grundsätzlich für beliebige Werte von j und q.

5. Das Berechnungsverfahren

Die vereinfachte Berechnung von Sammelrinnen beliebiger Geometrie lässt sich schrittweise zusammenfassen:

Schritt 1
- Festlegung der Geometrie der Sammelrinne, also Angabe des Profiltyps, der Länge der Einleitungsstrecke ΔL, der hydraulischen Belastung, Q_o und Q_u, des Sohlengefälls J_s,
- Ermittlung der hydraulischen Abflussgrössen im Zu- und Auslaufquerschnitt der Sammelrinne: Berechnung der kritischen Tiefen, h_k, und der Normalabfluss-Tiefen, h_N, im Ober-, o, und Unterwasserquerschnitt, u, mit Angabe des zugehörigen Fliesszustands.

Schrittt 2
- Angabe der massgebenden Randbedingung: h_o, falls $h_o/h_{k,o} < 1$ und h_u, falls $h_u/h_{k,u} > 1$,
- Bestimmung, resp. Schätzung der Ersatzbreiten $b = F/h$
- Berechnung der dimensionslosen Parameter nach (7) für strömendes Unterwasser und (11) für schiessendes Oberwasser; die ersten Grössen sind ungestrichen, die zweiten gestrichen, $\beta/\bar{\beta}$ bedeutet beispielsweise die Angabe des entsprechenden Wertes β oder $\bar{\beta}$,
- Ermittlung der Substitutionen $p/\bar{p}$ und $\sqrt{r}/\sqrt{\bar{r}}$.

Schritt 3
- In erster Näherung gilt $J = 0$,
- mit $p/\bar{p}$ und $\sqrt{r}/\sqrt{\bar{r}}$ lassen sich aus Bild 3 maximal zwei Lösungen für $y/\bar{y}$ entnehmen,
- Berechnung der zugehörigen Froude-Zahlen
- Entscheidung für den massgebenden Wert $y/\bar{y}$ aufgrund der Ober- und Unterwasserbedingungen unter Einbezug der Gleichung für die konjugierte Abflusstiefe, (14), im Falle eines Wassersprungs.

Schritt 4
- Neuberechnung der Ersatzbreite b im Querschnitt mit gesuchter Abflusstiefe, $b = F/h$,
- Ermittlung der Reibungsgefälle in den beiden Randquerschnitten, $J_{r,o}$ und $J_{r,u}$, nach Strickler

$$J_r = v^2/(k^2 R^{4/3}) \tag{27}$$

mit $R = bh/(b+2h)$ als hydraulischem Radius; Bestimmung des mittleren Reibungsgefälles J

$$J_{r,m} = (J_{r,o} + J_{r,u})/2 \tag{28}$$

und

$$J = J_s - J_{r,m}; \tag{29}$$

$j/\bar{j}$ folgt bei gegebener Länge der Sammelrinne unmittelbar aus (7) oder (11),
- Gilt für $j/\bar{j} > 0{,}1$, so wird $y/\bar{y}$ aufgrund der Beziehungen (8) oder (13) berechnet. Der im Schritt 3 ermittelte Wert $y/\bar{y}$ kann dabei als guter Näherungswert betrachtet werden.

Schritt 5
- Neuberechnung von $\beta/\bar{\beta}$ mit b_o/b_u nach 4. und b_u/b_o nach 2. sowie $p/\bar{p}$ und $\sqrt{r}/\sqrt{\bar{r}}$ und Übertrag von $f/\bar{f}$ nach 2.,
- Je nach der Grössenordnung von $j/\bar{j}$ Anwendung des Bildes 3 oder der vollständigen Gleichungen (10) bzw. (13),
- Angabe des massgebenden Wertes von y und somit h_o/h_u,
- Eventuelle Ermittlung der Geschwindigkeit v_o/v_u, der Energiehöhe H_o/H_u und des ξ-Wertes zur Untersuchung der Verlustverhältnisse der Sammelrinne.

Das Berechnungsverfahren wird vorteilhaft tabellarisch, beispielsweise nach Tabelle 1 durchgeführt. Die Schätzung der Ersatzbreite im Querschnitt mit der unbekannten Abflusstiefe nach Schritt 2 ist dabei iterativ vorzunehmen. Für Abflüsse ohne Fliesswechsel ist das Verhältnis der Abflusstiefen im Ersatzprofil ungefähr gleich demjenigen der effektiven Profilbreiten. Der Berechnungsgang wird in den nachfolgenden Berechnungsbeispielen erläutert.

6. Berechnungsbeispiele

Beispiel 1

Eine Sammelrinne mit der Länge $\Delta L = 10{,}0$ m erfährt einen seitlichen Zufluss von $\Delta Q = 10{,}0$ m³/s. Die prismatische Rechteckrinne mit $b = 1{,}5$ m und $J_s = 4‰$ ist oberwasserseitig geschlossen, womit $Q_o = 0$ und $Q_u = 10$ m³/s. Wie hoch steht der Oberwasserspiegel, falls die Unterwasser-Abflusstiefe $h_u = 1{,}95$ m beträgt?
Mit $k = 85$ m$^{1/3}$/s ergibt sich für die Normalabflusstiefe im Unterwasser $h_{N,u} = 1{,}88$ m und für die kritische Tiefe $h_{k,u} = 1{,}65$ m; die Sammelrinne ist deshalb vom Unterwasser eingestaut, der Fliesszustand ist strömend; die dimensionslosen Parameter werden somit ungestrichen eingesetzt. Mit $\beta = 1$, $q = 0$, $f = 0{,}61$ und $p = 0$ folgt $\sqrt{r} = 0{,}78$, also aus Bild 3 für $y = 1{,}48$, entsprechend $h_o = 2{,}89$ m. Das Reibungsgefälle im Unterwasserquerschnitt ergibt sich zu $J_{r,u} = 3{,}7‰$, also $J_{r,m} = (0 + 3{,}7)/2 = 1{,}9\%$, womit $J = 4 - 1{,}9 = 2{,}1‰$ und $j = 0{,}01$; das gefundene Resultat erfährt deshalb keine Änderung infolge j.

Im Unterwasserquerschnitt beträgt die mittlere Geschwindigkeit $v_u = Q_u/(bh_u) = 3{,}42$ m/s, also $H_u = 2{,}55$ m, für die mechanische Verlusthöhe folgt deshalb $\Delta H = H_o + J\Delta L - H_u = 0{,}36$ m, entsprechend $\xi = \Delta H/(v_u^2/2g) = 0{,}60$.

Beispiel 2

Eine rechteckige Sammelrinne mit $Q_o = 1{,}0$ m³/s, $Q_u = 5{,}0$ m³/s, $b_o = 1{,}0$ m, $b_u = 2{,}0$ m, $\Delta L = 5{,}0$ m, J_s 4,0‰ soll hydraulisch bemessen werden. Der k-Wert betrage dabei $k = 85$ m$^{1/3}$/s, die Abflusstiefe im Oberwasser-Querschnitt $h_o = 0{,}20$ m.
Die Berechnung dieses Beispiels ist aus Tabelle 2 zu ersehen. Nach Schritt 1 herrscht für den Normalabflusszustand (*NA*) im Oberwasser Strömen, im Unterwasser hingegen Schiessen. Aufgrund der Randbedingung $h_o = 0{,}20$ m folgt jedoch für $h_o/h_{k,o} = 0{,}43 < 1$, der Abfluss im Oberwasser ist deshalb schiessend. Mit $\sqrt{\bar{r}} = 2{,}92$ lässt sich Bild 3 nicht anwenden, Einsetzen der Parameter in (10) mit $J = 0$ ergibt jedoch

$$y^3 - 18y + 212{,}5 = 0 \,, \tag{30}$$

eine Gleichung, die keine positive, reelle Lösung für y besitzt. Der Abfluss ist in dieser Form deshalb unmöglich. Obwohl der Fliesszustand im Ober- und Unterwasser schiessend verläuft, stellt sich längs der Sammelrinne ein Wassersprung ein, im unteren Bereich der Sammelrinne herrscht somit Strömen, der Fliesswechsel Strömen – Schiessen stellt sich am Ende der Sammelrinne, der einzigen Diskontinuitätsstelle ein. Die gesamte Rechnung muss deshalb vom Unterwasser her wiederholt werden; als Unterwasser-Randbedingung folgt nach den obigen Überlegungen $h_u = h_{k,u} = 0{,}86$ m (eine ausführliche physikalische Begründung wird in [3] gegeben).
Die Wiederholung von Schritt 2 ergibt in Schritt 3 für $h_{o,1} = 0{,}05$ m und $h_{o,2} = 1{,}62$ m. Anhand der Froude-Zahlen ist der erste Abfluss schiessend, der zweite strömend mit der konjugierten Tiefe $h_{konj} = 0{,}07$ m. Die Randbedingung $h_o = 0{,}20$ m ist somit grösser als h_{konj}, womit sich ein durchgehend strömender Abfluss in der Sammelrinne einstellt. Hydraulische Berechnungen im Oberwasserkanal (Stau- und Senkungskurven) lassen die genaue Lokalisierung des Wassersprungs zu.
Beispiel 2 ist [3] entnommen; mit Hilfe der genaueren, «hydrostatischen Methode», mit der der Verlauf des Wasserspiegels ermittelt werden kann, folgt das exaktere Resultat $h_o = 1{,}575$ m, die Abweichung des hier berechneten Resultats beträgt demzufolge weniger als 3%. Das Bild 4 zeigt die vollständige Lösung des Problems nach [3].
Würde man im Oberwasserkanal hochschiessenden Abfluss voraussetzen, $h_o = 0{,}05$, der sich durch eine Schütze erzeugen liesse, so folgte für $\bar{y} = 17$, also für $h_u = 0{,}85$ m; der Abfluss längs der Sammelrinne wäre dann durchgehend schiessend.

Beispiel 3

Ein Regenüberlauf erfährt bei Regenwetter den Zufluss $Q_R = 2{,}1$ m³/s, davon sollen lediglich $Q_A = 0{,}1$ m³/s zur Reinigungsanlage weitergeleitet werden, der Rest wird über ein Streichwehr einer Sammelrinne zugeführt. Deren Länge beträgt $\Delta L = 4{,}0$ m, das Sohlengefälle $J_s = 5‰$ ist identisch demjenigen im Unterwasserkanal. Dieser besitze ein Kreisprofil mit dem Durchmesser $D = 1{,}25$ m und $K = 85$ m$^{1/3}$/s. Für welches Breitenverhältnis D_o/D_u werden die mechanischen Verluste der als U-Profil ausgebildeten Sammelrinne minimal, falls $Q_o = 0$ und der Unterwasserkanal auf die Höhe $h_u = 0{,}88$ m eingestaut ist?
Für die Abflusscharakteristik des Unterwasserkanals folgt $h_{N,u} = 0{,}69$ m, $h_{k,u} = 0{,}77$ m, der Fliesszustand bei Normalabfluss ist somit schiessend. Infolge $h_u = 0{,}88$ m liegt jedoch strömender Fliesszustand vor, die Berechnung erfolgt deshalb von unten nach oben. Mit $F_u = 0{,}93$ m² ergibt sich als Ersatzbreite $b_u = F_u/h_u = 1{,}06$ m.
Für den Spezialfall $q = 0$ entsteht unter Ausschluss der Lösung $y = 0$ nach (10)

$$y^2 + jy - 1 + j - 2r = 0 \,, \tag{31}$$

womit

$$y_{1,2} = -\frac{j}{2} \pm \sqrt{2r + (1 - j/2)^2} \,. \tag{32}$$

1. *Grundlagen*

Profil ....., Länge ΔL=..... m, Gefälle J_s= .....‰

	Q(m³/s)	h_k(m)	h_N(m)	h_N/h_k(−)	Fliessart
oben					
unten					

2. *Dimensionslose Parameter*

Randbedingung: h_o=..... m Berechnungs- ☐ oben → unten
oder h_u=..... m richtung ☐ unten → oben
Ersatzbreiten b_o=..... m, b_u=..... m

	$\beta/\bar{\beta}$	$f/\bar{f}$	$q/\bar{q}$	$j/-\bar{j}$	$r/\bar{r}$	$p/\bar{p}$	$\sqrt{r}/\sqrt{\bar{r}}$
oben							
unten							

vergl. (7), (9), resp. (12), (13)

3. *Näherungslösung*

Anwendung Bild 3 ergibt y_1= ..... (−) , y_2= ..... (−)
also h_1= ..... (m) , h_2= ..... (m)
womit f_1 = ... (−) , f_2= ..... (−)

Gesuchte Lösung (anhand Zusatzbedingung) $h_{o,u}$=..... m

4. *Neuberechnung*

Ersatzbreite mit 3.: F_o/F_u= ..... m², b_o/b_u= ..... m
Reibungsgefälle: $J_{r,o}$= ..... ‰ , $J_{r,u}$= ..... ‰
mittleres Gefälle: $J_{r,m}$= ..... ‰ , $J=J_s-J_{r,m}$= ..... ‰
red. Gefälle $j/\bar{j}$= ..... (vergl. (7) oder (11))

5. *Wiederholung Schritt 2*

$\beta/\bar{\beta}$= ....., $f/\bar{f}$= ....., $p/\bar{p}$= ....., $\sqrt{r}/\sqrt{\bar{r}}$= .....
falls $|j|$ / $|\bar{j}|$ <0,1, dann Anwendung Bild 3, sonst (10) oder (13)
Resultat: $y/\bar{y}$= ..... (−) , h_o/h_u = ... m

Tabelle 1. Schrittweise hydraulische Berechnung der Sammelrinne

1. *Grundlagen*

Profil Rechteck, Länge ΔL = 5,0 m, Gefälle J_s= 4,0‰

	Q(m³/s)	h_k(m)	h_N(m)	h_N/h_k(−)	Fliessart
oben	1,0	0,47	0,48	1,02	*NA*: Strömen
unten	5,0	0,86	0,80	0,93	*NA*: Schiessen

2. *Dimensionslose Parameter*

Randbedingung: h_o=0,20 m Berechnungs- ☒ oben → unten
oder h_u= – m richtung ☐ unten → oben
Ersatzbreiten b_o= 1,0 m , b_u= 2,0 m

	$\beta/\bar{\beta}$	$f/\bar{f}$	$q/\bar{q}$	$j/-\bar{j}$	$r/\bar{r}$	$p/\bar{p}$	$\sqrt{r}/\sqrt{\bar{r}}$
oben	2	12,75	5	0	8,5	12,5	2,92
unten	0,5	1	0,2	0	1,33	0,08	1,15

vergl. (7), (9), resp. (12), (13)

3. *Näherungslösung*

Anwendung Bild 3 ergibt y_1= 0,06 (−) , y_2= 0,05 (−)
also h_1= 1,885 (m) , h_2= 1,62 (m)
womit f_1 =470 (−) , f_2= 0,02 (−)

Gesuchte Lösung (anhand Zusatzbedingung) $h_{o,u}$= 1,62 m

4. *Neuberechnung*

Ersatzbreite mit 3.: F_o/F_u= 1,62 m², b_o/b_u= 1,0 m
Reibungsgefälle: $J_{r,o}$= 0,2‰ , $J_{r,u}$= 3,3 ‰
mittleres Gefälle: $J_{r,m}$=1,8‰ , $J=J_s-J_{r,m}$= 2,2 ‰
red. Gefälle $j/\bar{j}$= 0,01 (vergl. (7) oder (11))

5. *Wiederholung Schritt 2*

$\beta/\bar{\beta}$= ....., $f/\bar{f}$= ....., $p/\bar{p}$= ....., $\sqrt{r}/\sqrt{\bar{r}}$= .....
falls $|j|$ / $|\bar{j}|$ <0,1, dann Anwendung Bild 3, sonst (10) oder (13)
Resultat: $y/\bar{y}$= ..... (−) , h_o/h_u = 1,62 m

Tabelle 2. Auswertung des Beispiels 2

Im Normalfall gilt für $j \simeq 0$, $j/2$ in der Wurzel kann somit näherungsweise vernachlässigt werden; zudem ist physikalisch lediglich das positive Vorzeichen relevant, weshalb

$$y = \sqrt{1+2r} - j/2 \ . \tag{33}$$

Der Verlustbeiwert ξ beträgt für $q=0$ nach (21)

$$\xi = \frac{8(y+j-1)}{(1+\beta)\,(y^2+jy+j-1)} - 1 \tag{34}$$

und reduziert sich für $j=0$ unter Ausschluss der Identität $y=1$ auf

$$\xi = \frac{8}{(1+\beta)\,(1+y)} - 1 \ . \tag{35}$$

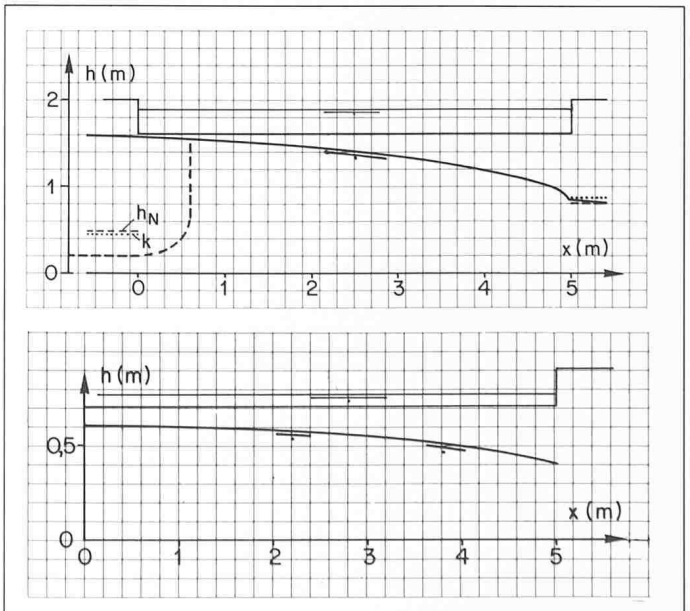
Aus Gleichung (33) geht hervor, dass sich y mit zunehmendem Wert r, also infolge $r=2f/(1+\beta)$ mit abnehmendem Wert β vergrössert. Im vorliegenden Beispiel beträgt $f=0{,}53$; Tabelle 3 zeigt die Abhängigkeit von y und ξ von β für $j=0$. Darnach stellen sich minimale Verluste für den sich in Fliessrichtung verengenden Kanal ein, die maximalen Verluste entstehen für $\beta=0$, entsprechend $b_o=0$. Aufgrund der Zunahme des Durchflusses in Fliessrichtung ist man bestrebt, die Sammelrinne in Fliessrichtung zu verbreitern, um so eine nahezu konstante Fliessgeschwindigkeit zu erzeugen. Wie anhand von Tabelle 3 nachgewiesen, ergibt sich dann als Folge eine grössere Oberwassertiefe h_o und zudem stellen sich grössere, mechanische Verluste ein.

Die Antwort auf Beispiel 3 lautet demnach: Die geringsten mechanischen Verluste mit Rücksicht auf eine vernünftige

Tabelle 3. y und ξ in Abhängigkeit von β für $f=0{,}53$ und $j=0$

β	0	0,5	1	1,5	2
y	1,77	1,55	1,44	1,36	1,31
ξ	1,89	1,09	0,64	0,36	0,15

Bild 4. Lösung des Beispiels 2 nach [3]. Der ausgezogene Spiegel entspricht dem effektiven Verlauf, der gestrichelte jenem bei Beeinflussung der Sammelrinne durch das Oberwasser



Ausbildung der Sammelrinne ergeben sich in der prismatischen Sammelrinne. Die Oberwassertiefe beträgt dann $h_o = 1{,}27$ m, der zugehörige Verlustbeiwert $\xi = 0{,}64$.

7. Schlussfolgerungen

Mit der vorliegenden Studie wird die vereinfachte Ermittlung der Abflussverhältnisse von Sammelrinnen beliebiger Geometrie ermöglicht. Als wichtigste Ergebnisse folgen:

1. Die Mittelwert-Hydraulik, die auf die Berücksichtigung der örtlichen Änderung des Wasserspiegels verzichtet, lässt relativ genaue Resultate zu.

2. Durch Einführung des rechteckigen Ersatzprofils lassen sich Sammelrinnen beliebigen Profils näherungsweise erfassen.

3. Im Normalfall besitzen das Sohlengefälle und der mittlere Wandreibungs-Gradient lediglich einen kleinen Einfluss auf den Abfluss.

4. Durch Anwendung des Impulssatzes in Fliessrichtung entsteht ein direkter Zusammenhang zwischen den Abflusstiefen in den Begrenzungs-Querschnitten der Sammelrinne. Für den in 3. erwähnten Spezialfall lässt sich dieser diagrammhaft darstellen und ermöglicht so einen raschen Zugang zur Lösung.

5. Die Gleichung für das Verhältnis der beiden Rand-Abflusstiefen lässt sich durch eine einfache Transformation für strömenden und schiessenden Abflusszustand in der Sammelrinne anwenden.

6. Der mechanische Verlustwert ξ, der den Energiehaushalt im Sammelkanal beschreibt, ist explizit darstellbar.

7. Das Berechnungsverfahren ist schrittweise erklärt. Eine tabellarische Vorlage erleichtert konkrete Berechnungsaufgaben.

8. Anhand von Beispielen wird die Methode erläutert. Vergleiche mit genaueren Verfahren zeigen nur relativ geringe Abweichungen.

9. Die minimalen mechanischen Verluste stellen sich in der prismatischen Sammelrinne ein.

Adresse des Verfassers: Dr. sc. techn. *W. H. Hager*, dipl. Bauing. ETH/SIA, Chaire de Constructions Hydrauliques CCH, Génie Civil GC, EPFL, 1015 Lausanne

Abkürzungen

b	[m]	Ersatzbreite
f	[–]	Froude-Zahl
g	[m/s²]	Gravitationskonstante
h	[m]	Abflusstiefe, Druckhöhe
j	[–]	reduziertes Gefälle $j = JL/h$
p	[–]	Substitution $p = q^2/\beta$
q	[–]	Verhältnis der Durchflüsse in den Randquerschnitten
r	[–]	reduzierte Froude-Zahl $r = 2f/(1+\beta)$
v	[m/s]	mittlere Geschwindigkeit $v = Q/F$
x	[m]	Fliessrichtung
y	[–]	Verhältnis der Abflusstiefen in den Randquerschnitten
z	[m]	Höhenlage des Kanals
D	[N]	Differenzkraft $D = Z - R$
F	[m²]	Querschnittsfläche
H	[m]	Energiehöhe
J	[–]	mittleres Gefälle $J = J_s - J_{r,m}$
K	[m$^{1/3}$/s]	Rauhigkeitsbeiwert
L	[m]	Länge der Sammelrinne
Q	[m³/s]	Durchfluss
R	[N]	Reibungskraft
S	[N]	Stützkraft
W	[N]	Wandreaktion
Z	[N]	Bodenreaktion
β	[–]	Verhältnis der Breiten in den Randquerschnitten
ρ	[kg/m³]	Dichte
ξ	[–]	Verlustbeiwert

Indices

m	mittlerer Querschnitt
o	oberer Querschnitt
u	unterer Querschnitt
r	bei J Reibungsgefälle
s	bei J Sohlengefälle
$\bar{\beta}$	gestrichene Grössen: Berechnungsrichtung von oben nach unten, ungestrichen von unten nach oben

Literatur

[1] *Favre, H.* «Contribution à l'étude des courants liquides», 1933, Rascher et Cie, Zürich,

[2] *Hager, W. H.* «Die Hydraulik von Vereinigungsbauwerken», *GWA*, Vol. 62, 1982, Heft 7, pp. 282–288; Diskussion Vol. 62, Heft 12,

[3] *Hager, W. H.* «Open channel hydraulics of flows with spatially increasing discharge», *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 21, 1983, pp. 177–193

[4] *Marchi de, G.* «Canali con portata progressivamente crescente», *L'Energia Elettrica*, Vol. 18, pp. 351–360.

Verdankungen

Diese Ende 1982 abgeschlossene Untersuchung entstammt einer internen Forschungsarbeit des Ingenieurbüros Kuster und Hager AG, Zürich. Der Verfasser möchte sich bei der Geschäftsleitung für die Unterstützung herzlich bedanken. Die Durchsicht und Kritik des Manuskripts verdanke ich den Herren *K. Hager*, Bauing. HTL und *H. Weyermann*, Bauing. HTL.