Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria
Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
Band: 90 (1998)
Heft: 5-6

Artikel: Fliessgeschwindigkeit in Wildbächern und Gebirgsflüssen
Autor: Hager, W.H.
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-939398

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: 25.12.2025

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

unsachlichen, polemischen Behauptungen alle objektiven Bemühungen in Frage. Selbst die Unbefangenheit der Bewilligungsbehörden und der Experten wird angezweifelt.

Die Systematik und die Vollständigkeit des Gesamtvergleichs der Expertisen der grundsätzlich möglichen Sedimententsorgung entspricht trotz Kritik aus Fischereikreisen dem neuesten Stand der Technik und Wissenschaft und wird vom Buwal ausdrücklich als Referenz betrachtet. Sie gelten als wesentliche Grundlage zur Entscheidungsfindung.

Somit bleibt uns bei der allfälligen, weiteren Unnachgiebigkeit und Uneinsicht der Einsprecher nur noch die Möglichkeit, ein massgebendes Gerichtsurteil abzuwarten.

Experten

Basler & Hofmann, Ingenieure und Planer AG, CH-8029 Zürich.

Büro für Gewässer- und Fischereifragen AG, *Heinz Marrer,* CH-4500 Solothurn.

Grundlagen

- Eidg. Talsperrenverordnung von 1957
- Verordnung zum Schutze des Aahorns vom 5. Mai 1980
- Verordnung über den Schutz der Auengebiete von nationaler Bedeutung vom 28. Oktober 1992
- Bundesgesetz über den Schutz der Gewässer (Gewässerschutzgesetz GSchG) vom 24. Januar 1991
  Art. 40: Spülungen und Entleerungen von Stauräumen
  - Nur mit Bewilligung der kantonalen Behörden.
  - Sind Spülungen notwendig, so legt die Behörde lediglich Zeitpunkt und Art der Durchführung fest.
- Wasserrechtsverleihung des Bezirkes March an die AG Kraftwerk Wägital vom 7. Mai 1961
  - Kraftwerksanlagen sind nach den Regeln der Technik stets in gutem Zustand zu halten.
  - Die Beliehene haftet für jeden Schaden, der nachweisbar infolge des Baues oder Betriebs der Wasserkraftanlagen an der Gesundheit oder am Eigentum Dritter oder an öffentlichem Eigentum entsteht.

Quellen

Rudolf Gartmann: Spülung und Entleerung von Stauseen und Ausgleichsbecken. «wasser, energie, luft», *82. Jahrgang,* 1990 Heft 1/2.

S. Gerster und *P. Rey:* Ökologische Folgen von Stauraumspülungen. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (Buwal), 1994.

Daniel Vischer: Wasserkraft im Widerstreit der Meinungen. «Schweizer Ingenieur und Architekt», Nr. 23, 27. Juni 1990.

André Lambert: Flüsse auf Tauchfahrt, «Neue Zürcher Zeitung», 24. April 1985.

Vortrag, den der Verfasser am 28. August 1997 in Valbella gehalten hat. Zur Fachtagung über das Langzeitverhalten von Talsperren, ihres Untergrundes und ihrer Umgebung lud die Arbeitsgruppe Talsperrenbeobachtung des Schweizerischen Nationalkomitees für grosse Talsperren ein.

Adresse des Verfassers: *Peter Suter,* Geschäftsleiter AG Kraftwerk Wägital, CH-8854 Siebnen.

Fliessgeschwindigkeit in Wildbächen und Gebirgsflüssen

Diskussion von W. H. Hager zum Aufsatz von D. Rickenmann in «wasser, energie, luft» 11/12, 1996

Parameterkombinationen

Seit rund 20 Jahren erfahren Rauhgerinne, also die von *Rickenmann* behandelten Wildbäche und Gebirgsflüsse, eine intensive Forschungsbearbeitung. Wesentliche Beiträge finden sich neben den bereits erwähnten Quellen bei *Hey*, et al. (1982) und *Yen* (1989, 1992). Kürzlich haben *Julien* und *Wargadalam* (1995) anhand eines grossen Datensets, welcher von 835 Natur- und 45 Laborkanälen stammt, ähnliche Korrelationen wie *Rickenmann* (1996) erarbeitet. Das Ziel dieser Diskussion ist zweifach:

- Einführung physikalischer Parameter, die den Rauhgerinneabfluss eindeutig charakterisieren,
- Verallgemeinerung der Resultate anhand der Daten von Julien und Wargadalam sowie von Rickenmann.

Die Hydraulik von nichtkohäsiven Alluvialkanälen lässt sich nach Julien und Wargadalam durch Stabilitätskriterien erfassen. Dabei sind die folgenden Parameter von Bedeutung:

- Oberflächenbreite w
- Mittlere Wassertiefe h
- Mittlere Fliessgeschwindigkeit V und
- Mittleres Sohlengefälle J_s.

Diese variieren im geradlinigen Rauhgerinne wesentlich mit den Grössen:

- Durchfluss Q,
- Massgebender Sedimentdurchmesser d_s und
- Shieldszahl τ^*_θ.

Julien et al. (1995) beziehen sich auf Durchflüsse zwischen 0,2 Ls^{-1} bis 26 560 m^3s^{-1}. Die meisten Messungen beinhalten *bank-full*-Abflüsse, andere sind jedoch unkorrigiert enthalten. Für d_s sind Grössen wie d_{50}, d_{65}, d_{84} oder d_{90} als typisch betrachtet worden. Die amerikanische Studie bezieht sich auf d_{50}, während Rickenmann d_{90} als massgebend betrachtet. Die Sedimentgrösse hat zwischen drei Grössenordnungen variiert. Die Shieldszahl τ^*_θ entspricht dem Verhältnis der Scherkraft τ_θ auf ein Partikel zu dessen Gewicht $(\rho_s-\rho)gd_s$ mit ρ_s als Sedimentdichte, ρ als Wasserdichte und g als Erdbeschleunigung.

Massgebende Parameter

In einer Diskussion der Arbeit von Julien und Wargadalam identifiziert *Hager* (1996) als die massgebenden Strömungsparameter:

- Relativwassertiefe $y = h/d_s$
- Relativbreite $W = w/d_s$
- Relativgeschwindigkeit $\mu = V/(gJ_sd_s)^{1/2}$
- Relativ-Shieldszahl τ^*_θ/J_s und
- Relativdurchfluss $q = Q/(gJ_sd_s^5)^{1/2}$.

Für $1 < h/d_s < 100$ lässt sich für den Durchfluss die folgende Beziehung auf ± 5 % ableiten

$$y = (q/123)^{3/8} \qquad \text{(A)}$$

entsprechend mit $d_s = d_{50}$

$$Q = 123(gJ_s)^{1/2}h^{8/3}d_s^{1/6}. \qquad \text{(B)}$$

Weiter gilt als Beziehung zwischen Wasserbreite und Wassertiefe auf ± 20 % genau

$$W = 30y \qquad \text{(C)}$$

also $w = 30h$. Eliminiert man h aus Gl. (B), so folgt

$$Q = 4{,}1(gJ_s)^{1/2}\,(wh)h^{2/3}d_s^{-1/6} \qquad \text{(B1)}$$

Geht man beim mittleren Profil von einem Parabelquerschnitt der Querschnittsfläche $F=(2/3)(wh)$ aus, so folgt weiter

$$Q = 6{,}15(gJ_s)^{1/2}F\,h^{2/3}d^{-1/6}. \qquad \text{(B2)}$$

Ohne die exakte Relation zwischen dem hydraulischen Radius und der Wassertiefe zu kennen, lässt sich aus Gl. (B2) unmittelbar eine Stricklergleichung ableiten, mit $K \sim g^{1/2}/d^{1/6}$.

Aus der Durchflussgleichung $Q = whV$ resp. dimensionslos $q = Wy\mu$ folgt mit Gl. (C) als mittlere Geschwindigkeit

$$\mu = 4{,}1y^{2/3}. \qquad \text{(D)}$$

Aus den Gln. (A) und (D) folgt weiter

$$\mu = 1{,}23q^{1/4}. \qquad \text{(E)}$$

Ist demnach der Relativdurchfluss q gegeben, so lässt sich die auf die Schubspannungsgeschwindigkeit bezogene Geschwindigkeit $\mu = V/V^*$ eindeutig ermitteln. Eine solche Beziehung ist von Rickenmann hergeleitet worden.

Modifikation von Rickenmanns Ansatz

Rickenmann führt zur Analyse seines Datensatzes die beiden Parameter $Y = V/(gd_{90})^{1/2}$ und $X^3 = Q/(gd_{90}^5)^{1/2}$ ein. Obwohl eingangs die Schubspannungsgeschwindigkeit $V^* = (ghJ_s)^{1/2} = (gJ_sd_{90})^{1/2}(h/d_{90})^{1/2}$ eingeführt wird, fehlt in Y das Sohlengefälle J_s. Beachtlich an den Gln. (9) ist die Abhängigkeit der Geschwindigkeit V vom Durchfluss $Q^{0.34}$ resp. von $Q^{0.29}$, im Mittel also etwa von $Q^{1/3}$. Setzt man $V \sim Q^{1/3}$, so ergibt sich mit C als Proportionalitätskonstante dimensionslos $\mu = Cq^{1/3}$, also

$$V = C\left(\frac{gJ_s}{d_{90}}\right)^{1/3} Q^{1/3}. \qquad \text{(F)}$$

Vergleicht man nun die Exponenten von Gl. (*F*) mit denjenigen von Gl. (9), so findet man eine erstaunliche Übereinstimmung, insbesondere in g und Q, während der Gefällseinfluss in Gl. (9a) und der Sedimenteinfluss in Gl. (9b) unterschätzt werden. Sowohl die Gln. (9) als auch Gl. (F) sind dimensionslos, was als notwendige, nicht jedoch als *hinreichende Voraussetzung* für die Relevanz einer hydraulisch korrekten Beziehung betrachtet werden darf. Gl. (F) besitzt den Vorteil einer physikalischen Beziehung, ausgedrückt durch das Konzept der Schubspannungsgeschwindigkeit. Wird dieses offensichtlich auch von Rickenmann massgebende Konzept postuliert, so folgt nach der Kontinuitätsgleichung für den Durchfluss automatisch die Grösse q. Die Proportionalitätskonstante C kann jedoch noch mit den Grössen y und W variieren. Um eine solche Abhängigkeit zu eruieren, muss $C = \mu/q^{1/3}$ als Funktion von y resp. W dargestellt werden.

Ein weiteres Indiz *versteckter Parameterkombinationen* in Gl. (9) ist die Zweiteilung der Geschwindigkeitsformel für Gefälle etwa kleiner und grösser als 1 %. Heute bezieht man sich bei Gl. (5) nicht auf Manning-Strickler (*Levi,* 1995), sondern auf Gauckler-Manning-Strickler (GMS-Formel). *Philippe-Gaspard Gauckler* (1826–1905) hat nämlich diese Formel 1867 bereits aus den Daten von *Darcy* und *Bazin* abgeleitet (*Hager,* 1994). Seine stark vereinfachte Fliessformel gegenüber derjenigen der beiden Experimentatoren blieb jedoch ziemlich unbekannt, verglichen mit dem Erfolg der Formel von *Manning*, der sie über 20 Jahre später wieder propagierte. Dieser «Misserfolg der Gaucklerformel» lässt sich wesentlich auf den Umstand zurückführen, dass analog wie Rickenmann zwei Gefällsbereiche – $J_s < 0{,}07\,\%$ und $J_s > 0{,}07\,\%$ – mit verschiedenen Beziehungen abgedeckt wurden. Rein physikalisch liegt kein Grund vor, das Sohlengefälle J_s allein für einen Übergang von der einen auf die andere Formel in Rechnung zu stellen. Zudem wurde Gaucklers Name in der Originalpublikation fälschlicherweise durch *Gauchler* wiedergegeben. Schliesslich hat sich Gauckler nach 1870 nicht mehr mit Hydraulik beschäftigt. Unklar bis heute bleibt jedoch, ob Manning die Arbeiten von Gauckler wirklich unbekannt waren (*Dooge,* 1992).

Vergleicht man Gl. (E) mit Rickenmanns verallgemeinertem Ansatz (F), so findet man mit Ausnahme des Exponenten dieselbe Beziehung. Der Unterschied im Exponenten lässt sich dabei durch eine Änderung von d_{50} zu d_{90} nicht beeinflussen. Grundsätzlich ist die Wahl von d_{90} – insbesondere in steileren Rauhgerinnen – gegenüber d_{50} besser zu rechtfertigen. Damit wird der Strömungswiderstand wesentlich von den nahezu grössten Sedimentelementen aufgebracht.

Wird schliesslich die mittlere Gerinnebreite B durch d_{90} normiert, und wird $B \sim Q^{1/3}$ postuliert, so folgt $B/d_{90} = 5q^{1/3}$, also

$$B = 5\left(\frac{d_{90}}{gJ_s}\right)^{1/6} Q^{1/3}. \qquad \text{(G)}$$

Der Vergleich mit Gl. (11) nach Rickenmann ist insofern wiederum beachtlich, als dass die Exponenten von d_{90} und J_s nur wenig von (1/6) abweichen, derjenige von g sogar exakt stimmt. Wird y aus den Gln. (A) und (C) eliminiert, so folgt $W = 30(q/123)^{3/8} = 4{,}94q^{3/8}$, was annähernd mit (G) übereinstimmt. Diese Überlegungen können deshalb dahingehend interpretiert werden, dass sich nordamerikanische und mitteleuropäische Datensätze auf vergleichbare Grundlagen bringen lassen. Durch geeignete Wahl der *physikalisch* ermittelten Basisparameter lassen sich deshalb Beziehungen aufstellen, die eine Charakterisierung von Rauhgerinnen mittels der dominanten Grössen zulassen.

Referenzen

- *Dooge, J. C. I.* (1992). The Manning formula in context. Channel flow resistance: Centennial of Manning's formula. B.C. Yen, ed. Water Resources Publications: Littleton, Col.
- *Hager, W. H.* (1994). Die historische Entwicklung der Fliessformel. Schweizer Ingenieur und Architekt *112* (9): 123–133.
- *Hager, W. H.* (1996). Diskussion zu Alluvial channel geometry: Theory and applications. Journal of Hydraulic Engineering *122* (12): 750.
- *Hey, R. D., Bathurst, J. C., Throne, C. R.* (1982). Gravel-bed rivers. John Wiley & Sons: New York.
- *Julien, P. Y., Wargadalam, J.* (1995). Alluvial channel geometry: Theory and applications. Journal of Hydraulic Engineering *121* (4): 312–325.
- *Levi, E.* (1995). The science of water – The foundation of modern hydraulics. ASCE Press: New York.
- *Rickenmann, D.* (1996). Fliessgeschwindigkeit in Wildbächen und Gebirgsflüssen. wasser, energie, luft *88* (11/12): 298–304.
- *Yen, B. C.* (1989). Proc. Intl. Conf. Channel flow and catchment runoff: Centennial of Manning's formula and Kuichling's rational formula. Dept. Civil Engineering, University of Virginia: Charlottesville VA.
- *Yen, B. C.* (1992). Channel flow resistance: Centennial of Manning's formula. University of Virginia and University of Illinois: Urbana, IL.

Adresse des Verfassers: PD Dr. sc. techn. *Willi H. Hager,* VAW, ETH-Zentrum, CH-8092 Zürich.

Fliessgeschwindigkeit in Wildbächen und Gebirgsflüssen

Antwort von D. Rickenmann auf den Diskussionsbeitrag von W. H. Hager

Der Autor dankt *W. H. Hager* für den interessanten Diskussionsbeitrag. Es ist bemerkenswert, dass sich die Resultate von *Julien* und *Wargadalam* (1995) aufgrund eines umfangreicheren Datensatzes prinzipiell mit den Formeln des Autors vergleichen lassen. Hier soll im wesentlichen die Frage diskutiert werden, ob für den gesamten vom Autor untersuchten Bereich, der insbesondere auch viele Abflüsse in steilen Wildbächen umfasst, eine einzige allgemeingültige Beziehung angegeben werden kann, die eine ähnlich gute Prognose der Geschwindigkeiten erlauben würde wie die Gleichungen (9a) und (9b).

Zuerst sei darauf hingewiesen, dass beim Datensatz von *Julien* und *Wargadalam* (1995) die steilsten Gefälle 8,1% betragen, während vom Autor Gerinne mit Gefällen bis zu 63% einbezogen wurden. Die im Artikel gemachte Unterscheidung in zwei Gefällsbereiche ist motiviert durch eine deutliche Änderung des Reibungsbeiwertes im Bereich relativer Abflusstiefen h/d_{90} = 3 ... 4 (Bilder 2 und 3). Es wurde vermutet, dass diese Änderung mit dem Fehlen eines logarithmischen Geschwindigkeitsprofiles bei relativen Abflusstiefen kleiner als etwa 3 zusammenhängen könnte. Beim vom Autor untersuchten Datensatz deckt sich dieser kritische Wert etwa mit einem Grenzgefälle von rund 0,6 bis 0,8% (Bild 11). *Julien* und *Wargadalam* (1995) zeigen für knapp die Hälfte ihres Datensatzes ein Diagramm der berechneten Fliessgeschwindigkeiten in Abhängigkeit der relativen Abflusstiefe h/d_{50}. Für Werte h/d_{50} kleiner als etwa 10 ergibt sich tendenziell eine Unterschätzung der Fliessgeschwindigkeiten (ihre Fig. 5c), ähnlich wie das für den Datensatz des Autors festgestellt werden kann (Bild 10).

Führt man mit den von Hager benutzten dimensionslosen Parametern μ und q eine Regressionsberechnung mit den von *Rickenmann* (1996) verwendeten Daten durch, so ergibt sich als beste Beziehung:

$$\mu = 0{,}56\, q^{0.347} \qquad (15)$$

Die Gleichung (15) liegt sehr nahe bei der Beziehung (F) nach Hager. Da der Exponent 1/3 eine etwas allgemeinere Gültigkeit erwarten lässt, wird im weiteren ohne allzu grossen Verlust an Genauigkeit die Beziehung untersucht:

$$\mu = C\, q^{1/3} \qquad (16)$$

Gleichung (16) entspricht der Gleichung (F). Die beste Übereinstimmung mit den gemessenen Geschwindigkeiten ergibt sich für C = 0,66. Der Korrelationskoeffizient zwischen berechneten und gemessenen Geschwindigkeiten ist für Gl. (15) r = 0,85 und für Gl. (16) r = 0,88. Die Güte der Korrelation ist somit schlechter als für die Gleichungen (9a) und (9b). Im weiteren ergibt sich für die beiden Gleichungen (15) und (16) eine systematische Überschätzung der Geschwindigkeit für hohe Gefälle (diese Tendenz ist etwas ausgeprägter für Gl. [16], welche ja leicht von der optimalen Regression bzw. Gl. [15] abweicht).

Die Frage ist nun, inwieweit die «Konstante» C in Gl. (16) noch von weiteren Parametern abhängt. Die Analyse zeigt, dass C in Abhängigkeit der untersuchten Parameter, $C = C(h/d_{90})$ oder $C = C(B/d_{90})$ oder $C = C(Q)$ oder $C = C(J)$, mehr oder weniger systematische Abweichungen zeigt, die keine einfache mathematische Beschreibung zulassen; zudem sind die Abweichungen in den ersten beiden Fällen (h/d_{90}; B/d_{90}) nur für etwa drei Viertel des gesamten Datensatzes bekannt. Es ergibt sich die Tendenz, dass unter Verwendung von Gl. (16) die Endbereiche des hier untersuchten

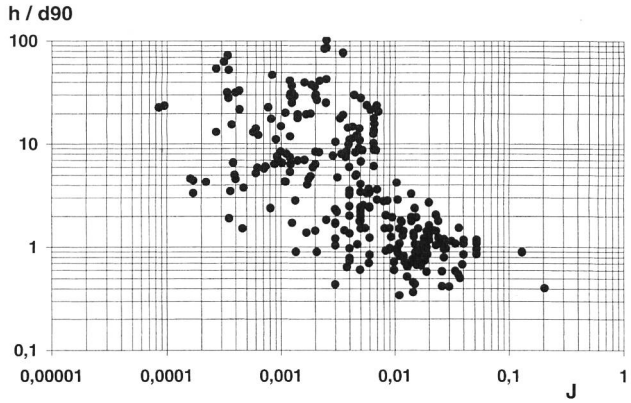

Bild 11. Verteilung der verwendeten Daten bezüglich relativer Abflusstiefen h/d_{90} und Gefälle J.

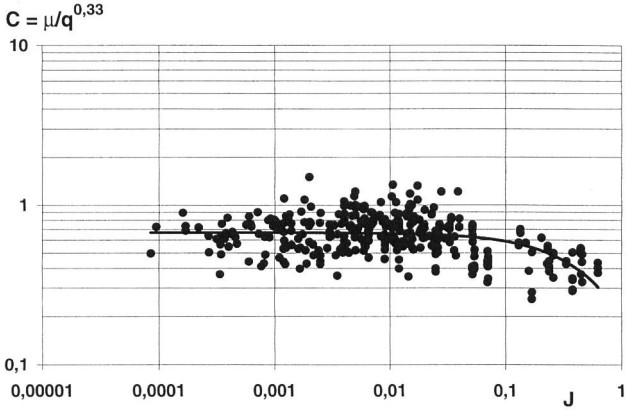

Bild 12. Abhängigkeit des Faktors C in Gleichung (16) vom Gerinnegefälle J. Die Linie entspricht der Exponentialfunktion in Gl. (17).

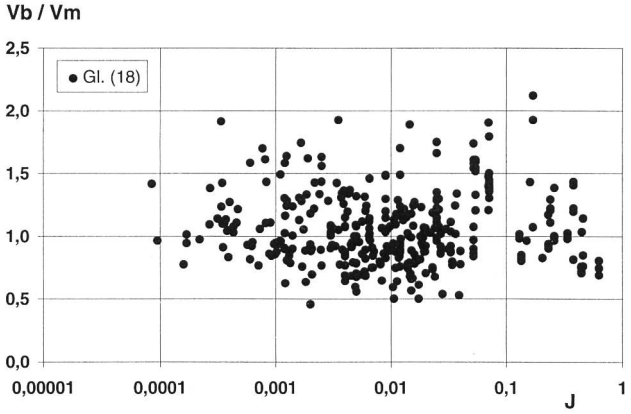

Bild 13. Verhältnis von berechneter zu gemessener Fliessgeschwindigkeit, V_b/V_m, in Abhängigkeit des Gerinnegefälles J.

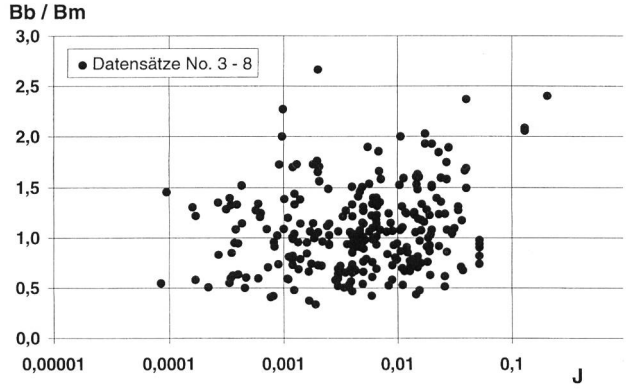

Bild 14. Verhältnis von berechneter zu gemessener (mittlerer) Gerinnebreite, B_b/B_m, in Abhängigkeit des Gerinnegefälles J.

Datensatzes nicht ganz zutreffend beschrieben werden können.

Unter Berücksichtigung des ganzen Datensatzes lässt sich C in Abhängigkeit des Gefälles J (Bild 12) wie folgt beschreiben:

$$C = 0{,}67 / e^{1{,}26\,J} \qquad (17)$$

Für Gefälle kleiner als etwa 1 % tendiert der Ausdruck $e^{1{,}26\,J}$ gegen 1, d.h. wird C angenähert zu einer Konstanten mit dem Wert 0,67. Aus der Kombination von Gl. (17) mit Gl. (16) resultiert folgende dimensionsgerechte Beziehung für die Fliessgeschwindigkeit V:

$$V = (0{,}67 / e^{1{,}26\,J})\ (g\ Q\ J/d_{90})^{0{,}33} \qquad (18)$$

Der Korrelationskoeffizient zwischen berechneten und gemessenen Geschwindigkeiten ist für Gl. (18) $r = 0{,}89$. Über den ganzen Gefällsbereich zeigen die mit Gl. (18) prognostizierten Geschwindigkeiten keinen Trend einer systematischen Abweichung im Bereich kleiner oder grosser Gefälle (Bild 13). Die Verwendung der zwei Gleichungen (9a) und (9b) ergibt hingegen eine leicht bessere Korrelation für die zwei Teilbereiche (Bild 4). Anstelle von Gl. (17) könnte man die Abhängigkeit C von J auch mit der Potenzfunktion $C = 0{,}48/J^{0{,}06}$ annähern. Damit ergibt sich aber bei grossen sowie bei kleinen Gefällen eine systematische Abweichung zwischen berechneten und gemessenen Fliessgeschwindigkeiten.

Es ist möglich, dass die grösseren Abweichungen bei Verwendung einer einzigen Gleichung für den ganzen Bereich (Gl. 16 bzw. 18) teilweise durch den nicht homogenen Datensatz bedingt sind, worin im Bereich steiler Gefälle die grossen Abflüsse sicher untervertreten sind. Mit dem verwendeten begrenzten Datensatz kann diese Frage leider nicht abschliessend beurteilt werden.

Für die hier verwendeten Daten wurde auch für die dimensionslose Breite B/d_{90} eine Regressionsberechnung mit dem von Hager vorgeschlagenen dimensionslosen Parameter q durchgeführt. Es ergibt sich als beste Beziehung:

$$B/d_{90} = 6{,}6\ q^{0{,}340} \qquad (19)$$

Die Gleichung (19) liegt sehr nahe bei der Beziehung (G) nach Hager. Setzt man den Exponenten zu 1/3 anstatt 0,340, so ergibt sich folgende dimensionsgerechte Beziehung:

$$B = 7{,}0\ (d_{90}/[g\ J])^{0{,}17}\ Q^{0{,}33} \qquad (20)$$

welche mit Ausnahme der Konstanten der Gleichung (G) entspricht. Der Korrelationskoeffizient zwischen berechneten und gemessenen Breiten ist für Gl. (20) $r = 0{,}80$. Der Unterschied zu Gl. (11) mit $r = 0{,}82$ ist gering. Wie auch Bild 14 zeigt, ist damit die Güte der Korrelation vergleichbar mit derjenigen von Gleichung (11).

Durch Kombination und Umformung der Gleichungen (18) und (20) lässt sich folgende Beziehung ableiten:

$$V = (C_2 / e^{1{,}26\,J})\ J^{0{,}48}\ h\ (g/d_{90})^{0{,}50} \qquad (21)$$

wobei C_2 eine dimensionslose Konstante ist. Im Vergleich zum Ansatz nach Gauckler-Manning-Strickler (GMS) ergibt sich eine grössere Abhängigkeit der Fliessgeschwindigkeit von der Abflusstiefe, was durch erhöhte Reibungsverluste im Bereich grosser relativer Rauhigkeiten bedingt sein kann. Es sei darauf hingewiesen, dass Gl. (21) nicht über den ganzen Parameterbereich abgestützt ist, da für die Abflüsse bei steilen Gefällen keine Angaben zu B oder h vorhanden sind. Diese Gleichung ist hier vor allem zu Vergleichszwecken aufgeführt und soll Tendenzen aufzeigen.

Gemäss *Julien* (1995) kann die Fliessgeschwindigkeit anstatt als logarithmische Funktion $V = \sim v^* \ln(h/d)$ auch als Potenzfunktion $V = \sim v^* (h/d)^b$ angegeben werden, wobei der Exponent b mit abnehmenden Werten h/d kleiner als 100 zunimmt. So kann zum Beispiel angegeben werden:

$$V = C_3\ J^{0{,}5}\ h\ (g/d)^{0{,}50} \qquad \text{für } h/d \approx 5 \qquad (22)$$

Es ergibt sich somit bereits im Bereich $100 < h/d < 3$, wo noch eine volle Gültigkeit des logarithmischen Fliessgesetzes angenommen werden kann, eine Erhöhung des Exponenten b im Vergleich zur GMS-Formel (wo $b = 1/6$ ist). Für Werte h/d kleiner als etwa 3 nimmt der Exponent stark zu. Es ist interessant festzustellen, dass bei Umformung des logarithmischen Fliessgesetzes für den Bereich abnehmender Werte h/d tendenziell eine Erhöhung des Exponenten bei h resultiert, was in Übereinstimmung ist mit der empirischen Gleichung (21), welche insbesondere auch aus Abflüssen bei steilen Gefällen und mit kleinen Werten h/d abgeleitet wurde.

Zusammenfassung

Für den von *Julien* und *Wargadalam* (1995) untersuchten Datensatz lassen sich mit den Vereinfachungen von *Hager* (1996) folgende Gleichungen und die entsprechenden Parameterbereiche angeben (dabei sind auch 45 Daten aus Laborversuchen enthalten):

Autoren	N	J [%]	Q [m3/s]	d_{50} [cm]	h/d50	B [m]
Julien und Wargadalam (1995) , Hager (1996)	880	0,004 - 8,1	0,00018 - 26600	0,012 - 40	1,42 - 70 400	0,16 - 900
$V = 1{,}23\ g^{0{,}38}\ Q^{0{,}25}\ J^{0{,}38} / d_{50}^{0{,}13}$						Gl. (E)
$V = 4{,}1\ g^{0{,}50}\ J^{0{,}50}\ h^{0{,}67} / d_{50}^{0{,}17}$						Gl. (D)

In ähnlicher Weise ergibt sich für den von Rickenmann (1996) untersuchten Datensatz für die Beschreibung des ganzen Parameterbereiches nach der Diskussion mit Hager folgende zusammenfassende Darstellung:

Autoren	N	J [%]	Q [m3/s]	d_{90} [cm]	h/d90	B [m]
Rickenmann (1996), Hager (1997)	373	0,0085 - 63	0,3 - 2400	3 - 210	0,34 - 102	4,5 - 153
$V = 0{,}37\ g^{0{,}33}\ Q^{0{,}34}\ J^{0{,}20} / d_{50}^{0{,}35}$						Gl. (9a)
$V = (0{,}67 / e^{1{,}26\,J})\ (g^{0{,}33}\ Q^{0{,}33}\ J^{0{,}33} / d_{90}^{0{,}33})$						Gl. (18)

Für Abflüsse in rauhen Gerinnebetten bei Gefällen steiler als einige wenige % (wildbachartige Abflüsse) wird die Verwendung der Gl. (9a) oder (18) empfohlen. Für Abflüsse bei flacheren Gefällen kann man sich auf die Beziehungen (E) und (D), welche der GMS-Formel entsprechen, oder noch besser auf logarithmische Fliessformeln wie etwa Gl. (1) abstützen.

Literatur

Julien, P. Y. (1995): Erosion and Sedimentation. Cambridge University Press, New York, 280 p.

Adresse des Verfassers: Dr. *Dieter Rickenmann,* Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, CH-8903 Birmensdorf.

Korrigenda

Zu «wasser, energie, luft – eau, énergie, air» 88 (1996), Heft 11/12, S. 299:

In Gleichung (7) sollte der Exponent bei q 0,6 anstatt 0,16 sein. Die Gleichung (7) sollte also richtig lauten:

$$V = 1{,}3\ g^{0{,}2}\ q^{0{,}6}\ J^{0{,}2} / d90^{0{,}4}.$$