Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria

Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband

Band: 104 (2012)

Heft: 2

Artikel: Verbesserung von Geschiebevorhersagen in Wildbächen und Gebirgsflüssen durch Berücksichtigung von Makrorauigkeit

Autor: Nitsche, Manuel / Rickenmann, Dieter / Turowski, Jens M.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-941881

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

Verbesserung von Geschiebevorhersagen in Wildbächen und Gebirgsflüssen durch Berücksichtigung von Makrorauigkeit

Manuel Nitsche, Dieter Rickenmann, Jens M. Turowski, Alexandre Badoux, James W. Kirchner

Zusammenfassung

Grobe Blöcke, Stufen-Becken-Strukturen und eine stark variierende Gerinnebreite sind typische Merkmale von Wildbächen und steilen Gebirgsflüssen. Der Fliesswiderstand, der durch solche Makrorauigkeit erzeugt wird, hat einen grossen Einfluss auf den Geschiebetransport. Viele Geschiebetransportgleichungen überschätzen den Transport in steilen Gerinnen um mehrere Grössenordnungen, da die typische Makrorauigkeit nur in wenigen Ansätzen berücksichtigt wird. Diese Ansätze sind jedoch noch keinen systematischen Tests mit Feldmessungen unterzogen worden. In der vorliegenden Studie wurden verschiedene Ansätze untersucht, mit denen der Beitrag der Makrorauigkeit am Fliesswiderstand berechnet werden kann. Diese Ansätze wurden mit einer Transportgleichung kombiniert und die Ergebnisse wurden mit Geschiebedaten aus 13 Schweizer Wildbächen und Gebirgsflüssen verglichen. Die Untersuchungsbäche haben Gerinneneigungen von 2 bis 19%; ihre Einzugsgebietsflächen betragen 0.5 bis 170 km^2. Für sechs Bäche konnte auf Zeitreihen von zumeist jährlichen Geschiebevolumenmessungen zurückgegriffen werden. Für die anderen sieben Bäche wurden Geschiebevolumen nach den Hochwasserereignissen 2000 und 2005 geschätzt. Mit allen getesteten Gleichungskombinationen wurde eine Verbesserung der Geschiebevorhersage erreicht im Vergleich zu einer Referenzgleichung, die nicht für den Einfluss der Makrorauigkeit korrigiert wurde. Die Ansätze könnten in der Praxis genutzt werden, um verbesserte Vorhersagen für Ereignisfrachten in Schweizer Wildbächen und Gebirgsflüssen zu erzielen.

1. Einleitung

Fluvialer Geschiebetransport hat sich in dicht besiedelten Alpentälern als einer der bedrohlichsten Naturgefahrenprozesse erwiesen. In der Schweiz sind viele der schadenreichsten Unwetterereignisse stark durch Geschiebeprobleme geprägt (z.B. Bezzola und Hegg, 2007; BWG, 2002). Die zuverlässige Abschätzung und Vorhersage von Transportraten ist wichtig, um zukünftige Schäden zu verhindern oder zu reduzieren.

Gebräuchliche Transportgleichungen überschätzen in der Regel Geschiebevolumen um bis zu drei Grössenordnungen, wenn sie für Wildbäche und steile Gebirgsflüsse angewendet werden (z.B. Bathurst et al., 1987; Rickenmann, 2001). Dies ist weitgehend darauf zurückzuführen, dass viele dieser Gleichungen auf der Grundlage von Daten aus Laborversuchen mit künstlichen Gerinnen entwickelt und meist nur in flacheren Flüssen getestet wurden. Sowohl Laborrinnen wie auch flache Flüsse unterscheiden sich beträchtlich von Wildbächen und Gebirgsflüssen.

Steile Flüsse mit Gefällen von mehr als 3 bis 5% weisen typischerweise folgende Merkmale auf: (i) sehr breite Kornverteilungen, (ii) grobe, während der meisten Hochwasserereignisse unbewegliche Blöcke im Gerinnebett, (iii) Sohlenformen, die aus der Gruppierung von grösseren Elementen entstehen (Stufen-Becken-Abfolgen) und (iv) eine variable Gerinnebreite. Die Sohle steiler Gerinne neigt oft dazu, Ansammlungen unterschiedlicher dominierender Korngrössen auszubilden (z.B. Lamarre und Roy, 2008; Yager, 2006) oder Stufen um grobe Sohlenelemente zu formen, die sich über die gesamte Breite ausdehnen (Church und Zimmermann, 2007; Whittaker und Jaeggi, 1982). Solche Sohlenformen erhöhen die Bettrauigkeit in Wildbächen und steilen Gebirgsflüssen weit über ein in flacheren Flüssen normales Mass. Diese zusätzliche Rauigkeit wurde auch in Laboruntersuchungen nur selten berücksichtigt.

Makrorauigkeit in einem Gerinne ist eine physikalische Quelle des Fliesswiderstandes. In feinerem Bettmaterial gelagerte grobe Blöcke stören die Abflussverhältnisse und erhöhen die Turbulenz (z.B. Bathurst, 1978; Yager et al., 2007). An Stufen entsteht schiessender Abfluss und beim Eintauchen in darauf folgende Becken werden die Wassermassen stark gebremst, was beträchtliche Energieverluste verursacht. Es treten hydraulische Sprünge, Wirbel und erhebliche Turbulenzen auf (z.B. Wilcox et al., 2006). Gemäss Zimmermann (2010) geht ein Grossteil der Fliessenergie in steilen Gerinnen durch diese Makrorauigkeit verloren.

Unterschiedliche Gleichungen wurden zur Quantifizierung des Fliesswiderstandes vorgeschlagen, vor allem für Gerinne mit geringen Abflusstiefen (Smart und Jäggi, 1983; Smart et al., 2002; Bathurst, 2002; Ferguson, 2007; Rickenmann und Recking, 2011). In der Mehrzahl dieser Ansätze wird der Reibungsbeiwert in Funktion der relativen Abflusstiefe d/D oder r_h/D beschrieben, wobei d die mittlere Abflusstiefe, r_h der hydraulische Radius und D eine repräsentative Korngrösse ist. Gewisse Studien wiederum berücksichtigen explizit die Effekte grösserer Partikel (Blöcke) in den entsprechenden Widerstandsgleichungen (z.B. Bathurst et al., 1981; Whittaker et al., 1988; Lee und Ferguson, 2002; Yager et al., 2007).

In der vorliegenden Studie fassen wir die Ergebnisse von Nitsche et al. (2011) für den deutschsprachigen Raum zusammen. Es wurde der Einfluss verschiedener Fliesswiderstandsgleichungen auf Geschiebevorhersagen für Wildbäche und Gebirgsflüsse getestet. Vier von fünf der getesteten Gleichungen berücksichtigen explizit ein Mass der Makrorauigkeit. Der fünfte Ansatz basiert hauptsächlich auf einer empirischen Beziehung in Abhängigkeit der relativen Abflusstiefe. Mittels Fliesswiderstandsaufteilung wurde die Energie geschätzt, die für den Geschiebetransport zur Verfügung steht. Die

wegen der Makrorauigkeit reduzierte Energie wurde über ein reduziertes Energieliniengefälle in die Geschiebetransportgleichungen integriert. Die Ergebnisse der Geschiebeberechnungen wurden mit Frachtmessungen aus 13 Schweizer Wildbächen und Gebirgsflüssen verglichen. Der systematische Vergleich der Fliesswiderstandsansätze erlaubt eine Beurteilung ihrer Anwendbarkeit für Geschiebetransportvorhersagen in steilen Gerinnen.

2. Fliesswiderstands- und Sedimenttransportformeln

Die Gesamtrauigkeit eines Gerinnes wird in der Regel durch einen zu kalibrierenden Parameter beschrieben, wobei in den untersuchten Gleichungen der Darcy-Weisbach-Reibungsbeiwert f und der Manning-Strickler-Koeffizient n verwendet werden:

$$v = \sqrt{\frac{8gdS}{f}} = \frac{d^{2/3}\sqrt{S}}{n} \tag{1}$$

Dabei ist v die mittlere Fliessgeschwindigkeit, d die Abflusstiefe, S das Gerinnegefälle und g die Gravitationsbeschleunigung. Der Faktor f ist eine dimensionslose Grösse und wird hier im Zusammenhang mit den Berechnungen des Fliesswiderstandes verwendet.

In der Fachliteratur veröffentlichte Formeln zur Berechnung des Fliesswiderstandes und des Geschiebetransportes beinhalten teilweise Ansätze, welche explizit dem Effekt von grossen Rauigkeitselementen in Wildbächen und Gebirgsflüssen Rechnung tragen. Die in unserer Studie berücksichtigten und im folgenden Abschnitt 2.1 präsentierten Methoden zur Quantifizierung des Fliesswiderstandes haben eine gemeinsame Grundannahme. Sie gehen von einem heterogenen Gerinnebett aus, das einerseits aus relativ feinem Sohlenmaterial besteht, andererseits aber auch grobe, bis blockgrosse Partikel aufweist. Dabei tragen beide Elemente zu verschiedenen, von der Abflusshöhe abhängigen Anteilen zum gesamten Fliesswiderstand f_{tot} bei.

$$f_{tot} = f_0 + f_{add} \tag{2}$$

Mit f_0 als Fliesswiderstand durch das Sohlenmaterial und f_{add} als Widerstand durch grobe Rauigkeitselemente. Blöcke und Stufen stellen die grundlegenden groben Rauigkeitselemente – die Makrorauigkeit – dar, die in den Ansätzen berücksichtigt sind. Zur besseren Vergleichbarkeit wurde in einzelnen Fällen die Originalform der Fliesswiderstandsgleichungen in die Form des Darcy-Weisbach-Reibungsbeiwertes übertragen.

Die Fliesswiderstandsgleichungen wurden mit einer Geschiebetransportformel kombiniert, indem ein reduziertes Energieliniengefälle auf Basis der Aufteilung der Fliesswiderstände in die Transportformel eingeht (vgl. Chiari et al., 2010; Rickenmann und Recking, 2011) (vgl. Abschnitt 2.2).

2.1 Fliesswiderstandsformeln zur Berücksichtigung der Makrorauigkeit

Whittaker et al. (1988) untersuchten experimentell die Grenzbedingungen für die Bewegung grober Blöcke auf einem mobilen Gerinnebett. Whittaker et al. (1988) betrachteten die gesamte, auf den Wasserfluss wirkende Schubspannung als Summe zweier Komponenten: den Fliesswiderstand durch das Sohlenmaterial und den Fliesswiderstand durch grobe Blöcke:

$$\sqrt{\frac{8}{f_0}} = 2.5\ln\left(\frac{12r_h}{1.5D_{90}}\right) \tag{3}$$

$$\sqrt{\frac{8}{f_{add}}} = 2.5\ln\left(\frac{12r_h}{k_b}\right) \tag{4}$$

Dabei ist D_{90} die charakteristische Korngrösse des Bachbettmaterials, für welche 90% des Materials feiner ist. Die Blockrauigkeit k_b ist definiert als:

$$k_b = \alpha D_b\left(17.8 - 0.47\frac{d}{D_b}\right) \tag{5}$$

Dabei ist D_b der mittlere Blockdurchmesser und $\alpha = N D_b^2$ ist die Blockkonzentration im Gerinne mit N als Anzahl gesetzte Blöcke pro Quadratmeter Flusssohle. Whittaker et al. (1988) gingen von stationären und gleichförmigen Abflussbedingungen aus. Das Konzept der Blockrauigkeit k_b ist für den Bereich $\alpha < 0.15$ und $0.5 < d/D_b < 4$ anwendbar.

Egashira und Ashida (1991) erarbeiteten einen Fliesswiderstandsansatz für den Fluss über Stufen-Becken-Abfolgen, der sowohl die Energieverluste von Wirbeln in der Ablösungszone unmittelbar hinter der Stufe als auch die Verluste durch Sohlenmaterial berücksichtigt. Tests an einem experimentellen Gerinne mit künstlichen Stufen-Becken-Formen zeigten eine gute Übereinstimmung mit ihrem Ansatz. Für den Fliesswiderstand durch Sohlenmaterial zwischen den Stufen-Becken-Formen (f_0) gehen die Autoren (ähnlich wie Whittaker et al., 1988) von einer logarithmischen Geschwindigkeitsverteilung aus.

$$\sqrt{\frac{8}{f_0}} = 2.5\ln\left(\frac{11r_h}{1.5D_{90}}\right) \tag{6}$$

Der Fliesswiderstand in der Ablösungszone (f_{add}) wird gegeben als:

$$\sqrt{\frac{8}{f_{add}}} = \sqrt{\frac{2r_h}{KE \cdot H}} \tag{7}$$

Dabei ist KE eine empirische Konstante, angegeben mit 0.48, und H ist die Stufenhöhe. Der gesamte Fliesswiderstand f_{tot} ergibt sich in Gl. (8), wobei L die Distanz zwischen den Stufen ist und a eine empirische Variable darstellt, die das Verhältnis zwischen der Länge der Ablösungszone und der Stufenhöhe beschreibt. Dieser Parameter a variiert je nach Strömungsbedingungen stark.

$$\sqrt{\frac{8}{f_{tot}}} = \sqrt{\frac{8L}{aH(f_{add} - f_0) + f_0 L}} \tag{8}$$

Auch Pagliara und Chiavaccini (2006) führten in einer Laborrinne Experimente zum Fliesswiderstand durch. In ihrer Rinne platzierten sie glatte und raue Halbkugeln auf einem feineren Basismaterial, um die Wirkung von Blöcken zu simulieren. Die durch die Kugeln verursachte Zunahme des Fliesswiderstandes konnten die Autoren mit deren Blockkonzentration Γ, deren Disposition (in Reihen oder zufällig) und deren Oberflächenrauigkeit in Beziehung bringen. Es resultierten zwei empirische Formeln: Mit Gl. (9) wird der gesamte Fliesswiderstand inklusive der Wirkung von Blöcken berechnet, während Gl. (10) den Fliesswiderstand ohne Blöcke beschreibt.

$$\sqrt{\frac{8}{f_{tot}}} = 3.5(1+\Gamma)^c S^{-0.17}\left(\frac{d}{D_{84}}\right)^{0.1} \tag{9}$$

$$\sqrt{\frac{8}{f_0}} = 0.43\ln\left(S^{-2.5}\frac{d}{D_{84}}\right) + 2.8 \tag{10}$$

Die Zunahme des Fliesswiderstandes ist gemäss Gl. (9) direkt proportional zur Blockkonzentration $\Gamma = n\,\pi\,D_b^2/(4\,W\,L)$ mit n als Anzahl Blöcke sowie W und L als Gerinnebreite und -länge. Der Exponent c wurde empirisch abgeleitet und hängt von der Disposition und Oberflächenbeschaffenheit der Blöcke ab. Beide Gleichungen sollten ausschliesslich für steile (8 bis 40%) Blockrampen oder künstliche, lose geschüttete Gerinne verwendet werden. Zudem ist Gl. (9) nur für Blockdichten Γ bis 0.3 zulässig (Pagliara, 2008).

Yager (2006) präsentierte einen theoretischen Fliesswiderstandsansatz, dem die Annahme zugrunde liegt, dass die gesamte Sohlenschubspannung τ_t eines Gerinneabschnitts aufgeteilt werden kann in (a) die Schubspannung, die auf das mobile Sohlenmaterial wirkt, und (b) die Schubspannung, die auf unbewegliche Blöcke wirkt. Die beiden Anteile werden mit den entsprechenden Flächen gewichtet, die durch das bewegliche und das unbewegliche Material eingenommen werden. Unbewegliche Körner stehen nicht immer als isolierte Rauigkeitselemente im Bett, sondern bilden oft dichte Anhäufungen quer zur Fliessrichtung. Yager (2006) ging daher in ihrer Studie von stufenartig angeordneten Blöcken aus, für welche sie eine Stufenlänge λ_w und einen charakteristischen Stufenabstand λ_x definierte. Die Blockdichte und das Herausragen der Blöcke aus dem Sohlenmaterial erwiesen sich als die wichtigsten Einflussfaktoren auf die Schubspannung und die Fliessgeschwindigkeit. Für eine Aufteilung des Fliesswiderstands nehmen wir an, dass die in Rauigkeitsbeiwerte nach Darcy-Weisbach umgeformten Schubspannungen für bewegliches und unbewegliches Bettmaterial den Fliesswiderständen durch Sohlenmaterial bzw. durch grobe Rauigkeitselemente entsprechen.

$$\sqrt{\frac{8}{f_0}} = \sqrt{\frac{2}{C_m(1-\lambda_w/\lambda_x)}} \tag{11}$$

$$\sqrt{\frac{8}{f_{add}}} = \sqrt{\frac{2\lambda_x W}{A_{IF} C_I}} \tag{12}$$

C_m ist hier der Widerstandsbeiwert für das mobile Material, für welchen der Wert 0.44 angenommen wurde, und C_I der Widerstandsbeiwert für das immobile Material. A_{IF} ist die Fläche der unbeweglichen Körner, die senkrecht zur Fliessrichtung steht. Der theoretisch abgeleitete Ansatz zur Aufteilung der Sohlenschubspannung besitzt nur wenige empirische Variablen und sollte deshalb für viele verschiedene Abflussbedingungen gültig sein. Bisher wurde er erst an wenigen Labordaten und in einem Gebirgsbach getestet.

Rickenmann und Recking (2011) evaluierten in ihrer Studie verschiedene Fliesswiderstandsansätze anhand von Daten aus 2890 Fliessgeschwindigkeitsmessungen in Kiesbettflüssen weltweit. In diesem Datensatz befinden sich auch viele Messungen aus steilen Flüssen. Die Autoren folgern, dass die so genannte «variable power flow» Widerstandsgleichung VPE von Ferguson (2007) die Daten am besten beschreibt. Der VPE-Ansatz wurde in der Folge als Basis zur Entwicklung einer Methode zur Aufteilung des Fliesswiderstandes für mittel- bis grossskalige Rauigkeitsbedingungen in Gerinnen verwendet (im Sinne von Bathurst et al., 1981). Anhand von Gl. (13) kann ein Basisniveau für den Fliesswiderstand berechnet werden, das den Fliessbedingungen bei kleinskaliger Rauigkeit (d.h. bei grösseren relativen Abflusstiefen r_h/D_{84}) entspricht:

$$\sqrt{\frac{8}{f_0}} = \frac{v_0}{\sqrt{g \cdot r_h \cdot S}} = 6.5\left(\frac{r_h}{D_{84}}\right)^{0.167} \tag{13}$$

Wird Gl. (13) für mittel- bis grossskalige Rauigkeitsbedingungen in steilen Gerinnen mit kleinen relativen Abflusstiefen verwendet, kann mittels der virtuellen Geschwindigkeit v_0 ein entsprechendes Basisniveau geschätzt werden. Diese Annahme ist analog zur Verwendung der Gl. (3) beim Ansatz von Whittaker et al. (1988) bzw. der Gl. (6) beim Ansatz von Egashira und Ashida (1991). Der gesamte Fliesswiderstand kann wie folgt bestimmt werden:

$$\sqrt{\frac{8}{f_{tot}}} = \frac{v_{tot}}{\sqrt{g \cdot r_h \cdot S}} \tag{14}$$

wobei v_{tot} mit dem VPE-Ansatz nach Ferguson (2007) berechnet wird:

$$v_{tot} = \frac{\sqrt{g \cdot r_h \cdot S} \cdot 6.5 \cdot 2.5\left(\frac{r_h}{D_{84}}\right)}{\sqrt{6.5^2 + 2.5^2\left(\frac{r_h}{D_{84}}\right)^{5/3}}} \tag{15}$$

Das Verhältnis zwischen Basiswiderstand und gesamtem Fliesswiderstand ergibt sich dann zu:

$$\sqrt{\frac{f_0}{f_{tot}}} = \frac{v_{tot}}{v_0} \tag{16}$$

Gl. (15) liefert gute Resultate zur Berechnung von Fliessgeschwindigkeiten in steilen rauen Gerinnen. Der in Gl. (13) bis (16) dargestellte Ansatz ist der einzige hier verwendete Ansatz, der nicht explizit eine Messgrösse für grobe Rauigkeitselemente beinhaltet. Die hier vorgeschlagene Aufteilung des Fliesswiderstandes ist im Grunde eine Funktion der relativen Abflusstiefe. Es handelt sich um einen pauschalen, empirischen Ansatz, welcher aber implizit Informationen über eine durchschnittliche Rauigkeitserhöhung in steilen und rauen Gerinnen enthält. Ein alternatives und äquivalentes Berechnungsverfahren wurde von Rickenmann und Recking (2011) auch für den Fall hergeleitet, dass der Einheitsabfluss statt der Abflusstiefe gegeben ist; dieses Verfahren wurde von Rickenmann (Rickenmann 2012) auf Berechnungen zum Geschiebetransport angewendet.

2.2 Formeln zur Berechnung des Sedimenttransportes

Rickenmann (1991) leitete aus 252 von Meyer-Peter und Müller (1948), Smart und Jäggi (1983) und Rickenmann (1990) durchgeführten Laborversuchen eine dimensionslose Geschiebetransportgleichung ab, die ein Gerinnegefälle von 0.04 bis 20% abdeckt. Nach Rickenmann (2001) kann diese vereinfacht angegeben werden als:

$$\Phi_b = 2.5\sqrt{\theta}(\theta - \theta_c)Fr \tag{17}$$

Dabei ist $\phi_b = q_b\,[(s-1)\,g\,D_{50}^3]^{-0.5}$ die dimensionslose Geschiebetransportrate, q_b die volumetrische Geschiebetransportrate pro Einheitsbreite, $s = \rho_s/\rho$ das Verhältnis von Feststoffdichte (ρ_s) zur Dichte des Fluids (ρ), D_{50} die mediane Korngrösse, Fr die Froude-Zahl und $\theta = r_h\,S\,[(s-1)\,D_{50}]^{-1}$ die dimensionslose Sohlenschubspannung. Für die Berechnung der kritischen dimensionslosen Schubspannung bei Beginn des Geschiebetransportes θ_c wird statt r_h der hydraulische Radius r_{hc} bei kritischem Abfluss pro Einheitsbreite q_c eingesetzt. Dieser wiederum kann mit einer empirischen Gleichung abgeschätzt werden:

$$q_c = 0.065 \cdot (s-1)^{1.67}\sqrt{g}\,D_{50}^{1.5}\,S^{-1.12} \tag{18}$$

Gl. (18) wurde von Bathurst et al. (1987) vorgeschlagen und von Rickenmann (1990) leicht modifiziert. Sie basiert auf Laborver-

suchen mit relativ einheitlichen Korngrössen und Gerinnegefällen von 0.25 bis 20%. In der vorliegenden Studie verwenden wir Gl. (17) als Referenzgleichung zur Bestimmung des Geschiebetransports, welche die Auswirkungen grossskaliger Rauigkeitselemente nicht berücksichtigt.

Zur Bestimmung des Geschiebetransportes unter Berücksichtigung des Fliesswiderstandes durch grobe Rauigkeitselemente kann Gl. (17) nach Rickenmann (1991) auch in Kombination mit den in Abschnitt 2.1 präsentierten Fliesswiderstandsformeln verwendet werden. Rickenmann (2005) führte eine empirische Funktion ein, um grossskalige Rauigkeit in steilen Gerinnen über ein reduziertes Energieliniengefälle zu berücksichtigen. Mit dieser Methode konnte für verschiedene Hochwasserereignisse eine bessere Übereinstimmung zwischen im Feld beobachteten und berechneten Geschiebevolumen erreicht werden (z.B. Badoux und Rickenmann, 2008; Chiari und Rickenmann, 2011). Das gesamte Energieliniengefälle S bzw. das reduzierte Energieliniengefälle S_{red} wird unter Anwendung der Darcy-Weisbach-Gleichung (1) wie folgt angegeben:

$$S = \frac{v^2 f_{tot}}{8gd} = \frac{v^2 n^2_{tot}}{r_h^{4/3}} \tag{19}$$

$$S_{red} = \frac{v^2 f_o}{8gd} = \frac{v^2 n^2_o}{r_h^{4/3}} \tag{20}$$

Daraus lässt sich der Anteil S_{red} am gesamten Energieliniengefälle S bestimmen, welcher ausschliesslich der Basisreibung (der Grundrauigkeit des Sohlenmaterials) zuzuordnen ist:

$$S_{red} = S\left(\frac{n_0}{n_{tot}}\right)^2 = S\left(\sqrt{\frac{f_0}{f_{tot}}}\right)^2 \tag{21}$$

Gemäss theroretischen Überlegungen von Meyer-Peter und Müller (1948) kann der Exponent in Gl. (21) auch einen Wert von 1.33 aufweisen. Daher nahmen Chiari et al. (2010) einen plausiblen Bereich für den Exponenten von 1 bis 2 an, und Gl. (21) kann dann allgemein geschrieben werden als:

$$S_{red} = S\left(\frac{n_0}{n_{tot}}\right)^e = S\left(\sqrt{\frac{f_0}{f_{tot}}}\right)^e \tag{22}$$

Meyer-Peter und Müller (1948) schlugen aufgrund ihrer Experimente einen empirischen Wert $e = 1.5$ für den Exponenten in Gl. (22) vor. Anhand der Nachrechnungen des Geschiebetransportes bei verschiedenen Hochwasserereignissen in der Schweiz und in Österreich ergibt sich ein geeigneter Wertebereich von $e = 1.2$ bis 1.5 (Badoux und Rickenmann, 2008; Chiari und Rickenmann, 2011). In dieser Studie wird ein Wert von $e = 1.5$ verwendet.

S_{red} wird verwendet, um eine reduzierte dimensionslose Sohlenschubspannung zu bestimmen, welche in unserer Referenzgleichung zur Bestimmung des Geschiebetransports (Gl. 17) eingesetzt wird:

$$\theta_r = \frac{r_h \cdot S_{red}}{(s-1)D_{50}} \tag{23}$$

Weil Gl. (18) rein empirisch ist, wurde die reduzierte kritische dimensionslose Schubspannung $\theta_{c,r}$ bestimmt mit:

$$\theta_{c,r} = \frac{r_{hc} \cdot S_{red(r_{hc})}}{(s-1)D_{50}} \tag{24}$$

wobei der kritische hydraulische Radius r_{hc} und das reduzierte Energieliniengefälle $S_{red(rhc)}$ für den kritischen Abfluss zum Bewegungsbeginn des Geschiebes mit Gl. (18) berechnet wurden. Damit ergibt sich der Geschiebetransport zu:

$$\Phi_b = 2.5\sqrt{\theta_r}(\theta_r - \theta_{c,r})Fr \tag{25}$$

3. Untersuchungsgebiete und Datengrundlage

3.1 Geschiebetransport- und Abflussdaten

Zum Testen der ausgewählten Formeln wurden Messungen in 13 Wildbächen und Gebirgsflüssen in den Schweizer Alpen und Voralpen durchgeführt *(Bild 1)*. Durch diese Auswahl der Gerinne konnten wir einen weiten Bereich von Gerinnecharakteristiken abdecken (vgl. *Bild 2*). Während gewisse untersuchte Gerinneabschnitte

Parameter	Symbol	Rotenbach	Rappengraben 1	Schwändlibach	Sperbelgraben	Rappengraben 2	Erlenbach	Melera	Saltina	Lonza	Baltschieder	Mattenbach	Gamsa	Buoholzbach	Steinibach
Einzugsgebietsgrösse (km²)		1.7	0.7	1.4	0.5	0.6	0.7	1.1	78	170	43	31	38	14	12
Höhenlage, niedrigste/höchste (m ü.M.)		1274/1630	983/1256	1217/1642	911/1203	990/1256	1110/1655	962/1773	670/3438	630/3994	647/3934	1015/2728	660/3391	490/2404	493/1955
Gerinneneigung [a]	S	0.051	0.06	0.098	0.101	0.106	0.115	0.17	0.02	0.064	0.135	0.15	0.165	0.17	0.186
D_{30} (m) [b]	D_{30}	0.02	0.01	0.02	0.02	0.01	0.03	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03	0.02	0.03	0.04
D_{50} (m) [b]	D_{50}	0.05	0.03	0.03	0.04	0.03	0.07	0.04	0.06	0.05	0.07	0.07	0.05	0.07	0.12
D_{84} (m) [b]	D_{84}	0.18	0.08	0.16	0.08	0.08	0.29	0.16	0.16	0.20	0.18	0.45	0.14	0.23	0.92
D_{90} (m) [b]	D_{90}	0.25	0.10	0.21	0.09	0.10	0.39	0.22	0.19	0.30	0.21	0.72	0.16	0.54	1.24
Gerinnebreite bei bordvollem Abfluss (m) [c]	W	5.63	4.98	4.96	5.43	4.98	4.70	5.57	14.14	12.44	11.68	13.50	11.80	9.76	8.00
Gerinnebreite an der Basis (m) [c]	W_{base}	3.75	4.20	3.50	3.00	3.50	3.50	4.00	12.00	9.50	9.00	11.00	9.50	7.00	6.00
Blockkonzentration [d]	Γ	0.02	0	0.04	0	0	0.11	0.02	0.08	0.09	0.16	0.26	0.16	0.10	0.40
Mittlerer Blockdurchmesser (m) [e]	D_b	0.63	-	0.75	-	-	0.82[f]	0.72	1.03	1.00	1.31	1.02	1.16	1.07	1.06
Mittlerer Stufenabstand (m) [g]	L	10.45	22.91	16.19	60.83	22.91	7.86	15.32	31.39	17.78	7.84	10.85	16.48	10.00	50.83
Mittlere Stufenhöhe (m) [g]	H	0.51	1.58	0.81	1.00	1.58	0.69	1.04	1.65	1.04	1.13	0.98	3.02	2.12	2.73
Stufengefälle [g]	H/L	0.049	0.069	0.050	0.016	0.069	0.088	0.068	0.053	0.058	0.144	0.09	0.183	0.212	0.054
Blockabstand (m) [h]	λ_x	29.64	-	13.24	-	-	4.00	26.38	10.12	9.17	6.40	3.12	5.57	8.30	2.07
Stufenlänge (m) [h]	λ_w	0.63	-	0.75	-	-	1.30	0.72	1.03	1.00	1.31	1.02	1.16	1.07	1.06
Höhe des Sediments über der Basis der unbeweglichen Körner (m) [i]	z_m	0.25	-	0.32	-	-	0.31	0.38	0.40	0.39	0.55	0.63	0.56	0.47	0.47
Herausragen der unbeweglichen Körner (m) [i]	p_u	0.38	-	0.43	-	-	0.13	0.34	0.63	0.61	0.77	0.39	0.60	0.60	0.60
Median Korngrösse des mobilen Sediments (m) [j]	D_{50m}	0.05	0.03	0.03	0.04	0.03	0.06	0.04	0.06	0.05	0.07	0.07	0.05	0.07	0.10
Koeffizient für Blockoberfläche [k]	c	-2.40	-2.40	-2.40	-2.40	-2.40	-2.40	-2.40	-2.40	-2.40	-2.40	-2.40	-2.40	-2.40	-2.40
Blockkonzentration [l]	α	0.02	0	0.06	0	0	0.14	0.03	0.10	0.11	0.20	0.32	0.20	0.13	0.50

[a] mittlere Gerinneneigung des Untersuchungsabschnitts; [b] Korngrössenverteilung berechnet nach Fehr (1987) mithilfe von Linienzahlanalysen von mindestens 500 Steinen > 1cm für jeden Bachabschnitt; [c] Mittelung von Messungen mindestens alle 10 Meter; [d] nach Pagliara und Chiavaccini (2006); [e] gemessen wurden Körner mit B-Achsen Durchmesser grösser 0.5 m; [f] Yager et al.(2007) gibt einen Wert von 0.44 an; [g] berechnet aus Längsprofilen mit Laserdistanz- und -neigungsmesser, wobei H die vertikale Distanz zwischen höchstem Punkt der Stufe und dem tiefsten Punkt des Beckens und L ist die effektive Distanz zwischen den Stufen; Stufen wurden gemessen bei Vorhandensein eines Beckens und bei $H > 0.5$ m; [h] nach Yager (2006); [i] nach Yager (2006) mit $z_m = D_b - p_u$, wobei p_u die Länge des strömungszugewandten Teil eines unbeweglichen Korns ist, der aus dem mobile Sediment herausragt; [j] abgeleitet aus der Korngrössenverteilung unter Ausschluss der Korngrössen die grosser als D_b sind; [k] Koeffizient der Blockverteilung und der Blockoberflächentextur nach Pagliara und Chiavaccini (2006); [l] nach Whittaker et al. (1988)

Tabelle 1. Gerinneeigenschaften

ziemlich flach verlaufen, weisen andere steilere Abschnitte Stufen-Becken-Abfolgen oder sogar kaskadenartige Morphologien auf (gemäss Montgomery und Buffington, 1997). Die Gefälle der Gerinneabschnitte reichen von 2 bis 19%. Die berücksichtigten Wildbäche und Gebirgsflüsse lassen sich in zwei Klassen unterteilen: (a) Gerinne, für welche langjährige, periodische Messreihen von abgelagerten Geschiebevolumen bestehen, und (b) Gerinne, welche nach einzelnen extremen Transportereignissen untersucht wurden *(Tabelle 1)*.

In die erste Klasse (a) fallen fünf Einzugsgebiete von Wildbächen, in denen abgelagertes Material in Geschiebesammlern (Rotenbach, Schwändlibach, Melera) oder kleineren Rückhalteräumen (Sperbelgraben, Rappengraben) über Jahrzehnte regelmässig vermessen wurde (Rickenmann, 1997). Der sechste Bach der Klasse (a) ist der Erlenbach (Hegg et al., 2006), wo transportiertes Geschiebe seit 1983 mindestens jährlich in einem Geschiebesammler vermessen wird. Zusätzlich liegen im Erlenbach auch Informationen zum Transportgeschehen während einzelner Ereignisse vor.

In die zweite Klasse (b) fallen insgesamt sieben Wildbäche und Gebirgsflüsse, deren Transportaktivität nach einem extremen Unwetterereignis untersucht wurde. Während des bedeutenden Hochwasserereignisses vom Oktober 2000 (BWG, 2002) kam es in den seitlichen Zuflüssen der Rhone, der Lonza, Saltina, dem Baltschiederbach und der Gamsa, zu beträchtlichen Sedimentumlagerungen (vgl. dazu auch Badoux und Rickenmann, 2008). Für drei weitere Einzugsgebiete der Klasse (b), den Buoholzbach, Steinibach und Mattenbach, wurden fluvial transportierte Sedimentvolumen während des extremen Unwetters im August 2005 untersucht. Genauere Angaben zu den Bacheigenschaften und den verwendeten Abfluss- und Geschiebedaten geben Nitsche et al. (2011).

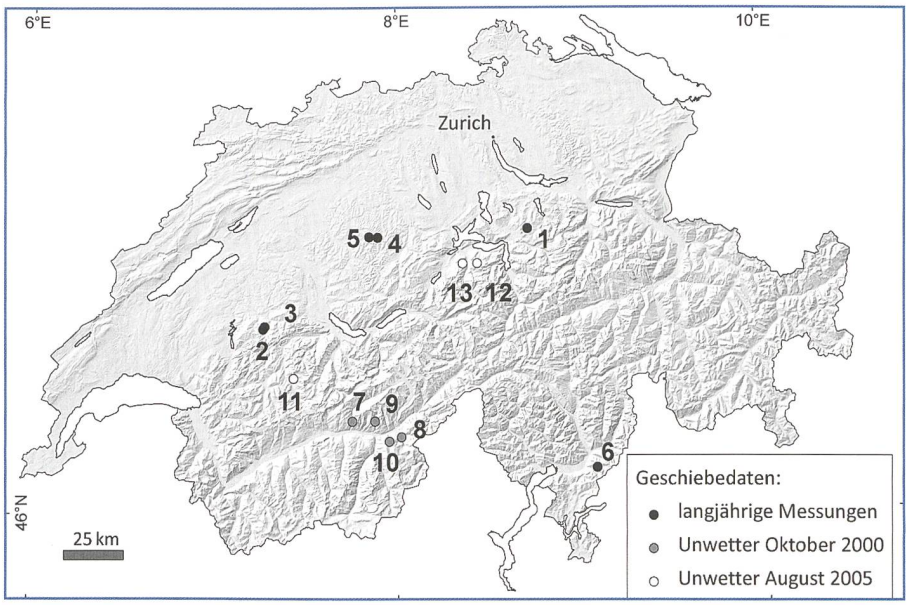


Bild 1. Geografische Lage der untersuchten Gerinne. Die Symbole geben den Typ der zur Verfügung stehenden Geschiebedaten an (langjährige, periodische Messreihen oder einzelne extreme Transportereignisse). 1 = Erlen bach, 2 = Rotenbach, 3 = Schwändlibach, 4 = Rappengraben, 5 = Sperbelgraben, 6 = Melera, 7 = Lonza, 8 = Saltina, 9 = Baltschiederbach, 10 = Gamsa, 11 = Mattenbach, 12 = Buoholzbach, 13 = Steinibach.

Bild 2. Beispiele der untersuchten Bäche mit unterschiedlich rauen Gerinnen: a) Saltina, b) Sperbelgraben, c) Erlenbach, d) Gamsa (vgl. Bild 1 und Tabelle 1).

3.2 Feldmessungen

Die Rauigkeit eines Gerinneabschnittes beschreibenden morphologischen Parameter wurden in den 13 Gerinnen aufgenommen und sind in *Tabelle 1* aufgeführt. Wir haben uns auf diejenigen Grössen konzentriert, die zur Anwendung der in Abschnitt 2.1 und 2.2 präsentierten Fliesswiderstands- und Geschiebetransportgleichungen erforderlich sind. Einige Parameter wie etwa die Gerinnebreite und der Stufenabstand variieren innerhalb eines betrachteten Abschnittes beträchtlich. Da alle Berechnungen für einzelne Flussabschnitte erfolgen, verwenden wir Abschnittsmittelwerte der gemessenen Grössen für die sogenannte Schlüsselstrecke mit der geringsten Transportkapazität. In Strecken mit ähnlicher Gerinnerauigkeit und ähnlichem Abfluss entspricht die Schlüsselstrecke dem Abschnitt mit dem geringsten Gerinnegefälle. Es ist jedoch möglich, dass ein etwas steilerer Abschnitt mit bedeutend grösserer Gerinnerauigkeit die geringste Geschiebetransportkapazität aufweist. Im Rahmen dieser Studie wurde vom Prinzip des kleinsten Gefälles ausgegangen. In den untersuchten Gerinnen stimmen die bestimmten Schlüsselstrecken mit den Abschnitten unmittelbar oberhalb der Geschiebeablagerungsgebiete überein. Die entsprechenden Längen der Schlüsselstrecken variieren stark und betragen 10 bis 34 mal die Gerinnebreite.

4. Resultate

4.1 Fliesswiderstands-berechnungen

Die Aufteilung des Fliesswiderstandes, durch den Term $(f_0/f_{tot})^{0.5}$ charakterisiert, variiert je nach verwendeter Methode stark. Für einen gegebenen Wildbach oder Gebirgsfluss kann die Aufteilung über einen weiten Bereich von relativen Abflusstiefen sogar entgegengesetzte Resultate hervorbringen *(Bild 3)*. Dies spiegelt die Unterschiede in den verwendeten Ansätzen zur Fliesswiderstandsaufteilung deutlich wider. Aber auch Methoden, welche auf ähnlichen Rauigkeitsparametern basieren, liefern teilweise (stark) abweichende Quotienten von Basisrauigkeit zu Gesamtrauigkeit $(f_0/f_{tot})^{0.5}$. Dies gilt auch für den engen Bereich von Abflussbedingungen, die während der berücksichtigten Ereignisse für den Geschiebetransport von Bedeutung waren (*Bild 3*, graue Balken).

Als Beispiel hierzu können die Ansätze von Whittaker et al. (1988) und Pagliara und Chiavaccini (2006) erwähnt werden, welche beide die Blockdichte zur Berechnung des Fliesswiderstandes verwenden. Die Methoden weisen abweichende empirische Beziehungen zwischen der Blockdichte und der relativen Abflusstiefe auf, was vermutlich auf unterschiedliche zugrundeliegende Versuchsanordnungen im Labor zurückzuführen ist.

Die vier in *Bild 3* dargestellten Beispiele zeigen Resultate von Wildbächen und Gebirgsflüssen mit sehr unterschiedlichen Rauigkeitsmerkmalen (vgl. *Bild 2* und *Tabelle 1*). Der Gerinneabschnitt der Saltina weist das niedrigste Gefälle aller untersuchten Abschnitte auf. Der Sperbelgraben zeichnet sich durch relativ kleine Korngrössen und das gänzliche Fehlen von groben Blöcken aus. Die Wechsellagerung von erosionsfälligen Mergellagen und resistenteren Nagelfluh- und Sandsteinlagen führte aber zur beobachteten Stufen-Becken-artigen Gerinnemorphologie. Während der Erlenbach eine mittlere Blockdichte und ein mittleres Stufengefälle aufweist, ist die Gamsa durch hohe Werte der Blockdichte und des Stufengefälles gekennzeichnet.

Für den vergleichsweise rauen Abschnitt der Gamsa liefern die Ansätze von Egashira und Ashida (1991), Whittaker et al. (1988) und Yager (2006) für alle Abflussverhältnisse einen ziemlich tiefen Anteil von Basisrauigkeit an der Gesamtrauigkeit. Dieselben Ansätze ergeben für den Erlenbach einen höheren Anteil von Basisrauigkeit, da der Erlenbach weniger grobe Rauigkeitselemente aufweist. Auf den Sperbelgraben angewendet, ergeben die Ansätze von Whittaker et al. (1988) und Yager (2006) für den Term $(f_0/f_{tot})^{0.5}$ einen Wert von eins. Die Berechnung nach Egashira und Ashida (1991) hingegen, die ausschliesslich die Stufen-Becken-Geometrie berücksichtigt, resultiert in einem beträchtlichen Anteil der Formrauigkeit.

Unter Berücksichtigung aller 14 Untersuchungsabschnitte zeigt nur der Ansatz von Rickenmann und Recking (2011) in allen Fällen eine Zunahme des Anteils an Basisrauigkeit mit zunehmender relativer Abflusstiefe. Für die Ansätze von Yager (2006) und Whittaker et al. (1988) gilt dies nur ab einem bestimmten Grenzwert für r_h/D_{84}. Die Methoden von Egashira und Ashida (1991) und Pagliara und Chiavaccini (2006) zeigen eine schwächere Abhängigkeit des Verhältnisses $(f_0/f_{tot})^{0.5}$ von der relativen Abflusstiefe. Der Anteil der Basisrauigkeit an der Gesamtrauigkeit variiert im betrachteten r_h/D_{84}-Bereich nur mässig bis wenig.

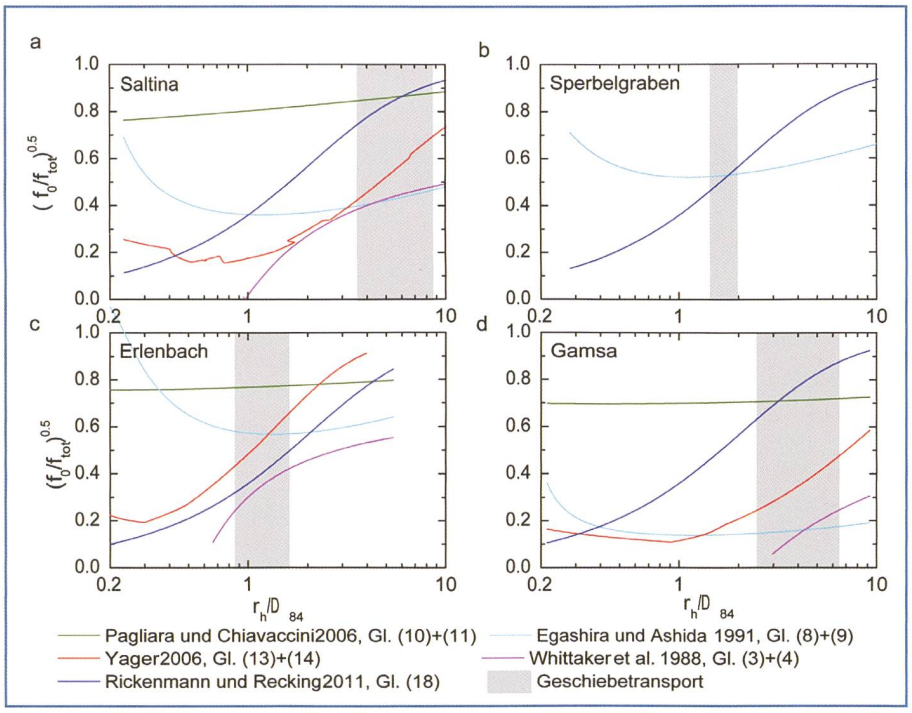


Bild 3. Anteil des Basiswiderstands am Gesamtfliesswiderstand in Form von $(f_0/f_{tot})^{0.5}$ bei unterschiedlichen relativen Abflusstiefen (r_h/D_{84}) für die vier unterschiedlich rauen Gerinne in Bild 2. Jede Farblinie zeigt die Berechnungen für einen Fliesswiderstandsansatz (vgl. Tabelle 2). Die grauen Flächen geben den Bereich an, in dem 90% des Geschiebetransports während der untersuchten Ereignisse auftrat (verändert nach Nitsche et al., 2011).

4.2 Berechnungen von Geschiebetransportvolumen

Für die Berechnungen des Geschiebetransportes in den Untersuchungsgebie-

Geschiebetransport	Gleichung	Partitionierung der Fliesswiderstände	Gleichung	Abkürzung
Rickenmann (2001)	Gl. (17)	keine Reduktion (no reduction)	-	Ri-no
Rickenmann (2001)	Gl. (25)	Pagliara und Chiavaccini (2006)	Gl. (9) + (10)	Ri-PC
Rickenmann (2001)	Gl. (25)	Whittaker et al. (1988)	Gl. (3) + (4)	Ri-W
Rickenmann (2001)	Gl. (25)	Egashira und Ashida (1991)	Gl. (7) + (8)	Ri-EA
Rickenmann (2001)	Gl. (25)	Yager (2006)	Gl. (11) + (12)	Ri-Y
Rickenmann (2001)	Gl. (25)	Rickenmann und Recking (2011)	Gl. (16)	Ri-RR

Tabelle 2. Kombinationen von Geschiebetransport- und Fliesswiderstandsgleichungen mit Abkürzungen.

ten verwendeten wir Gl. (17) von Rickenmann (2001). Dieser Ansatz wurde als Referenzgleichung ohne weitere Korrektur sowie in Kombination mit allen in Abschnitt 2.1 aufgeführten Methoden zur Aufteilung des Fliesswiderstandes angewendet. Die Referenzgleichung und die fünf Kombinationen sind in Tabelle 2 zusammengefasst. Zur Bewertung der verschiedenen Methoden verwenden wir das Verhältnis von berechnetem zu gemessenem Geschiebetransportvolumen (V_{ber}/V_{gem}).

Die Güte der mit den sechs Ansätzen erzielten Resultate variiert für die verschiedenen Gerinne und für die einzelnen Hochwasserereignisse stark *(Bild 4)*. Für Gerinne mit langjährigen Messreihen wurden die Bereiche der Verhältnisse V_{ber}/V_{gem} für jedes Untersuchungsgebiet mit sogenannten Boxplots dargestellt; für Gerinne mit einzelnen Extremereignissen sind Einzelpunkte aufgeführt. Einige Gleichungen weisen eine beträchtliche Variation von einer bis drei Grössenordnungen für Werte von V_{ber}/V_{gem} auf. Die Referenzgleichung ohne Berücksichtigung von groben Rauigkeitselementen (Ri-no) überschätzt in der Regel die Geschiebetransportvolumen um bis zu zwei Grössenordnungen *(Bild 4)*. Im Vergleich dazu wurden mit allen Formelkombinationen mit einer Aufteilung des Fliesswiderstandes jeweils kleinere Volumen bestimmt. Die Ermittlung von Geschiebevolumen für einzelne Hochwasserereignisse erzielt generell bessere Ergebnisse als für die langjährigen Datenreihen. Letztere beinhalten eine Vielzahl von kleinen Transportereignissen mit Abflüssen in der Nähe des Transportbeginns und kleinen relativen Abflusstiefen (r_h/D_{84}),

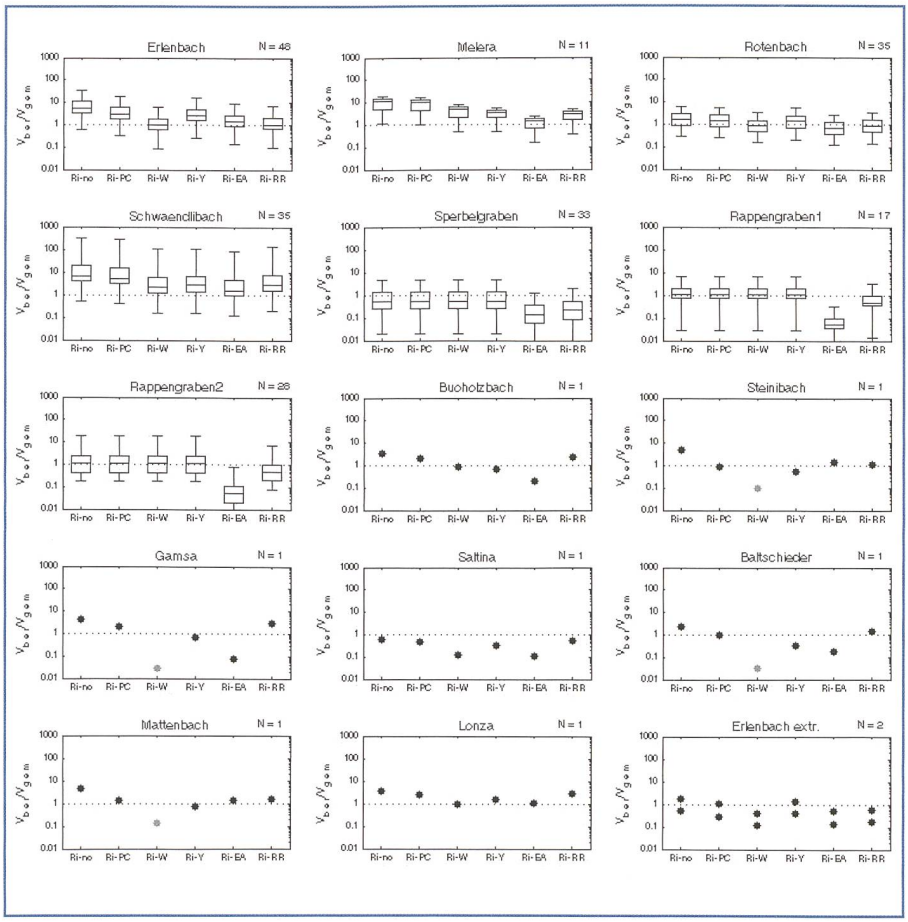


Bild 4. Verhältnis von berechneten zu gemessenen Geschiebevolumen (V_{ber}/V_{gem}) für die untersuchten Gerinne. Die Berechnung mit der Referenzformel von Rickenmann (2001) ohne Korrektur für Makrorauigkeiten ist jeweils ganz links aufgeführt (Ri-no). Die weiteren Formelkombinationen sind in Tabelle 2 definiert. Punkte in hellem Grau bedeuten, dass der Ansatz für den Bach nicht anwendbar ist. N ist die Anzahl verwendeter Geschiebetransportereignisse. Die gestrichelte Line beim Wert 1 entspricht einer perfekten Übereinstimmung von Berechnung und Beobachtung. Die Boxen sind durch das 25- und 75-Perzentil und den Median definiert. Die Whisker zeigen die 5- und 95-Perzentile der Daten. Die Grafik «Erlenbach extr.» (letzte Zeile, rechte Spalte) enthält aussschliesslich Daten von zwei der grössten gemessenen Hochwasserereignissen im Erlenbach (verändert nach Nitsche et al., 2011).

Name	Definition	Einbezogene Flüsse
Γ-gross	Blockkonzentration $\Gamma \geq 0.1$	Gamsa, Baltschieder, Buoholzbach, Steinibach, Mattenbach, Erlenbach
Γ-klein	Blockkonzentration $\Gamma < 0.1$	Melera, Rotenbach, Schwändlibach, Sperbelgraben, Rappengraben 1+2, Saltina, Lonza
H/L-gross	Stufengefälle $H/L > 0.068$	Gamsa, Baltschieder, Buoholzbach, Mattenbach, Erlenbach, Rappengraben 1+2
H/L-klein	Stufengefälle $H/L \leq 0.068$	Melera, Rotenbach, Schwändlibach, Sperbelgraben, Steinibach, Saltina, Lonza
Ereignisdaten	Daten von Grossereignissen	Buoholzbach, Steinibach, Gamsa, Saltina, Baltschieder, Mattenbach, Lonza, Erlenb._extr.
Langzeitdaten	Daten mehrjähriger Messreihen	Erlenbach, Melera, Rotenbach, Schwändlibach, Sperbelgraben, Rappengraben 1+2
Alle Daten	Gesamtdatensatz	Ereignisdaten + Langzeitdaten (Geschiebesummen der einzelnen Gerinne)

[a] Für die Gerinne Gamsa, Baltschieder, Steinibach und Mattenbach wurden mit dem Ansatz Rickenmann-Whittaker (Ri-W) keine Berechnungen berücksichtigt, weil die Bedingungen ausserhalb des Gültigkeitsbereichs lagen.

Tabelle 3. Definition der Datengruppen [a].

für die Geschiebeberechnungen mit einem grenzwertbasierten Ansatz generell ungenauer sind.

Um den Einfluss verschiedener Gerinnecharakteristiken auf die einzelnen Ansätze *(Tabelle 2)* zu untersuchen, wurden die 13 Gerinne gemäss folgenden Kriterien unterteilt: (i) hohe und tiefe Blockdichte Γ, (ii) hohes und tiefes Stufengefälle *H/L*, und (iii) Datenklassen (vgl. auch Tabelle 3). Eine solche Vorgehensweise sollte es ermöglichen, die Bedingungen zu bestimmen, unter denen ein Ansatz besonders gute Resultate liefert bzw. unter denen ein Ansatz eher ungeeignet ist. Die auf groben Blöcken basierten Ansätze (Kombinationen Ri-PC, Ri-W und Ri-Y) lieferten erwartungsgemäss bessere Ergebnisse für Flüsse mit hoher Blockdichte und hohem Stufengefälle als für Flüsse mit weniger ausgeprägten Rauigkeitselementen *(Bild 5)*. Zudem erwiesen sich die anhand von Kombinationen mit starker physikalischer Komponente (Ri-W und Ri-Y) durchgeführten Berechnungen als etwas besser als diejenigen mit der Verknüpfung Ri-PC. Für Gerinne mit einer geringen Blockdichte und/oder einem tiefen Stufengefälle resultierte eine hohe Variabilität der vorhergesagten Geschiebetransportvolumen Vber von mehr als einer Grössenordnung *(Bild 5)*. Der Fliesswiderstandsansatz von Yager (2006) ergab für Gerinne mit hoher Blockdichte relativ gute Vorhersagen (Medianwerte von V_{ber}/V_{gem} innerhalb einer Grössenordnung um 1). Die Kombination unter Berücksichtigung des Fliesswiderstandsansatzes von Egashira und Ashida (1991) (Ri-EA), welche dem Stufengefälle explizit Rechnung trägt, lieferte Werte für das Verhältnis V_{ber}/V_{gem}, die über eineinhalb Grössenordnungen variierten. Dies entspricht dem grössten Schwankungsbereich aller sechs getesteten Ansätze. Der jeweilige Medianwert von V_{ber}/V_{gem} weist dabei – mit Ausnahme von Gerinnen mit tiefem Stufengefälle – auf eine systematische Unterschätzung der Transportvolumen mittels Kombination Ri-EA *(Bild 5)*. Die Korrektur des Energieliniengefälles scheint somit im Ansatz von Egashira und Ashida (1991) zu stark auszufallen. Die Formelkombination Ri-RR generierte für alle Gerinnegruppen (Tabelle 3) Medianwerte von V_{ber}/V_{gem} nahe dem Wert eins und wies jeweils relativ geringe Schwankungen auf.

Für die Gerinne mit einer hohen Blockdichte Γ lieferten die Kombinationen Ri-Y, Ri-PC, Ri-W und Ri-RR Medianwerte von V_{ber}/V_{gem} im Bereich von 1 *(Bild 5)*. In all diesen Ansätzen (ausser Methode Ri-RR) wird der Fliesswiderstand auch auf der Basis der groben Blöcke berechnet. In Gerinnen mit einer ausgeprägten Stufen-Becken-Struktur generierten schliesslich die Kombinationen R-Y, R-PC, Ri-W und R-RR die besten Ergebnisse.

In *Bild 6* sind die Resultate der verschiedenen Ansätze in Klassen dargestellt, um die Qualität der Ergebnisse zu veranschaulichen. Für die langjährigen Datensätze lieferten die Kombinationen Ri-W, Ri-RR und Ri-Y die besten Vorhersagen. Für 71, 64 bzw. 63% der berechneten Transportvolumen liegt die Abweichung innerhalb eines Faktors zehn um die beobachteten Werte ($0.3 < V_{ber}/V_{gem} < 3$).

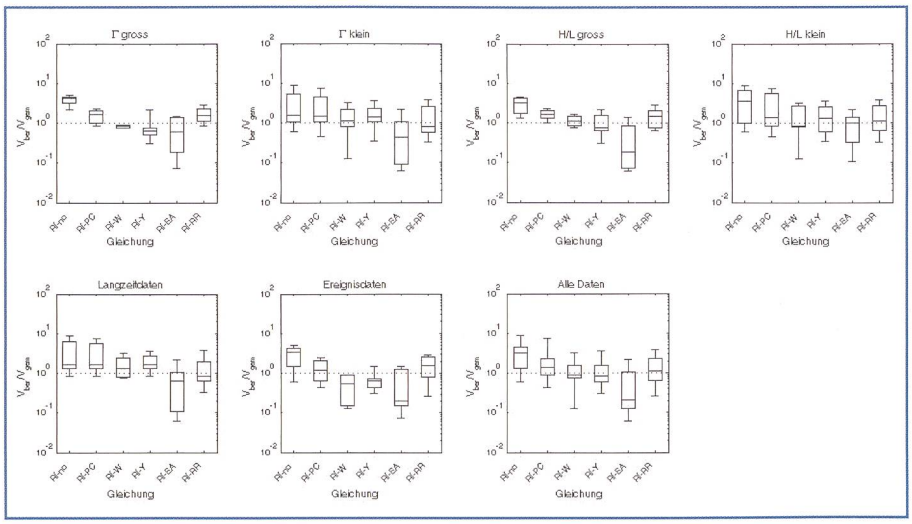


Bild 5. Verhältnis berechneter zu gemessener Geschiebefracht (V_{ber}/V_{gem}) für verschiedene Gleichungskombinationen (s. Tabelle 2), differenziert nach verschiedenen Datentypen (s. Tabelle 3). Die gestrichelte Line beim Wert 1 entspricht einer perfekten Übereinstimmung von Berechnung und Beobachtung (verändert nach Nitsche et al., 2011).

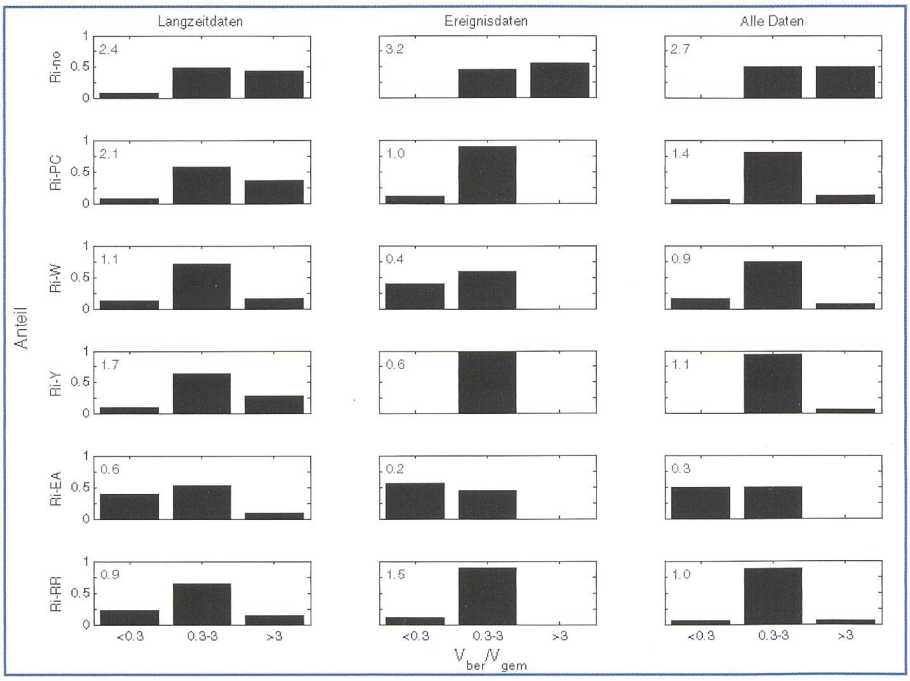


Bild 6. Verhältnis berechnetem zu gemessenem Geschiebevolumen (V_{ber}/V_{gem}), berechnet mit verschiedenen Gleichungskombinationen (Zeilen; definiert in Tabelle 2) und unterschieden nach Datengruppen (Spalten; definiert in Tabelle 3). Die V_{ber}/V_{gem}-Verhältnisse sind in drei Klassen angegeben, von denen die mittlere Klasse alle Berechnungen innerhalb eines Faktors zehn um die gemessen Geschiebefrachten repräsentiert. Die grauen Zahlen geben den Median der V_{ber}/V_{gem}-Verhältnisse an. Die Gruppe «Langzeitdaten» besteht aus 207 Transportereignissen, die Gruppe «Ereignisdaten» besteht aus 9 Transportereignissen. Die Gruppe «Alle Daten» besteht aus den Geschiebesummen der einzelnen Gerinne, um jeden Bach unabhängig von der Ereignisanzahl gleich zu gewichten. Der Ansatz von Whittaker et al. (Ri-W) wurde bei vier Gerinnen nicht angewendet (verändert nach Nitsche et al., 2011).

	Langzeitdaten					Ereignisdaten					Alle Daten				
	P_{10}	P_{90}	med	SD	CV	P_{10}	P_{90}	med	SD	CV	P_{10}	P_{90}	med	SD	CV
Ri-no	0.41	14.5	2.4	35.0	4.4	0.53	4.8	3.2	1.7	0.6	0.61	7.0	2.7	2.4	0.8
Ri-PC	0.37	10.2	2.1	28.2	4.5	0.35	2.3	1.0	0.7	0.6	0.48	6.2	1.4	2.0	1.0
Ri-W	0.24	5.2	1.1	10.8	3.9	0.12	0.9	0.4	0.4	0.8	0.12	2.9	0.9	1.0	0.9
Ri-Y	0.32	6.1	1.7	11.5	3.2	0.32	1.5	0.6	0.4	0.6	0.35	2.9	1.1	0.9	0.7
Ri-EA	0.04	2.9	0.6	8.4	4.5	0.09	1.5	0.2	0.6	1.0	0.07	1.5	0.3	0.6	1.0
Ri-RR	0.16	3.9	0.9	14.1	4.9	0.33	2.9	1.5	1.0	0.7	0.34	2.9	1.0	1.1	0.8

[a] P_{10} und P_{90} definieren das 10. und 90. Perzentil der Daten, *med* bezeichnet den Median, *SD* ist die Standardabweichung und *CV* ist der Variationskoeffizient.

Tabelle 4. Statistische Kennwerte für das Verhältnis berechneter zu gemessener Geschiebevolumen (V_{ber}/V_{gem}) [a].

Insgesamt schwankten die V_{ber}/V_{gem}-Werte aller sechs Ansätze für diese Klasse in einem Bereich zwischen 0.04 und 59. Den besten Medianwert für V_{ber}/V_{gem} der langjährigen Daten erzielten Ri-W (1.1) und Ri-RR (0.9) (*Bild 6* und *Tabelle 4*). Der Variationskoeffizient von Ri-W und Ri-RR liegt allerdings im Bereich der meisten anderen Ansätze; in dieser Sparte erreichte Kombination Ri-Y den tiefsten Wert.

Für die «Ereignisdaten» war die Kombination Ri-Y der einzige Ansatz, bei dem die Abweichung aller berechneten Transportvolumen innerhalb eines Faktors zehn um die beobachteten Werte ($0.3 < V_{ber}/V_{gem} < 3$) lag. Die Kombination Ri-PC ergab zwar den besten Medianwert für die «Ereignisdaten», doch bei diesem Ansatz gibt es einen Vorbehalt bezüglich der allgemeineren Anwendbarkeit der Resultate (vgl. Abschnitt 5). Die Kombination Ri-EA ergab die niedrigsten V_{ber}/V_{gem}-Werte, mehr als 70% der Ereignisse wurden unterschätzt. Den besten Medianwert für den gesamten Datensatz («Alle Daten») wurde mit dem empirischen Ansatz Ri-RR erzielt ($V_{ber}/V_{gem} = 1.0$), und 88% der Ereignisse wurden innerhalb eines Faktors zehn um die beobachteten Werte vorhergesagt. Die Medianwerte der Blockansätze Ri-Y und R-W fielen allerdings nur marginal schlechter aus. Ri-Y sagte sogar 93% aller Ereignisse innerhalb eines Faktors zehn um die beobachteten Frachten voraus.

5. Diskussion

Die meisten der getesteten Ansätze zur Fliesswiderstandsaufteilung enthalten eine empirische Komponente und die Ergebnisse zeigen, dass ein einzelner Ansatz nicht weit ausserhalb der Strömungsverhältnisse anwendbar ist, als für die er entwickelt wurde. Die meisten Gleichungen schnitten bei grossen Abflussereignissen besser ab, also bei grossen relativen Abflusstiefen und hohen Sohlschubspannungen, wenn ein Grossteil des Bachsediments mobil ist. Dieses Phänomen wurde auch in anderen Studien beobachtet (z.B. Bathurst et al., 1987; Rickenmann, 2001). Die bedeutenden Abflussereignisse hatten generell längere Transportphasen mit grossen Abflüssen als die Ereignisse der Langzeitdatenreihe.

Im Vergleich zur Referenzgleichung von Rickenmann (2001) (Ri-no), die keine Makrorauigkeit berücksichtigt, reduzierte der Blockansatz von Pagliara und Chiavaccini (2006) in der Kombination Ri-PC konsistent die berechneten Transportraten in den Gerinnen, die hohe Blockdichten und Stufengefälle aufweisen. Mit der Fliesswiderstandsgleichung von Pagliara und Chiavaccini (2006) wird über die gesamte Bandbreite relativer Abflusstiefen ein annähernd konstanter Wert für den Term $(f_0/f_{tot})^{0.5}$ berechnet. Das ist nicht plausibel und wird auch nicht von den anderen Ansätzen bestätigt. Dennoch werden bei transportrelevanten Bereichen der relativen Abflusstiefe ähnliche $(f_0/f_{tot})^{0.5}$-Werte berechnet wie mit dem empirischen Ansatz von Rickenmann und Recking (2011). Diese Übereinstimmung ist aber eher zufällig, denn für kleinere relative Abflusstiefen waren die $(f_0/f_{tot})^{0.5}$-Werte von Pagliara und Chiavaccini (2006) sehr hoch im Vergleich zu den Berechnungen mit dem empirisch breit abgestützten Ansatz von Rickenmann und Recking (2011) und auch im Vergleich zum physikalisch basierten Ansatz von Yager (2006). Die allgemeinere Anwendbarkeit des Ansatzes von Pagliara und Chiavaccini (2006) muss damit zumindest bezweifelt werden, vor allem für geringe Abflüsse. Obwohl Pagliara (2008) die Gültigkeit des Ansatzes auf Gerinneneigungen zwischen 0.08 und 0.4 und Blockdichten kleiner als 0.3 beschränkte, liegen die mit der Kombination Ri-PC berechneten Verhältnisse V^{ber}/V^{gem} in der gleichen Grössenordnung, egal ob innerhalb oder ausserhalb des angegeben Gültigkeitsbereiches.

Der Ansatz von Whittaker et al. (1988), Kombination Ri-W, reagierte sehr empfindlich auf Änderungen in Blockdichten sowie in relativen Abflusstiefen, was zu sehr variablen $(f_0/f_{tot})^{0.5}$-Werten führte. Der Ansatz ist beschränkt auf Blockdichten kleiner 0.15 (Whittaker et al., 1988). Tatsächlich waren die berechneten Fliesswiderstände nur für Gerinne plausibel, die kleine Blockdichten aufwiesen. Für vier der untersuchten Gerinne mit grösseren Blockdichten (Baltschieder, Mattenbach, Gamsa, Steinibach) wurden die Fliesswiderstände überschätzt und infolgedessen der Geschiebetransport um eine Grössenordnung unterschätzt. Deshalb wurden diese Berechnungen nicht in die weitere Auswertung einbezogen (s. *Bild 4*, graue Punkte). Die guten Resultate für Gerinne mit grossen Blockdichten und Stufengefällen (Klassifizierung nach *Tabelle 3*) basieren also nur auf wenigen Daten.

Der Ansatz von Egashira und Ashida (1991), Kombination Ri-EA, reagiert sehr sensitiv auf das Stufengefälle H/L. Die sehr kleinen berechneten Werte für $(f_0/f_{tot})^{0.5}$ führen zu einem signifikanten Anstieg des gesamten Fliesswiderstandes. Deswegen wurden Geschiebevolumen mit dem Ansatz Ri-EA unterschätzt. Im Vergleich zu anderen Kombinationen ergab Ri-EA die kleinsten mittleren V_{ber}/V_{gem}-Werte für den gesamten Datensatz. Die $(f_0/f_{tot})^{0.5}$-Werte sind mit zunehmendem Abfluss nicht signifikant gestiegen. Das könnte an den unterschiedlichen Stufeneffekten liegen, die im Labor beobachtet wurden; dort entsprechen Stufen idealisierten, rinnenüberspannenden Elementen. In der Natur sind Stufen komplexer aufgebaut, was möglicherweise eine andere Energieumwandlung zur Folge hat als in einem vereinfachten Rinnenaufbau.

Der Ansatz zur Aufteilung der Fliesswiderstände von Yager (2006), Kombination Ri-Y, lieferte über einen grossen Bereich relativer Abflusstiefen ähnliche $(f_0/f_{tot})^{0.5}$-Werte wie der empirische Ansatz von Rickenmann und Recking (2011), besonders bei Gerinnen mit signifikanter Makrorauigkeit. Die Kombination Ri-Y ergab V_{ber}/V_{gem}-Medianwerte von 1.1 für den gesamten Datensatz mit einem ledig-

lich geringen Variationskoeffizienten (0.9); ausserdem wurden 93% der Ereignisse innerhalb eines Faktors zehn um die gemessenen Transportvolumen berechnet.

Der Ansatz von Rickenmann und Recking (2011), Kombination Ri-RR, ergab konsistent plausible Geschiebeabschätzungen über einen grossen Bereich relativer Abflusstiefen mit einem medianen V_{ber}/V_{gem}-Verhältnis von 1.0 für den gesamten Datensatz und einem kleinen Variationskoeffizienten von 1.1. Der Ansatz ergab relativ gute Vorhersagen, besonders für die Daten der Langzeitbeobachtungen, wobei den Ereignissen ein sehr grosser Bereich relativer Abflusstiefen vorherrscht.

Keine der untersuchten Gleichungen ergab für jedes Ereignis eine ähnlich gute Geschiebevorhersage, auch nicht innerhalb eines Bachtyps mit spezifischer Makrorauigkeit. Dennoch schnitten die Blockansätze von Ri-PC, Ri-W und Ri-Y in Gerinnen mit grosser Blockdichte gewöhnlich besser ab, das heisst, 90% der Vorhersagen lagen innerhalb eines Faktors zehn um die beobachteten Geschiebevolumen. Das ist eine deutliche Verbesserung der Vorhersagegenauigkeit im Vergleich zur Referenzgleichung Ri-no.

Interessanterweise ergab auch der rein empirische Ansatz Ri-RR sehr gute Geschiebevorhersagen, obwohl er nicht explizit ein Mass für Makrorauigkeit berücksichtigt. Das bedeutet entweder, dass physikalisch basierte Ansätze in steilen Gerinnen nur ungenügend den Einfluss der Makrorauigkeiten auf den Fliesswiderstand beschreiben können, oder dass Gerinneeigenschaften und Strömungszustände in solchen Wildbächen und Gebirgsflüssen nicht genau genug gemessen werden können. Generell wird die Aufteilung der Fliesswiderstände für geringe Abflusstiefen als schwierig angesehen (Rickenmann und Recking, 2011). Zimmermann (2010) bemerkte, dass es bei solchen Abflüssen schwierig ist, zwischen Korn- und Formrauigkeit zu differenzieren. Obwohl das Konzept der Aufteilung der Fliesswiderstände in einigen Studien in Frage gestellt wurde (z.B. David et al., 2011; Wilcox et al., 2006), ergab diese Methode in anderen Untersuchungen (Badoux und Rickenmann, 2008; Chiari und Rickenmann, 2011; Rickenmann, in press) sowie in der vorliegenden Studie Geschiebeabschätzungen, die deutlich besser mit den beobachteten Transportvolumen übereinstimmen als bei Berechnungen ohne Berücksichtigung der zusätzlichen Fliesswiderstände. Das relativ gute Abschneiden des Ansatzes von Yager (2006) in Gerinnen mit grosser Blockdichte zeigte, dass diese physikalisch basierte Methode einen Fortschritt darstellt, um solche Strömungszustände in steilen rauen Gerinnen besser zu berücksichtigen. Die verbesserte Übereinstimmung zwischen berechneten und gemessenen Geschiebefrachten stützt unsere Annahme, dass physikalische Rauigkeitsmasse tatsächlich einen direkten Einfluss auf Geschiebetransportraten haben.

Die hier verwendete Methode, bei der das Energieliniengefälle reduziert wird, könnte je nach verwendeter Geschiebeformel unterschiedliche Auswirkungen aufweisen. In einem Vergleich von Geschiebeformeln an über 1000 Labordatenpunkten wurde festgestellt, dass die hier verwendete Formel nach Rickenmann (2001) ähnlich grosse Abweichungen ergab, wie andere gängige schubspannungsbasierte Formeln (Recking et al., 2008). Allerdings kann die Verwendung anderer Geschiebetransportformeln in steilen Gerinnen zum Teil zu beträchtlichen Differenzen in den berechneten Transportraten führen. Ein ausführlicher Test verschiedener Transportformeln sprengt den Rahmen dieses Beitrages. Die Berücksichtigung der Geschiebetransportformel von Parker (1990) in Kombination mit dem Ansatz nach Yager (2006) wurde zusätzlich zu den hier beschriebenen Resultaten von Nitsche et al. (2011) diskutiert.

6. Schlussfolgerungen

Geschiebetransportformeln wurden mit Fliesswiderstandsgleichungen kombiniert, um zusätzliche Fliesswiderstände zu berücksichtigen, die durch niedrige Abflüsse und durch Makrorauigkeiten entstehen. Mehrere Methoden zur Aufteilung des Fliesswiderstandes wurden verwendet, um ein verringertes Energieliniengefälle als Basis für modifizierte Geschiebetransportberechnungen abzuschätzen. Dieses Vorgehen reduzierte die Überschätzung der beobachteten Geschiebefrachten im Vergleich zu den Berechnungen mit der Referenzgleichung nach Rickenmann (2001) signifikant.

Die getesteten Ansätze brachten sehr unterschiedliche Verbesserungen der Geschiebevorhersagen. Dies ist hauptsächlich auf die Grösse und Dichte der Makrorauigkeitselemente und die Fliessbedingungen zurückzuführen. Die Ansätze, welche die Auswirkungen einzelner grosser Blöcke berücksichtigen, brachten im Allgemeinen bessere Resultate für Gerinne mit einer hohen Konzentration grosser Blöcke oder in Stufen-Becken-Systemen. Mit der Kombination der Transportgleichung von Rickenmann (2001) und den Fliesswiderstandsgleichungen von Yager (2006), von Whittaker et al. (1988) und von Pagliara und Chiavaccini (2006) lagen mindestens 75% der berechneten Ereignisse für Gerinne mit hoher Blockdichte innerhalb eines Faktors zehn um die beobachteten Frachten. Allerdings gelten bezüglich des Ansatzes von Pagliara und Chiavaccini (2006) die Einschränkungen gemäss Abschnitt 5. Der Ansatz von Egashira und Ashida (1991), der Fliesswiderstände anhand charakteristischer Grössen der Stufen-Becken-Struktur abschätzt, ergab keine Verbesserung der Transportvorhersagen im Vergleich mit der Referenzgleichung.

Wenn keine detaillierten Informationen zur Rauigkeit des untersuchten Gerinnes vorliegen, empfiehlt sich der Ansatz von Rickenmann und Recking (2011) als einfache Möglichkeit, erhöhte Rauigkeitswerte in steilen Gerinnen zu berücksichtigen. Für Gerinne mit hoher Blockdichte lagen mit dem Ansatz ebenfalls mindestens 75% der berechneten Ereignisse innerhalb eines Faktors zehn um die beobachteten Frachten. Der Ansatz ergab im Mittel die besten Vorhersagen für alle Gerinne, die ein breites Spektrum verschiedener Charakteristiken abdecken.

Die Ansätze, welche die Makrorauigkeit berücksichtigen, gaben jedoch Ergebnisse, die bis zu einer Grössenordnung näher an den beobachteten Werten lagen, als Berechnungen ohne Berücksichtigung der Makrorauigkeit. Mittels des Ansatzes von Yager (2006) wurden für Gerinne mit hohen Blockdichten relativ gute Ergebnisse erzielt. Dies weist darauf hin, dass diese physikalisch-basierte Methode einen Fortschritt in der theoretischen Beschreibung von Bedingungen mit zusätzlichen Fliesswiderständen darstellt. Trotzdem führten der Ansatz von Yager (2006) und die pauschalen Methoden von Rickenmann und Recking (2011) zu ähnlich guten Ergebnissen. Dieses Resultat impliziert, dass entweder die physikalisch-basierten Ansätze noch weiter verbessert werden können, um den Einfluss der Makrorauigkeit auf die Gesamtrauigkeit zu beschreiben, oder dass es noch nicht möglich ist, Makrorauigkeit mit genügender Genauigkeit zu identifizieren und quantitativ zu erfassen.

Dank

Wir bedanken uns beim BAFU für die finanzielle Unterstützung, welche es uns erlaubte, dieses Projekt durchführen zu können. Zudem danken wir Christoph Hegg für die Aufgleisung des Projektes.

Literatur

Badoux, A., Rickenmann, D. (2008): Berechnungen zum Geschiebetransport während der Hochwasser 1993 und 2000 im Wallis. «Wasser Energie Luft», 100(3), 217–226.

Bathurst, J.C. (1978): Flow Resistance of Large-Scale Roughness. Journal of the Hydraulics Division-ASCE, 104(12), 1587–1603.

Bathurst, J.C. (2002): At-a-site variation and minimum flow resistance for mountain rivers. Journal of Hydrology, 269, 11–26.

Bathurst, J.C., Graf, W.H., Cao, H.H. (1987): Bed load discharge equations for steep mountain rivers, in Sediment transport in gravel-bed rivers, edited by Thorne, C.R. et al., pp. 453–477, John Wiley and Sons Ltd., New York.

Bathurst, J.C., Li, R.-M., Simons, D.B. (1981): Resistance equation for large-scale roughness. Journal of the Hydraulics Division, 107, 1593–1613.

Bezzola, G.R., Hegg, C. (Eds.) (2007): Ereignisanalyse Hochwasser 2005. Teil 1 – Prozesse, Schäden und erste Einordnung, 215 pp., Umwelt-Wissen Nr. 0707. Bundesamt für Umwelt BAFU und Eidg. Forschungsanstalt WSL, Bern.

BWG (2002): Hochwasser 2000, Ereignisanalyse/Fallbeispiele, 248 pp., Berichte des Bundesamt für Wasser und Geologie BWG, Serie Wasser Nr. 2, Bern.

Chiari, M., Friedl, K., Rickenmann, D. (2010): A one-dimensional bedload transport model for steep slopes. Journal of Hydraulic Research, 48(2), 152–160.

Chiari, M., Rickenmann, D. (2011): Back-calculation of bedload transport in steep channels with a numerical model. Earth Surface Processes and Landforms, 36, 805–815.

Church, M., Zimmermann, A. (2007): Form and stability of step-pool channels: Research progress. Water Resources Research, 43(3), W03415.

David, G.C.L., Wohl, E.E., Yochum, S.E., Bledsoe, B.P. (2011): Comparative analysis of bed resistance partitioning in high gradient streams. Water Resources Research, 47, W07507.

Egashira, S., Ashida, K. (1991): Flow resistance and sediment transportation in streams with step-pool bed morphology, in Fluvial Hydraulics of Mountain Regions, pp. 45–58, Springer, Heidelberg.

Fehr, R. (1987): Einfache Bestimmung der Korngrössenverteilung von Geschiebematerial. Schweizer Ingenieur und Architekt, 105(38), 1004–1109.

Ferguson, R. (2007): Flow resistance equations for gravel- and boulder-bed streams. Water Resources Research, 43(12), W05427.

Hegg, C., McArdell, B.W., Badoux, A. (2006): One hundred years of mountain hydrology in Switzerland by the WSL. Hydrological Processes, 20, 371–376.

Lamarre, H., Roy, A.G. (2008): A field experiment on the development of sedimentary structures in a gravel-bed river. Earth Surface Processes and Landforms, 33, 1064–1081.

Lee, A.J,. Ferguson, R.I. (2002): Velocity and flow resistance in step-pool streams. Geomorphology, 46, 59–71.

Meyer-Peter, E., Müller, R. (1948): Formulas for bedload transport. Proc. 2nd meeting Int. Assoc. Hydraulic Structures Research, Appendix 2, pp. 39–64, Stockholm, Sweden.

Montgomery, D.R., Buffington, J.M. (1997): Channel-reach morphology in mountain drainage basins. GSA Bulletin, 109(5), 596–611.

Nitsche, M., Rickenmann, D., Turowski, J.M., Badoux, A., Kirchner, J.W. (2011): Evaluation of bedload transport predictions using flow resistance equations to account for macro-roughness in steep mountain streams. Water Resources Research, 47, W08513.

Pagliara, S. (2008): Closure to «Flow Resistance of Rock Chutes with Protruding Boulders» by S. Pagliara and P. Chiavaccini. Journal of Hydraulic Engineering, 134(7), 1022–1023.

Pagliara, S., Chiavaccini, P. (2006): Flow Resistance of Rock Chutes with Protruding Boulders. Journal of Hydraulic Engineering, 132(6), 545–552.

Parker, G. (1990): Surface-based bedload transport relation for gravel rivers. Journal of Hydraulic Research, 28(4), 417–436.

Recking, A., Frey, P., Paquier, A., Belleudy, P., Champagne, J.Y. (2008): Feedback between bed load transport and flow resistance in gravel and cobble bed rivers. Water Resources Research, 44, W05412.

Rickenmann, D. (1990): Bedload transport capacity of slurry flows at steep slopes. Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich, Nr. 103.

Rickenmann, D. (1991): Hyperconcentrated flow and sediment transport at steep flow. Journal of Hydraulic Engineering, 117(11), 1419–1439.

Rickenmann, D. (1997): Sediment Transport in Swiss Torrents. Earth Surface Processes and Landforms, 22, 937–951.

Rickenmann, D. (2001): Comparison of bed load transport in torrents and gravel bed streams. Water Resources Research, 37(12), 3295–3305.

Rickenmann, D. (2005): Geschiebetransport bei steilen Gefällen, in «VAW 75 Jahre», Festkolloquium, Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich, Nr. 190, pp. 107–119.

Rickenmann, D. (2012), Alluvial steep channels: Flow resistance, bedload transport prediction, and transition to debris flows, Kapitel 28 in Church, M., Biron, P. & Roy, A. (eds.) Gravel Bed Rivers: Processes, tools, environments, John Wiley and Sons, 386–397.

Rickenmann, D., Recking A. (2011): Evaluation of flow resistance in gravel-bed streams through a large field data set. Water Resources Research, 47, W07538.

Smart, G.M., Duncan, M.J., Walsh, J.M. (2002): Relatively Rough Flow Resistance Equations. Journal of Hydraulic Engineering, 128(6), 568–578.

Smart, G.M., Jäggi, M.N.R. (1983): Sedimenttransport in steilen Gerinnen. Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich, Nr. 64.

Whittaker, J.G., Hickman, W.E., Croad, R.N. (1988): Riverbed Stabilisation with placed blocks. Report 3–88/3, Central Laboratories, Works and Development Services Corporation, Lower Hutt, NZ.

Whittaker, J.G., Jaeggi, M.N.R. (1982): Origin of Step-Pool Systems in Mountain Streams. Journal of the Hydraulics Division-Asce, 108(6), 758–773.

Wilcox, A.C., Nelson, J.M., Wohl, E.E. (2006): Flow resistance dynamics in step-pool channels: 2. Partitioning between grain, spill, and woody debris resistance. Water Resources Research, 42, W05419.

Yager, E.M. (2006): Prediction of sediment transport in steep, rough streams, PhD thesis, 232 pp., University of California, Berkeley.

Yager, E.M., Kirchner, J.W., Dietrich, W.E. (2007): Calculating bed load transport in steep boulder bed channels. Water Resources Research, 43, W07418.

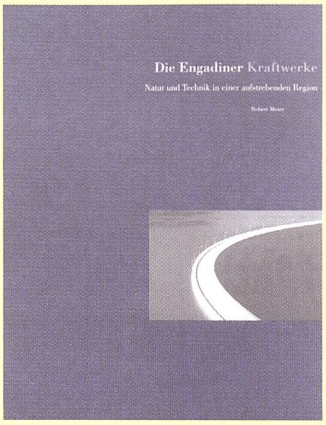
Zimmermann, A. (2010): Flow resistance in steep streams: An experimental study. Water Resources Research, 46, W09536.

Anschrift der Verfasser
Dr. *Manuel Nitsche,* Dr. *Dieter Rickenmann*
Dr. *Jens M. Turowski,* Dr. *Alexandre Badoux*
Prof. Dr. *James W Kirchner*
Gruppe Wildbäche, Gebirgshydrologie und Massenbewegungen, Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL
Zürcherstrasse 111, CH-8903 Birmensdorf
Kontakt: Dieter Rickenmann
dieter.rickenmann@wsl.ch
Tel. 044 739 24 29

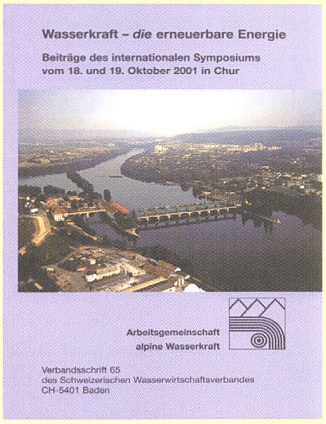
manuel.nitsche@wsl.ch
jens.turowski@wsl.ch
alexandre.badoux@wsl.ch
james.kirchner@wsl.ch

Bestellen Sie unsere Verbandsschriften direkt unter: www.swv.ch

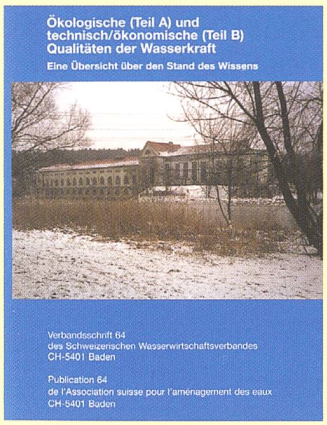
VS: Nr. 67, ***Der Schweizerische Wasserwirtschaftsverband 1910–2010, ein Portrait,*** von Dr. Walter Hauenstein, 2010, 156 S. Format 17 × 24 cm, ISBN 978-3 85545-155-5, CHF 40.–.



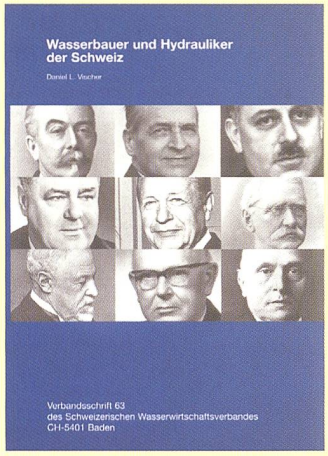
VS: Nr. 66, ***Die Engadiner Kraftwerke – Natur und Technik in einer aufstrebenden Region,*** von Robert Meier, 2003, 207 S., Format 28.5 × 20.5 cm, ISBN 3-85545-129-X, CHF 60.–.



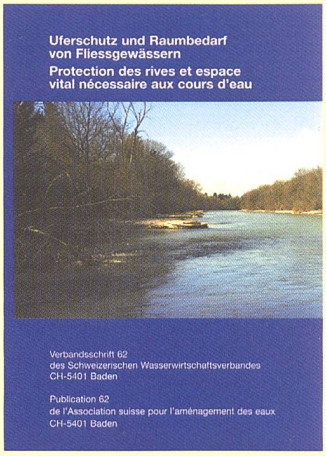
VS: Nr. 65, ***Wasserkraft – die erneuerbare Energie.*** Beiträge des internationalen Symposiums vom 18./19. Okt. 2001 in Chur, CHF 30.–.



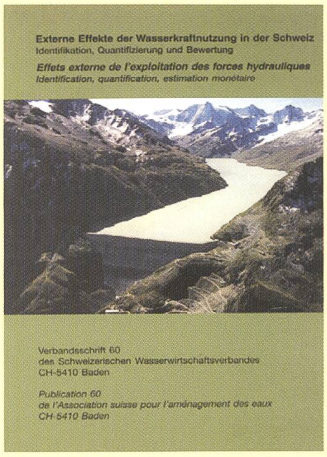
VS: Nr. 64, ***Ökologische (Teil A) und technisch/ökonomische Qualitäten der Wasserkraft.*** ecoconcept Zürich und Schnyder Ingenieure AG, Ottenbach, CHF 40.–.



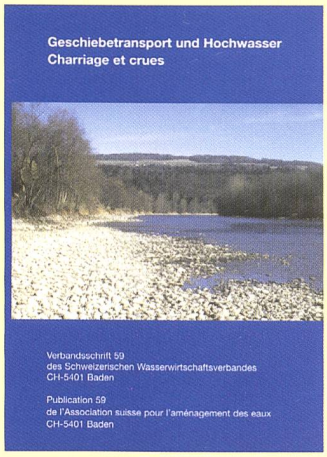
VS: Nr. 63, ***Wasserbauer und Hydrauliker der Schweiz.*** Kurzbiographien ausgewählter Persönlichkeiten, 2001, von Daniel L. Vischer, CHF 50.–.



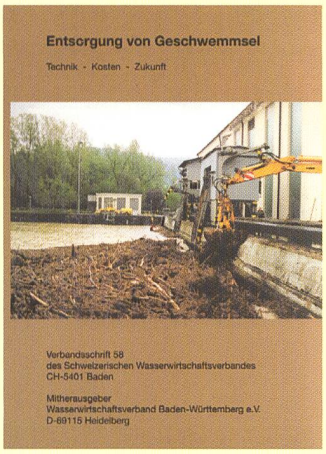
VS: Nr. 62, ***Uferschutz und Raumbedarf von Fliessgewässern/Protection des rives et espace vital nécessaire aux cours d'eau,*** 2001, Vorträge in Biel, CHF 40.–.



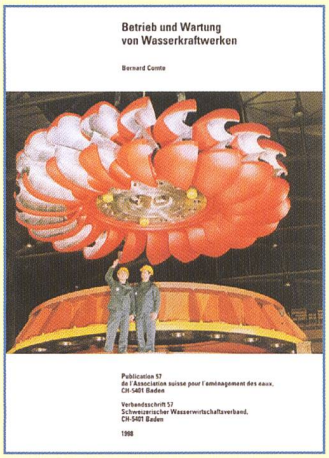
VS: Nr. 60, ***Externe Effekte der Wasserkraftnutzung / Effets externe de l'exploitation des forces hydrauliques,*** 1999, CHF 50.–.



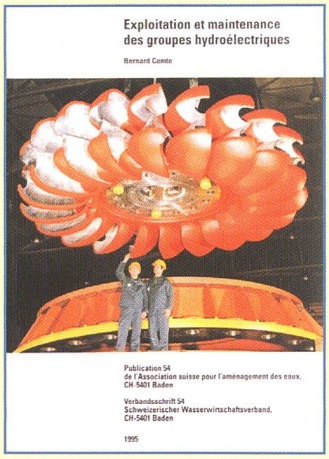
VS: Nr. 59, ***Geschiebetransport und Hochwasser/Charriage et crues,*** Vorträge in Biel, 1998, CHF 50.–.



VS: Nr. 58, ***Entsorgung und Geschwemmsel,*** Stand der Technik – Kosten – Zukunft, Vorträge in Bad-Säckingen, 1998, CHF 50.–.



VS: Nr. 57, ***Betrieb und Wartung von Wasserkraftwerken,*** 1998, Bernard Comte, CHF 120.–.



VS: Nr. 54, ***Directives pour l'exploitation et la maintenance des groupes hydroélectriques,*** 1995, Bernard Comte, CHF 98.–.