

Tobias Meile, Jean-Louis Boillat und Anton Schleiss

Dämpfende Wirkung von großmaßstäblichen Uferrauheiten auf Schwall- und Sunkerscheinungen in Flüssen

Der Betrieb der Speicherkraftwerke zur Abdeckung der Verbrauchsspitzen führt in den betroffenen Fließgewässern zu aus ökologischer Sicht ungünstigen, raschen Abfluss- und Wasserspiegelschwankungen. Zu deren Abminderung sind nebst wasserbaulichen auch flussbauliche Maßnahmen denkbar. In Modellversuchen wurde der Einfluss von großmaßstäblichen Uferrauheiten und Buchten auf den Fließwiderstand und die Fortpflanzung von (Schwall-) Wellen untersucht. Zur Beschreibung des Fließwiderstandes konnten empirische Formeln entwickelt werden. Der passive Rückhalt in den Buchten verändert die Abflusswellen. Die dämpfende Wirkung ist aber grundsätzlich geringer als diejenige von gesteuerten Rückhaltebecken, insbesondere für lange Turbinierdauern.

1 Einleitung

Speicherkraftwerke decken die Verbrauchsspitzen an elektrischer Energie ab, indem entsprechend der Nachfrage turbinert wird. Erfolgt die Wasserrückgabe direkt in ein Gewässer, führt dies zu Schwall- und Sunkerscheinungen, d. h. zu relativ schnell wechselnden Abflussbedingungen zwischen maximalen und minimalen Wasserspiegeln im Gewässer-

querschnitt sowie zur Fortpflanzung von dynamischen Wellen im Gewässerabschnitt. Aus Sicht der Gewässerökologie sind diese täglich und schnell wechselnden Abflussbedingungen eine Störung des natürlichen Abflussregimes. Sie wirken sich neben einer monotonen Gewässermorphologie oder unzureichender Wasserqualität negativ auf die Lebensbedingungen im Gewässer aus (s. z. B. [1], [2], [8]).

Großmaßstäbliche Uferrauheiten und Buchten erhöhen die Rauheit und den passiven Wasserrückhalt in einem Gewässer. Dies beeinflusst die Fortpflanzungsgeschwindigkeit und die Form von Wellen im Allgemeinen und von Schwallwellen im Besonderen. Um die Wirkung von großmaßstäblichen Uferrauheiten und Buchten auf Wellen infolge Kraftwerksbetrieb besser zu verstehen, wurden in Lausanne systematische Versuche mit stationären

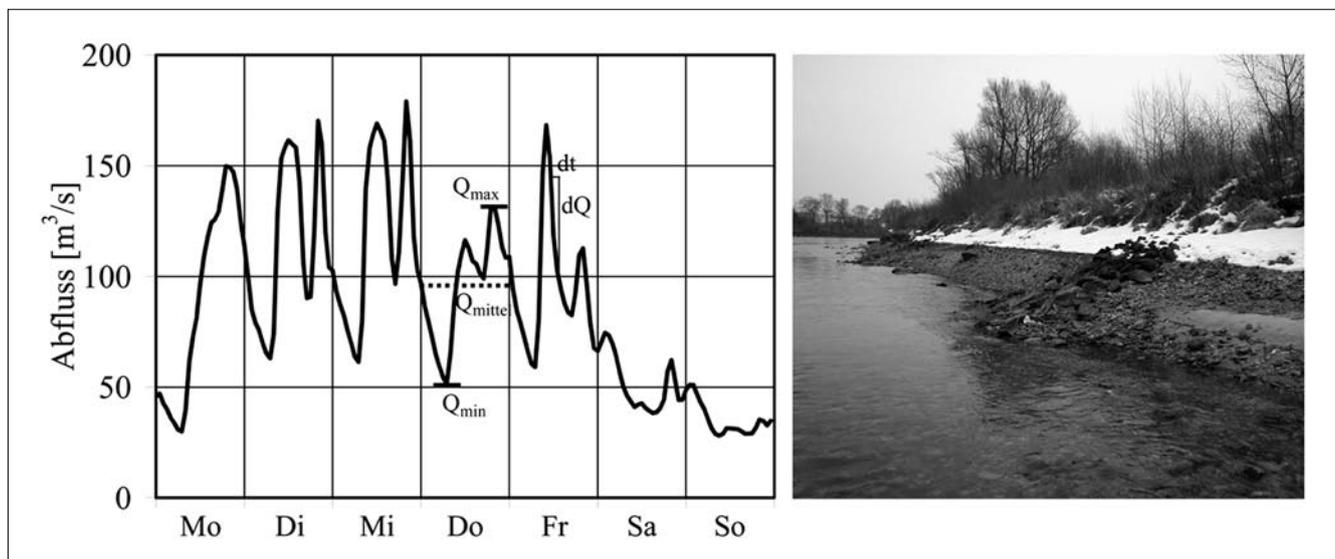


Bild 1: Abflussschwankungen der Rhone bei Branson für eine Januarwoche des Jahres 1999 mit Definition der Schwallkenngrößen (links), die beobachtete Schwankung des Wasserspiegels ist anhand der Schneelinie sichtbar (rechts) (Photo: A. Peter)

und instationären Abflüssen in einer großen Anzahl von verschiedenen Geometrien durchgeführt. Dies erlaubte empirische Formeln zur Bestimmung von Fließwiderstandsbeiwerten zu entwickeln, welche auch für instationäre Abflussberechnungen in numerischen Modellen verwendet werden können.

2 Schwall/Sunk-Kenngrößen und Schwall reduzierende Maßnahmen

Hauptsächlich mittlere bis größere Talflüsse der Alpen und Voralpen sind von Schwall- und Sunkerscheinungen betroffen [1]. Die täglichen Abflussschwän-

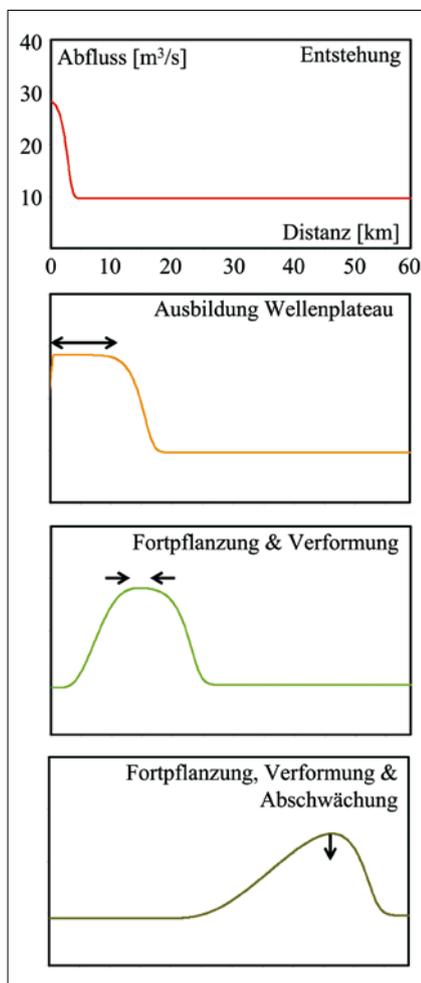


Bild 2: Phasen einer Abflusswelle 24 min, 124 min, 184 min und 420 min nach Inbetriebnahme der Turbinen, dargestellt für eine Turbinierdauer von 2 Stunden; das prismatische Gewässer mit Rechteckquerschnitt weist eine Breite von 12 m, eine mittlere Sohlenneigung von 1,5 ‰ und einen Strickler-Beiwert von $35 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ auf.

kungen können mit dem Schwall/Sunk-Verhältnis Q_{\max}/Q_{\min} oder der relativen Schwall/Sunk-Differenz $(Q_{\max} - Q_{\min})/Q_{\text{mittel}}$ beschrieben werden (**Bild 1**). Die Schwall/Sunk-Raten dQ/dt entsprechen der Geschwindigkeit der Abflusswechsel, wobei der Wert auch von der zeitlichen Auflösung der zur Verfügung stehenden Daten abhängt [9]. Zusätzlich kann auch die Häufigkeit der Wechsel als Kriterium berücksichtigt werden [5]. In unbeeinflussten alpinen und voralpinen Gewässern sind die Kenngrößen Q_{\max}/Q_{\min} und dQ/dt im Winterhalbjahr natürlicherweise am kleinsten. Unter dem Einfluss von Schwall und Sunk nehmen die Kenngrößen aber oft gerade in dieser Periode die größten Werte an. Weitere Kenngrößen sind der tägliche Maximalschwall Q_{\max} , maßgebend für Geschiebetrieb und Resuspension sowie die Anzahl Schwallspitzen pro Tag und die Volatilität [9].

In der Literatur als ökologisch vertretbar erachtete Richt- und Grenzwerte der erwähnten Kenngrößen weisen je nach untersuchtem Gewässertyp eine große Bandbreite auf. Dies deutet darauf hin, dass insbesondere in großen Gewässern zur sinnvollen Schwalldämpfung gewässerspezifische Grenzwerte verwendet werden sollten. Mit maßgeschneiderten Kriterien wurden beispielsweise am Alpenrhein verschiedene mögliche Szenarien einer Schwallregelung untersucht [12].

Zur Schwalldämpfung sind grundsätzlich konstruktive oder betriebliche Maßnahmen möglich. Betriebliche Maßnahmen schränken die Spitzenenergieproduktion der Speicherkraftwerke aber stark ein und verursachen Kosten, die in den meisten Fällen deutlich höher liegen als z. B. der Bau von Ausgleichsbecken [12].

Der fehlende Spitzenstrom müsste zudem anderweitig beschafft werden, z. B. mit Gaskombikraftwerken, was wiederum die CO_2 -Emissionen erhöhen würde. Wasserbauliche Maßnahmen, wie Ausgleichsbecken, erfordern zwar auch größere Investitionen und Landbedarf, sind aber energiewirtschaftlich oft die einzige sinnvolle Lösung. Eine Studie basierend auf 14 Messstellen an 6 Schwall beeinflussten, größeren Gewässern in der Schweiz ermittelte die erforderlichen Rückhaltevolumen zur Einhaltung bestimmter Schwall/Sunk-Verhältnisse im Tages- und Wochenausgleich. Bei längeren Schwallimpulsen und zur Auffüllung des Sunks am Wochenende sind teilweise sehr große Volumen notwendig [11], wie sie nur durch Ausgleichsbecken und insbesondere durch Mehrzweckbecken [4] zur Verfügung gestellt werden könnten.

3 Modellversuche in einem Kanal mit großmaßstäblichen Rauheiten

Im reibungsfreien Horizontalkanal verringern sich weder Fortbreitungs geschwindigkeit noch Höhe der Front einer Schwallwelle. Unter Berücksichtigung der Wandreibung und der Sohlenneigung nimmt aber die Fronthöhe im Fließverlauf ab [3], [7]. Die Strömungsverhältnisse in einem Gewässerabschnitt, verursacht durch den Betrieb von Speicherkraftwerken, resultieren aus dem komplexen Zusammenspiel von Sohlenneigung, Gewässergeometrie, Wandreibung und produktionsspezifischen Parametern [10]. Im Normalfall können bei Betrachtung eines Gewässerabschnittes vier Phasen einer Abflusswelle infolge Speicherkraftwerks-

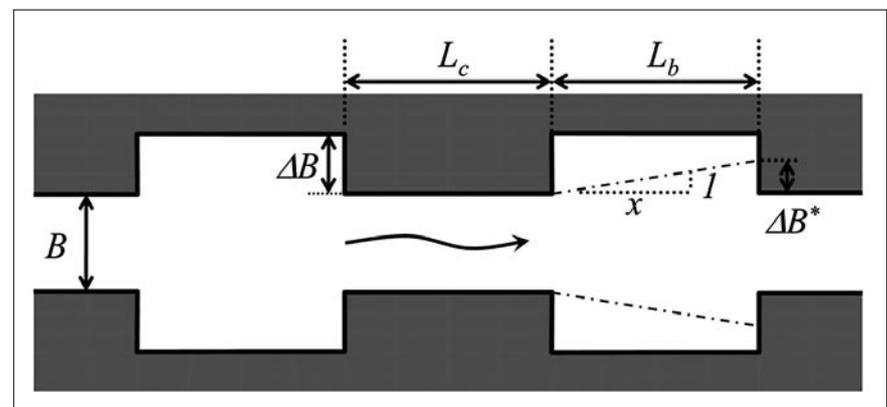


Bild 3: Definition der geometrischen GMR-Parameter: Variable Parameter sind die Buchtenlänge L_b und deren Abstand L_c sowie die Tiefe ΔB , die Basisbreite $B = 0,5 \text{ m}$ ist konstant, die effektive Breite im Fließwiderstandsmodell ist definiert als $\Delta B^* = L_b/x$

betrieb unterschieden werden (Bild 2). Die Phase der Entstehung der Welle ist mit dem Erreichen eines konstanten Abflusses unterhalb der Rückgabestelle abgeschlossen. Danach bildet sich ein Wellenplateau mit Maximalabfluss aus (Bild 2, 2. Teilbild). Dieses wächst in der Länge bis die Turbinen abgestellt werden. In der Folge verschiebt sich der Wellenkörper flussabwärts und verformt sich (Bild 2, 3. Teilbild). Das Wellenplateau wird dadurch ab-

gebaut. Nach dessen gänzlichen Abbau wird der Maximalabfluss durch die weitere Verformung verringert (Bild 2 unten). Dieser Vorgang wird als Fließretention bezeichnet und ist in jedem Gewässer vorhanden. Schwall- und Sunkwellen, wie durch Favre [3] untersucht, treten beim Betrieb von Speicherkraftwerken nur in seltenen Fällen auf. Bei Abflussverhältnissen, wie sie durch Speicherkraftwerke verursacht werden, wird jedoch oft der ge-

samte in Bild 2 dargestellte Ablauf als Schwallwelle bezeichnet [10].

Systematische Modellversuche mit Schwall- und Sunkwellen, verursacht durch eine plötzliche Abflussänderung am oberen Ende des Kanals, wurden in einer 38,3 m langen Rinne mit einem durchschnittlichen Gefälle von 1,14 ‰ durchgeführt [6]. Insgesamt 40 verschiedene, idealisierte großmaßstäbliche Rauheiten des Ufers (GMR) (Bild 3) wurden dabei zuerst unter stationären und dann unter instationären Abflussbedingungen untersucht. Das Verhältnis Q_{\max}/Q_{\min} variierte zwischen 1,1 und 10,2.

Die Abflussbedingungen der Versuche waren stets strömend mit Froude-Zahlen von 0,3 bis 0,7. Verglichen mit dem prismatischen Gerinne bewirken die großmaßstäblichen Rauheiten Energieverluste zusätzlich zur Wandreibung, bedingt durch vertikale Mischschichten, Wirbelzonen und Rezirkulationszellen. Zudem sind die im Modell untersuchten Buchten ständig benetzt und führen bei steigendem Wasserspiegel im instationären Versuch zu einem passiven Rückhalt.

4 Empirische Ansätze zur Bestimmung des Fließwiderstandes von großmaßstäblichen Uferrauheiten

Da die GMR über einen längeren Abschnitt regelmäßig vorkommen, erzeugen sie analog zur Wandreibung einen verteilten Energieverlust. Die durch die Geometrie verursachte Uferrauheit konnte daher mittels Staukurvenberechnungen bestimmt werden. Mit zunehmendem Abfluss nehmen auch die Abflusstiefen und somit der Einfluss der Uferrauheit zu. Die Rauheit der getesteten Geometrien (Nr. 111 bis 444) ist in Bild 4 als Chezy-Beiwert der Wand C_w dargestellt, wobei dieser Wert den Effekt der GMR einschließt.

Im Vergleich zum prismatischen Kanal, verringern die GMR den Chezy-Beiwert deutlich (Bild 4: $C_{w,\text{prismatisch}} - C_{w,143} = 39 \text{ m}^{0,5}/\text{s}$). Dies erhöht bei zunehmendem Verhältnis der Abflusstiefe zur Basisbreite h/B den Fließwiderstand. Der Unterschied zwischen den untersuchten Geometrien mit GMR ist hingegen geringer (Bild 4: $C_{w,143} - C_{w,212} = 19 \text{ m}^{0,5}/\text{s}$). Eine Geometrie, generiert aus einer zufälligen Aneinanderreihung der achsensymmetrischen Geometrien (Nr. 111 bis 444) entlang des linken und rechten Ufers, weist einen Chezy-Beiwert $C_{w,\text{zufällig}} = 27,4 \text{ m}^{0,5}/\text{s}$

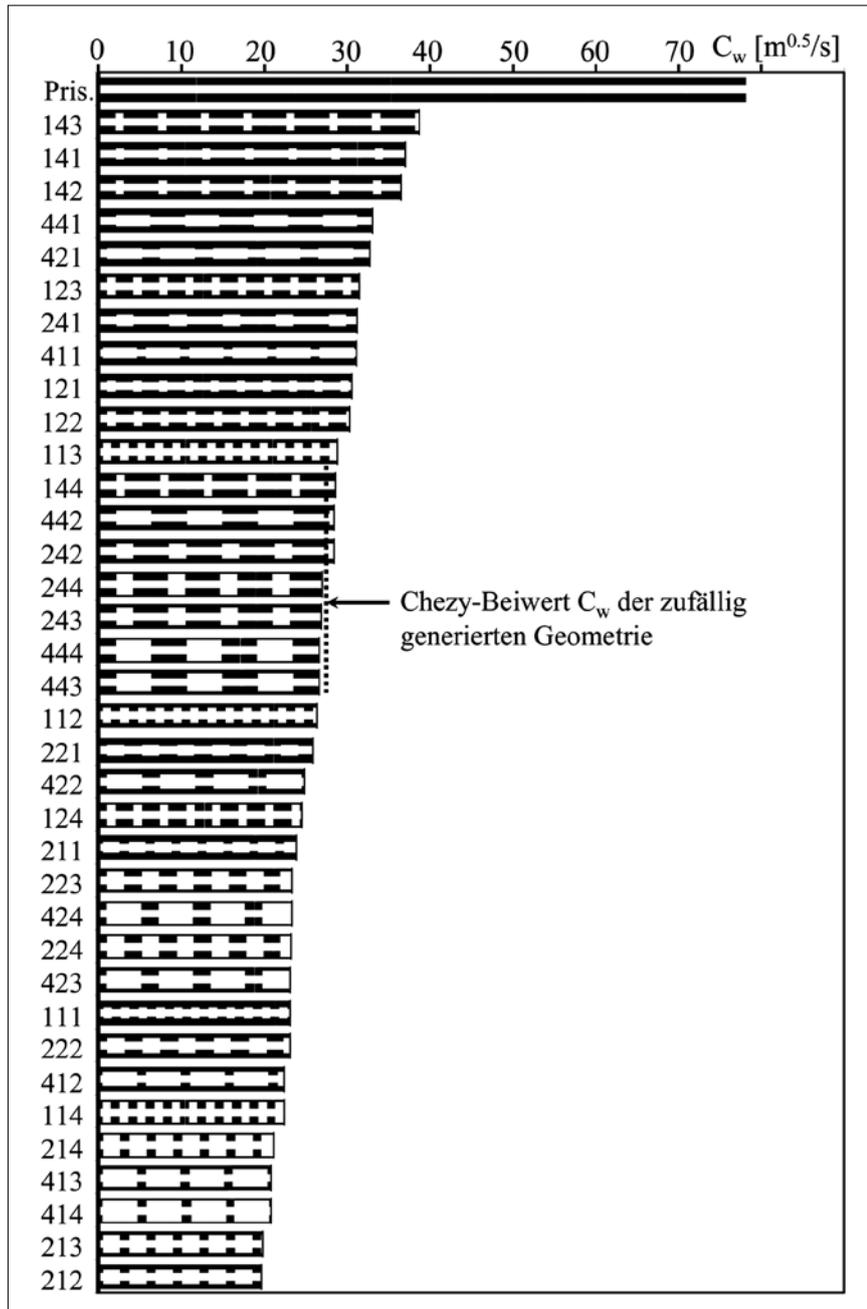


Bild 4: Chezy-Beiwert C_w der untersuchten Geometrien bezogen auf die Wand inklusive dem Effekt der großmaßstäblichen Rauheiten. Der Beiwert entspricht dem größten untersuchten Abfluss und bezieht sich auf ein Verhältnis der Abflusstiefe zur Basisbreite von $h/B \approx 0,6$ bis $0,7$

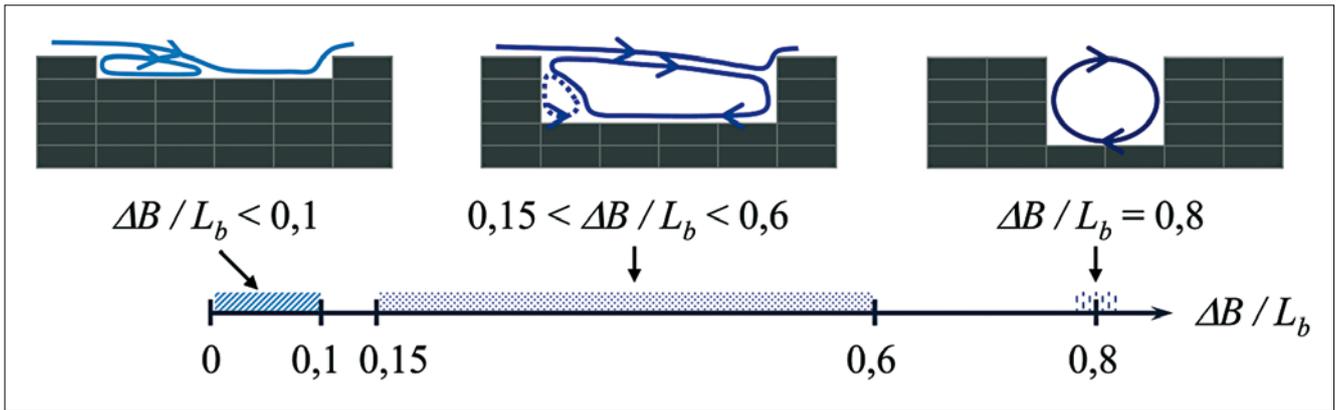


Bild 5: Aufteilung der Geometrien in Fließtypen unter Berücksichtigung von $\Delta B/L_b$: „wieder anlegende Buchtenströmung“ ($\Delta B/L_b < 0,1$); „lang gezogene Rotationsströmung in Bucht (2 Zellen)“ ($0,15 < \Delta B/L_b < 0,6$); „kreisförmige Rotationsströmung in Bucht (1 Zelle)“ ($\Delta B/L_b \approx 0,8$)

auf und liegt somit etwa in der Mitte der untersuchten Geometrien.

Anhand der Versuche mit verschiedenen Abflüssen konnten empirische Fließwiderstandsgesetze zur Abschätzung des Einflusses der GMR entwickelt werden. Sie basieren auf der Annahme, dass der totale Fließwiderstandsbeiwert eines Querschnittes f_m wie folgt aufgeteilt werden kann:

$$f_m = f_{prism} + f_{GMR} \quad (1)$$

Dabei beschreibt f_{prism} den Anteil aller Effekte am Fließwiderstand bezüglich des Querschnitts, wie beispielsweise auch Bettformen, jedoch ohne GMR. Dieser Fließwiderstandsbeiwert f_{prism} kann mit allgemein bekannten Gesetzen bestimmt werden. Der Fließwiderstand der GMR kann durch den zusätzlichen Anteil f_{GMR} berücksichtigt werden.

Zur besseren physikalischen Beschreibung der Rauheit wurden die Geometrien unter Berücksichtigung des Verhältnisses $\Delta B/L_b$ in drei Fälle unterteilt, wobei die mit Versuchen abgedeckte Bandbreite von $\Delta B/L_b$ in **Bild 5** dargestellt ist. Die Zwischenbereiche $0,10 < \Delta B/L_b < 0,15$ und $0,60 < \Delta B/L_b < 0,75$ können in erster Näherung dem Bereich der „lang gezogenen Rotationsströmung“ zugeordnet werden. Der Bereich von $0,75 < \Delta B/L_b < 1,0$ erzeugt eine „kreisförmige Rotationsströmung“.

Die ermittelten empirischen Formeln und deren Anwendungsbereich für die drei Fließtypen sind in **Tabelle 1** zusammengefasst. Die Gl. (2) und (3) basieren auf einem konzeptuellen Modell, welches das Kräftegleichgewicht mittels eines Widerstandsbeiwertes C_d (drag coefficient)

berücksichtigt. Gl. (4) wurde durch Optimierung der Konstanten und der Exponenten eines Potenzgesetzes gefunden.

Befinden sich die GMR nur an einem Ufer, reduziert sich der Fließwiderstandsbeiwert f_{GMR} um 50 %. Gl. (3c) beschreibt eine empirisch bestimmte Größe, die eine konzeptuelle Ausweitung der Strömung umfasst, so dass die effektive Breite ΔB^* in Gl. (3a) zum in den Modellversuchen beobachteten Fließwiderstandsbeiwert führt. Basierend auf den Versuchen für rechtwinklige Buchten beträgt $C_d = 0,475$ in den Gl. (2) und (3a). Der Fließwiderstandsbeiwert dürfte bei abgerundeten, natur-

nahen Buchten geringer, jedoch größer als $C_d = 0,25$ sein [7].

Mit Hilfe der Gl. (1) bis (4) kann der Einfluss von GMR bei der Berechnung der Normalabflusstiefe oder des Reibungsgefälles in Staukurven berücksichtigt werden. In **Bild 6** sind die Resultate eines Berechnungsbeispiels für eine Buchtgeometrie dargestellt, welche eine langgezogene Rotationsströmung erzeugt. Für eine gegebene Sohlenneigung S_0 und einen gegebenen Abfluss Q kann die Normalabflusstiefe als einzige Unbekannte mit Hilfe der Darcy-Weisbach-Formel bestimmt werden zu

Tab. 1: Empirische Formeln zur Berechnung des zusätzlichen Fließwiderstandsbeiwertes f_{GMR} . Für $r_h/B < 0,08$ können die Formeln f_{GMR} in guter Näherung verwendet werden, da sich mit abnehmendem Verhältnis der Wandeinfluss verringert. Die Froude-Zahl variierte in den Versuchen von ca. 0,3 bis 0,7 und die Reibungsneigungen von 1 ‰ bis 5 ‰. Der Parameter U ist die mittlere Fließgeschwindigkeit, r_h der hydraulische Radius und $Re = U \cdot r_h/\nu$ die Reynoldszahl, wobei sich U , r_h und Re auf den Querschnitt mit der Basisbreite B beziehen.

Fließtyp	Formel	Anwendungsbereich
„wieder anlegende Buchtenströmung“	Konzeptuelles Modell basierend auf C_d : $f_{GMR,wa} = C_d \frac{8 \cdot r_h \cdot \Delta B}{B(L_b + L_c)} \quad (2)$	$\Delta B/L_b \leq 0,1$ $0,08 < r_h/B < \sim 0,25$ $12 < (L_b + L_c)/r_h < 65$ $12 < (L_b + L_c)/\Delta B < 40$ $\sim 1,5 < (L_b + L_c)/L_b < \sim 3$
„lang gezogene Rotationsströmung“	Konzeptuelles Modell basierend auf C_d : $f_{GMR,wa} = C_d \frac{8 \cdot r_h \cdot \Delta B^*}{B \cdot (L_b + L_c)} \quad (3a)$ $\Delta B^* = \min(\Delta B; (L_b/x)) \quad (3b)$ $x = \left(\frac{150\,000}{Re} + 4,5 \right) \left(\frac{L_b}{\Delta B} \right)^{0,18} \quad (3c)$	$0,1 \leq \Delta B/L_b \leq 0,75$ $0,08 < r_h/B < \sim 0,25$ $9 < (L_b + L_c)/r_h < 67$ $3,3 < (L_b + L_c)/\Delta B < 25$ $2 < (L_b + L_c)/L_b < 5$
„kreisförmige Rotationsströmung“	Von Potenzgesetz: $\sqrt{f_{GMR,kf}} = 5 \cdot \left(\frac{L_b + L_c}{r_h} \right)^{1/3} \quad (4)$	$0,75 \leq \Delta B/L_b \leq 1,0$ $0,08 < r_h/B < \sim 0,25$ $B \cong L_b$ $\sim 2 < (L_b + L_c)/L_b < \sim 5$

$$S_0 = S_f = (f_{prism} + f_{GMR,lg}) \cdot \frac{1}{4 \cdot r_h} \left(\frac{Q}{B \cdot h} \right)^2 \quad (5)$$

Wird zudem die Rauheit des Querschnittes mit einer Basisbreite B durch den Strickler-Beiwert $K_{st,prism}$ beschrieben, errechnet sich f_{prism} wie folgt:

$$f_{prism} = \frac{8g}{K_{st,prism}^2 \cdot r_h^{1/3}} \quad (6)$$

Im Berechnungsbeispiel (Bild 6) gilt $K_{st,prism} = 35 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$.

Der Unterschied zwischen der Normalabflusstiefe einer prismatischen Referenzkonfiguration und derjenigen einer Geometrie mit GMR (Bild 6) zeigt die zunehmende Bedeutung der GMR mit der relativen Abflusstiefe h/B .

5 Verformung und Abminderung von Schwallwellen durch großmaßstäbliche Uferrauheiten

Mit instationären Versuchen wurden Schwallwellen mit steiler Front untersucht. Die Versuche haben gezeigt, dass die Höhe der Schwallwellenfront exponentiell mit der Distanz abnimmt [6]. Dieser Effekt wird durch GMR verstärkt. Hinter der Wellenfront steigt der Wasserspiegel im Wellenkörper jedoch weiter kontinuierlich an. Infolge der erhöhten Uferrauheit und der Tatsache, dass die Basisbreite B nicht erhöht wurde, liegt der

Wasserspiegel über denjenigen des prismatischen Gerinnes. Dies ist im Hinblick auf eine Verminderung der Amplitude der Wasserspiegelschwankungen zwischen dem Maximal- und Minimalabfluss einer Schwallwelle eher ungünstig. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Schwallwellenfront reduziert sich unter Berücksichtigung der GMR mit zunehmendem Fließwiderstandsbeiwert. Die Theorie für prismatische Gerinne ist also nicht mehr anwendbar.

Im numerischen 1-D-Modell konnten verschiedene getestete Schwallwellen mit recht guter Übereinstimmung nachgerechnet werden [6]. Die 1-D-Gleichungen von de Saint Venant mussten aber angepasst werden:

- In der dynamischen Gleichung wurden die großmaßstäblichen Uferrauheiten in der Berechnung des Reibungsgefälles unter Beibehaltung der Gewässerbreite B berücksichtigt.
- In der Kontinuitätsgleichung wurde die Gewässerbreite angepasst, um dem passiven Rückhalt in den Buchten gerecht zu werden. Die Gewässerbreite in der Kontinuitätsgleichung ist $B' = B + \Delta S / \Delta L$, wobei $\Delta S / \Delta L$ die zusätzliche benetzte Fläche ΔS pro Gewässerdistanz ΔL darstellt. Für die untersuchten rechteckigen Buchtengeometrien beträgt $B' = B + 2 \cdot \Delta B \cdot L_b / (L_b + L_c)$.

Inwiefern sich dauernd benetzte, großmaßstäbliche Uferrauheiten und Buchten

auf die Fließretention auswirken könnten, sei an einem Berechnungsbeispiel verdeutlicht. Dabei wurde ein Gewässer mit einer Basisbreite von 12 m und einem Sohllängengefälle von 1.5 ‰ mit einem Strickler-Beiwert (ohne GMR) von $35 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ untersucht. Für den Basisabfluss wurde ein Wert von $9.8 \text{ m}^3/\text{s}$ angenommen. Als Zielwert wird rechnerisch ein Schwall/Sunk-Verhältnis $Q_{max}/Q_{min} \leq 2/1$ nach einer Fließstrecke von 10 km angestrebt. Der angenommene Betrieb der Zentrale selbst erzeugt für das prismatische Gerinne ein Verhältnis von $Q_{max}/Q_{min} = 6/1$ an der Wasserrückgabe.

Zwei verschiedene Turbiniersequenzen mit $49 \text{ m}^3/\text{s}$ von 2 h respektive 0,5 h wurden dabei für folgende vier Fälle untersucht:

- 1) Ausgangszustand: berücksichtigt wird einzig die Rückhaltewirkung des prismatischen Gerinnes.
- 2) Ausgleichsbecken: ein genügend großes Ausgleichsbecken unmittelbar unterhalb der Zentrale erlaubt, das gewünschte Schwall/Sunk-Verhältnis einzuhalten.
- 3) GMR A: Gewässerumgestaltung in der 10 km langen Fließstrecke unterhalb der Zentrale zur Erhöhung der Uferrauheit, jedoch ohne bedeutende passive Rückhaltwirkung ($\Delta B = 0,25 \text{ m}$, $L_b = 2,5 \text{ m}$, $L_c = 0,5 \text{ m}$, $B = 12 \text{ m}$ gemäß Bild 3).
- 4) GMR B: Gewässerumgestaltung in der 10 km langen Fließstrecke unterhalb der Zentrale mit größeren Uferbuchten, welche einen bedeutenden passiven Rückhalt bewirken ($\Delta B = 4 \text{ m}$, $L_b = 40 \text{ m}$, $L_c = 8 \text{ m}$, $B = 12 \text{ m}$ gemäß Bild 3).

Die Resultate für diese vier Fälle und die zwei verschiedenen Turbinierzeiten sind in **Bild 7** anhand der Ganglinien 10 km flussabwärts der Zentrale dargestellt. In **Tabelle 2** sind die erzielten Schwall/Sunk-Verhältnisse zusammengefasst. Folgende Punkte können hervorgehoben werden:

- Die Resultate für Turbiniersequenzen von 0,5 h und 2 h sind sehr unterschiedlich. Während die Fließretention für die kurze Turbiniersequenz (0,5 h) auch im prismatischen Gerinne zu einer Abminderung des Schwall/Sunk-Verhältnisses führt, hat sich das Wellenplateau nach 10 km in der selben Geometrie für die längere Turbinierdauer (2 h) noch nicht abgebaut.
- GMR und Buchten mit oder ohne bedeutenden passiven Rückhalt verstärken die auch im prismatischen Gerinne vor-

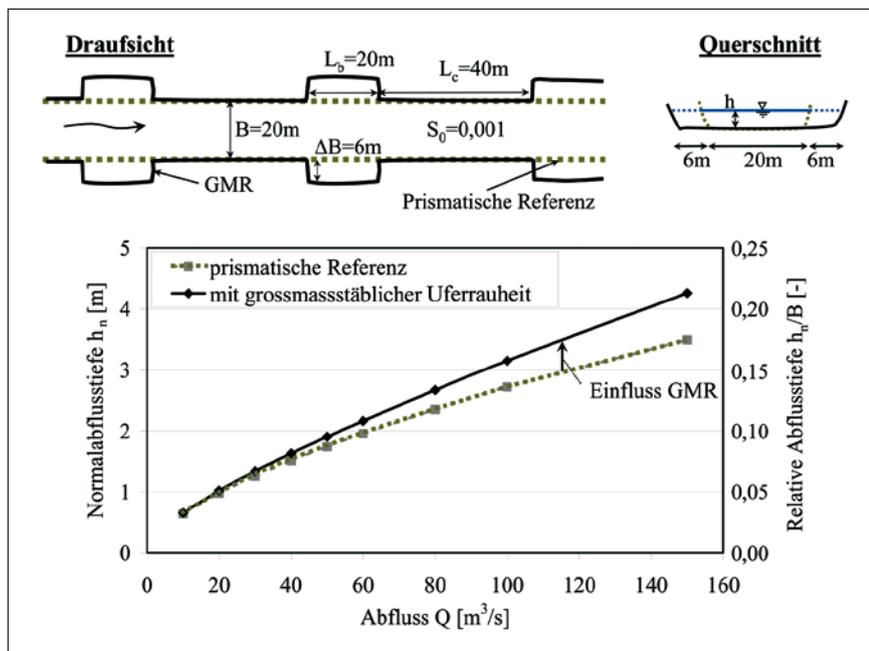


Bild 6: Berechnungsbeispiel für die Normalabflusstiefe unter Berücksichtigung von GMR mit $K_{st,prism} = 35 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$

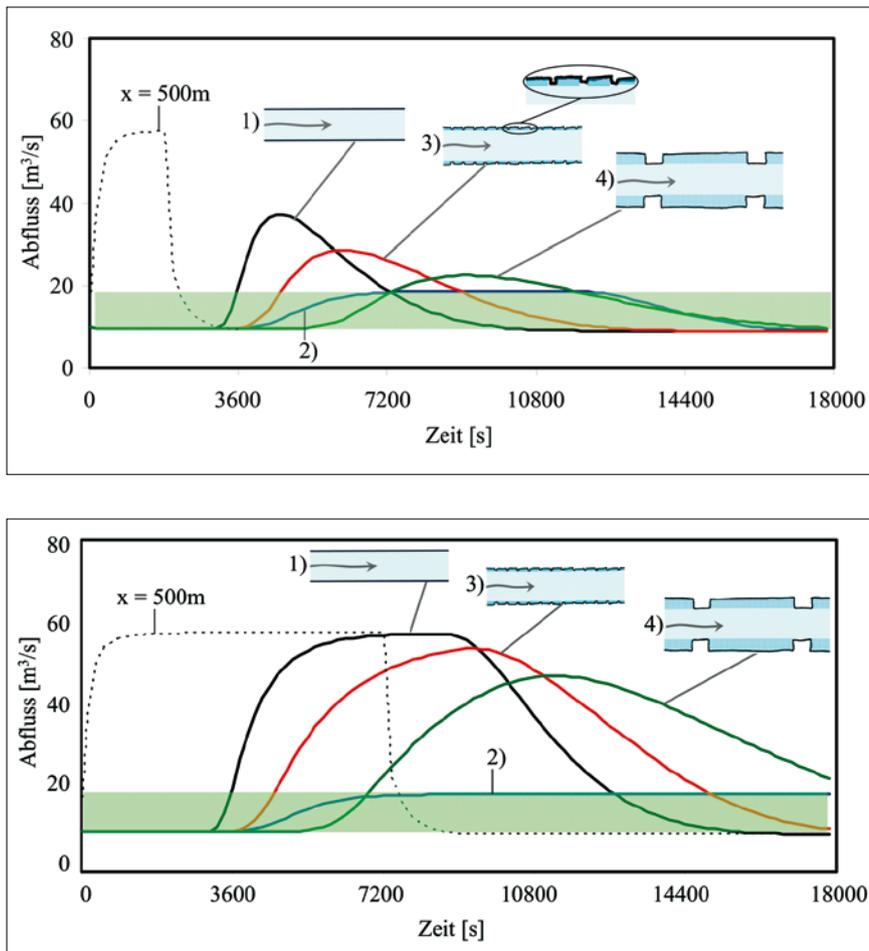


Bild 7: Vergleich der Abflussganglinie für die berechneten Fälle 1), 2), 3) und 4) gemäß Tabelle 2 nach einer Fließstrecke von 10 km für die Turbinierdauer von 0,5 h (oben) und 2 h (unten)

handene Fließretention. So kommt es mit GMR nach 10 km auch für die längere Turbinierzeit zu einer, wenn auch geringen, Abminderung des Schwall/Sunk-Verhältnisses.

- Im Vergleich zu einem Querschnitt 500 m unterhalb der Zentrale vermindern sich in allen Fällen die Schwall/Sunk-Raten weiter flussabwärts. Die Abminderung nach 10 km ist, abgesehen vom Fall mit Ausgleichsbecken, am größten mit GMR in Form von Uferbuchten mit bedeutendem passiven Rückhalt.
- In keinem der gerechneten Fälle ist nach einer Fließstrecke von 10 km eine Schwallwelle mit steiler Front erkennbar.
- Der hypothetische Zielwert von $Q_{\max}/Q_{\min} \leq 2/1$ kann im Beispiel nur mit einem entsprechend großen Ausgleichsbecken vollständig eingehalten werden. Für die kurze Turbinierdauer von lediglich 0,5 h kommt aber auch der Fall mit

GMR und passiven Retentionsflächen dem Ziel relative nahe (Tabelle 2). Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die untersuchten GMR selbst für relative kurze Turbinierdauern und auch nach einer Fließstrecke von 10 km nur eine beschränkte Abminderung des Schwall/Sunk-Verhältnisses verursachen. Dies gilt, obwohl ständig benetzte Buchten betreffend Fließretention eine günstige Situation darstellen. In natürlichen

Gewässern, z. B. in Strecken mit alternierenden Kiesbänken oder einem verzweigten Gerinne, sind ständig benetzte Retentionsflächen bzw. Buchten nur beschränkt vorhanden. Betreffend Anstiegs- und Rückgangsraten des Abflusses kann aber allgemein eine Verbesserung festgestellt werden.

6 Schlussfolgerungen

Die durch den Betrieb von Speicherkraftwerken verursachte Ausbreitung und Abschwächung von Abflusswellen hängt von der Gewässermorphologie sowie von kraftwerks- und produktionsspezifischen Parametern ab.

Systematische Modellversuche in einem Kanal mit GMR erlaubten die Bestimmung von drei empirischen Formeln zur Abschätzung des Einflusses der Uferformrauheiten auf den Fließwiderstandsbeiwert eines Querschnittes. Dabei wurde zwischen drei verschiedenen Fließtypen unterschieden: die wieder anlegende Buchtenströmung, die lang gezogene Rotationsströmung und die kreisförmige Rotationsströmung.

Die durchgeführten instationären Modellversuche geben die Abflussvorgänge unmittelbar unterhalb der Wasserrückgaben bei schnellem Abflusswechsel wieder. In diesem Bereich ist der Wasserspiegelanstieg charakterisiert durch einen schnellen Anstieg (Wellenfront), gefolgt von einem progressiveren Anstieg (Wellenkörper). Die Höhe der Wellenfront nimmt im Fließverlauf unter dem Einfluss der Sohlenneigung und dem Fließwiderstand exponentiell ab. Diese Abnahme wird durch GMR und Buchten noch verstärkt.

Morphologische Maßnahmen in Form von ständig benetzten seitlichen Buchten erhöhen den passiven Gewässerrückhalt sowie die Rauheit. In Gewässerquerschnitten mit einem kleinen Verhältnis der Ab-

Tab. 2: Schwall/Sunk-Verhältnis Q_{\max}/Q_{\min} nach einer Fließstrecke von 10 km für vier untersuchte Fälle und zwei unterschiedliche Turbinierdauern. Der Basisabfluss beträgt $Q_{\min} = 9,8 \text{ m}^3/\text{s}$.

Untersuchte Maßnahme	T = 2 h	T = 0,5 h
1) Ausgangszustand	6/1	3,9/1
2) Ausgleichsbecken vor Einleitung (V: Volumen des Ausgleichsbeckens)	2/1 (V \approx 280 000 m ³)	2/1 (V \approx 70 000 m ³)
3) GMR A (raue Ufer mit $\Delta B = 0,25 \text{ m}$, $L_b = 2,5 \text{ m}$, $L_c = 0,5 \text{ m}$)	5,6/1	3/1
4) GMR B (Uferbuchten mit $\Delta B = 4 \text{ m}$, $L_b = 40 \text{ m}$, $L_c = 8 \text{ m}$)	4,9/1	2,3/1

Tobias Meile, Jean-Louis Boillat and Anton Schleiss

Reduction of Hydropeaking in Rivers by Bank Macro Roughness

High-head storage hydropower plants operate their turbines during periods of high energy demand. The starting and stopping of turbines results in rapid fluctuations of discharge and water levels in rivers called hydropeaking, which are unfavourable from an ecological point of view. Besides retention basins, morphological measures can help to reduce the fluctuations by increasing the natural retention capacity of rivers. Systematic hydraulic model tests have been performed to evaluate the influence of macro roughness and cavities at the banks on the flow resistance and the propagation of (surge) waves. For the estimation of the flow resistance empirical formulas could be developed. The passive retention due to bank cavities influences the propagation of waves. The effect of morphological measures on hydropeaking is generally less than that of managed retention basins, especially for long operation sequences of turbines.

flusstiefe zur Basisbreite dominiert dabei die passive Retention den Effekt des relativ geringfügig erhöhten Fließwiderstandes durch die Rauheit der Ufer. Um den passiven Gewässerrückhalt tatsächlich zu erhöhen und gleichzeitig die Gefahr von strandenden Organismen zu verringern, müssten großmaßstäbliche Uferbuchten so ausgestaltet sein, dass sie auch bei Sunk benetzt sind. Wechselnd benetzte Flächen sollten nur geringe Ausmaße aufweisen.

Die Wirkung morphologischer Maßnahmen hinsichtlich Fließretention ist gewässerspezifisch. Die Erhöhung der Rauheit sowie der passive Gewässerrückhalt verzögert für kurze Turbiniersequenzen das Erreichen der stationären Abflussbedingungen an der Rückgabestelle. Für lange Turbinierdauern, wie sie bei den Speicherkraftwerken im Alpenraum im Normalfall vorherrschen, beschränken sich die positiven Effekte von morphologischen Maßnahmen hauptsächlich auf die verbesserte Struktur- und Strömungsvielfalt. Die täglichen Wasserspiegelschwankungen können bei langen Turbinierdauern jedoch nur durch Rückhaltebecken maßgebend verringert werden.

Hinweis und Danksagung

Erweiterte Fassung eines Vortrages, gehalten am Symposium „Flussbauliche Maßnahmen im Dienste des Hochwasserschutzes, der Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft“ vom 7. November 2007 in Lausanne, Schweiz.

Diese Arbeit wurde im Rahmen des Rhone-Thur-Projekts durchgeführt und unterstützt durch das Bundesamt für Wasserwirtschaft und Geologie (BWG), heute Bundesamt für Umwelt (BAFU).

Autoren

Dr. Tobias Meile
Dr. Jean-Louis Boillat
Prof. Dr. Anton Schleiss

Laboratoire de Constructions
Hydrauliques (LCH)

Ecole Polytechnique Fédérale
de Lausanne (EPFL)

Station 18, 1015 Lausanne, Schweiz

tobias.meile@hydrocosmos.ch

jean-louis.boillat@epfl.ch

anton.schleiss@epfl.ch

Literatur

- [1] Baumann, P.; Klaus, I.: Gewässerökologische Auswirkungen des Schwallbetriebes – Ergebnisse einer Literaturstudie. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Bern, Switzerland, 2003.
- [2] Cushman, R. M.: Review of ecological effects of rapidly varying flows downstream of hydroelectric facilities. In: North American Journal of Fisheries Management (1985), S. 330-339.
- [3] Favre, H.: Etude théorique et expérimentale des ondes de translation dans les canaux découverts, Dunod, Paris, 1935.
- [4] Heller, Ph.; Pellaud, M.; Bollaert, E.; Schleiss, A.; Schlaepfer, R.: River rehabilitation through a multipurpose reservoir. In: Proceedings of the 32nd Congress of IAHR, Special Session 01 (SS01-01-0), Venice, Italien, 1.-6. July 2007, CD-Rom, 2007.
- [5] Meile, T.; Schleiss, A.; Boillat, J.-L.: Entwicklung des Abflussregime der Rhone seit dem Beginn des 20. Jahrhunderts. In: Wasser, energie, luft 97 (2005), Nr. 5/6, S. 3-142.
- [6] Meile, T.: Influence of macro-roughness of walls on steady and unsteady flow in a channel. Thèse N° 3952 de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne und Mitteilung Nr. 36 des Wasserbaulabors der ETH Lausanne (LCH-EPFL), ISSN 1661-1179., 2007.
- [7] Meile, T.; Boillat, J.-L.; Schleiss, A.: Einfluss von großmaßstäblichen Uferauheiten und Buch-

ten auf Schwallwellen in Flüssen infolge Kraftwerksbetrieb. In: Wasser, energie, luft 100 (2008), Nr. 1, S. 6-12.

- [8] Pellaud, M.: Ecological response of a multi-purpose river development project using macro-invertebrates richness and fish habitat value. Thèse N° 3807 de l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL), 2007.
- [9] Pfaundler, M.; Keusen, M.: Veränderungen von Schwall-Sunk. Hydrologische Datenanalyse zur Charakterisierung von Schwall-Sunk Phänomenen in der Schweiz. In: Umwelt-Wissen Nr. 0712, Bundesamt für Umwelt, Bern, 2007.
- [10] Stranner, H.: Schwallwellen im Unterwasser von Spitzenkraftwerken und deren Reduktion durch flussbauliche Maßnahmen. In: Schriftenreihe zur Wasserwirtschaft der Technische Universität Graz, 1996, Nr.20.
- [11] VAW-LCH: Kraftwerksbedingter Schwall und Sunk, Eine Standortbestimmung. Bericht VAW 4232 & LCH 05-2006, Zürich/Lausanne, 2006.
- [12] Wickenhäuser M.; Hauenstein W.; Minor H.-E.: Maßnahmen zur Schwallspitzenreduktion und deren Auswirkungen. In: Wasser, energie, luft 97 (2005), Heft 1/2, S. 29-38.