

Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria
Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
Band: 101 (2009)
Heft: 3

Artikel: Bewertung von Schwall/Sunk : Herleitung eines ökologisch abgestützten Bewertungskonzepts
Autor: Schweizer, Steffen / Neuner, Johann / Heuberger, Nick
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-941941>

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: 22.02.2026

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

Bewertung von Schwall/Sunk – Herleitung eines ökologisch abgestützten Bewertungskonzepts

■ Steffen Schweizer, Johann Neuner, Nick Heuberger

1. Einleitung

Um den zeitlich veränderlichen Strombedarf der Verbraucher zu decken und die Funktionsfähigkeit der Stromnetze zu gewährleisten, wird in vielen Ländern Wasser in hoch gelegenen Stauseen gespeichert und bei Stromspitzenbedarf zur Energiegewinnung turbinert. Wird dieses Wasser direkt in ein Fliessgewässer abgegeben, entstehen künstliche Pegelschwankungen (Schwall/Sunk), die die gewässerökologische Situation beeinträchtigen können. Sowohl in der Schwall- wie auch in der Sunkphase können kurzfristig auftretende Veränderungen (z.B. erhöhte Wirbellosendrift während Schwallabfluss, Stranden von Fischen während der Sunkphase) und langfristige Veränderungen (z.B. Abnahme der Artenvielfalt der Invertebraten (Wirbellose) und der Fische) beobachtet werden (Baumann & Klaus, 2003). Diesbezüglich wurden und werden in verschiedenen Forschungsinstituten, aber auch in der Praxis weltweit Untersuchungen durchgeführt (z.B. Meile et al., 2005). Diese zeigen, dass die gewässerökologischen Auswirkungen von künstlichen Pegelschwankungen sehr unterschiedlich ausfallen können und dass dabei verschiedenste Parameter (z.B. Flussmorphologie, Ufergestaltung, Korngrössenverteilung, Art und Ausmass der Pegelschwankungen) eine wichtige Rolle spielen (z.B. Meile et al., 2005 und 2008). Neuere Untersuchungen haben zum Beispiel gezeigt, dass ein sog. Vorschwall die Invertebratendrift offensichtlich verringern kann (Burri 2009), dass sich Fische bis zu einem gewissen Grad an die Konsequenzen von Sunkphasen «erinnern» können (Heggenes, 2009) oder dass sich der Schwallabfluss bei Einsatz eines Beruhigungsbeckens im weiteren Fliessverlauf durch das Phänomen einer Wellenaufstellung im ungünstigen Fall verschärfen kann (Baumann, 2009).

Die Massnahmen zur Verminderung oder Eliminierung von Schwall/Sunk lassen sich generell in bauliche und betriebliche Massnahmen unterteilen. Als bauliche

Massnahmen kommen beispielsweise die direkte Ableitung des turbinierten Wassers in einen See oder in den Stauraum eines Laufwasserkraftwerks, der Bau von Rückhaltebecken oder -kavernen, und eine morphologische Optimierung eines Gewässers in Frage. Als betriebliche Massnahmen können in erster Linie Minimal- und Maximalabflüsse, langsames An- und Zurückfahren der Turbinen und die Erzeugung eines Vorschwalls genannt werden (Meile et al., 2005, Moor 2009).

Um den Handlungsbedarf in den verschiedenen Schwallstrecken zu priorisieren und um die geeignete(n) Massnahme(n) zur Dämpfung der künstlichen Pegelschwankungen auszuwählen, wird dringend eine gewässerökologische Bewertungsmethode benötigt, die eine differenzierte Betrachtung jedes Gewässers ermöglicht. Bisher existieren nur wenige Bewertungsmethoden, die sich oft auf pauschale Verhältniszahlen abstützen und die effektiv bestehenden gewässerökologischen Defizite sowie die Eigenheiten der Gewässer zu wenig berücksichtigen.

In der Schweiz haben Pfaundler et al., (2007) im Rahmen der Methode HYDMOD-F einen Indikator zur Bewertung von kurzzeitigen Abflussschwankungen aus Wasserkraftwerken («Schwall-Sunk-Phänomen») entwickelt. Dabei werden neben den Verhältnissen von Schwall- zu Sunkabfluss und von Schwall zu mittlerem Abfluss auch die Einzugsgebietsgrösse sowie Pegelanstiegs- und Rückgangsraten mit einbezogen. Die Methode HYDMOD-F bildet das Modul Hydrologie des Modul-Stufenkonzeptes, einer schweizerischen Methodik für die Untersuchung und Beurteilung der Fliessgewässer (BUWAL, 1998). HYDMOD-F beschränkt sich deshalb per Definition auf hydrologische Erscheinungen. Andere wichtige Einflussfaktoren, darunter hauptsächlich die Morphologie des Gewässers, werden demgegenüber nicht oder nur am Rande berücksichtigt.

Die Methode von Pfaundler et al., (2007) wurde von Mitarbeitenden der KWO

an der Hasliaare (zwischen der Wasserrückgabe in Innertkirchen und dem Brienzensee) für die heutige Situation und für die zukünftige Situation mit einem Beruhigungsbecken (Schweizer et al., 2008) angewendet und getestet (Schweizer & Heuberger 2009). Aufgrund der zahlreichen gewässerökologischen Untersuchungen in der Hasliaare, die bereits durchgeführt wurden oder aktuell durchgeführt werden, eignet sich dieser Abschnitt der Aare sehr gut für das Testen einer Methode zur Bewertung der Auswirkungen von künstlichen Pegelschwankungen. Bei der Anwendung von HYDMOD-F zeigte sich, dass diese Bewertungsmethode äusserst sensibel auf die Abflussverhältnisse ($Q_{\text{Schwall}}/Q_{\text{Sunk}}$ und Q_{Schwall}/MQ) und verhältnismässig unsensibel auf die weiteren Parameter reagiert. Die Bestimmung des repräsentativen Schwallabflusses mittels der Rechteckmethode (Pfaundler et al., 2007) nimmt die schwalldämpfende Wirkung des geplanten Beruhigungsbeckens (Schweizer et al., 2008) bereits für den heutigen Zustand vorweg, so dass der Unterschied mit und ohne Beruhigungsbecken mit dieser Methode nicht sehr ausgeprägt ausfällt. Bis Ende 2009 wird die Bewertungsmethode HYDMOD-F an verschiedenen Flussabschnitten in der Schweiz getestet und anschliessend überarbeitet. Das Thema Schwall/Sunk beschäftigt mittlerweile auch Stände- und Nationalrat: Sowohl deren aktuell erarbeiteter Gegenvorschlag zur Volksinitiative «Lebendiges Wasser» als auch die Initiative selbst fordern eine Erweiterung des Gewässerschutzgesetzes um eine klare Regelung der künstlichen Pegelschwankungen in schweizerischen Fliessgewässern. Spätestens bei der Erweiterung der Gewässerschutzverordnung bedarf es dann aber klarer und ökologisch nachvollziehbarer Richtlinien und Kriterien, um einen möglichst grossen gewässerökologischen Gewinn mit vertretbaren finanziellen Mitteln zu erreichen. Im folgenden Artikel wird ein Bewertungskonzept vorgeschlagen, das sich an den ökologischen Defiziten

von Schwallstrecken orientiert, die Eigenheit von Fließgewässern (vor allem die Flussmorphologie) soweit noch praktikabel mitberücksichtigt und ausschliesslich hydrologisch-hydraulische Eingangsgrößen verwendet, da abiotische Indikatoren im Allgemeinen leichter und eindeutiger zu bestimmen sind als biologische Parameter. Je nach Morphologie sind bezüglich Schwall/Sunk unterschiedliche Prozesse und Phänomene für die aquatische Lebensgemeinschaft relevant. Da dies in diesem Konzept explizit berücksichtigt wird und die Morphologie der schweizerischen Flüsse sich häufig kleinräumig ändert, ist die hier vorgestellte Methode eher für eine kleinräumige Betrachtung geeignet.

Selbstverständlich kann weder bei der endgültigen Beurteilung einer Schwallstrecke noch bei der Festlegung von Massnahmen zur Minderung von Schwall/Sunk auf detaillierte biologische Untersuchungen des Benthos (Flora und Fauna der Gewässersohle) und der Fischfauna verzichtet werden. Allerdings kann das hier vorgestellte Konzept den Entscheidungsträgern wichtige Hinweise über die gewässerökologische Situation geben, transparente und der jeweiligen Situation angepasste Lösungen aufzeigen und die Priorisierung der zu sanierenden Schwallstrecken unterstützen. Auch aufwändige biologische Untersuchungen (z.B. Driftmessungen bei vielen verschiedenen Szenarien) können in bestimmten Fällen mit diesem Konzept ersetzt oder zumindest reduziert werden.

2. Häufigste ökologische Defizite verursacht durch Schwall/Sunk

Die durch Schwall und Sunk verursachten gewässerökologischen Defizite lassen sich in kurzfristige und langfristige Defizite unterteilen. Bei den kurzfristig auftretenden Defiziten handelt es sich um immer wiederkehrende Prozesse infolge von künstlichen Pegelschwankungen; die langfristig auftretenden Defizite sind dann eine Folge der immer wieder auftretenden kurzfristigen Störungen der natürlichen Hydrologie eines Gewässers. Die hier aufgelisteten Defizite können für jede Schwallstrecke unterschiedlich stark ausfallen und unterschiedlich häufig auftreten.

2.1 Kurzfristig auftretende Defizite und für deren Beschreibung geeignete Schwall/Sunk-Indikatoren

Als die wichtigsten kurzfristig auftretenden gewässerökologischen Defizite in Schwallstrecken können genannt werden:

- Regelmässige Bewegungen von Teilen der Gewässersohle durch eine starke hydraulische Belastung während der Schwallphase
- Periodisches Trockenfallen von Teilen

der Gewässersohle und damit verbundenes Stranden von Fischen und Invertebraten bei tiefem Abfluss in der Sunkphase.

- Erhöhte Invertebratendrift infolge

Typisches gewässerökologisches Defizit	Gut geeignete Indikatoren zur Beschreibung des Defizits	Alternative Indikatoren mit beschränkter Aussagekraft
Regelmässige Bewegungen von Teilen der Gewässersohle bei Q_{Schwall}	Häufigkeit, wie oft der Schwallabfluss Q_{Schwall} den kritischen Wert für den Transportbeginn auf der Sohle übersteigt $F(Q_{\text{Schwall}} > Q_{\text{Transportbeginn}})$	
Periodisches Trockenfallen von Teilen der Gewässersohle und damit verbundenes Stranden von Fischen und Invertebraten sowie Trockenfallen von Laichgruben während tiefem Abfluss während der Sunkphase	Pegelrückgangsrates $P_{\text{Rück}}$ Absolute oder relative Änderung der benetzten Breite ΔB oder $B_{\text{Schwall}}/B_{\text{Sunk}}$ (vgl. Kap. 3.2) (bzw. Gerinnegeometrie)	Schwall/Sunk-Verhältnis $Q_{\text{Schwall}}/Q_{\text{Sunk}}$
Erhöhte Invertebratendrift infolge schneller Zunahme der Turbulenz und hohem hydraulischen Stress auf die Gewässersohle sowie Wegspülen von Fischeiern und Fischlarven	Pegelanstiegsrate P_{Anstieg} Turbulenzänderung beim Abflussanstieg ΔRe (Änderung der Reynold's Zahl) Unter Mitberücksichtigung eines sog. Vorschwalls Dimensionslose Sohlenschubspannung θ oder andere hydraulische Parameter	Schwall/Sunk-Verhältnis $Q_{\text{Schwall}}/Q_{\text{Sunk}}$ oder wenn regelmässig ein sog. Vorschwall gefahren wird $Q_{\text{Schwall}}/Q_{\text{Vorschwall}}$
Kurzzeitige Änderung der Wassertemperatur (speziell markante Abkühlungen)	Verhältnis Wassertemperatur des turbinierten Wassers zu Wassertemperatur des Basisabflusses in Abhängigkeit zum Schwall/Sunk-Verhältnis $T_{\text{Triebwasser}}/T_{\text{Basisabfluss}} \cdot Q_{\text{Schwall}}/Q_{\text{Sunk}}$ Schwall/Sunk-Verhältnis $Q_{\text{Schwall}}/Q_{\text{Sunk}}$	
Kurzzeitige Änderung der Wassertrübung	Verhältnis Schwebstoffkonzentration des turbinierten Wassers zu Schwebstoffkonzentration des Basisabflusses in Abhängigkeit zum Schwall/Sunk-Verhältnis $C_{\text{Schwebstoff-Triebwasser}}/C_{\text{Schwebstoff-Basisabfluss}} \cdot Q_{\text{Schwall}}/Q_{\text{Sunk}}$ Dimensionslose Sohlenschubspannung θ Pegelanstiegsrate Reynoldszahl Re (Turbulenz) Schwall/Sunk-Verhältnis $Q_{\text{Schwall}}/Q_{\text{Sunk}}$	

Tabelle 1. Indikatoren zur Beschreibung der kurzfristig auftretenden gewässerökologischen Defizite. Werden in der zweiten Spalte mehrere Indikatoren genannt, haben diese in etwa die gleiche Aussagekraft. Indikatoren der dritten Spalte sind deutlich weniger aussagekräftig bzgl. dem jeweiligen Defizit und sind als Ersatz bei unzureichender Datengrundlage in Betracht zu ziehen. Die Abkürzungen der Indikatoren werden in Kapitel 3 und 7 näher beschrieben.

Anmerkung: $Q_{\text{Transportbeginn}}$ könnte auch mit $Q_{\text{Transportbeginn}} = 0.6 \cdot MHQ$ grob abgeschätzt werden ($Q_{\text{Transportbeginn}}$ = kritischer Abfluss, ab dem sich Teile der Sohle anfangen zu bewegen, MHQ = mittlerer jährlicher Hochwasserabfluss).

schneller Zunahme der Turbulenz und hohem hydraulischen Stress auf der Gewässersohle

- Kurzzeitige Änderung der Wassertemperatur
- Kurzzeitige Änderung der Wassertrübung

Für jedes der hier aufgeführten gewässerökologischen Defizite eignen sich unterschiedliche Indikatoren, um das Ausmass des jeweiligen Defizits hinreichend genau zu beschreiben (*Tabelle 1* sowie Kapitel 3).

Die Auswahl der in *Tabelle 1* vorgeschlagenen Indikatoren wird in den Kapiteln 3.1–3.5 näher erläutert.

2.2 Langfristig auftretende Defizite

Allgemein können in Schwallstrecken häufig folgende Defizite im Vergleich zu hydrologisch unbeeinflussten Fliessgewässern beobachtet werden (Baumann & Klaus, 2003):

- Reduktion der Biomasse, der Abundanz und der Artenvielfalt von Wasserpflanzen und wirbellosen Tieren (Invertebraten)
- Reduktion der Biomasse, der Abundanz und der Artenvielfalt von Fischen
- Reduktion oder Verhinderung der natürlichen Reproduktion von Fischen aufgrund
 - verstärkter Sohlenkolmation (diese verhindert oder erschwert die Eiablage und reduziert die Erfolgsquote)
 - fehlendes Nahrungsangebot für Jungfische

sowie der kurzfristig auftretenden Defizite:

- relativ inkonstante Habitatbedingungen (häufige Änderungen der Fliessgeschwindigkeit und Abflusstiefe)
- von Trockenfallen von Laichplätzen
- Wegspülen von Fischeiern bei $Q_{Schwall}$
- Verdriften von Fischlarven
- Zunahme der Kolmation durch sog. Vibrationseffekt (die Abflussänderungen erzeugen eine Art Sohlenvibration, die zu einem höheren Eintrag von Feinmaterial in die Sohle führen kann)

2.3 Zusammenhang zwischen kurzfristig und langfristig auftretenden gewässerökologischen Defiziten

Während die Einflussfaktoren auf die kurzfristig auftretenden gewässerökologischen Defizite zum Grossteil bekannt sind (vgl. *Tabelle 1*), müssen bei den langfristig auftretenden gewässerökologischen Defiziten

ten auch weitere Einflussfaktoren wie z.B. die Wasserqualität, die Vernetzung (lateral, longitudinal und vertikal), die Flussmorphologie, das Abflussregime oder weitere anthropogene Nutzungen mitberücksichtigt werden. Generell ist es aber sehr wahrscheinlich, dass die kurzfristig auftretenden Defizite auch die langfristig auftretenden Mängel stark beeinflussen, z.B.:

- Regelmässige Bewegungen der Sohle infolge $Q_{Schwall}$ verhindern die natürliche Reproduktion der Fische, reduzieren die Biomasse, Abundanz und Artenvielfalt der pflanzlichen und tierischen Sohlenbewohner (Benthosorganismen) erheblich
- Das periodische Trockenfallen von Abschnitten der Gewässersohle während der Sunkphase vermindert den besiedelbaren Lebensraum und reduziert die Abundanz und Biomasse sowohl der Vertebraten als auch der Invertebraten. Dies kann auch zum Verschwinden bestimmter Fischarten in einer Schwallstrecke führen
- Eine regelmässig auftretende hohe Invertebratendrift reduziert permanent die Gesamtbiomasse des Benthos. Empfindlichere Arten, die mit diesen Bedingungen nicht zurechtkommen, können verschwinden. Auch Fischlarven können verdriftet werden
- Mit einer geringeren Biomasse des Benthos geht auch ein reduziertes Nahrungsangebot für Fische einher, wo-

durch auch deren Abundanz und Biomasse tendenziell vermindert wird

- Die künstliche und häufige Änderung des Abflusses bewirkt tendenziell eine Erhöhung der Kolmation durch den sog. Vibrationseffekt. Allerdings halten Speicherseen auch einen erheblichen Teil des Sediments zurück, wodurch im Jahresdurchschnitt sowohl Trübung als auch Sohlenkolmation reduziert werden

Bild 1 veranschaulicht die klaren und vermuteten Zusammenhänge zwischen kurzfristig und langfristig auftretenden Defiziten schematisch.

Die hier aufgeführten Zusammenhänge sowie *Bild 1* zeigen, dass ein relativ enger Zusammenhang zwischen den kurz- und langfristig auftretenden gewässerökologischen Defiziten besteht. So ist eine vereinfachende Betrachtung der Schwall/Sunk-Problematik mit einer klaren Fokussierung auf die relativ gut zu beschreibenden kurzfristig auftretenden Defizite als erste Annäherung an diese gewässerökologische Problematik gerechtfertigt.

3. Beschreibung und Beurteilung der Defizite unter besonderer Berücksichtigung der Morphologie

Die Auswirkungen von Schwall/Sunk auf die Gewässerökologie hängen unter anderem sehr stark von der Flussmorphologie ab (*Tabelle 2*). Im Folgenden werden ver-

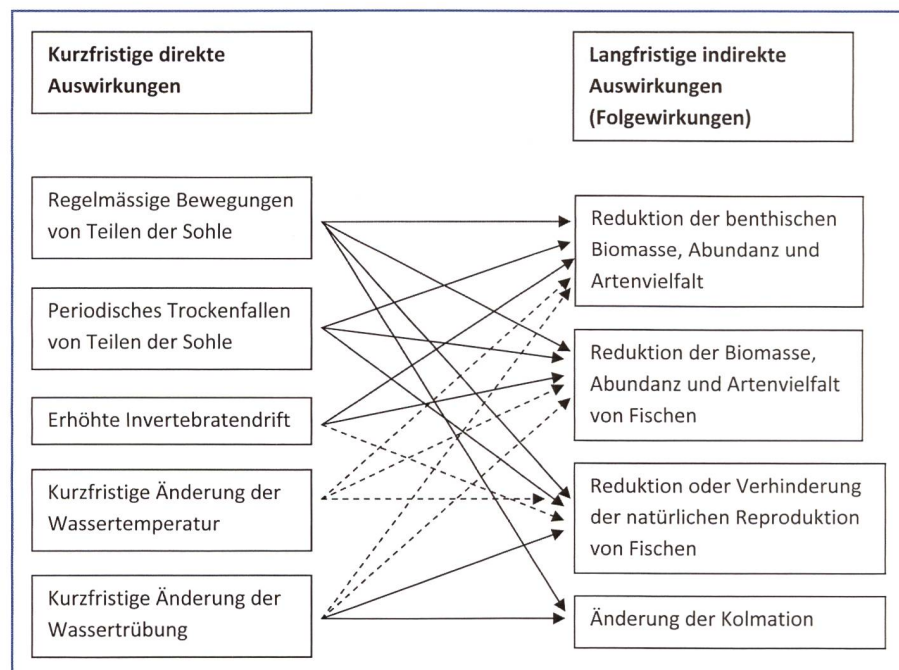


Bild 1. Schematische Darstellung des Einflusses von kurzfristig auftretenden Defiziten (links) auf langfristig auftretende Defizite (rechts) infolge von Schwall/Sunk. Durchgezogene Pfeile zeigen relativ eindeutige Zusammenhänge auf; bei gestrichelten Pfeilen kann ein Zusammenhang vermutet werden.

einfach drei Morphologieformen unterschieden:

- Gerader oder kanalisierter Flusslauf ohne Grobstrukturen
- Flusslauf mit alternierenden Kiesbänken (mit flachen und tiefen Zonen sowie variabler Fliessgeschwindigkeit)
- Verzweigte Flussabschnitte (mit flachen und tiefen Zonen sowie variabler Fliessgeschwindigkeit)

Theoretisch können mäandrierende Flüsse für die hier betrachtete Fragestellung beim Auftreten von Kiesbänken der zweiten Morphologieform (alt. Kiesbänke) und beim Fehlen von Kiesbänken der ersten Morphologieform (gerade) zugeordnet werden. Allerdings treten künstliche Pegelschwankungen selten in mäandrierenden Flüssen auf.

3.1 Regelmässige Bewegungen der Sohle bei $Q_{Schwall}$

Bei konstantem Abfluss gilt grundsätzlich: Je geringer die einem Fluss zur Verfügung stehende Breite ausfällt, umso grösser wird die mittlere Wassertiefe und damit umso grösser der hydraulische Stress, der auf die Flusssohle wirkt. Dieser hydraulische Stress wird meistens mit der dimensionslosen Sohlenschubspannung θ (vgl. 7. Abkürzungen und Formeln) beschrieben.

Laborversuche und Naturbeobachtungen haben gezeigt, dass die sich einstellende Morphologie unter anderem sehr stark von der dem Gewässer zur Verfügung stehenden Breite abhängt: Unter den gleichen Randbedingungen (Gefälle, Korngrössenverteilung, Hochwasserdynamik) bilden sich mit zunehmender Breite folgende Morphologien aus: gerade \rightarrow alternierende Kiesbänke \rightarrow verzweigt (sofern die sog. Stream Power [SP] ausreichend gross ist [vgl. 7. Abkürzungen und Formeln] und kein Geschiebedefizit vorhanden ist) (Da Silva, 1991, Schweizer, 2007). Das heisst, dass vor allem bei geraden Flussläufen, aber auch bei alternierenden Kiesbänken der Grossteil der Flusssohle tendenziell einem höheren hydraulischen Stress ausgesetzt ist als bei verzweigten Gewässerabschnitten. Deshalb treten regelmässige Bewegungen von Teilen der Sohle infolge von $Q_{Schwall}$ eher in kanalisierten Einzelgerinnen auf.

Mit Hilfe der dimensionslosen Sohlenschubspannung kann die kritische Abflusstiefe abgeschätzt werden, ab der sich Teile der Sohle zu bewegen beginnen. Allerdings variieren die Werte für θ_{Cr} in der Fachliteratur (z.B. Zarn [1997] $\theta_{Cr} = 0.033$, Hunzinger [1998] $\theta_{Cr} = 0.039$) etwas. Aus dem Hydrograph und der kritischen Ab-

Typisches gewässerökologisches Defizit	Flussmorphologie		
	Gerade	Alternierende Kiesbänke	Verzweigt
Regelmässige Bewegungen von Teilen der Gewässersohle bei $Q_{Schwall}$	+++	++	+
Periodisches Trockenfallen von Teilen der Gewässersohle und damit verbundene Stranden von Fischen und Wirbellosen während der Sunkphase	+	+ / ++	+++
Erhöhte Invertebratendrift beim Abflussanstieg	+++	++	+ / ++
Kurzzeitige Änderung der Wassertemperatur	+++	+++	+++
Kurzzeitige Änderung der Trübung	+++	+++	+++

Tabelle 2. Beurteilung des Auftretens von typischen gewässerökologischen Defiziten infolge von Schwall/Sunk in Abhängigkeit von der Flussmorphologie. Die Bewertungen +, ++ und +++ geben die Wahrscheinlichkeit an, mit der ein typisches gewässerökologisches Defizit bei einer bestimmten Flussmorphologie auftritt (wobei + = unwahrscheinlich und +++ = sehr wahrscheinlich).

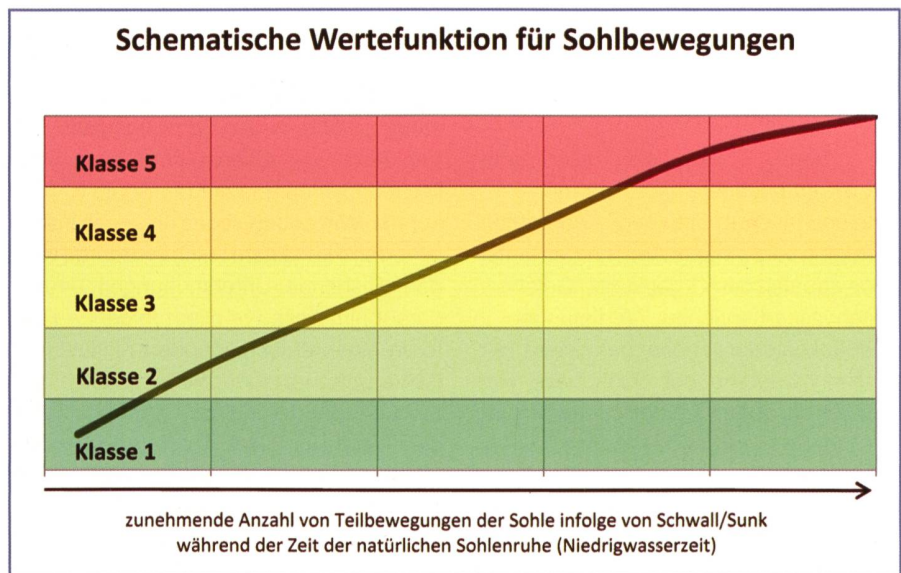


Bild 2. Schematische Wertefunktion zur Beurteilung der Sohlenstabilität in Schwallstrecken. Beachte: Die hier angegebene Wertefunktion ist nur zur Veranschaulichung gedacht. Eine anwendbare Wertefunktion muss erst noch von Gewässerökologen und Wasserbauern entwickelt und definiert werden.

flusstiefe kann anschliessend die Häufigkeit der Bewegungen von Teilen der Sohle abgeschätzt werden. Für eine Bewertung von Schwall/Sunk sollten dann aber nur eindeutig von Kraftwerken erzeugte Schwallwellen berücksichtigt werden, damit Flüsse mit verschiedenem Abflussregime bzgl. künstlichen Pegelschwankungen verglichen werden können.

In einem nächsten Schritt bedarf es noch einer ökologisch begründeten Wertefunktion für die Häufigkeit der Sohlbewegungen. Diese könnte z.B. 5 Klassen von natürlich (Klasse 1) bis künstlich (Klasse 5) zur Bewertung verwenden. Bild 2 zeigt schematisch eine Wertefunktion,

wie sie für dieses kurzfristig auftretende Defizit denkbar wäre. Diese Bewertung gilt nur für Zeiten, in denen der Abfluss natürlicherweise tief und die Gewässersohle entsprechend stabil bleiben würde. In den Alpenflüssen, die vom Schwallbetrieb aus Wasserkraftwerken am stärksten betroffen sind, fällt diese Zeit der Sohlenruhe auf das Winterhalbjahr. Im Sommer ist eine periodische Bewegung und Umlagerung der Sohle hingegen sowohl aus hydrologischer und flussmorphologischer als auch aus gewässerökologischer Sicht notwendig (Pfaundler et al., 1998; Scheurer & Molinari, 2003, Robinson & Uehlinger, 2003).

3.2 Periodisches Trockenfallen von Teilen der Gewässersohle und ein damit verbundenes Stranden von Fischen und Invertebraten während tiefem Abfluss in der Sunkphase

In der Sunkphase können infolge des Abflussrückgangs bestimmte Teile der Gewässersohle trockenfallen. Dies tritt ausschliesslich bei strukturreichen und breiten Flussabschnitten auf, da gerade und durch Dämme stark eingeeengte Flussläufe in der Regel auch bei Niedrigwasser die gesamte Gewässersohle benetzen. Bei Flussabschnitten mit alternierenden Kiesbänken hängt der Anteil der Fläche der Gewässersohle, die bei Q_{Sunk} trocken fällt, vom Querprofil, bzw. von der Uferneigung und der Schräge der Kiesbank ab – je flacher die Ufer und Kiesbänke, umso grössere Flächen können bei Q_{Sunk} trockenfallen. Für verzweigte Fliessgewässer gelten ähnliche Überlegungen wie für Flussabschnitte mit alternierenden Kiesbänken – allerdings fällt der Anteil von trockengelegten Flächen während Q_{Sunk} tendenziell höher aus.

Vom Trockenfallen bestimmter Gewässerabschnitte sind vor allem Fische und Invertebraten negativ betroffen. Speziell in verzweigten Abschnitten laufen diese aquatischen Organismen Gefahr, in Hinterwasserbereichen, Vertiefungen in Kiesbänken oder in höher gelegenen Teilgerinnen während der Sunkphase vom Hauptstrom abgeschnitten zu werden und bei längerer Niedrigwasserphase (z.B. am Wochenende) zu stranden.

Der Anteil der Fläche der Gewässersohle, die bei Q_{Sunk} trocken fällt, kann am besten mit der Änderung der benetzten Breite abgeschätzt werden. Um verschiedenen breite Flussabschnitte miteinander vergleichen zu können, könnte das Verhältnis von benetzter Breite bei Schwallabfluss zum Sunkabfluss verwendet werden: $B_{\text{Schwall}}/B_{\text{Sunk}}$. Wesentlich unpräziser beschreibt das Schwall/Sunk-Verhältnis den Anteil der Gewässersohle, der bei Q_{Sunk} trocken fällt.

Für die betroffenen aquatischen Organismen spielt ausserdem die Geschwindigkeit des Abflussrückgangs eine sehr entscheidende Rolle (ein langsamer Abflussrückgang erhöht die Reaktionszeit für die aquatischen Organismen). Dieser Prozess kann mit der Pegelrückgangsrate relativ gut beschrieben werden. Bei der Bestimmung der Pegelrückgangsrates sollte das Messintervall des Hydrographen nicht mehr als 15 Minuten betragen.

Eine Bewertung des periodischen

Trockenfallens von Teilen der Gewässersohle sollte sich also sowohl auf die Änderung der benetzten Breite als auch auf die Pegelrückgangsrates beziehen. Für beide Indikatoren und deren Gewichtung müsste auch hier noch eine Wertefunktion bzw. Wertematrix entwickelt werden – evtl. bedarf es für alternierende Kiesbankstrecken und für verzweigte Abschnitte verschiedener Wertefunktionen. Für beide Morphologien lassen sich in der Literatur Empfehlungen finden. Bei offenen Forschungsfragen (z.B. die Anfälligkeit zu Stranden ist abhängig von der Fischart und von der Jahreszeit, Peter (2009)) sollten dann weitere Feld- und Laboruntersuchungen diese Empfehlungen noch verfeinern. Da bei geraden Flussläufen so gut wie keine Stellen trocken fallen, sollte die Wertefunktion dies auch so abbilden (kein Defizit «Trockenfallen» angeben).

3.3 Erhöhte Drift von Wirbellosen und Fischlarven beim Abflussanstieg

Infolge von unnatürlich raschen Abflussanstiegen während den Schwallphasen und den damit verbundenen höheren hydraulischen Kräften, die auf die Sohle wirken, können Wirbellose, Algen und auch Fischlarven sowie kleinere Fische verdriftet werden. Bisherige Untersuchungen deuten darauf hin, dass vor allem folgende Faktoren einen entscheidenden Einfluss auf die Verdriftung haben: die Turbulenzänderung ΔRe (Änderung der Reynold's Zahl), die Geschwindigkeit der sich ändernden hydraulischen Bedingungen (z.B. sehr gut mit der Pegelanstiegsrate P_{Anstieg} abschätzbar, sofern das Messintervall im Hydrographen nicht grösser als 15 Minuten ist) und die maximal auftretenden Kräfte auf die Sohle (z.B. dimensionslose Sohlschubspannung θ , Schubspannungsgeschwindigkeit v , ... jeweils bei Maximalabfluss). Bei geraden Flussabschnitten treten ΔRe , P_{Anstieg} , θ , v in der Regel am intensivsten auf, bei verzweigten Flussläufen am wenigsten ausgeprägt. Mit einem sog. Vorschwall (Erhöhung des Abflusses auf ein bestimmtes Niveau für eine bestimmte

Zeit – erst danach darf auf Vollast gefahren werden) lässt sich sowohl die kurzfristige Änderung der Turbulenz ΔRe beim Abflussanstieg verringern als auch die Reaktionszeit für die aquatischen Organismen deutlich erhöhen. Für eine Bewertung der Invertebratendrift infolge von künstlichen Pegelschwankungen bedarf es also einer Wertefunktion bzw. Wertematrix, die ΔRe , P_{Anstieg} und θ oder v beinhaltet. Der Effekt eines sog. Vorschwalls wird mit tieferen Werten von ΔRe bereits berücksichtigt. Falls der Indikator Schwall/Sunk-Verhältnis gewählt wird, sollte anstelle des Sunkabflusses der Abflusswert des Vorschwalls $Q_{\text{Vorschwall}}$ verwendet werden. Vor allem für die Abschätzung/Bewertung der Invertebratendrift basierend auf hydraulischen Grössen besteht noch grösserer Forschungsbedarf für Labor und Feldversuche (z.B. mit beweglichen Abflussrinnen wie von Batalla et al., 2007 beschrieben).

Die KWO und die Limnex AG haben im Frühjahr 2008 an der Hasliaare Schwall- und Driftversuche durchgeführt (Limnex 2009). An zwei in der Morphologie sich unterscheidenden Abschnitten wurde die Invertebratendrift gemessen. In beiden Abschnitten wurde die Geschwindigkeit des Abflussanstiegs variiert. Beim ersten Termin wurde der Abfluss von 8 auf 62 m³/s innerhalb von 5 Minuten erhöht, beim zweiten innerhalb von 30 Minuten – dieses Maximalszenario tritt in der Hasliaare in der Regel nur einmal pro Winter auf (Schweizer et al., 2008). Es zeigte sich, dass die Driftdichte (Anzahl der verdrifteten Wirbellosen pro m³) von Invertebraten in der Kiesbankstrecke in Meiringen nur 50% und die Driftmasse (Masse der verdrifteten Invertebraten pro m³) nur 30%, bezogen auf die kanalisierte Strecke in Brienzwiler, betrug, d.h., die Morphologie hat einen starken Einfluss auf die Verdriftung von Invertebraten in der Grössenordnung Faktor 2–3. Im kanalisierten Flussabschnitt konnte mit dem verzögerten Abflussanstieg die Driftdichte auf 30% und die Driftmasse auf 20% reduziert werden, im Abschnitt mit alternierenden Kiesbänken die Driftdichte auf 30% und die Driftmasse auf 50%. Das heisst, die

Verhältnis benetzte Breite bei Schwallabfluss zu Sunkabfluss $B_{\text{Schwall}}/B_{\text{Sunk}}$ (-)	Pegelrückgangsrates $P_{\text{Rück}}$ (cm/min)				
	Zunahme der Pegelrückgangsrates →				
	Zunahme Des Verhältnisses $B_{\text{Schwall}}/B_{\text{Sunk}}$	Klasse 1	Klasse 1	Klasse 1	Klasse 1
		Klasse 1	Klasse 2	Klasse 2	Klasse 2
		Klasse 2	Klasse 2	Klasse 3	Klasse 3
		Klasse 2	Klasse 3	Klasse 4	Klasse 5
		Klasse 3	Klasse 4	Klasse 4	Klasse 5

Bild 3. Schematische Wertematrix zur Beurteilung des gewässerökologischen Defizits «Periodisches Trockenfallen von Teilen der Gewässersohle infolge von Sunk». Beachte: Die hier angegebene Wertematrix ist nur zur Veranschaulichung gedacht. Eine anwendbare Wertematrix muss erst noch von Gewässerökologen und Wasserbauern entwickelt und definiert werden.

Geschwindigkeit des Abflussanstiegs und die Morphologie haben einen etwa gleich grossen Einfluss auf die Verdriftung der Invertebraten in der Hasliaare.

3.4 Kurzzeitige Änderung der Wassertemperatur

Durch das Zurückhalten von Wasser in hochgelegenen Stauseen werden sowohl das Abfluss- als auch das Temperaturregime eines Fliessgewässers verändert. Unterhalb der Wasserrückgabe kann ein grosser Temperaturunterschied zwischen Basisabfluss und turbiniertem Wasser auftreten.

Die kurzzeitige Änderung der Wassertemperatur ist von der gegebenen Flussmorphologie relativ unabhängig. Einzig Hinterwasserbereiche oder Vertiefungen in Kiesbänken, die hydraulisch nicht direkt mit dem Hauptstrom verbunden sind, werden von einer Änderung der Wassertemperatur im Hauptstrom nicht oder nur sehr zögerlich beeinflusst. Generell sind die grössten Änderungen der Wassertemperatur im Sommer zu erwarten, wenn der Basisabfluss eines Gewässers relativ warm ist und bei Schwall mit sehr kaltem Wasser aus hochgelegenen Stauseen vermischt wird.

Da die Wassertemperatur den Stoffwechsel von aquatischen Organismen sehr stark beeinflusst und empfindlichere Arten nur eine begrenzte Temperaturtoleranz aufweisen, kann davon ausgegangen werden, dass häufige und kurzfristige Änderungen der Wassertemperatur einen erheblichen Einfluss auf die Gewässerökologie haben (Caissie, 2006). Dies dürfte sowohl die Artenvielfalt als auch die Abundanz und Biomasse verschiedenster Arten betreffen.

Als beschreibenden Indikator eignet sich hier das Schwall/Sunk-Verhältnis, da dies auch dem Mischungsverhältnis von turbiniertem Wasser und Basisabfluss entspricht. Auch absolute Werte der Änderung der Wassertemperatur könnten in eine Wertefunktion mit einbezogen werden (z.B. absolute Wassertemperaturänderungen oder kritische Wassertemperaturen).

3.5 Kurzzeitige Änderung der Wassertrübung

Kurzzeitige Erhöhungen der Wassertrübung reduzieren die Photosynthese von Wasserpflanzen, verschlechtern die Sichtverhältnisse für Invertebraten und Fische, können die Sauerstoffaufnahme von aquatischen Organismen negativ beeinflussen und das Abschwemmen von

Wasserpflanzen verstärken (durch sog. Abrasionseffekt). Allerdings sei hier aus Gründen der Vollständigkeit erwähnt, dass sich ein bestimmter Teil der Sedimente in den Speicherseen auch absetzt und so im Jahresmittel geringere Schwebstoffkonzentrationen in einer Schwallstrecke auftreten. Die Flussmorphologie spielt bei der kurzzeitigen Änderung der Wassertrübung infolge von Schwall/Sunk eine untergeordnete Rolle (vgl. Ausführungen in 3.4).

Die kurzzeitige Trübungszunahme kann durch das turbinierte Wasser (trübes Wasser aus Stauseen mit Gletscherzufluss und/oder Schneeschmelze) direkt bedingt sein und/oder von einer Aufwirbelung von feinem Sediment infolge Abflusszunahme herrühren. Wird das Verhältnis der Schwebstoffkonzentrationen von Triebwasser und Basisabfluss mit dem Schwall/Sunk-Verhältnis multipliziert, kann die relative Zunahme der Trübung in der Schwallstrecke infolge Zuleitung von trübem Triebwasser bestimmt werden. Die weitere Zunahme der Wassertrübung infolge Aufwirbelung von Sediment bei einer Abflusszunahme kann entweder mit der dimensionslosen Sohlenschubspannung oder mit der Reynoldszahl abgeschätzt werden. Eine mögliche Wertefunktion sollte auf jeden Fall die relative Zunahme der Trübung infolge Zuleitung von trübem Triebwasser berücksichtigen und bei einer genaueren Analyse die Trübungszunahme durch Aufwirbelung noch hinzuaddieren.

Auch absolute Werte könnten in eine Wertefunktion mit einbezogen werden (z.B. kritische Trübstoffkonzentrationen für bestimmte aquatische Organismen), wobei vor allem im Winter während der Laichzeit und der Inkubation von Forellen diese Tiere empfindlich reagieren.

4. Herleitung eines Bewertungskonzepts mit Diskussion

Da alle wesentlichen gewässerökologischen Defizite, die kurzfristig auftreten (Kap. 2.1), sehr gut mit relativ einfachen hydrologisch-hydraulischen Parametern beschrieben werden können (Kap. 3 und *Tabelle 1*) und von einem starken Zusammenhang zwischen kurz- und langfristig auftretenden Defiziten ausgegangen werden kann (Kap. 2.3), drängen sich die kurzfristig auftretenden gewässerökologischen Defizite für eine Bewertung von künstlichen Pegelschwankungen förmlich auf. Da aber je nach Morphologie diese Defizite unterschiedlich intensiv auftreten und relevant sind (vgl. Kapitel 3, *Tabelle 2*), muss auch die Flussform eines schwall-

beeinflussten Gewässers berücksichtigt werden. Diesem Umstand wird sowohl bei der Auswahl der Indikatoren als auch bei den Definitionen der Wertefunktionen (*Bild 2* und *3*) Rechnung getragen.

Die Gesamtbewertung von künstlichen Pegelschwankungen kann nun in zwei Schritten erfolgen:

Im ersten Schritt werden alle gewässerökologischen Defizite, die kurzfristig auftreten, mit den Schwall/Sunk-Indikatoren aus *Tabelle 1* bewertet. Daraus ergibt sich eine gewässerökologisch nachvollziehbare Bewertung, die die auftretenden Defizite direkt beurteilt. Um eine Gesamtbewertung zu bekommen, müssen die einzelnen Defizite anschliessend in einem zweiten Schritt gewichtet werden oder ein anderes Verfahren kann gewählt werden (z.B. das am schlechtesten bewertete Defizit wird stärker gewichtet, o.ä.).

Dieses Bewertungskonzept gibt dann auch direkte Hinweise, welche Defizite auftreten und wie diese am besten behoben werden – z.B. spielt in einem geraden Gerinne die Pegelanstiegsrate (Verdriftung von Invertebraten) eine viel wichtigere Rolle als die Pegelrückgangsraten (Stranden von Fischen wegen fehlender Strukturen unwahrscheinlich). Eine solche Vorgehensweise ist aus gewässerökologischer Sicht viel aussagekräftiger als sich nur auf einen einzigen Indikator abstützen (z.B. nur das Schwall/Sunk-Verhältnis zu reduzieren).

Wird diese Methode in der Praxis angewendet, kann sie den Entscheidungsträgern wichtige Hinweise über die gewässerökologische Situation geben und sehr transparente Lösungen aufzeigen. Bei der anstehenden Änderung des Gewässerschutzgesetzes (Initiative «Lebendiges Wasser» und parlamentarischer Gegenvorschlag) und der damit verbundenen Anpassung der Ausführungsbestimmungen wird es aller Voraussicht nach auch eine neue Regelung für künstliche Pegelschwankungen geben. Wenn das hier beschriebene Bewertungskonzept noch fertig ausgearbeitet wird, kann es als ein sehr nützliches Werkzeug zur Priorisierung von zu sanierenden Schwallstrecken verwendet werden, und es kann die effektivsten Massnahmen zur Verbesserung der Gewässerökologie für die unterschiedlichen Schwallstrecken aufzeigen und optimieren (z.B. Steuerung eines Beruhigungsbeckens).

Das hier beschriebene Konzept ist noch keine fertige Bewertungsmethode, zeigt aber den Weg für eine ökologisch transparente und nachvollziehbare Be-

wertungsmethode auf. Zur Anwendung der Methode fehlen derzeit

- die endgültige Auswahl der vorgeschlagenen Indikatoren,
- die Definitionen der Wertefunktionen
- die Gewichtung der bewerteten gewässerökologischen Defizite und
- die Auswahl und Dauer der zu betrachtenden Periode der Abflussganglinie.

Auch die Auswahl der Untersuchungsperiode spielt bei der Bewertung eine sehr entscheidende Rolle (z.B. Revisionen an Turbinen oder in Zuleitungsstollen, Saison). Da Schwall/Sunk die natürliche Hydrologie während der winterlichen Niedrigwasserperiode relativ gesehen am stärksten verändert und in dieser Zeit die sensibelsten ökologischen Prozesse (Reproduktion der Fische und der Wirbellosen) ablaufen und ausserdem natürlicherweise keine regelmässigen und keine grösseren Hochwasserereignisse in den Alpenflüssen stattfinden, sollte die Untersuchungsperiode im Winter gewählt werden (wie auch von Pfandler et al., 2007 empfohlen). Um eine möglichst repräsentative Zeitspanne zu bestimmen, könnten in einem ersten Schritt alle Wochen zwischen Dezember und Februar betrachtet und für diese jeweils z.B. das mittlere Schwall/Sunk-Verhältnis berechnet werden (anstelle des Schwall/Sunk-Verhältnisses könnte auch der absolute Abflussanstieg oder ein anderer hydrologischer Parameter während der Schwallphase als Kriterium gewählt werden). Für die weiteren Bewertungen könnten dann z.B. nur die Wochen mit dem dritt- und viertgrössten Schwall/Sunk-Verhältnis weiterbetrachtet werden. Die Untersuchungsdauer von zwei Wochen sollte ein guter Kompromiss zwischen Rechenaufwand und Repräsentativität sein.

Tabelle 3 stellt alle benötigten Eingangsgrossen zur Berechnung der vorgeschlagenen Indikatoren zusammen.

5. Ausblick und Empfehlungen

Die Auswahl der vorgeschlagenen Indikatoren hängt von der allgemeinen Datengrundlage, dem gewünschten Detaillierungsgrad (bzw. Aussagekraft) und dem für die Anwender zumutbaren Aufwand ab. Daher wird diese Methode hier bewusst sehr flexibel beschrieben. In einer Arbeitsgruppe aus Experten in den Bereichen Limnologie, Hydraulik/Wasserbau und Hydrologie sowie Entscheidungsträgern vom Bundesamt für Umwelt und von kantonalen Fachstellen kann die hier vorgestellte Methode weiterdiskutiert und konkretisiert werden. Je nach Bedarf kann sie vereinfacht (z.B. Berücksichtigung von

Vorgeschlagener Indikator	Eingangsgrossen zur Berechnung des Indikators	Mögliche Datenquellen	Zur Beschreibung des/der gewässerökologisches/n Defizit(e) relevant
$F(Q_{\text{Schwall}} > Q_{\text{Transportbeginn}})$ (Häufigkeit von Teilbewegungen der Sohle bei Q_{Schwall})	Wassertiefe h Gefälle J Korngrössenverteilung und Mediankorngrösse d_{50} oder Mittlerer jährlicher Hochwasserabfluss	Hydrograph, Längsprofilaufnahmen / Karten Linienproben, Untersuchungen der Gewässersohle Langjähriger Hydrograph	Bewegungen der Sohle bei Q_{Schwall}
	MHQ (wenn $0.6 \cdot \text{MHQ}$ für $Q_{\text{Transportbeginn}}$ verwendet wird vgl. Tabelle 1)		
$P_{\text{Rück}}$ (Pegelrückgangsrage)	Pegelrückgangsrage	Hydrograph	Periodisches Trockenfallen bei Q_{Sunk}
ΔB (Änderung der benetzten Breite)	Änderung der benetzten Breite	Querprofilaufnahme kombiniert mit Pegel-Abfluss-Beziehung (P-Q-Beziehung) oder mit einem hydraulischen Modell	Periodisches Trockenfallen bei Q_{Sunk}
P_{Anstieg} Pegelanstiegsgate	Pegelanstiegsgate	Hydrograph	Verdriftung bei Q_{Schwall}
ΔRe (Änderung der Reynold's Zahl als Mass der Turbulenzänderung)	Wassertiefe h Gefälle J Sinuosität Kinematische Zähigkeit Mittlere Korngrösse, evtl. Korngrössenverteilung	Hydrograph, Längsprofilaufnahmen / Karten Mittlere Wassertemperatur und Tabellen zur Viskosität Linienproben, Untersuchungen der Gewässersohle	Verdriftung bei Q_{Schwall}
θ (Dimensionslose Sohlenschubspannung)	Wassertiefe h Gefälle J Mittlere Korngrösse d_m , evtl. Korngrössenverteilung	Hydrograph, Längsprofilaufnahmen / Karten Linienproben, Untersuchungen der Gewässersohle	Verdriftung bei Q_{Schwall}
$Q_{\text{Schwall}}/Q_{\text{Sunk}}$ (Schwall/Sunk-Verhältnis)	Maximaler Abfluss während Schwallphase Q_{Schwall} und minimaler Abfluss während Sunkphase Q_{Sunk}	Hydrograph	Änderung der Wassertemperatur bei Q_{Schwall}

Tabelle 3. Eingangsgrossen zur Berechnung der vorgeschlagenen Indikatoren (Fortsetzung auf der nächsten Seite).

weniger Indikatoren und Einflussgrössen) oder verfeinert werden, z.B. durch eine Erweiterung um bestimmte Indikatoren. Hier könnten noch Indikatoren zur Beschreibung der Habitatsverteilungen bei niedrigem und hohem Abfluss (dies ist v.a. für das Benthos und für verschiedene Le-

bensstadien von Fischen von Bedeutung) oder zur Beurteilung der Durchgängigkeit für bestimmte Fischarten in die Methode integriert werden.

In dieser Arbeitsgruppe könnten auch die Wertefunktionen definiert und festgelegt werden und bei Bedarf wissen-

Re (Reynold's Zahl)	Siehe ΔRe	Siehe ΔRe	Änderung der Wassertrübung bei $Q_{Schwall}$
$C_{Schwebstoff-Triebwasser} / C_{Schwebstoff-Basisabfluss} \cdot Q_{Schwall} / Q_{Sunk}$ (Zu erwartende Änderung der Trübung)	Schwebstoff- konzentrationen von Triebwasser $C_{Schwebstoff-Triebwasser}$ und vom Basisabfluss $C_{Schwebstoff-Basisabfluss}$ Schwall/Sunkver- hältnis $Q_{Schwall} / Q_{Sunk}$	Schwebstoff- oder Trübbemessungen Hydrograph	Änderung der Wassertrübung bei $Q_{Schwall}$
$Q_{Schwall} / Q_{Vorschwall}$ (Verhältnis Schwall- abfluss zu Abfluss bei sog. Vorschwall)	Maximaler Abfluss während Schwallphase $Q_{Schwall}$ und Abfluss während Vorschwall $Q_{Vorschwall}$	Hydrograph	Verdriftung bei $Q_{Schwall}$

Fortsetzung Tabelle 3.

schaftliche Untersuchungen zur Bestimmung dieser Wertefunktionen formuliert und initiiert werden.

- Die Wertefunktion für die Häufigkeit von Teilbewegungen der Sohle infolge von $Q_{Schwall}$ könnte von Limnologieexperten und Wasserbauern diskutiert und festgelegt werden; zusätzliche Feld- und Laboruntersuchungen sind wahrscheinlich nicht nötig.
- Bei der Festlegung der Wertematrix zum Beurteilen des Trockenfallens von Sohlbereichen infolge von Q_{Sunk} kann sicher auf die einschlägige Literatur und bereits durchgeführte Untersuchungen im Labor und in der Praxis (evtl. mit etwas anderer Zielsetzung, aber mit übertragbaren Erkenntnissen) zurückgegriffen werden. Weitergehende Untersuchungen können aber noch notwendig sein, um die genaue Wertematrix für dieses Defizit festzulegen.
- Bei der Beurteilung der Invertebratendrift dürfte der grösste Handlungsbedarf liegen. Hier könnte ein relativ schlankes Forschungsprojekt, das nach Abhängigkeiten der Invertebratendrift von hydraulischen-hydrologischen Grössen (z.B. Re, ΔRe , v , Vorschwall...) und von der Sohlenbesiedlung der Wirbellosen (Grösse, Körperform, bevorzugte Lebensräume der Invertebraten) sucht, wichtige Erkenntnisse liefern. Dies könnte in Labor- und Feldversuchen untersucht werden. Dieses Forschungsprojekt müsste sowohl von Hydraulikern und als auch von Limnologen begleitet werden.
- Die Wertefunktionen für die kurzfristigen Veränderungen der Wassertemperatur und der Wassertrübung infolge von $Q_{Schwall}$ könnten von Limnologie-

experten diskutiert und festgelegt werden. Zusätzliche Feld- und Laboruntersuchungen sind diesbezüglich wahrscheinlich nicht mehr nötig.

Wie die einzelnen bewerteten gewässerökologischen Defizite gewichtet werden können, kann ebenfalls von der oben beschriebenen Arbeitsgruppe empfohlen oder festgelegt werden oder könnte im Rahmen eines Forschungsprojekts erarbeitet werden.

Neben den kurzfristig auftretenden gewässerökologischen Defiziten spielen auch die langfristigen Defizite aus gewässerökologischer Sicht eine entscheidende Rolle (vgl. Kap. 2.3 und Bild 1). In wie weit die langfristig auftretenden Defizite mit den kurzzeitigen abgeschätzt werden können, könnte auch innerhalb einer Forschungsarbeit geklärt werden. Wie Bild 1 verdeutlicht, kann aber von einer guten bis sehr guten Korrelation ausgegangen werden.

Aktuell befassen sich drei KTI-Forschungsprojekte mit unterschiedlichen Aspekten von Schwall/Sunk:

- Fischökologischer Zustand der Hasliaare: Einfluss von Schwall/Sunk und Morphologie auf den fischökologischen Zustand eines Gewässers mit Fokussierung auf die Hasliaare (Eawag).
- Uferstrukturierungen zur Verbesserung der Ruheplätze für Bachforellen bei Schwall (FH Fribourg, EPFL)
- Optimierung der Kraftwerkssteuerung der KWO mit einem hydraulisch-hydrologischen Modell zur Reduktion der negativen Auswirkungen von Schwall/Sunk (EPFL)

Eine Erweiterung dieser KTI-Forschungsprojekte (Förderagentur des Bundes für Innovation) oder ein ganz eigenständiges Forschungsprojekt zur Klä-

rung der oben gestellten Forschungsfragen wäre denkbar und wird von den Autoren gewünscht.

Wie schon eingangs erwähnt kann weder bei der endgültigen Beurteilung einer Schwallstrecke noch bei der Festlegung von Massnahmen zur Minderung von Schwall/Sunk auf detaillierte Benthos- und Fischuntersuchungen verzichtet werden.

Abschliessend möchten die Autoren darauf hinweisen, dass ökologische Bewertungen fast immer vereinfachte Beschreibungen der in der Natur ablaufenden Prozesse sind – dies gilt selbstredend auch für die hier beschriebene gewässerökologische Bewertungsmethode. Wichtig ist in jedem Fall, dass die abschliessende Bewertung von einem fachlich breit abgestützten Personenkreis durchgeführt wird, welcher die Summe jahrelanger praktischer Erfahrungen in sich vereint.

Literatur

- Baumann P. (2009): Wirksamkeit schwalldämpfender Massnahmen – illustriert an verschiedenen Beispielen. Vortrag an der Fachtagung «Schwall und Sunk – im Spannungsfeld von Energiewirtschaft und Ökologie» (09.03.2009 Solothurn).
- Baumann P. & Klaus I. (2003): Gewässerökologische Auswirkungen des Schwallbetriebs. Mitteilungen zur Fischerei Nr. 75, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern.
- Batalla R.J., Vericat D., Gibbins C.N. (2007): Field experiments to assess the links between bed-material entrainment and invertebrate drift in gravel-bed rivers. Fall 2007 AGU Meeting, San Francisco: Abstract H51H-0874.
- Burri T. (2009): Umgang mit Schwall/Sunk bei der Erneuerung des KW Amsteg. Vortrag an der Fachtagung «Schwall und Sunk – im Spannungsfeld von Energiewirtschaft und Ökologie» (09.03.2009 Solothurn).
- BUWAL (1998): Methoden zur Untersuchung und Beurteilung der Fliessgewässer: Modul-Stufen-Konzept. Mitteilungen zum Gewässerschutz 26. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern, 43 Seiten.
- Caissie D. (2006): The thermal regime of rivers: a review. Freshwater biology 51: 1389–1406.
- Da Silva A.M.A.F. (1991): Alternate bars and related alluvial processes. Master of Science Thesis, Queen's University, Kingston, Ontario, Canada.
- Heggenes J. (2009): Hydropeaking in Norway: Economy and ecology. Vortrag an der Fachtagung «Schwall und Sunk – im Spannungsfeld von Energiewirtschaft und Ökologie» (09.03.2009 Solothurn).
- Hunzinger L.M. (1998): Flussaufweitungen – Morphologie, Geschiebehaushalt und Grund-



sätze zur Bemessung. Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie 159, ETHZ, 206 Seiten.

Limnex AG (2009): Schwall/Sunk in der Hasliaare – Bericht. Limnex AG Zürich.

Meile T., Fette M. und Baumann P. (2005): Synthesebericht Schwall/Sunk. Publikation des Rhone-Thur Projektes.

Meile T., Boillat J.-L. und Schleiss A. (2008): Einfluss von grossmasstäblichen Uferauflagen und Buchten auf Schwallwellen in Flüssen infolge Kraftwerksbetrieb. Wasser Energie Luft 2008(1): 6–12.

Moor J.-F. (2009): Pour une conciliation de l'hydroélectricité et des milieux aquatiques, l'exemple du bassin Adour-Garonne». Vortrag an der Fachtagung «Schwall und Sunk – im

Spannungsfeld von Energiewirtschaft und Ökologie» (09.03.2009 Solothurn).

Peter A. (2009): Fazit aus wissenschaftlicher Sicht und Ausblick auf zukünftige Untersuchungen. Vortrag an der Fachtagung «Schwall und Sunk – im Spannungsfeld von Energiewirtschaft und Ökologie» (09.03.2009 Solothurn).

Pfaundler M., Dübendorfer C., Pfammatter R. und Zysset A. (2007): Methoden zur Untersuchung und Beurteilung der Fliessgewässer. Hydrologie-Abflussregime. Umwelt-Vollzug. Entwurf vom Oktober 2007. Bundesamt für Umwelt, Bern 104 S.

Robinson C.T. & Uehlinger U. (2003): using artificial floods for restoring river integrity. Aquat. Sci. 65: 181–182.

Scheurer T. & Molinari P. (2003): Experimental

floods in the River Spöl, Swiss National Park: Framework, objectives and design. Aquat. Sci. 65: 183–190.

Schweizer S. (2007): Predicting the consequences of river rehabilitation measures on morphology, hydraulics, periphyton and on invertebrates. Diss. ETHZ No. 16838, 122 Seiten.

Schweizer S., Neuner J., Ursin M., Tscholl H. und Meyer M. (2008): Ein intelligent gesteuertes Beruhigungsbecken zur Reduktion von künstlichen Pegelschwankungen in der Hasliaare. Wasser Energie Luft 2008 (3): 209–215.

Schweizer S. & Heuberger N. (2009): Test der aktuellen Version von HYDMOD-F bezüglich Schwall/Sunk. Technischer Bericht der KWO.

Zarn B. (1997): Einfluss der Flussbettbreite auf die Wechselwirkung zwischen Abfluss, Morphologie und Geschiebetransportkapazität. Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie 154, ETHZ, 209 Seiten.

Abkürzungen und Formeln

ΔB = Änderung der benetzten Breite infolge von künstlichen Pegelschwankungen (m)

B_{MQ} = Benetzte Breite bei mittlerem Abfluss (m)

$C_{\text{Schwebstoff-Triebwasser}} / C_{\text{Schwebstoff-Basisabfluss}}$ = Verhältnis der Schwebstoffkonzentration des turbinieren Wassers zur Schwebstoffkonzentration des Basisabflusses (-)

d_{50} = Median Korngrösse (m)

ΔRe = Änderung der Turbulenz auf der Gewässersohle infolge von künstlicher Abflusszunahme (-)

$F(Q_{\text{Schwall}} > Q_{\text{Transportbeginn}})$ = Häufigkeit, wie oft der Schwallabfluss Q_{Schwall} den kritischen Wert für den Transportbeginn auf der Sohle übersteigt (Jahr⁻¹)

MHQ = Mittlerer jährlicher Hochwasserabfluss (m³/s)

MQ = Mittlerer Abfluss (m³/s)

P_{Anstieg} = Pegelanstiegsrate (cm/min)

$P_{\text{Rück}}$ = Pegelrückgangsrage (cm/min)

Q_{Schwall} = Maximalabfluss während der Schwallphase (m³/s)

Q_{Sunk} = Minimalabfluss während der Sunkphase (m³/s)

$Q_{\text{Schwall}}/Q_{\text{Sunk}}$ = Schwall/Sunk-Verhältnis (-)

$Q_{\text{Vorschwall}}$ = Abfluss des Vorschwalls (m³/s) (nähere Erklärungen siehe Kapitel 3.3)

Re = Reynoldszahl des Korns (-) mit $Re = \frac{v \cdot d}{\nu}$ und $\nu = \sqrt{\frac{g \cdot h \cdot J}{S}}$

Schubspannungsgeschwindigkeit (d = Korngrösse (m), ν = kinematische Zähigkeit (m²/s), g = 9.81 m/s², h = mittlere Abflusstiefe (m), J = Gefälle (-), S = Sinusität (-)

θ = dimensionslose Sohlenschubspannung (-) mit $\theta = \frac{h \cdot J}{(s-1)d}$ mit s = Dichteverhältnis von Geschiebe und Wasser (-)

θ_{Cr} = kritische dimensionslose Sohlenschubspannung ab der sich Teile der Sohle zu bewegen beginnen (-). In der Literatur kann θ_{Cr} variieren z.B. 0.033 (Zarn 1997) und 0.039 (Hunzinger).

SP = Stream power (m³/s) mit $SP = MHQ \cdot J$ (MHQ = Mittlerer jährlicher Hochwasserabfluss (m³/s) und J = Gefälle (-))

$T_{\text{Triebwasser}}$ = Wassertemperatur des turbinieren Wassers (°C)

$T_{\text{Basisabfluss}}$ = Wassertemperatur des Basisabflusses (°C)

Verdankungen

Für die sehr aufmerksame Durchsicht des Manuskripts, wertvolle stilistische Verbesserungen und inhaltliche Anmerkungen möchten wir uns ganz herzlich bei Herrn Max Ursin (KWO), Dr. Heinz Peter Tscholl (KWO), Peter Baumann (Limnex AG), Martin Pfaundler (BAFU) und Armin Peter (Eawag) bedanken. Peter Baumann, Martin Pfaundler und Armin Peter gaben uns Autoren immer wieder die Möglichkeit, zu interessanten und sehr tiefgehenden Diskussionen, die die Erstellung und die Verfeinerung dieses Bewertungskonzepts erst ermöglichten.

Anschrift der Verfasser:

Dr. Steffen Schweizer (Gewässerökologe der KWO)

Nick Heuberger (Mitarbeiter in der Abteilung Umwelt und Innovation der KWO)

Kraftwerke Oberhasli AG, Grimselstrasse 19, CH-3862 Innertkirchen
Tel. +41 (0)33 982 2019, sste@kwo.ch

Dr. Johann Neuner

TIWAG-Tiroler Wasserkraft AG
Eduard-Wallnöfer-Platz 2, A-6020 Innsbruck
Tel. +43 (0)50607 21368
johann.neuner@tiwag.at