

Kleinräumige baulich-morphologische Massnahmen in der Schwall-Sunk-Sanierung: Wirksamkeit für das Makrozoobenthos?

Nathalie Friese, Christine Weber, Cristina Rachelly, Volker Weitbrecht, Nico Bätz

Zusammenfassung

In der Schweiz beruht die Schwall-Sunk-Sanierung in Fließgewässern auf baulichen und ggf. betrieblichen Massnahmen zur Dämpfung der Schwall-Sunk-Abflussganglinie. Ergänzend dazu können kleinräumige baulich-morphologische Massnahmen zum Einsatz kommen, wie beispielsweise Totholzstrukturen, Buchten oder Blocksteingruppen. Im vorliegenden Artikel diskutieren wir ihre Wirkung auf das Makrozoobenthos, das aufgrund seiner grossen Artenvielfalt und der komplexen Lebenszyklen oft stark vom Schwall-Sunk-Betrieb betroffen ist. Wir erörtern, inwiefern verschiedene Massnahmentypen die negativen Auswirkungen des Schwall-Sunk-Betriebs kleinräumig reduzieren können, z. B. indem sie die hydraulischen Kräfte verringern, eine beständige Benetzung garantieren oder die natürliche Sedimentdynamik fördern.

(Schweizer et al., 2016, 2021). Baulich-morphologische Massnahmen zur spezifischen Förderung des Makrozoobenthos fehlen dagegen weitgehend. Das Makrozoobenthos umfasst eine grosse Vielfalt an wirbellosen Kleinlebewesen ab ca. 1 mm Körperlänge – von Insekten zu Schnecken und Muscheln, Flohkrebse, Milben, Egel, Plattwürmern. Sie bewegen sich kleinräumig und sind sehr unterschiedlich in ihren Lebensraumsansprüchen, z. B. zur Fortpflanzung oder Nahrungssuche. Rein auf Fische ausgerichtete Schwall-Sunk-Sanierungsmassnahmen fördern nicht zwingend auch das Makrozoobenthos. In der Praxis ergeben sich entsprechend Unsicherheiten hinsichtlich der Funktionsweise und Wirksamkeit von baulich-morphologischen Massnahmen für das Makrozoobenthos und somit auch Herausforderungen bei der Planung (z. B. Zielkonflikte mit Fisch-spezifischen Massnahmen).

1. Massnahmen zur Sanierung von Schwall-Sunk

Im Rahmen der strategischen Planung Sanierung Schwall-Sunk wurden 102 sanierungspflichtige Kraftwerke identifiziert (BAFU, 2015). Diese Kraftwerke führen zu kurzfristigen künstlichen Abflussänderungen (Schwall-Sunk), die die einheimischen Tiere und Pflanzen sowie ihre Lebensräume wesentlich beeinträchtigen (Art. 39a GSchG; Art. 41e GSchV). Um die Kraftwerksinhaber bei der Umsetzung der Sanierungsmassnahmen zu unterstützen, stellt der Bund eine Vollzugshilfe (VZH; Tonolla et al., 2017) und jährlich 50 Mio. CHF für die gesamte Sanierung der Wasserkraft zur Verfügung (d. h. Sanierung Schwall-Sunk, Geschiebe und Fischgängigkeit).

Die Behörden ordnen bauliche Massnahmen zur Sanierung von Schwall-Sunk an (Art. 39a, Abs. 1, GSchG). Dabei liegt der Schwerpunkt auf der Dämpfung der massgebenden hydrologischen Kenngrössen des Schwall-Sunk-Betriebs (d. h. Schwallabfluss, Sunkabfluss, Pegelanstiegs- und Pegelrückgangsrate). Die am häufigsten erwogene bauliche Schwall-Sunk-Sanierungsmassnahme ist die Bereitstellung eines Ausgleichsvolumens in Form von Becken, Stollen oder Kaverne, wie das prominente Fallbeispiel der KWO zeigt (Schweizer et al., 2016, 2021). Auf Antrag des Kraftwerksinhabers können die Behörden jedoch auch

betriebliche Massnahmen verfügen (Art. 39a, Abs. 1, GSchG). Hierfür wird der Turbinenbetrieb des Kraftwerks angepasst. Um die ökologische Wirksamkeit solcher baulichen und/oder betrieblichen Massnahmen zu unterstützen, können ergänzend kleinräumige baulich-morphologische Massnahmen im Fließgewässer zum Einsatz kommen.

Baulich-morphologische Massnahmen werden in der VZH als ergänzende Massnahmen geführt und als «lokale, kleinräumige morphologische Anpassungen im Gerinne selbst («Instream»)» definiert, welche die «ökologischen Auswirkungen von Schwall-Sunk im Gewässer» mindern. In der Schwall-Sunk-Sanierung lassen sich also nur kleinräumige Eingriffe zur lokalen Habitataufwertung realisieren; grossräumige Veränderungen der Gewässermorphologie dagegen müssen im Rahmen der Revitalisierung (gemäss Art. 38a GSchG) umgesetzt und finanziert werden.

Die VZH führt verschiedene baulich-morphologische Massnahmen auf, wie beispielsweise permanent benetzte Seitenarme, Instream River Training Massnahmen, Störsteine oder Buchten (Anhang E in der VZH). Diese Massnahmen zielen vor allem auf die Verbesserung der Habitateigenschaften für Fische ab, so zum Beispiel Fischbuchten nach Ribi et al. (2014) oder auch Fischunterstände, Wurzelstöcke, Belebtsteingruppen und Hakenbunnen

In diesem Artikel diskutieren wir Faktoren, welche die Wirksamkeit von kleinräumigen baulich-morphologischen Massnahmen in der Schwall-Sunk-Sanierung für das Makrozoobenthos beeinflussen. Wir konzentrieren uns auf die aquatischen Insekten und ihre Larven, da sie vergleichsweise gut untersucht sind und mindestens einen Teil ihres komplexen Lebenszyklus im Wasser durchlaufen (Box S. 10; Bild 1). Dadurch spielen aquatische Insekten eine wichtige Rolle in der Vernetzung von Wasser und Land, z. B. im Nahrungsnetz (Baxter et al., 2005, Sitters et al., 2015). In einem ersten Schritt illustrieren wir, wie Schwall-Sunk aquatische Insekten beeinflusst. In einem zweiten Schritt diskutieren wir die spezifischen Eigenschaften kleinräumiger baulich-morphologischer Massnahmen und deren Wirksamkeit zur Reduktion der negativen Auswirkungen des Schwall-Sunk-Betriebs auf die aquatischen Insekten. Und schliesslich gehen wir der Frage nach, wie sich die ökologische Wirksamkeit von baulich-morphologischen Massnahmen erhöhen bzw. dauerhaft gewährleisten lässt.



a) Ein Steinfliegen-Weibchen (*Baetis* sp.) klettert zur Eiablage kopfüber entlang von Steinen, die aus dem Wasser ragen, ins Wasser, wo es die Eier an der Steinoberfläche anbringt.



b) Eier (Gelege in Gallerthüllen) von Limnephilidae in Ufernähe unter Steinen, wo sie bei Sunk leicht trockenfallen.



c) Köcherlose Köcherfliegenlarve (*Hydropsyche incognita*), die Fangnetze zwischen Steinen aufspannt; sie kommt nur in Fließgeschwindigkeiten von ca. max. 0,5 m/s vor.



d) Köcherfliegenlarve (*Halesus radiatus*), die in Ufernähe lebt und in Schwall-Sunk-Strecken kaum vorkommen kann, weil sie bei Schwall weggespült wird.



e) Steinfliegenlarve (*Amphinemura sulcicollis*), die an Totholz, Wasserpflanzen oder Moos lebt.



f) Steinfliege (*Perla grandis*) bei der Emergenz nachts in Ufernähe, knapp über der Wasseroberfläche.

Bild 1: Entwicklungsstadien aquatischer Insekten. Photos: V. Lubini.

Larve, Puppe, Imago – Entwicklungsstadien aquatischer Insekten

Aquatische Insekten lassen sich mit wenigen Ausnahmen in zwei Gruppen unterteilen, je nachdem ob sie eine vollständige Entwicklung inkl. Verpuppung durchlaufen (holometabole Insekten) oder eine unvollständige (=hemimetabole Insekten; *Thorp und Rogers, 2015; siehe auch Bild 1*). Nach der Eiablage durch die Adulttiere schlüpfen die Larven. Damit sie wachsen können, häuten sich die Larven mehrfach. Bei der vollständigen Entwicklung verpuppen sich die Larven danach, bevor sie ins adulte, geflügelte Stadium (Imago) übergehen; bei der unvollständigen Entwicklung kommt das Puppen-Stadium nicht vor. Der Übergang vom aquatischen (Larve/Puppe) zum terrestrischen Stadium (Imago) wird als Emergenz bezeichnet. Sind die abiotischen Umstände temporär unvorteilhaft, können einige Arten im Ei- oder Puppenstadium überdauern. Je nach Art und Habitat kann der Lebenszyklus einmal oder auch mehrfach pro Jahr durchlaufen werden. In seltenen Fällen erstreckt sich ein ganzer Zyklus auch über zwei oder mehr Jahre.

Die hier zusammengefassten Angaben stützen sich auf eine Synthese der Literatur sowie auf Interviews mit zehn Expert:innen mit technischem und/oder biologischem Hintergrund aus Praxis und Forschung.

2. Einfluss von Schwall-Sunk auf aquatische Insekten

In ihrer Entwicklung durchlaufen aquatische Insekten einen komplexen Lebenszyklus vom Ei über Larve sowie z. T. Puppe zum geschlechtsreifen Adulttier (*Box S. 10, Bild 2*). Während Ei- und Larven-Stadium im Wasser stattfinden, ist der Übergang zum Adulttier meistens mit einem Wechsel in den terrestrischen Lebensraum verbunden (*Emergenz; Thorp und Rogers, 2015*). Eine erhöhte Sterblichkeit in einem Entwicklungsstadium wirkt sich mit grosser Wahrscheinlichkeit auf die Individuenzahl in den darauffolgenden Entwicklungsstadien aus (*Encalada und Peckarsky, 2012*). Die verschiedenen Entwicklungsstadien aquatischer Insekten laufen in vielen unterschiedlichen Habitaten ab und können somit auf vielfältige Weise vom Schwall-Sunk-Betrieb beeinflusst werden (*Bild 2; Tabelle 1*). Auswirkungen auf das Larvenstadium sind dabei am besten dokumentiert. Dagegen gibt es kaum Wissen zum Schwall-Sunk-Einfluss auf Eiablage, Puppen-Stadium oder Emergenz. Es gibt aber Hinweise, dass das Ei-Stadium ein wesentlicher limitierender

Faktor oder Flaschenhals für die Biomasse und Vielfalt aquatischer Insekten sein kann (*Kennedy et al., 2016, Lancaster et al., 2010, Miller et al., 2020*). In der Schweiz ist ein bedeutender Teil der aquatischen Insekten vom Schwall-Sunk-Betrieb betroffen (*siehe Box S. 16 für Details*).

Der Einfluss des Schwall-Sunk-Betriebs auf die Entwicklungsstadien aquatischer Insekten lässt sich in zwei direkte und drei indirekte Haupteinflussfaktoren unterteilen (*Tabelle 1*). Direkte Haupteinflussfaktoren sind unausweichlich mit dem Schwall-Sunk-Betrieb verbunden, d. h. sie treten in jeder Schwall-Sunk-Strecke in kleinerem oder grösserem Masse auf. Indirekte Haupteinflussfaktoren sind von den lokalen Bedingungen (z. B. Kanalisierung) sowie grossräumigen Prozessen (z. B. Feinsedimentaufkommen) abhängig und können durch den Schwall-Sunk-Betrieb allenfalls verstärkt werden; sie treten nicht in jeder Schwall-Sunk-Strecke auf.

Aquatische Insekten werden direkt beeinflusst durch (*siehe auch Bild 2*):

- (i) die erhöhten hydraulischen Kräfte (z. B. Fließgeschwindigkeit, Sohlschubspannung) bei Schwall bzw. beim Übergang vom Sunk- zum Schwallabfluss, sowie
- (ii) die unbeständige Benetzung von Flachwasserzonen (Wasserwechselzone) während Sunk bzw. beim Übergang vom Schwall- zum Sunkabfluss.

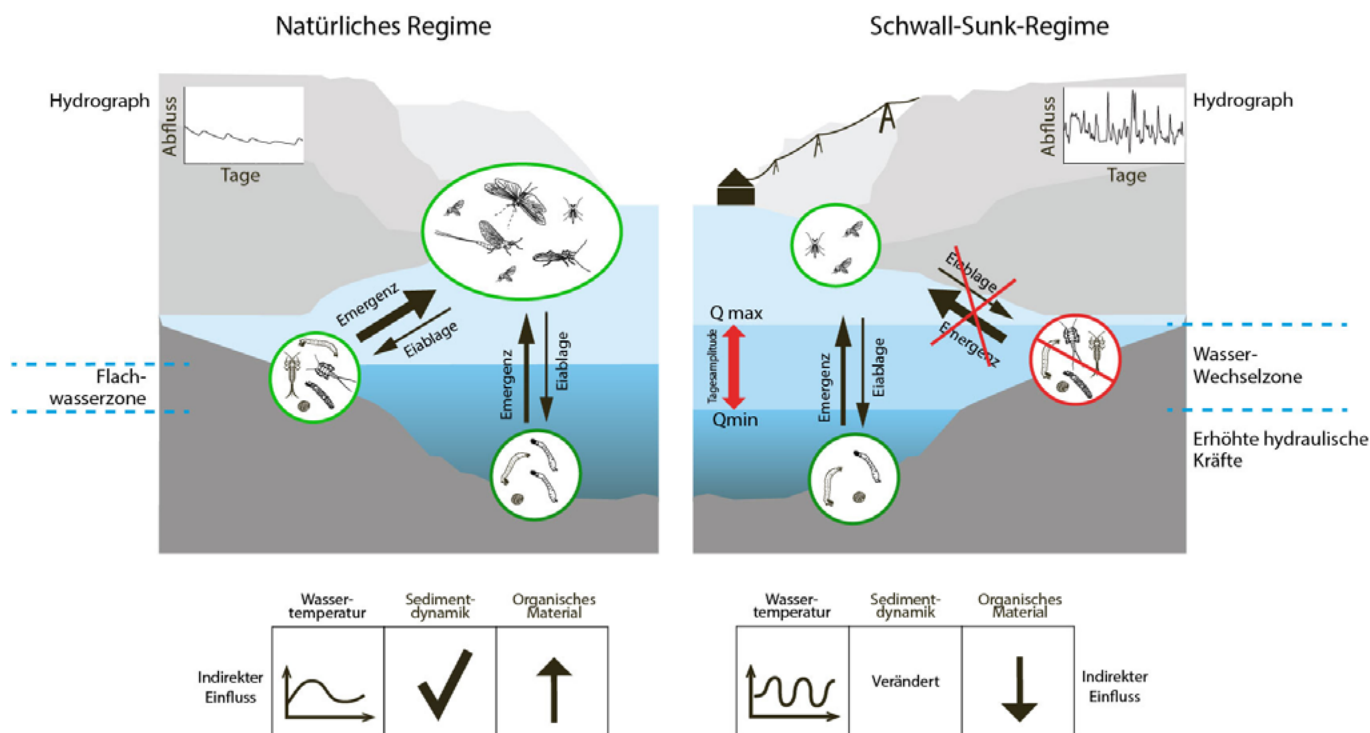


Bild 2: Vergleich der Einflussfaktoren, welche auf die Entwicklungsstadien aquatischer Insekten in einem Flussabschnitt mit natürlicher Hydrologie (links) und mit Schwall-Sunk-Betrieb (rechts) einwirken. Unten links und rechts ist beispielhaft der jeweilige Abflussverlauf dargestellt. Modifiziert von Kennedy et al. (2016).

Die indirekten Haupteinflussfaktoren umfassen (siehe auch Bild 2):

- (iii) eine veränderte Sedimentdynamik (z. B. Geschiebe-Mobilisierung, Substratsortierung, Kolmation),
- (iv) einen verringerten Rückhalt von organischem Material (z. B. abgelagertes Laub, Algen), sowie
- (v) abrupte Temperaturerhöhungen oder -abnahmen.

Daneben sind viele weitere indirekte Einflüsse des Schwall-Sunk-Betriebs dokumentiert, so z. B. auf den Gasgehalt (Pulg et al., 2016) oder auf die Geräuschkulisse unter Wasser (Lumsdon et al., 2017); die genauen ökologischen Auswirkungen sind aber noch wenig untersucht.

Wie stark die fünf Haupteinflussfaktoren die aquatischen Insekten beeinflussen, ist massgeblich von der Gewässermorphologie abhängig (Greimel et al., 2018).

Direkte Einflussfaktoren

Durch die abrupte Erhöhung der hydraulischen Kräfte können aquatische Insektenlarven, aber auch Puppen, passiv verdriften: Wenn sich Individuen nicht am Substrat festhalten oder rechtzeitig im Kieslückensystem verstecken können, werden sie von der Schwallströmung mitgerissen (z. B. Bild 1c–d; Waters, 1972, Gibbins et al., 2007, 2010). Gerade in kanalisierten Schwall-Sunk-Strecken gibt es wenig natürliche oder künstliche morphologische

Strukturen, wie z. B. Buchten, die zu einer Reduktion oder Pufferung der erhöhten hydraulischen Kräfte bei Schwall führen können (Bruder et al., 2016). Die Kombination aus monotoner Morphologie und Schwall-Sunk-Betrieb kann somit zu einem generellen Anstieg von Arten führen, die ökologisch an stärkere Strömung angepasst sind (rheophile, resp. rheobionte Arten). Gleichzeitig nimmt der Anteil jener Arten ab, die in schwacher Strömung leben (Cushman 1985; Schmutz et al., 2013; Schülting et al., 2016). Inwieweit die abrupten hydraulischen Veränderungen die Emergenz oder die Adulttiere bei der Eiablage beeinträchtigen, ist bisher nicht ausreichend untersucht. Aufgrund des Eiablageverhaltens ist anzunehmen, dass auch Eier resp. Eiballen vermehrt verdriften werden.

Die künstlichen Abflussschwankungen führen zur Entstehung einer Wasserwechselzone, deren Ausmass von der Schwall-Sunk-Amplitude sowie von der Querschnittsform (inkl. Ufer- bzw. Bankstruktur) bestimmt wird. Je breiter und flacher das Ufer oder die Kiesbank und je grösser die Schwall-Sunk-Amplitude, desto grösser wird die Wasserwechselzone. Dort können nicht nur Fische, sondern auch aquatische Insekten stranden bzw. deren Habitate trockenfallen (Tanno et al., 2021). Viele aquatische Insekten kleben ihre Eier an Steine knapp unter der Wasserlinie, meist in Flachwasserzonen (Kennedy et al., 2016; Statzner und Beche, 2010). Gerade

langanhaltende Schwall-Phasen können dazu führen, dass aquatische Insekten die Wasserwechselzone als Habitat für die Eiablage nutzen (z. B. Bild 1a-b; Kennedy et al., 2016). Das Trockenfallen bei Sunk kann schon ab einer Dauer von einer Stunde zu einer um über 80 Prozent erhöhten Sterblichkeit der Eier führen und somit die Anzahl der daraus resultierenden Larven reduzieren (Kennedy et al., 2016; Miller et al., 2020). Beobachtungen zeigen, dass schlüpfbereite Larven, die sich in der Regel an der Wasserlinie aufhalten, vermehrt stranden und ihre Entwicklung nicht abschliessen können (z. B. Bild 1f; V. Lubini, pers. Mitteilung). Da Puppen nur eingeschränkt oder überhaupt nicht mobil sind, ist ähnlich wie beim Ei-Stadium auch hier ein negativer Einfluss durch das Trockenfallen zu erwarten. Manche Arten aquatischer Insekten sind in der Lage, ungünstige Habitatbedingungen im Ei- oder auch Puppenstadium zu überdauern (Thorpe und Rogers, 2015). Eier können zum Beispiel durch eine gelatinöse Schicht geschützt sein, wodurch die Sterblichkeit durch Austrocknung stark verringert wird (Miller et al., 2020).

Indirekte Einflussfaktoren

Ein hoher Anteil an Feinsedimenten im Fließgewässer, kombiniert mit fehlenden Hochwassern aufgrund der Speichernutzung, kann zur dauerhaften Verstopfung des Kieslückensystems führen (Kolmation; Baumann und Klaus, 2003; Schweizer et

	Entwicklungsstadien	Ei	Larve	Puppe (nur bei vollständiger Entwicklung; Box S. 10)	Emergenz	Imago (inkl. Emergenz und Eiablage)
Haupteinflussfaktoren	Erhöhte Hydraulische Kräfte		Erhöhte Abdrift, insbesondere kurz nach Einsetzen des Schwalls (<i>Bruno et al., 2016</i>)* Grosse Larven mit Köcher werden weniger rasch verdriftet; netzbauende Arten verlieren ihr Habitat (<i>V. Lubini, pers. Mitteilung</i>)	Verdriftung findet statt (z.B. <i>Bruno et al., 2010</i>)*; Puppenstadium oft in Publikationen nicht spezifisch erwähnt		Abdrift eierlegender Weibchen bei Schwall (<i>V. Lubini; pers. Mitteilung</i>) Verdriftung von schlupfbereiten Larven, resp. Nymphen, die sich an der Wasserlinie aufhalten (<i>V. Lubini, pers. Mitteilung</i>)
	Unbeständige Benetzung	Erhöhte Sterblichkeit bei Trockenfallen (<i>Miller et al., 2020</i>)*	Stranden in der Wasserwechselzone (<i>Tanno, et al. 2021</i>)*	Trockenfallen der ufernahen Puppen (<i>V. Lubini, pers. Mitteilung</i>)		Probleme bei der visuellen Suche nach einem Eiablageort, Risiko, dass weniger Eier abgelegt werden (<i>V. Lubini, pers. Mitteilung</i>)
	Veränderte Sedimentdynamik	Erhöhte Sterblichkeit aufgrund Feinsedimenttransport und -ablagerung (<i>Everall et al., 2018</i>)	Nach Verschüttung erhöhter Stress und Energieaufwand für Befreiung (<i>Dobson et al., 2000</i>)			Fehlen geeigneter Korngrößen zur Eiablage, verstärkt durch Kolmation, senkt den Fortpflanzungserfolg (<i>V. Lubini, pers. Mitteilung</i>)
	Verringerter Rückhalt von organischem Material		Verringerung Biomasse und Qualität des Algenaufwuchses (= Nahrungsquelle), (<i>Cashman et al., 2017</i>)* Fehlen von Baumaterial für Köcher (<i>V. Lubini, pers. Mitteilung</i>)			
	Erhöhte Temperaturschwankungen	Verlängerung Entwicklungszeit bei tiefen Temperaturen. Schlupferfolg temperaturabhängig (<i>Elliott, 1972</i>)	Variable Reaktionen auf Schwall-Sunk in Kombination mit Thermopeaking, z. B. reduzierte Abdrift bei kaltem Thermopeaking (<i>Schülting et al., 2016</i>)*, keine Störung der Larvalentwicklung bei Wassertemperaturschwankungen (<i>Frutiger 2004</i>)*	Zu erwarten ist eine ähnliche Auswirkung wie bei Larven. Die Entwicklungszeit wird ebenfalls durch die Temperatur gesteuert (<i>V. Lubini; pers. Mitteilung</i>)		Verfrühte Emergenz bei erhöhten Wassertemperaturen (<i>Hogg und Williams, 1996</i>)

Tabelle 1: Wirkung der Haupteinflussfaktoren des Schwall-Sunk-Betriebs auf aquatische Insekten: Diese Tabelle zeigt anhand von Beispielen auf, wie sich die fünf Haupteinflussfaktoren (Abschnitt 3) auf die unterschiedlichen Entwicklungsstadien aquatischer Insekten auswirken können; sie erhebt nicht den Anspruch auf Vollständigkeit. Der Farbcode gibt an, welche Auswirkungen bereits gut (grün) oder mässig (gelb) untersucht sind und wo noch deutliche Wissenslücken bestehen (rot). Studien, die sich explizit auf Schwall-Sunk beziehen, sind mit einem Sternchen (*) markiert.

al., 2009). Ohne eine gelegentliche Mobilisierung der Sohle verringert die Kolmation die Verfügbarkeit, Erreichbarkeit und Qualität wertvoller Habitats im Kieslückensystem für Larven vieler Arten (*Bo et al., 2007*). Schwall-Sunk-Betrieb kann zudem zu einem selektiven Auswaschen gewisser Korngrößen (z. B. Substratsortierung, Vergrößerung) führen, was die Verfügbarkeit bzw. die Qualität von Kieshabitats einschränkt (*Vericat et al., 2020*). Welche Auswirkung die durch den Schwall-Sunk-Betrieb veränderte Sedimentdynamik auf das Puppenstadium oder auf Adulttiere hat, ist nicht hinreichend geklärt (*Batalla et al., 2021*).

Die allgemeine Verfügbarkeit von organischem Material wie Blättern, Nadeln oder Algenbewuchs wird in Schwall-Sunk-Strecken durch das häufige Auswaschen und Abreiben reduziert (*Mochizuki et al., 2006*), dies insbesondere bei beeinträchtigter Morphologie, z. B. aufgrund von Kanalisierung. Zahlreiche Auswirkungen auf die aquatischen Insekten sind die Folge, da viele Arten vom organischen Material abhängig sind. So nagen einige an Rinden oder grasen Algen ab, andere verspeisen Blattreste (z. B. Bild 1e). Daneben wird or-

ganisches Material auch als Habitat genutzt, z. B. für die Fortpflanzung oder den Schutz vor Fressfeinden (*Hoffmann und Resh, 2003; Thorp und Rogers, 2015*). Weicht die Temperatur des turbinierten Wassers von der Wassertemperatur ab, so spricht man von Thermopeaking (*Zolezzi et al., 2011*). Je nach Saison kann es zu kaltem Thermopeaking (bei einer Temperaturabnahme) oder warmen Thermopeaking (bei einer Erhöhung) kommen. Die Kombination von Schwall-Sunk-Betrieb und Thermopeaking kann, je nach Temperatur und Artenzusammensetzung, zu erhöhter oder verringerter Verdriftung von Larven führen und den Entwicklungsprozess der Eier verlangsamen oder beschleunigen (*Bruno et al., 2013; Elliott 1972; Schülting et al., 2016*). Auch der Entwicklungsprozess von Puppen kann durch die Wassertemperatur beeinflusst werden (*Hogg und Williams, 1996*).

3. Eigenschaften baulich-morphologischer Massnahmen mit Fokus auf aquatische Insekten

Kleinräumige baulich-morphologische Massnahmen sind für aquatische Insekten und

deren Entwicklungsstadien besonders wirksam, wenn sie die zwei folgenden generellen Eigenschaften erfüllen:

1. Reduktion resp. Pufferung der durch Schwall-Sunk-Betrieb erhöhten hydraulischen Kräfte und ihrer Schwankungen. Damit stabilisieren sich lokal die Habitateigenschaften, und die Verdriftung wird reduziert.
2. Sicherstellung der beständigen Benetzung wertvoller Habitats in ökologisch relevanten Zeitfenstern bzw. Pufferung wesentlicher Schwankungen in der Benetzung. Dadurch wird ermöglicht, dass insbesondere immobile Entwicklungsstadien (Eier und Puppen) bei Sunk nicht trockenfallen und die Emergenz stattfinden kann.

Zudem erhöhen folgende Eigenschaften die Wirksamkeit von baulich-morphologischen Massnahmen, insbesondere, wenn im Sanierungsprojekt diesbezüglich spezifische Defizite erkannt wurden:

3. Förderung der natürlichen Sedimentdynamik, um lokal eine dauerhafte innere Kolmation zu verhindern und eine Substratmobilisierung bzw.

-sortierung zu ermöglichen. Damit bleibt der Zugang zum Kieslückensystem als Habitat und Rückzugsort erhalten und die Habitatvielfalt wird erhöht.

4. Erhöhung des Rückhalts von organischem Material, welches als hochwertige Nahrungsquelle und als Habitat für aquatische Insekten dienen kann.
5. Pufferung von Temperaturschwankungen, damit negative Auswirkungen auf die Entwicklungsstadien und die durch Temperatur ausgelöste Drift verhindert werden.

Der lokale Pufferungseffekt (Punkte 1, 2, 5) ist stark von der hydraulischen Anbindung der Massnahme an den Schwall-Sunk-Hauptstrom abhängig (Jackson et al., 2012): Die Wasseraustauschrate zwischen dem durch die Massnahmen geschaffenen Habitat und dem Hauptstrom kontrolliert, wie stark die durch den Schwall-Sunk-Betrieb verursachten Schwankungen abgeschwächt werden können. In einem Altarm mit grossem Wasservolumen und kleiner Austauschfläche zum Hauptgerinne dauert z. B. eine schwallbedingte Temperaturänderung deutlich länger und erreicht evtl. einen geringeren Maximalwert als in einer offenen Uferbucht.

Zu betonen ist auch, dass die Trübungsproblematik und eine damit einhergehende verstärkte innere Kolmation der Sohle nur bedingt durch kleinräumige baulich-morphologische Massnahmen verringert werden kann, da die Kolmation und kontinuierliche Resuspension von Feinsedimenten primär durch den Feinsedimentgehalt des Wassers und das Auftreten grösserer Abflussspitzen abhängig ist (Wharton et al., 2017). In kanalisierten Gewässerabschnitten kann eine zusätzliche Strukturierung unter gewissen Umständen sogar zu einer Zunahme der Sedimentsortierung mit verstärkter Ablagerung von Feinsediment im strömungsberuhigten Bereich führen (Schweizer et al., 2016; Sindelar und Mende, 2009). Die Förderung einer natürlichen Sedimentdynamik (z. B. durch natürliche oder künstliche Hochwasser), welche eine gelegentliche (1–3 Mal pro Jahr) Mobilisierung der Sohle bzw. eine natürliche Substratsortierung verursacht, kann einer dauerhaften Kolmation entgegenwirken (Dekolmation).

Sammlung potenzieller baulich-morphologischer Massnahmen

Im folgenden Abschnitt wird exemplarisch gezeigt, wie sich verschiedene Typen baulich-morphologischer Massnahmen auf die

für aquatische Insekten relevanten Schwall-Sunk-Einflussfaktoren auswirken. Da bis jetzt Praxisbeispiele für baulich-morphologische Massnahmen, die aquatische Insekten berücksichtigen, weitgehend fehlen, präsentiert *Tabelle 2* eine Auswahl potentieller baulich-morphologischer Massnahmen und deren mögliche Wirkung. Die Liste erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit und die präsentierten Effekte sind oft fall-spezifisch. In der Annahme, dass die Auswirkungen der hier genannten baulich-morphologischen Massnahmen auf den Wasserspiegel meist gering sind, wird ein möglicher Zielkonflikt im Hinblick auf den Hochwasserschutz in diesem Artikel nicht weiter behandelt.

Totholzstrukturen vermindern die Fließgeschwindigkeit in ihrer Rückströmzone und im Innern der Strukturen (Schalko et al., 2021) und wirken so als Fänger für angeschwemmtes organisches Material (Widmer et al., 2019). Auch bieten sie Oberfläche, auf der vielfältige Biofilme aus Algen, Pilzen und Mikroorganismen wachsen können (Allan und Castillo, 2007). Biofilme werden von einigen aquatischen Insekten als Nahrungsquelle abgeweidet (Thorp und Rogers, 2015). In Schwall-Sunk-Strecken ist das Wachstum der Biofilme aufgrund der oft hohen Feinsedimentfracht allerdings oft reduziert (z. B. Abrieb, reduzierter Lichteintrag für Photosynthese). Das Holz bildet einen wertvollen Lebensraum für xylobionte (=holzbewohnende) Arten oder solche, die Fangnetze zur Erbeutung von Nahrung bilden. Ausserdem wird die Rinde von Laubbäumen für die Nahrungssuche abgenagt. Im Allgemeinen können Nadelbäume wegen ihres geringeren Nährstoffgehalts und höheren Anteils an sekundären Pflanzenstoffen schlechter durch das Makrozoobenthos verwertet werden als Laubbäume (Sedell et al., 1975; Hisabae et al., 2011). Idealerweise orientiert sich die Wahl des Holzes vor allem an den natürlicherweise in der Region zu erwartenden Baumarten. Gerade bei Totholzstrukturen braucht es eine gründliche vorausgehende Planung der Platzierung, um die Hochwassersicherheit garantieren und eine langfristige Funktionalität gewährleisten zu können (Schweizer et al., 2016; Widmer et al., 2019; Mende, 2018; Neuhaus und Mende, 2021). Bei hohem Feinsedimentgehalt besteht je nach Positionierung das Risiko einer raschen Versandung bzw. der Kolmation der Totholzstrukturen, womit wertvolles Habitat für aquatische Insekten verloren geht.

Steinstrukturen, wie Belebteingruppen oder auch Steinbuhnen (z. B. Mikrobuhnen, Hakenbuhnen etc.) können die Fließge-



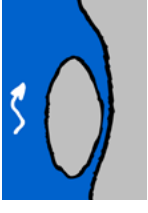



schwindigkeit verringern, aber vor allem diversifizieren (Werdenberg et al., 2014) und somit lokal die Diversität an potentiellen Habitaten für aquatische Insekten erhöhen. Je nach Positionierung in der Hauptströmung (inklinant/deklinant) und Höhenlage (überströmt/umströmt) führen sie zu unterschiedlichen Anordnungen von Kolken und Auflandezonen sowie erhöhter Substratsortierung (Mende, 2013). Gleichzeitig schaffen sie auch potentielle Strukturen für die Eiablage (Encalada und Peckarsky, 2012) beziehungsweise wertvolle strömungsberuhigte Bereiche für die Larven. Zu berücksichtigen ist, dass bei hohem Feinsedimentgehalt je nach Positionierung eine rasche Versandung bzw. Kolmation solcher Strukturen möglich ist und sie somit als Habitat für aquatische Insekten weniger geeignet sind. Regelmässig trockenfallende Teile der Strukturen, in der Regel Blocksteine, können auch kaum besiedelt werden.

Buchtartige Strukturen schwächen die bei Schwall entstehenden hydraulischen Kräfte ab und können damit ein geschütztes Habitat für aquatische Insekten bieten (Hauer et al., 2017; Meile et al., 2008; Ribi et al., 2014). Ein potenzielles Problem bei Buchtstrukturen kann die Vergrösserung der Wasserwechselzone durch ein flaches Ufer darstellen, was das Risiko der Strandung erhöht (Vanzo et al., 2016). Auch besteht das Risiko, dass solche Strukturen bei hohem Feinsedimentgehalt versanden bzw. kolmatieren, was wiederum zu einer signifikanten Abnahme der Habitatdiversität aquatischer Insekten führt. Bilden sich Einbuchtungen natürlicherweise, z. B. unterhalb einer Kiesbank, so wird eine langfristige Versandung durch die gelegentliche Mobilisierung des Geschiebes bei Hochwasserereignissen verhindert (Hauer et al., 2017). Die funktionelle Langlebigkeit solcher Strukturen ist somit massgeblich vom Hochwasser- und Sedimentregime abhängig.

Eine weitere Möglichkeit, um die vom Schwall-Sunk-Betrieb verursachten Abflussschwankungen zu dämpfen, ist die Wiederanbindung von alten, abgekoppelten Flussstrukturen. Die Anbindung von Seitenarmen ermöglicht eine hohe Habitatdiversität mit geringer Sohlenschubspannung, was zu einer verminderten Verdriftung aquatischer Insekten führen kann (Vanzo et al., 2016). Je nach Anbindung der Flussstruktur ist jedoch ein Trockenfallen bei Sunk möglich. Naturnahe Zuflüsse können einerseits für Sedimentnachschiebung sorgen und gleichzeitig die Abflussschwankungen reduzieren (Vericat et al., 2020) so-



Wirkung auf die Haupteinflussfaktoren des Schwall-Sunk-Betriebs auf aquatische Insekten (Tab. 1)

Massnahmen Typ	Verringerung der hydraulischen Kräfte	Beständige Benetzung	Förderung der natürlichen Sedimentdynamik:		Rückhalt von organischem Material	Verringerung der Temperaturschwankungen	Beispiele/ Referenzen
			Gelegentliche Substratmobilisierung/ Dekolmation	Verstärkte Substratsortierung			
Totholzstrukturen 	Verringerung in der Rückströmzone; insgesamt Erhöhung der Variabilität; evtl. Erhöhung im freien Fließquerschnitt bzw. am gegenüberliegenden Ufer	Keine Auswirkung*	Lokale Dekolmation bei Hochwasser; evtl. lokal erhöhter Transport im freien Fließquerschnitt bzw. am gegenüberliegenden Ufer	Lokal erhöhte Sortiereffekte in Rückströmzone; evtl. Feinsedimentablagerung	Erhöhung des Rückhalts von grobem organischem Material (z.B. Blätter)	Keine Auswirkung	<i>Schweizer et al., 2016</i> <i>Mende 2018, 2021</i> <i>Widmer et al., 2019</i>
Verschiedene Buhnentypen 	Verringerung in den Buhnentypen; insgesamt Erhöhung der Variabilität; evtl. Erhöhung im freien Fließquerschnitt	Je nach Buhnentypen und Verhältnis zum mittleren Schwall-Sunk-Wasserspiegel evtl. verstärktes Trockenfallen im Buhnentyp*	Lokale Dekolmation bei Hochwasser; evtl. lokal erhöhter Transport im freien Fließquerschnitt möglich	Erhöhte Sortiereffekte; evtl. Feinsedimentablagerungen im Buhnentyp	Kaum Auswirkung; evtl. Rückhalt von Blättern und Totholz im Buhnentyp	Je nach Volumen des Buhnentyps, dem Verhältnis zum mittleren Schwall-Sunk-Wasserspiegel, evtl. Verringerung der Schwankungen und Abmilderung der Gradienten	<i>Werdenberg et al., 2014</i> <i>Li et al., 2019</i>
Kiesbank/Schüttung 	Verringerung in der Rückströmzone; insgesamt Erhöhung der Variabilität; evtl. Erhöhung im freien Fließquerschnitt	Je nach Ausführung, Böschungsneigung und Höhenlage im Bezug zum mittleren Schwall-Sunk-Wasserspiegel, evtl. Trockenfallen	evtl. verstärkte Seitenerosion und Geschiebefähigkeit (bei unverbauten Ufern)	Keine Auswirkung (Veränderung der Zusammensetzung des Sohlsubstrats möglich in Abhängigkeit der eingebrachten Korngrößen)	Kaum Auswirkung; evtl. Rückhalt von Blättern und Totholz	Keine Auswirkung	<i>Hauer et al., 2017</i> <i>Döring et al., 2018</i> <i>Bunte 2004</i>
Belebsteingruppe/Blocksteingruppe 	Verringerung in der Rückströmzone; insgesamt Erhöhung der Variabilität	Keine Auswirkung*	Keine Auswirkung	Lokal erhöhte Sortiereffekte in Rückströmzone; evtl. Feinsedimentablagerung	Kaum Auswirkung; evtl. Rückhalt von Blättern und Totholz	Keine Auswirkung	<i>Schweizer et al., 2016</i> <i>Li et al., 2019</i>
Buchten 	Verringerung in den Buchten, kaum Beeinflussung im freien Fließquerschnitt	Je nach Ausführung und Verhältnis zum mittleren Schwall-Sunk-Wasserspiegel verstärktes Trockenfallen durch Entstehung von Flachufern möglich	Keine Auswirkung	Lokal erhöhte Sortiereffekte in Rückströmzone; evtl. Feinsedimentablagerung	Kaum Auswirkung; evtl. Rückhalt von Blättern	Je nach Grösse und Anbindung/ Entkopplung an die Hauptströmung, evtl. Dämpfung der Schwankungen	<i>Ribi et al., 2014</i>
Seitenarm/Blinde Mündung 	Massive Verringerung durch starke Strömungsberuhigung (stehendes Gewässer)	Je nach Verhältnis zum mittleren Schwall-Sunk-Wasserspiegel evtl. Trockenfallen	Keine Auswirkung	Lokal erhöhte Sortiereffekte in Rückströmzone; evtl. Feinsedimentablagerung	Erhöhung des Rückhalts	Je nach Grösse und Anbindung/ Entkopplung an die Hauptströmung, evtl. Dämpfung der Schwankungen	<i>Sumi et al., 2009</i>

Naturnaher Mündungsbereich eines Zuflusses 	Erhöhung der Variabilität	Je nach Verhältnis der Sohlenlage zum mittleren Schwall-Sunk-Wasserspiegel, evtl. Trockenfallen	Keine Auswirkung	evtl. erhöhte Sortiereffekte	Kaum Auswirkung; evtl. Rückhalt von Blättern und Totholz	Je nach Anbindung/ Entkopplung an die Hauptströmung, evtl. Dämpfung der Schwankungen	<i>Milner et al., 2019</i> <i>Vericat et al., 2020</i>
Unterspülte Ufer z. B. mit Wurzelwerk 	Erhöhung der Variabilität; kleinräumige strömungsberuhigte Zonen im Wurzelwerk	Keine Auswirkung*	Keine Auswirkung	Keine Auswirkung	Erhöhung des Rückhalts von grobem organischem Material (z. B. Blätter)	Keine Auswirkung	<i>Mende 2018</i> <i>Widmer et al., 2019</i>
Pool-Riffle-Sequenz 	Erhöhung der Variabilität in Längsrichtung	Kaum Auswirkung	evtl. lokale Dekolmation bei Hochwasser	Substratsortierung in Längsrichtung; reduzierte Ablagerung von Feinmaterial im Riffle	Keine Auswirkung	Keine Auswirkung	<i>Gore et al., 1998</i>

Tabelle 2: Übersicht von potentiellen baulich-morphologischen Massnahmen und ihrer möglichen Wirkung auf die Haupteinflussfaktoren des Schwall-Sunk-Betriebs auf aquatische Insekten. Die Wirkung bezieht sich auf den Zustand nach Erreichen eines steady-state nach Einbau der Massnahme. * = Je nach Struktur Zunahme der trockenfallenden Oberfläche.

wie die damit einhergehenden Wassertemperaturschwankungen durch Verdünnung dämpfen (Feng et al., 2018; Fullerton et al., 2015). Ferner bieten naturnahe Zuflüsse eine Quelle für die Wiederbesiedlung von aquatischen Insekten in Schwall-Sunk-belasteten Flussabschnitten (Kennedy et al., 2016; Milner et al., 2019). Die naturnahe Gestaltung eines Mündungsbereichs kann somit zu potenziell wertvollen Habitaten in Schwall-Sunk-Strecken führen.

4. Einbettung von kleinräumigen baulich-morphologischen Massnahmen

Die oben vorgestellten Massnahmen sind Beispiele, wie sich kleinräumige baulich-morphologische Massnahmen unter Berücksichtigung der aquatischen Insekten planen lassen. Ob und welche baulich-morphologischen Massnahmen sich für eine spezifische Schwall-Sunk-Strecke eignen, lässt sich nicht pauschal festlegen,

denn Wirksamkeit und Langlebigkeit solcher kleinräumigen Strukturen hängen auch von ihrer räumlichen Einbettung im Gewässerabschnitt und Einzugsgebiet ab.

Klein- und grossräumige Prozesse

Gemäss der VZH können baulich-morphologische Massnahmen im Rahmen der Schwall-Sunk-Sanierung nur kleinräumig umgesetzt werden. Bauliche und betriebliche Schwall-Sunk-Sanierungsmassnahmen greifen dagegen in das Abflussregime ein, welches natürlicherweise von Einzugsgebietseigenschaften abhängig ist (z. B. Vergletscherung, Landnutzung, Saisonalität des Niederschlags). Neben dem Abflussregime wird das Gewässerökosystem durch geomorphologische, ökologische und biogeochemische Prozesse geformt. Die Prozesse finden auf unterschiedlichen räumlichen Skalen statt (z. B. Mesohabitat, Flussabschnitt und Einzugsgebiet) und können in ihrer Intensität sehr stark variieren (Polvi et al., 2020). Je nach Intensität und Wech-

selwirkung zwischen den Prozessen besteht die Gefahr, dass baulich-morphologische Massnahmen nach kurzer Zeit ihre Funktionalität verlieren. Wie auch in der VZH bemerkt, kann zum Beispiel das Sedimentregime im Einzugsgebiet für die Beständigkeit einer baulich-morphologischen Massnahme entscheidend sein (siehe S. 112 in der VZH). So kann ein Geschiebedefizit zur Erosion von wertvollen Sedimentstrukturen führen (Kondolf 1997; Vericat et al., 2020). Umgekehrt kann ein hoher Feinsedimentgehalt im Fliessgewässer die Versandung bzw. Kolmation von Buchtstrukturen verursachen (Greimel et al., 2017). Die Berücksichtigung der Wechselwirkungen zwischen den Prozessen ist somit für die Langlebigkeit von baulich-morphologischen Massnahmen essenziell.

Potential für die Wiederbesiedlung

Die Wirksamkeit einer kleinräumigen baulich-morphologischen Massnahme wird

Auswirkungen von Schwall-Sunk auf die Lebensgemeinschaft des Makrozoobenthos. Erfahrungen aus Schweizer Projekten

In der Schweiz sind aktuell 523 Arten Eintags-, Stein- und Köcherfliegen (kurz EPT) nachgewiesen (*info fauna*–SZKF/CSCF, 2010): 89 Eintagsfliegen, 121 Steinfliegen, 313 Köcherfliegen. Aufgrund von Daten aus verschiedenen Projekten in Schwall-Sunk-Strecken und der Verbreitung und Ökologie der Arten ist eine Schätzung der von Schwall-Sunk betroffenen Artenvielfalt möglich. Mindestens 146 dieser Arten (28 Prozent) sind von den Auswirkungen des Schwall-Sunk-Betriebs betroffen, wovon 41 Arten (28 Prozent) in den Roten Listen aufgeführt sind (*Lubini et al., 2012*). Am häufigsten vom Schwall-Sunk-Betrieb betroffen sind in der Schweiz die Eintagsfliegen (55 Prozent), gefolgt von den Steinfliegen (39 Prozent) und den Köcherfliegen (16 Prozent). Das Gros dieser Arten bewohnt alpine und voralpine Gewässer sowie die Gewässer des Jurabogens.

Zahlreiche wissenschaftliche Studien belegen den Verlust der Artenvielfalt, die Abnahme der Biomasse und die Veränderung in der Zusammensetzung der Lebensgemeinschaft durch Schwall-Sunk, weil dort nur jene Arten vorkommen, welche die häufigen, künstlich erzeugten «hochwasserartigen» Schwälle überleben können. Diese andauernde Störung bewirkt, dass sich das Ökosystem auf einen neuen Zustand hinbewegt, der sich vom ursprünglichen unterscheidet. Die Auswirkungen zeigen sich direkt durch eine erhöhte Driftrate, aber auch indirekt durch die Beeinträchtigung der verschiedenen Entwicklungsstadien (*siehe Abschnitt 2 im Haupttext*). Die laufenden Untersuchungen im Rahmen der Nationalen Beobachtung der Oberflächengewässerqualität (NAWA) bestätigen diesen Befund: In 18 schwallbeeinflussten Flüssen wurden 2019 im Durchschnitt 19 ± 8 EPT-Arten nachgewiesen; im Minimum waren es bloss 5 (*Vispa*). Bei 24 vergleichbaren, jedoch nicht von Schwall-Sunk geprägten Gewässern waren es im Mittel 25 ± 9 EPT-Arten. Der Rückgang der Artenzahlen ist auch historisch belegt: Noch in den 1940er Jahren wurden in der Rhone bei Brig trotz der Korrektur 14 Steinfliegenarten nachgewiesen, darunter sehr seltene; heute sind es noch maximal 7 Arten (*info fauna*–SZKF/CSCF, 2010), keine davon steht in der Roten Liste. Oft verschärfen kanalisierte Gerinne mit über den gesamten Querschnitt gleichförmigen Fließgeschwindigkeiten die negativen Folgen des Schwall-Sunk-Betriebs zusätzlich (*Rey et al., 2011*).

In Schwall-Sunk-Strecken zeigt sich generell ein deutlicher Trend zur Dominanz von Arten, die an mittlere Fließgeschwindigkeiten angepasst sind, u. a. die Gattung *Rhithrogena* und *Baetis alpinus*, die stets hohe Individuendichten erreichen (*Hocevar et al., 2014; Wüthrich & Birnstiel, 2019*). Ebenso profitiert auch die Köcherfliege *Allogamus auricollis*, ein passiver Filtrierer, der auf festem Substrat sitzt und Fließgeschwindigkeiten von $< 0,5$ m/s toleriert. In der Rhone bei Riddes war *A. auricollis* sogar die einzige vorkommende Art (*Uhlmann, 2001*). Weniger stark beeinträchtigt werden in der Regel räuberische Arten wie die Gattungen *Rhyacophila* und *Isoperla*. An langsamere Fließgeschwindigkeiten ($< 0,25$ m/s) angepasste Arten der Uferzonen, u. a. die Ein-

tagsfliegen *Cloeon*, *Centroptilum*, *Alainites muticus* und die Arten der Leptophlebiidae, bei den Köcherfliegen die Gattung *Sericostoma* und die meisten Arten der Limnephilidae, sind hingegen in Schwall-Sunk-Strecken selten oder fehlen. Die Uferzone ist für viele Arten ein wichtiges Habitat für die Eiablage, für die Verpuppung oder den Übergang zur terrestrischen Lebensweise (Emergenz). Arten, die Habitate mit sehr hohen Fließgeschwindigkeiten (> 1 m/s) besiedeln (z. B. *Epeorus*), sind in Schwall-Sunk-Strecken ebenfalls oft untervertreten oder fehlen im Vergleich zur naturnahen Referenz (*Hocevar et al., 2014; Rey et al., 2011; Wüthrich, 2014*), möglicherweise als Folge davon, dass das Habitatangebot, dauernd benetzte Blöcke in starker Strömung, durch den Schwallbetrieb abgenommen hat und die Kolmation bei Hochwasser die Flucht in den Kieslückenraum erschwert.

Kolmation dürfte auch der Grund für die im Vergleich zur naturnahen Referenz geringeren Dichte der Steinfliege *Perla grandis* sein wie in der Moesa, im Vorder- und im Alpenrhein (*Hocevar et al., 2014; Lubini, 2016; Wüthrich & Birnstiel, 2019*), weil der Lückenraum unter grösseren Steinen für diese bis zu 3,5 cm grossen Larven fehlt. Von Kolmation betroffen sind ferner jene Larven, die tief im Gewässerbett (10–50 cm) leben, u. a. Leuctridae, Capniidae, Chloroperlidae (Steinfliegen).

Ausser den oben genannten Faktoren, die für das Makrozoobenthos als Folge des Schwallbetriebs problematisch sind, können sich auch Trübstoffe negativ auswirken. So lieferte der Schwallbetrieb in der Landquart den höchsten Trübstoffeintrag im System des Alpenrheins und unterhalb der Ill-Mündung war das Wasser des Alpenrheins permanent trüb (*Rey et al., 2011*). Die Trübstoffe schädigen den Biofilm am Gewässergrund, eine wichtige Nahrungsgrundlage der aquatischen Lebensgemeinschaft. Dazu gehören zahlreiche Eintagsfliegen und Köcherfliegen (Glossosomatidae), die den Aufwuchs an Steinen und Geröll in Ufernähe abweiden.

Zuflüsse tragen nicht in jedem Fall zur Artenvielfalt der Flüsse bei, da sie oft ebenso durch die Wasserkraft geprägt sind wie etwa die Ill und die Landquart im System des Alpenrheins oder weil sie einem anderen Gewässertyp entsprechen (z. B. Liechtensteiner Binnenkanal; *Rey et al., 2011*). Dabei darf nicht vergessen werden, dass auch kleinere Fließgewässer über eine artenreiche, oft spezialisierte Lebensgemeinschaft verfügen können und vom Schwall-Sunk-Betrieb ebenso betroffen sind (*Lubini, 2013*).

Insgesamt muss davon ausgegangen werden, dass in schwallbeeinflussten Fließgewässern das ökologische Potenzial bezüglich einer standortgerechten Artenvielfalt und Dichte nicht erreicht wird (*Rey et al., 2011*). Von grosser Bedeutung für den Schutz der EPT-Vielfalt in der Schweiz sind deshalb artenreiche Flusssysteme wie etwa die Thur mit 136 EPT-Arten (*info fauna*–SZKF/CSCF) oder das Sense-System mit 160 EPT-Arten (*Zurwerra et al., 2000*).

Verena Lubini

stark von den Ausbreitungsmöglichkeiten der aquatischen Insekten beeinflusst. Wenn aquatische Insektenarten aufgrund der Beeinträchtigungen in einer Schwall-Sunk-Strecke verschwunden sind, kann eine natürliche Wiederbesiedlung über drei Wege

erfolgen: i) durch das Eindriften von Larven sowie Individuen anderer aquatischer Entwicklungsstadien von flussaufwärts gelegenen Flussabschnitten; ii) durch fliegende Adulttiere, die sich in nahen, auch flussabwärts gelegenen Flussabschnitten

entwickelt haben und die Schwall-Sunk-Strecke zur Eiablage aufsuchen (*Bilton et al., 2001*); iii) via Wiederbesiedlung aus naturnahen Zuflüssen (*Kennedy et al., 2016; Milner et al., 2019*). Die Reichweite der drei Prozesse ist allerdings begrenzt

und liegt selten über fünf Kilometer (Gore, 1985; Sundermann et al., 2011).

Kopplung mit weiteren Massnahmen

Eine Kombination von kleinräumigen baulich-morphologischen Massnahmen mit weiteren Massnahmen kann Synergien schaffen. Betriebliche Massnahmen dienen im Allgemeinen der zusätzlichen Dämpfung der massgebenden hydrologischen Kenngrössen des Schwall-Sunk-Betriebs (Schwallabfluss, Sunkabfluss, Pegelanstiegs- und Pegelrückgangsrate) und können für eine saisonal abgestimmte Sanierung genutzt werden. Zusätzlich kann das Ableiten von natürlichen Hochwassern oder die Erzeugung künstlicher Hochwasser die ökologischen Prozesse in Schwall-Sunk-Strecken fördern. So wirken Hochwasserereignisse, deren Spitzenabfluss zu einem Aufbrechen der Deckschicht bzw. zu massgeblichen Sedimentumlagerungen führt, der Kolmation entgegen (Robinson und Uehlinger, 2008). Eine weitere Möglichkeit wäre es, während ökologisch sensibler Zeitfenster einen konstanten und vergleichsweise hohen Sunkabfluss zu garantieren (basierend auf Kennedy et al., 2016). Durch diese betriebliche Massnahme wäre gewährleistet, dass bei Sunkabfluss die Emergenz annähernd natürlich erfolgen kann bzw. Eier der aquatischen Insekten nicht austrocknen.

5. Schlussfolgerungen

Die Auswirkungen des Schwall-Sunk-Betriebs auf das Larvenstadium aquatischer Insekten wurde in wissenschaftlichen Publikationen gut dokumentiert (Tabelle 1). Im Gegensatz dazu sind Auswirkungen

vom Schwall-Sunk-Betrieb auf das Ei- und Puppenstadium sowie auf die Adulttiere bisher wenig beschrieben. Aufgrund der gut untersuchten Biologie und Ökologie, besonders der Eintags-, Stein- und Köcherfliegen, kann aber eine grobe Abschätzung der Auswirkungen vorgenommen werden (Box S. 16). Mit spezifischen Studien, z. B. im Rahmen von Wirkungskontrollen oder Forschungsarbeiten, können Wissenslücken in Zukunft gezielt geschlossen werden, auch um die ökologischen Anforderungen an kleinräumige baulich-morphologischen Massnahmen präziser definieren zu können. Den Wirkungskontrollen kommt dabei eine besondere Rolle zu, können doch z. B. vereinheitlichte Vorher-Nachher-Erhebungen die Grundlage für ein systematisches projektspezifisches und auch projektübergreifendes Lernen bilden (Thomas et al., 2019).

Es sind heute verschiedene Typen von kleinräumigen baulich-morphologischen Massnahmen zur Verbesserung der lokalen Strömungs- und Sedimentdynamik bekannt (Tabelle 2). Ihre Wirkung auf aquatische Insekten oder das Makrozoobenthos insgesamt wurde jedoch noch sehr wenig untersucht, so auch nicht in morphologisch stark veränderten Schwall-Sunk-Strecken. Hier sind Wirkungskontrollen zur Erweiterung der Kenntnisse und des Wissensstands entsprechend besonders wertvoll. Wird die Ökologie des Makrozoobenthos von Anfang an in den Schwall-Sunk-Sanierungsprozess einbezogen, können die Einflussfaktoren (Bild 2; Tabelle 1) in der Massnahmenplanung explizit adressiert werden. Dadurch kann die Wirksamkeit verschiedener baulich-morphologischer Massnahmen kleinräumig sowie ab-

schnittsbezogen durch eine gezielte Wirkungskontrolle geprüft werden.

Forschung und Praxis können bestehende Massnahmentypen dahingehend weiterentwickeln, dass sie eine Milderung der Haupteinflussfaktoren von Schwall-Sunk auf das Makrozoobenthos erlauben. Experimentelle Ansätze sind in dieser Hinsicht vielversprechend, da mit ihnen die Funktionsweise von baulich-morphologischen Massnahmen unter verschiedenen Bedingungen untersucht werden können (z. B. Schwall-Sunk-Kenngrössen, Trübung, Temperaturschwankungen, Geschiebehaushalt). Die interdisziplinäre Zusammenarbeit (z. B. Ökologie, Flussbau) ist dabei eine entscheidende Voraussetzung; sie ermöglicht eine umfassende Definition der Chancen und Grenzen für den Einsatz von kleinräumigen baulich-morphologischen Massnahmen für die Sanierung von Schwall-Sunk.

6. Danksagung

Die Autorinnen und Autoren bedanken sich herzlich bei den Interviewpartnerinnen und -partnern für ihre hilfreichen Auskünfte und weiterführenden Informationen: Lucie Lundsgaard-Hansen (BAFU), Lorenzo Gorla (BAFU), Verena Lubini (Gewässerökologie), Diego Tonolla (ZHAW und eQcharta GmbH), Steffen Schweizer (KWO), Matthias Mende (IUB Engineering AG), Michael Müller (IUB Engineering AG), Christoph Hauer (BOKU Wien), Tobias Meile (BG Ingénieurs Conseils SA) und Stephanie Schmidlin (Limnex AG). Ein herzlicher Dank geht an Peter Penicka für die graphische Umsetzung von Bild 1. Diese Arbeit wurde im Auftrag des Bundesamts für Umwelt (BAFU) durchgeführt.

Quellenangaben und Autorennachweis anschliessend an die französische Version des Artikels ab Seite 29.