

Feldexperiment zur Drift von Makroinvertebraten unter Schwall-Sunk

Der Einfluss von Hydraulik und Habitattyp

Nathalie Friese, Diego Tonolla, Christine Weber, Kate Mathers, Nico Bätz

Zusammenfassung

Bei Schwall-Sunk-Betrieb erhöhen sich mit jedem Schwall die hydraulischen Kräfte in den einzelnen Habitaten des Habitatmosaiks. Dies kann zur passiven Drift von Makroinvertebraten führen, bei der Individuen unfreiwillig von der Flusssohle abgelöst werden. Längerfristig beeinträchtigt dies die Zusammensetzung und Biomasse der Makroinvertebraten-Gemeinschaft.

In unserem Feldexperiment haben wir mit einer tragbaren Versuchsrinne die passive Drift von Makroinvertebraten unter erhöhten hydraulischen Kräften, wie sie beim Schwall-Sunk-Betrieb auftreten können, gemessen. Unsere Resultate zeigen, dass sich eine Erhöhung der hydraulischen Kräfte in unterschiedlichen Habitattypen unterschiedlich auswirken kann. In langsam durchflossenen Habitaten (Fließgeschwindigkeit $< 0,5$ m/s) ist die Zunahme der Fließgeschwindigkeit ausschlaggebend für die Erhöhung der passiven Drift. In schnell durchflossenen Habitaten ($> 0,5$ m/s) hingegen ist das Verhältnis zwischen minimaler und maximaler Fließgeschwindigkeit (Fließgeschwindigkeitsverhältnis) hauptverantwortlich für die Zunahme der passiven Drift.

Um das durch den Schwall-Sunk-Betrieb verursachte Driftrisiko von Makroinvertebraten gezielt zu reduzieren, sollten Massnahmen darauf abzielen, dass (i) in langsam durchflossenen Habitaten die Fließgeschwindigkeit möglichst wenig erhöht und (ii) in schnell durchflossenen Habitaten das Fließgeschwindigkeitsverhältnis möglichst gering gehalten wird. Dies bedarf einer expliziten Betrachtung (z.B. Modellierung) der räumlichen, aber auch zeitlichen Verteilung der hydraulischen Kräfte in einer Schwall-Sunk-Strecke.

Résumé

À chaque éclusée, les contraintes hydrauliques s'intensifient dans les habitats individuels au sein de la mosaïque d'habitats du cours d'eau. Ces contraintes hydrauliques peuvent entraîner une dérive passive des macroinvertébrés, au cours de laquelle une partie des individus sont arrachés du fond du lit. À long terme, ce phénomène entraîne une modification de la composition et de la biomasse de la communauté des macroinvertébrés.

Dans notre étude de terrain, nous avons utilisé un chenal expérimental portatif pour quantifier, dans différents types d'habitats, l'intensité de la dérive des macroinvertébrés provoquée par une augmentation des contraintes hydrauliques telle qu'elle pourrait être causée par les éclusées. Nos résultats montrent que cette augmentation des contraintes hydrauliques peut avoir des effets différents selon les types d'habitats. Dans les habitats à courant lent (vitesse d'écoulement $< 0,5$ m/s), la hausse de la vitesse d'écoulement est le paramètre déterminant pour l'intensification de la dérive passive. Dans les habitats à courant rapide ($> 0,5$ m/s), le paramètre dominant est en revanche le rapport entre la vitesse d'écoulement maximale et minimale (rapport des vitesses d'écoulement).

Pour réduire de façon ciblée le risque de dérive des macroinvertébrés causé par les éclusées, les mesures devraient viser à (i) limiter l'augmentation de la vitesse d'écoulement dans les habitats à courant lent et à (ii) maintenir le rapport des vitesses d'écoulement aussi bas que possible dans les habitats à courant rapide. Cela exige une considération explicite (par modélisation, par exemple) de la distribution aussi bien spatiale que temporelle des contraintes hydrauliques dans les tronçons soumis aux éclusées.

La version française de cet article est disponible à www.swv.ch/wel/drift

1. Einleitung

1.1. Makroinvertebraten-Drift und Schwall-Sunk

«Panta rhei – alles fliesst». In Fließgewässern trifft dieser Ausspruch des griechischen Philosophen Heraklit nicht nur auf das Wasser zu. Auch viel anderes wird mit dem Wasser in Fließrichtung bewegt, je nach Jahreszeit, Abfluss oder Einzugsgebietscharakteristiken in grösserem oder kleinerem Ausmass: Nährstoffe, Schwebstoffe und Geschiebe, Blätter, Holz, Eisschollen. Neben diesem abiotischen und abgestorbenen biotischen Material finden sich im fließenden Wasser auch lebende Organismen, die mit der Strömung interagieren. So können sich Makroinvertebraten, die wirbellosen Kleintiere ab ca. 1 mm Körperlänge (siehe Box 1), aktiv bzw. freiwillig in die Strömung begeben, um ein anderes Habitat aufzusuchen, z.B. für die Nahrungssuche, Fortpflanzung oder als Schutz vor Fressfeinden. Werden die Makroinvertebraten hingegen unfreiwillig durch mechanische Ablösung von der Sohle in die Strömung getrieben, spricht man von passiver Drift. Diese wird meist durch eine Zunahme der hydraulischen Kräfte wie z.B. der Fließgeschwindigkeit oder Sohlenschubspannung ausgelöst (z.B. Brittain und Eikeland, 1988; Gibbins et al., 2007; Naman et al., 2016; und Verweise darin).

Zu passiver Drift kann es aufgrund eines plötzlichen Abflussanstiegs während eines natürlichen Hochwassers kommen. Daneben führen aber v.a. unnatürliche Abflussschwankungen aufgrund des Schwall-Sunk-Betriebs zu passiver Drift. Diese Schwankungen treten meist mehrmals täglich auf, also viel häufiger als natürliche Hochwasser (Bätz et al., 2023). Sie stören den Lebenszyklus der Makroinvertebraten, beeinträchtigen ihre Fortpflanzung und Entwicklung und wirken sich negativ auf die Beständigkeit ihrer Lebensräume aus (Bätz et al., 2023; Friese et al., 2021). Der Schwall-Sunk-Betrieb kann zum Verschwinden von spezialisierten (und

Box 1: Makroinvertebraten – viel mehr als nur Fischfutter

Viele Fischarten in unseren Fließgewässern ernähren sich teilweise oder ausschliesslich von Makroinvertebraten. Deshalb werden die Makroinvertebraten oft als Fischfutter bezeichnet. Unabhängig davon kommt den Makroinvertebraten auch sonst eine zentrale Bedeutung in den Fließgewässern – und darüber hinaus – zu (*Macadam 2015; Twining et al., 2022*):

(i) Biodiversität: Insekten, Schnecken, Muscheln, Flohkrebse, Milben, Egel, Plattwürmer – aquatische Makroinvertebraten sind eine sehr vielfältige Gruppe von Organismen. Beispielsweise zählen wir in der Schweiz aktuell 523 Arten von Eintags-, Stein- und Köcherfliegen (*Lubini in Friese et al., 2021*). Makroinvertebraten tragen damit einen wesentlichen Teil zur überdurchschnittlich hohen Biodiversität unserer Fließgewässer bei.

(ii) Ökosystemingenieure: Makroinvertebraten verarbeiten organisches Material und sind so ein wesentliches Element im Abbauprozess und Nährstoffkreislauf in unseren Fließgewässern. Zudem verändern Makroinvertebraten durch ihre Aktivität die Habitateigenschaften von Fließgewässern, z.B. indem sie durch Netzbildung und Köcherbau Sedimente kleinräumig verfestigen oder deren Durchlässigkeit durch Graben und Wühlen erhöhen (*Mason et al., 2021*).

(iii) Nahrungsnetz im Wasser und an Land: Aquatische Insekten verbringen ihr Larvenstadium im Fließgewässer, bevor sie dieses bei der Emergenz verlassen. An Land stellen sie nahrhafte Nahrung (ungesättigte Omega-3-Fettsäuren) für verschiedene terrestrische Organismen wie Vögel, Eidechsen und Spinnen dar (*Twining et al., 2022*).

oft gefährdeten) Arten führen, zu einem Rückgang der Artenvielfalt sowie einer Verringerung der Biomasse (*Bruno et al., 2016; Cushman 1985; Lubini et al., 2012; Miller et al., 2014*).

Die genauen Ursachen der passiven Drift von Makroinvertebraten sind vielfältig und komplex und oft sehr spezifisch je nach Art oder Taxon (z.B. *Kjærstad et al., 2018; Leitner et al., 2017; Schülting et al., 2023; Tonolla et al., 2023*). Abflussparameter wie die Anstiegsrate, Magnitude oder Amplitude sind jedoch von grosser Bedeutung für die durch Schwall-Sunk bedingte passive Drift der Makroinvertebraten. Diese Abflussparameter bestimmen die räumliche und zeitliche Verteilung der hydraulischen Kräfte wie der Fließgeschwindigkeit, Froude-Zahl oder Sohlenschubspannung in einem Flussabschnitt sowie der damit einhergehenden kleinräumigen Habitateigenschaften (*Bätz et al., 2023; Bosco und Perry 2000; Bruno et al., 2016; Bruno et al., 2010; Gibbins et al., 2016; Miller et al., 2014; Schülting et al., 2023; Schülting et al., 2018; Timusk et al., 2016; Tonolla et al., 2023*). Es sind diese kleinräumigen Prozesse auf Ebene des einzelnen Habitats innerhalb des Habitatmosaiks, die schliesslich zur Drift der dort lebenden Makroinvertebraten führen. Daneben können auch Veränderungen in der Gewässermorphologie, Substratzusammensetzung, Wassertemperatur und / oder Wassertrübung die Habitateigenschaften in Schwallgewässern beeinflussen und die Wiederbesiedlung durch Makroinvertebraten verringern (*Bretschko and Moog 1990; Cushman 1985;*

Kjærstad et al., 2018). So ist die morphologische Heterogenität zum Beispiel entscheidend für das Vorkommen vielfältiger Habitate und Rückzugsorte für Makroinvertebraten unter Schwall-Sunk (*Friese et al., 2022; Hauer et al., 2017*).

1.2 Problemstellung und Zielsetzung

Im Modul der Vollzugshilfe (VZH) des Bundes «Schwall-Sunk-Massnahmen» (*Tonolla et al., 2017*) ist die Makroinvertebraten-Drift als ein Schwall-Sunk-sensitiver Indikator aufgeführt. Das bedeutet, dass sie auf Beeinträchtigungen durch Schwall-Sunk hinweist, aber nicht ausreichend prognostizierbar ist (daher kein Kernindikator). In der Praxis wird dieser Indikator aber in bestimmten Fällen für die Planung von Schwall-Sunk-Massnahmen (d. h. Massnahmen zur Minderung der ökologischen Auswirkungen des Schwall-Sunk-Betriebs) eingesetzt und kann somit die Funktion eines Kernindikators annehmen. Zum Beispiel werden generelle Zusammenhänge zwischen Abfluss bzw. Abflussänderungsraten und der Drift genutzt, um das erforderliche Speichervolumen (Becken, Kavernen) zur Schwall-Dämpfung zu bestimmen. Diese Abschätzungen erfolgen bisher oft anhand von Driftmessungen auf Ebene eines Flussabschnitts, also über verschiedene Habitattypen innerhalb des Habitatmosaiks hinweg. Allerdings bestimmen auch die Habitateigenschaften und die damit verbundenen Makroinvertebraten-Gemeinschaften die Drift. Diesen kleinräumigen Prozessen kann mit generel-

len Herangehensweisen auf Abschnittsebene nicht Rechnung getragen werden.

Im hier präsentierten Feldexperiment haben wir eine tragbare Versuchsrinne genutzt, um im Fließgewässer kleinräumig die hydraulischen Kräfte zu erhöhen und die daraus resultierende passive Makroinvertebraten-Drift (fortan als Drift bezeichnet) zu messen. Kleinräumig bedeutet, dass jede Erhebung auf einer Fläche stattfand, die in sich einheitlich war bezüglich Substratzusammensetzung und Fließgeschwindigkeit (d.h. in einem einzelnen Habitat). Die Versuchsrinne ermöglicht, mit verhältnismässig geringem Aufwand eine grosse Anzahl an Versuchsdurchgängen zu realisieren und so systematisch Zusammenhänge zwischen den hydraulischen Kräften und der Makroinvertebraten-Drift auf Ebene eines einzelnen Habitats zu erfassen. Zudem wurden die meisten Studien zur Makroinvertebraten-Drift entweder in Versuchskanälen durchgeführt, in denen Makroinvertebraten angesiedelt wurden, oder in bereits von Schwall-Sunk beeinflussten Strecken. Die hier angewandte Methode erlaubt es, Makroinvertebraten-Gemeinschaften in Fließgewässern ohne Schwall-Sunk-Einfluss hydraulischen Kräften auszusetzen, wie sie bei einem Schwall entstehen können. Dadurch wird die Lücke zwischen Experimenten in Versuchskanälen und Driftmessungen in Schwall-Sunk-Strecken geschlossen. Mit unserem Feldexperiment verfolgen wir folgende Hauptziele:

1. Untersuchung der Zusammenhänge zwischen hydraulischen Kräften und der Makroinvertebraten-Drift auf der Ebene einzelner Habitats des Habitatmosaiks. Hierbei zielen wir darauf ab, die hydraulischen Kräfte zu identifizieren, die die Makroinvertebraten-Drift auf der Ebene eines einzelnen Habitats beeinflussen. Unsere Hypothese besagt, dass die Drift vor allem von der absoluten Fließgeschwindigkeit und der Anstiegsrate der Fließgeschwindigkeit gesteuert wird (*Gibbins et al., 2016; Schülting et al., 2023; Tonolla et al., 2023*).
2. Untersuchung des Einflusses des Habitattyps auf die in Ziel 1 ermittelten Zusammenhänge. Dabei wollen wir herausfinden, inwiefern der Habitattyp die Makroinvertebraten-Drift auf der Ebene eines einzelnen Habitats beeinflusst. Unsere Vermutung ist, dass die Drift in langsam durchflossenen Habitaten stärker auf einen plötzlichen Anstieg der Fließgeschwindigkeit reagiert als in schnell durchflossenen Habitaten (*Aksamit et al., 2021; Kjærstad et al., 2018*).

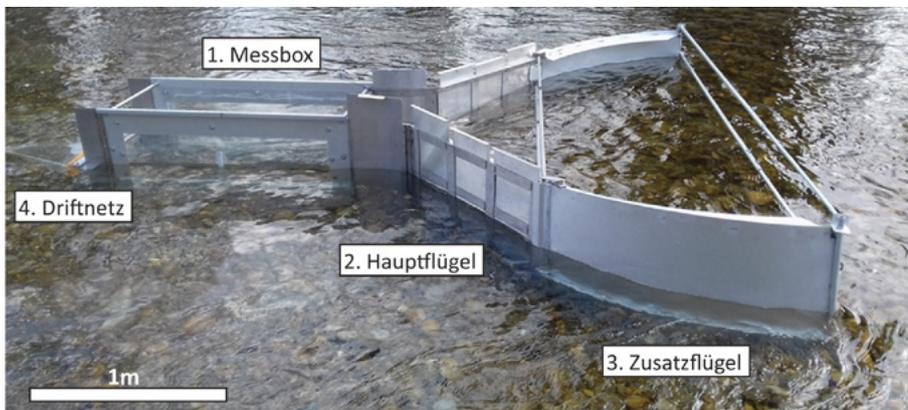


Bild 1: Tragbare Versuchsrinne mit vier Elementen (siehe Text für eine genauere Beschreibung).

2. Methoden

2.1 Tragbare Versuchsrinne

Für unser Feldexperiment haben wir eine tragbare Versuchsrinne entwickelt (adaptiert von Gibbins et al., 2016). Sie besteht aus vier Elementen (Bild 1):

1. Einer Messbox, welche seitlich zwei Plexiglaswände aufweist und gegen oben und unten sowie flussaufwärts und -abwärts offen ist. Dadurch wird ein Bereich von 0,5x1,2 m des Flussbetts abgegrenzt.
2. Zwei ausklappbaren Hauptflügeln mit je drei Öffnungen, die in einem 45°-Winkel an das flussaufwärts gelegene Ende der Messbox angebracht werden. Die Öffnungen können mittels Schieber nacheinander geschlossen werden, um den Durchfluss in der Messbox zu erhöhen. Die durch die Flügel verursachte Durchflussenerhöhung führt in der Messbox zu einer Erhöhung der hydraulischen Kräfte wie z. B. der Fließgeschwindigkeit.
3. Einem zweiten Paar Zusatzflügel, welches an die Hauptflügel anschliesst und somit den Durchfluss durch die Messbox zusätzlich erhöht. Die Krümmung der Flügel sorgt für eine homogene Konzentration des Abflusses.
4. Einem austauschbaren Driftnetz (Maschengröße 500 µm), das am flussabwärts gelegenen Ende der Messbox angebracht wird, um die driftenden Makroinvertebraten aufzufangen. Eine Schaumstoffdichtung am unteren Rand des Netzes garantiert, dass auch die bodennah driftenden Individuen aufgefangen werden.

2.2 Ablauf des Feldexperiments und Laborarbeit

Wir setzten die Versuchsrinne vom 16. März bis zum 21. April 2021 im Oberlauf der Emme

zwischen Eggwil und Zollbrück ein, der keinen Schwall-Sunk-Betrieb aufweist. Insgesamt führten wir 45 Versuchsdurchgänge durch, d. h. wir versetzten die Versuchsrinne 45 Mal an verschiedene Standorte auf der Flusssohle. Die Emme führte über diesen Zeitraum durchschnittlich einen Abfluss von 7,2 m³/s (Max = 12,9 m³/s; Min = 4,2 m³/s; STD = 2,8 m³/s; Jahresmittel = 9,02 m³/s; BAFU Messstation 2070). Das Gefälle im Untersuchungsgebiet beträgt 7 bis 5 Promille und das Sohlsubstrat besteht aus mittlerem bis grobem Kies (D₀₅ = 6 mm; D₅₀ = 17 mm; D₉₅ = 53 mm). Während der Arbeiten herrschten vorwiegend kalt-trockene Bedingungen; an drei Tagen schneite es.

Ein Versuchsdurchgang wurde in vier Phasen A, üb, b1 und b2 aufgeteilt (Bild 2). Die Phasen repräsentieren den Verlauf eines Schwallereignisses, wobei die A-Phase den Sunk, die üb-Phase den Anstieg des Schwalls und die b1- und b2-Phasen den Schwall darstellen:

- Ausgangsphase (A-Phase): Die Rinne wurde mit zurückgeklappten Hauptflügeln an einem geeigneten Standort

im Fließgewässer platziert, und die Grunddrift über 15 min mit einem Driftnetz gemessen. Vorversuche hatten gezeigt, dass die Rinne am besten an Standorten mit folgenden Eigenschaften funktioniert: Wassertiefen von 0,15–0,30 m, Fließgeschwindigkeiten von 0,3–0,7 m/s und mittlere Korngröße (D₅₀) < 40 mm.

- Übergangsphase (üb-Phase): Anschließend wurden die Hauptflügel aufgeklappt und an der Messbox befestigt. Das Driftnetz wurde ausgetauscht und die Schieber wurden schrittweise geschlossen (ca. alle 15 sec ein Schieber pro Hauptflügel) und die Zusatzflügel installiert. Dadurch wurden die Fließgeschwindigkeit und die übrigen hydraulischen Kräfte stetig erhöht. Die Übergangsphase dauerte 3 min; die genaue Dauer (sec) für die Schließung der Schieber und die Installation der Zusatzflügel wurde für die Analyse festgehalten.
- Belastungsphase 1 und 2 (b1- und b2-Phase): Das Driftnetz wurde ein weiteres Mal zu Beginn der Phase b1 (3 min) und ein letztes Mal zu Beginn der Phase b2 (9 min) ausgetauscht.

Für einzelne Auswertungen wurden die üb-, b1- und b2-Phasen kombiniert und als gesamte Belastungsphase behandelt. Mit einer Dauer von 15 min ist sie damit direkt vergleichbar mit der A-Phase.

Direkt im Anschluss an jeden Versuchsdurchgang wurden die Wassertiefen sowie die Fließgeschwindigkeiten (TSR MC4.0 Minipropeller) für die B-Phase und, nach Rückbau der Flügel, für die A-Phase gemessen. Dazu wurden in der Messbox neun Messpunkte in einem horizontalen 3x3-Ras-

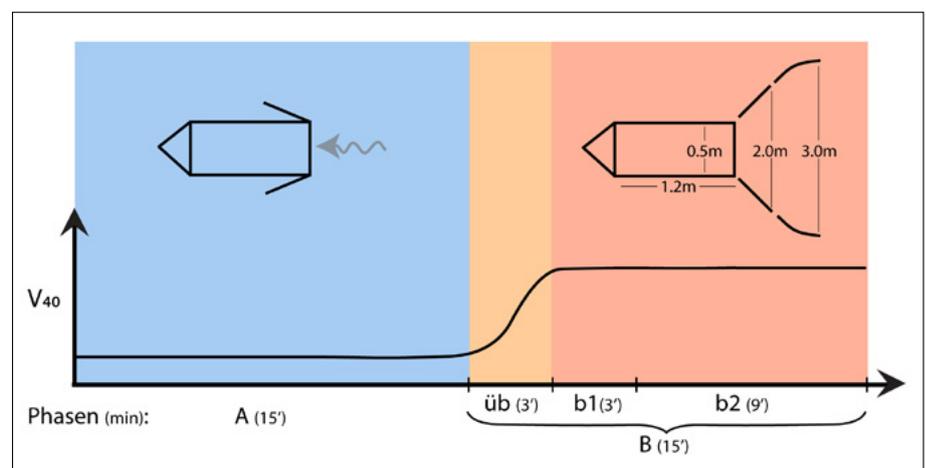


Bild 2: Schematische Darstellung eines Versuchsdurchgangs mit den vier verschiedenen Phasen (vgl. Kap. 2.2). Der geschwungene Pfeil zeigt die Fließrichtung. V₄₀ steht für die mittlere Fließgeschwindigkeit. Zahlen in Klammern zeigen die Dauer der verschiedenen Phasen in Minuten.

ter beprobt. Vorversuche hatten gezeigt, dass neun Messpunkte ausreichen, um Mittelwert und Variabilität der Fliessgeschwindigkeit zuverlässig zu charakterisieren.

Für die Fliessgeschwindigkeit wurde an jedem Messpunkt ein 10 sec-Mittelwert bestimmt (2 Messungen/sec; Genauigkeit ± 1 Prozent), und zwar für die mittlere Fliessgeschwindigkeit V_{40} (in 40 Prozent der Wassertiefe ab der Sohle) sowie für die bodennahe Fliessgeschwindigkeit V_0 (ca. 0,02 m Tiefe), sofern es der Algenbewuchs erlaubte. Für jeden der 45 Versuchsdurchgänge wurde die Korngrößenverteilung im Innern der Messbox ermittelt (Wolman Pebble Count mit mindestens 50 Messungen). Daneben wurden die Trübung (Hach 2100Qis) sowie Wassertemperatur, pH und Leitfähigkeit (Hanna Meter) gemessen und die Globaleinstrahlung (Meteoswiss Messstation LAG) als Proxy für die Wetterbedingungen festgehalten.

Die Driftproben aus jedem Driftnetz wurden nach jedem Versuchsdurchgang in Ethanol fixiert. Im Labor wurden die Individuen in den Driftproben von anderem organischem und anorganischem Material getrennt und anschliessend mindestens bis auf Familienniveau resp. wenn möglich bis auf Artniveau bestimmt und gezählt. Adulte und Puppen wurden in der Analyse nicht berücksichtigt und von den Berechnungen ausgenommen.

2.3 Berechnungen und Analyse

Folgende hydraulische Kräfte wurden berechnet: Für die mittlere Fliessgeschwindigkeit (V_{40} [m/s]), die bodennahe Fliessgeschwindigkeit (V_0) und die Wassertiefe (D [m]) wurden die Messungen aus den neun Punkten für die A- und B-Phase getrennt gemittelt. Für V_{40} wurde das Verhältnis zwischen den Fliessgeschwindigkeiten der A- und B-Phase berechnet und prozentual zur A-Phase ausgedrückt ($V_{40\%}$ [%]). Dabei drückt ein Wert von 0 Prozent aus, dass es keine Erhöhung von V_{40} gegeben hat. Die Anstiegsrate der Fliessgeschwindigkeit über die Zeit ($V_{40\text{rat}}$ [m/s²]) wurde berechnet, indem die Differenz zwischen V_{40} in der A- und B-Phase durch die benötigte Zeit (sec) für die Schliessung der Schieber und die Installation der Zusatzflügel geteilt wurde. Die Froude-Zahl (Fr) wurde mittels der Formel $Fr = V_{40}/(\sqrt{gD})$ für jede Phase berechnet. Für die Sohlenschubspannung (τ) wurde die Formel von *Whiting und Dietrich (1990)* genutzt, τ [N/m²] = $\rho(V_0k)^2 * (\ln(10z/D_{84}))^{-2}$, mit ρ : Wasserdichte (1000 kg/m³); z : der Messtiefe für V_0 (2–3 cm); k : von Karman's-Konstante (0,40)

und D_{84} : 84. Perzentil der Korngrößenverteilung.

Die Drift wurde als Driftintensität (DI; Individuen/min m²) ausgedrückt (*Gibbins et al., 2016*), d.h. die Anzahl verdrifteter Invertebraten wurde durch die Dauer der jeweiligen Versuchsphase und den Strömungsquerschnitt des Driftnetzes (= mittlere Wassertiefe*Rinnenbreite) geteilt. In den Fällen, in denen das Driftnetz überströmt wurde, wurde eine maximale Wassertiefe von 23,5 cm verwendet, was der Summe der Netzhöhe (20 cm) und der Schaumstoffdichtung am unteren Netzrand (3,5 cm) entspricht. Die DI wurde für alle Phasen separat berechnet. Aufgrund früherer Ergebnisse aus Rinnen- und Feldexperimenten von *Tonolla et al. (2019)* wird eine Erhöhung der DI für Standorte mit einer $V_{40} > 0,5$ m/s erwartet. Wir nutzten diesen Grenzwert, um die Standorte der 45 Versuchsdurchgänge anhand von V_{40} in Phase A in langsam ($< 0,5$ m/s) oder schnell durchflossene ($> 0,5$ m/s) Habitats einzuteilen. Dieser Schwellenwert deckt sich auch mit den Ergebnissen von *Graf et al. (2013)*, die 0,5 m/s als ungefähren Schwellenwert identifizierten, bei dessen Überschreitung ein Rückgang der Köcherfliege *Allogamus auricollis* (als Beispiel eines strömungsempfindlichen und exponierten Taxons) beobachtet wird.

Die DI wird nicht nur durch die lokalen hydraulischen Kräfte bestimmt, sondern auch durch Wassertemperatur, Trübung, pH und Leitfähigkeit sowie durch die lokalen Sedimenteigenschaften (z.B. mediane Korngrößenverteilung – D_{50}) und die Wetterbedingungen (z.B. Globaleinstrahlung). Diese nicht-hydraulischen Grössen variierten im Tagesverlauf sowie über den gesamten Versuchszeitraum. Mittels einer multiplen Regression wurde der durchschnittliche Effekt dieser Grössen auf die DI der Phasen A und B bestimmt und in einem zweiten Schritt von den Daten subtrahiert (z.B. *Westaway et al., 2003*). Die Phasen \bar{u}_b , b_1 und b_2 wurden mit den Funktionen für die Phasen A und B korrigiert. Bei dieser Korrektur der DI zeigte die Leitfähigkeit über den Versuchszeitraum den grössten Einfluss auf die DI (Koeffizient des Regressionsmodells = $-0,35$), gefolgt vom pH ($-0,15$) und der Temperatur (0,09). Globaleinstrahlung, D_{50} und Trübung hatten nur einen marginalen Effekt (0,08 – 0,06 resp. 0,05). Die korrigierte Genauigkeit des multiplen Regressionsmodells beträgt $R^2 = 0,20$, was bedeutet, dass 20 Prozent der durch die oben genannten Variablen erklärten Varianz aus dem Datensatz entfernt werden konnten.

Mit einem nicht-parametrischen Friedman-Test wurde untersucht, ob sich die DI in der Phase A signifikant (Bonferroni-Korrektur) von den Phasen \bar{u}_b , b_1 und b_2 sowie der gesamten Belastungsphase B unterscheidet. Zusätzlich wurde ein Permutationstest durchgeführt um festzustellen, ob sich die Zusammensetzung der Drift zwischen der Phase A und B unterscheidet. Diese Tests wurden mit SPSS (Version 28.0.1.1) durchgeführt.

Eine Quantilregression (QR; R Software) wurde für die Ermittlung der Zusammenhänge zwischen der DI und den hydraulischen Kräften genutzt. Für diese Analysen wurde der Datensatz für die Phasen A und B verwendet. Im Gegensatz zur gebräuchlichen linearen Regression, welche den durchschnittlichen Effekt der unabhängigen Variablen auf die abhängige Variable schätzt, betrachtet die Quantilregression die Effekte getrennt für verschiedene Quantile (o.a. Reaktionsbereiche) der Verteilung der abhängigen Variablen. So kann beispielsweise die Quantilregression des 0,9-Quantils resp. 90. Perzentils genutzt werden, um den obersten Bereich der DI in Bezug auf eine hydraulische Variable zu erfassen. Die QR ermöglicht damit eine Einschätzung des gesamten Reaktionsbereichs (*Gibbins et al., 2016*), vor allem, wenn die Zielvariable ein starkes Hintergrundrauschen hat. Sie erweitert somit das Verständnis der Beziehung zwischen den Variablen. Die QR wurde durch den Achsenursprung forciert, da, wenn die Fliessgeschwindigkeit = 0 m/s ist, auch keine passive Drift von Makroinvertebraten stattfinden kann. Exponentielle Funktionen wurden auf drei verschiedene Quantile angewendet (QR_1 = für 0,1-Quantil; QR_5 = für 0,5-Quantil; QR_9 = für 0,9-Quantil). Um den Einfluss der verschiedenen hydraulischen Kräfte auf die Drift vergleichen zu können, wurden die Exponenten der QR standardisiert (z.B. *Siegel, 2016*): $\beta^* = \beta (IQ_x/IQ_y)$; mit β : dem ursprünglichen resp. standardisierten Exponenten; IQ_x : dem Interquartil einer hydraulischen Kraft; IQ_y : dem Interquartil der Driftintensität.

Zusätzlich wurde eine Redundanz-Analyse (RDA) durchgeführt. Diese multivariate statistische Analyse erlaubt herauszufinden, welche hydraulischen Kräfte die taxonomische Zusammensetzung der Drift bestimmen.

3. Ergebnisse und Diskussion

3.1 Generelles Driftverhalten

In unseren 45 Versuchsdurchläufen wurden insgesamt 4885 Makroinvertebraten aus 34 Familien erfasst. *Bild 3* zeigt den zeitlichen Verlauf der Driftintensität (DI) über die ver-

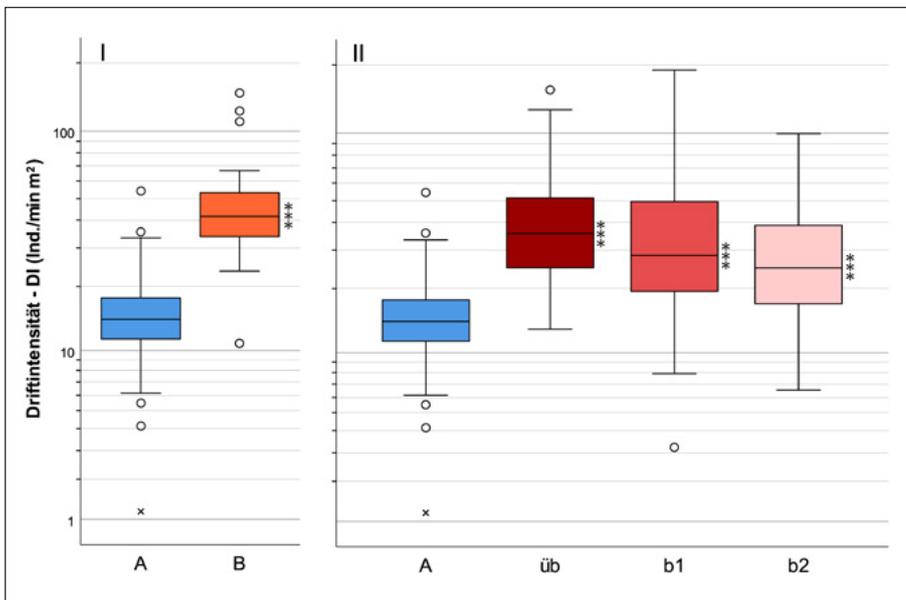


Bild 3: Driftintensität (DI) für die verschiedenen Versuchsphasen. I: Phasen A (Ausgangsphase) und B (gesamte Belastungsphase = üb + b1 + b2). II: Phasen A, üb (Übergangsphase), b1 und b2 (Belastungsphasen). Die Y-Achsen sind logarithmiert, um kleine Unterschiede besser darzustellen. Die Box zeigt den Median (Strich) und das 1. und 3. Quartil an. Die Balken repräsentieren den Maximal- resp. Minimal-Wert ohne Berücksichtigung der Ausreisser (Kreise = schwache Ausreisser; Kreuze = extreme Ausreisser). Die Sternchen (*) zeigen signifikante Unterschiede ($p < 0,01$) zur Phase A an.**

schiedenen Phasen der Experimente. Wir beobachteten einen signifikanten Anstieg der DI von Phase A (Median = 14,1 Individuen/min m^2) zu Phase B (Median = 41,6 Individuen/min m^2), sowie zu den Phasen üb, b1 und b2 (Median der DI = 35,6, 28,4, 24,9 Individuen/min m^2). Dies deutet darauf hin, dass die Zunahme der Gesamtdrift primär durch eine Erhöhung der hydraulischen Kräfte verursacht wurde, was in Einklang mit früheren Studien steht (Aksamit et al., 2021; Bruno et al., 2010, 2016; Imbert und Perry, 2000; Miller und Judson, 2014; Schülting et al., 2018, 2023; Timusk et al., 2016; Tonolla et al., 2023).

Während der Phase A wurde die Drift zu 95 Prozent von sechs Familien dominiert (Bild 4): Simuliidae (41 Prozent), Chironomidae (21 Prozent), Baetidae (11 Prozent), Heptageniidae (11 Prozent), Nemouridae (6 Prozent) und Leuctridae (5 Prozent). In der Phase B änderte sich die taxonomische Zusammensetzung der Drift nur geringfügig, jedoch nahm die DI für die meisten Familien zu, mit signifikanten Anstiegen bei den Baetidae (+ 320 Prozent) und Nemouridae (+ 275 Prozent).

Um die DI präzise zu interpretieren, ist es wichtig, die Verbreitung und Besiedlungsdichte der verschiedenen Taxa im Benthos, d.h. auf der Kieselsohle, zu berücksichtigen: Je häufiger ein Taxon im Benthos ist, desto wahrscheinlicher ist es, dass Individuen dieses Taxons von der Sohle abgelöst werden und verdriften. Eine hohe Drift, insbesondere

bei individuenreichen Taxa, weist dementsprechend nicht unbedingt auf eine hohe Empfindlichkeit gegenüber den hydraulischen Kräften hin (Tonolla et al., 2023). Um die relative Empfindlichkeit eines Taxons zu bestimmen, kann die Driftproportion ermittelt werden: Dazu wird in dieser Studie die

Differenz zwischen der medianen Drift in Phasen B und A durch die Besiedlungsdichte im Benthos geteilt. Die Chironomidae, die an 34 der 45 Standorte vorkamen, zeigten eine niedrige Driftproportion von 0,2 Prozent. Die Simuliidae hingegen (14 Standorte) hatten die höchste Driftproportion von 11,6 Prozent. Die Baetidae (37 Standorte) wiesen eine mittlere Driftproportion von 2,3 Prozent auf. Ähnlich niedrige Driftproportionen zeigten Heptageniidae (1,3 Prozent; 30 Standorte) und Leuctridae (0,2 Prozent; 41 Standorte), während die Nemouridae an 8 Standorten eine mittlere Driftproportion von 4,8 Prozent aufwiesen.

Vergleichbare Studien zeigten, dass die Chironomidae und Baetidae verstärkt in der Drift auftreten, wenn die hydraulischen Kräfte zunehmen (Bruno et al., 2013; Moog, 1993; Schülting et al., 2023; Tonolla et al., 2023). Gleichzeitig dominieren sie aber auch häufig die Zusammensetzung der Makroinvertebraten-Gemeinschaft in Schwall-Sunk-Gewässern (Tanno et al., 2016, 2021; Tonolla et al., 2023). Daher gelten einige Arten dieser Familien tendenziell als widerstandsfähig gegenüber erhöhten hydraulischen Kräften und dürften flexible Habitatansprüche haben. Unsere Ergebnisse zeigten, dass die Simuliidae aufgrund ihrer verhältnismässig geringen Besiedlungsdichte eine hohe Driftproportion aufwiesen (wie auch in Tonolla et al., 2023). Auch bei den Baetidae ist die Driftproportion als mittelgross einzuordnen. Andere Taxa, wie die Nemouridae, zeigen oft

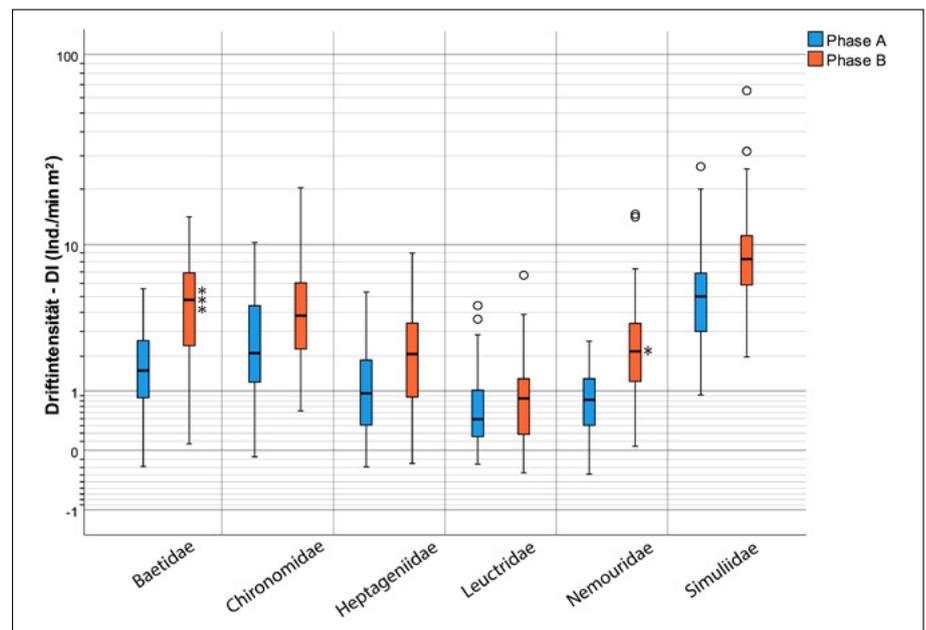


Bild 4: Driftintensität (DI) nach taxonomischen Familien für die Phasen A und B. Die Y-Achse ist logarithmiert, um kleinere Unterschiede besser darzustellen. Die Box zeigt den Median (Strich) und das 1. und 3. Quartil. Die Balken repräsentieren den Maximal- resp. Minimal-Wert ohne Berücksichtigung der Ausreisser (Kreise = schwache Ausreisser; Kreuze = extreme Ausreisser). Die Sternchen (*, *) zeigen signifikante Unterschiede ($p < 0,1$, $p < 0,01$) zur Phase A an.**

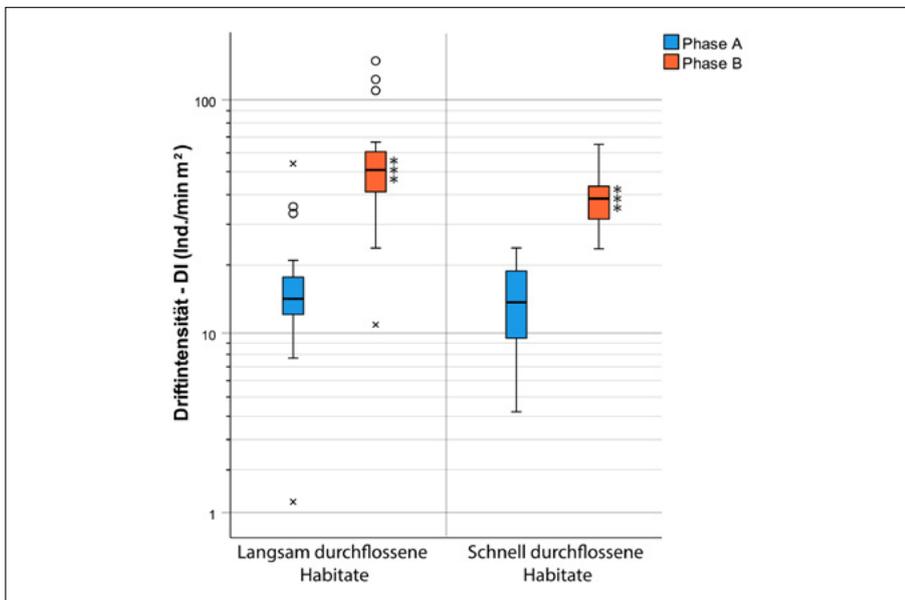


Bild 5: Driftintensität für langsam und schnell durchflossene Habitate. Die Y-Achse ist logarithmiert, um kleinere Unterschiede besser darzustellen. Die Box zeigt den Median (Strich) und das 1. und 3. Quartil an. Die Balken repräsentieren den Maximal- resp. Minimal-Wert ohne Berücksichtigung der Ausreisser (Kreise = schwache Ausreisser; Kreuze = extreme Ausreisser). Die Sternchen (***) zeigen signifikante Unterschiede ($p < 0,01$) zur Phase A an.

eine hohe Empfindlichkeit gegenüber einer Erhöhung der hydraulischen Kräfte (unsere Studie; Lagarrigue et al., 2002; Schülting et al., 2023). Heptageniidae scheinen hingegen widerstandsfähiger als die Nemouridae zu sein (Bruno et al., 2013; Friese et al., 2024; Graf et al., 2013; Moog, 1993; Schülting et al., 2018, 2023; Tonolla et al., 2023).

Betrachtet man die DI der Phase A separat für die langsam durchflossenen und die schnell durchflossenen Habitate, so war sie in beiden Habitattypen sehr ähnlich (Bild 5). In Phase B jedoch reagierten langsam durchflossene Habitate mit einem stärkeren Anstieg der DI (+358 Prozent) verglichen mit schnell durchflossenen Habitaten (+281 Prozent). Ein Permutationstest zeigte, dass die Driftzusammensetzung zwischen den Phasen A und B für beide Habitattypen signifikant unterschiedlich war, wobei Baetidae und Nemouridae den Unterschied bestimmten. In langsam durchflossenen Habitaten waren zusätzlich höhere Anteile an Chironomidae und Heptageniidae in der Drift zu finden.

Diese Erkenntnisse deuten auf Unterschiede in der Driftempfindlichkeit der verschiedenen Familien zwischen den Habitattypen hin, wobei die Driftproportionen für die langsam durchflossenen Habitate etwa doppelt so hoch waren wie in den schnell durchflossenen Habitaten. Aufgrund des geringen Vorkommens der Taxa in den einzelnen Habitaten ist es jedoch schwierig, genauere Aussagen auf dieser Ebene zu treffen.

3.2 Einfluss der hydraulischen Kräfte auf die Drift

Unsere Feldexperimente zeigen einen exponentiellen Anstieg (Quantilregressionen in Bild 6) der Driftintensität (DI) infolge der Zunahme der Fließgeschwindigkeit (V_{40}), der Froude-Zahl, der Fließgeschwindigkeitsanstiegsrate (V_{40rate}) und des Fließgeschwindigkeitsverhältnisses ($V_{40\%}$). Die beobachtete Varianz in der DI, ersichtlich durch die Differenz zwischen den oberen und unteren Quantilen (QR_9 und QR_1), weist auf komplexe Wechselwirkungen zwischen lokalen hydraulischen Bedingungen und dem Driftverhalten einzelner Makroinvertebraten-Taxa. Unsere Redundanzanalyse (RDA) bestätigt zudem eine signifikante Beziehung zwischen diesen hydraulischen Kräften und der Driftzusammensetzung ($F = 2,45$, $p = 0,002$), wobei nur V_{40} einen signifikanten Einfluss auf die Driftzusammensetzung hatte ($F = 3,67$, $p = 0,05$) und nur 9 Prozent der Varianz erklärte.

Der Vergleich unserer Ergebnisse mit denen anderer Studien, wie denen von Gibbins et al. (2016) und Friese (2019), zeigt eine hohe Übereinstimmung. Insbesondere im Vall Arbúcies (Spanien) während des Frühlings stimmten die Beziehungen zwischen der DI und V_{40} sowie der Froude-Zahl gut mit unseren Beobachtungen überein (Gibbins et al., 2016). In der Chli Schliere im Frühling folgte die DI im Allgemeinen dem Trend für den unteren Reaktionsbereich (QR_1) der V_{40} , lag jedoch für die Froude-Zahl

und $V_{40\%}$ darunter (Friese, 2019). Die DI aus den Herbst-Vorexperimenten in der Emme tendierte ebenfalls zum unteren Reaktionsbereich (QR_1) für V_{40} und Froude-Zahl, während die Werte für $V_{40\%}$ den oberen Reaktionsbereich (QR_9) überstiegen. Trotz saisonaler und gewässerspezifischer Variabilität bleiben die grundlegenden Zusammenhänge zwischen hydraulischen Kräften und Makroinvertebraten-Drift beständig.

Durch Standardisierung der in Bild 6 dargestellten Exponenten der Quantilregressionen konnten wir die relativen Einflussstärken der verschiedenen hydraulischen Faktoren auf die Drift quantifizieren. Hierbei erwies sich, dass die Fließgeschwindigkeit (V_{40}) den stärksten Einfluss ausübte, gefolgt vom prozentualen Fließgeschwindigkeitsverhältnis ($V_{40\%}$). Die Anstiegsrate der Fließgeschwindigkeit (V_{40rate}) hatte einen geringeren Einfluss auf die Drift, mit einer Varianz zwischen minus 21 Prozent im unteren (QR_1) und minus 3 Prozent im mittleren Reaktionsbereich (QR_5).

Wie bei Gibbins et al. (2016), Schülting et al. (2023) und Tonolla et al. (2023) zeigten auch unsere Ergebnisse, dass eine Erhöhung der hydraulischen Kräfte und insbesondere der Fließgeschwindigkeit, zu einer Erhöhung der Drift führt. Obwohl die getesteten Bereiche unterschiedlich sind, zeigte die Fließgeschwindigkeit in allen Studien den höchsten Einfluss auf die Drift. In unserer Studie wurde das Fließgeschwindigkeitsverhältnis ($V_{40\%}$) als zweitwichtigste Variable identifiziert. In den Rinne-Experimenten von Schülting et al. (2023) und der Feldstudie von Tonolla et al. (2023) wurde die Pegelanstiegsrate als zweitwichtigste Variable ausgewiesen. Obwohl sie nicht direkt mit $V_{40\%}$ vergleichbar ist, deuten beide Kenngrößen auf die Wichtigkeit der Änderung der lokalen Fließgeschwindigkeit für die Drift hin.

3.3 Drift unter Einbezug des Habitattyps

Unsere Studie zeigt, dass sich die Driftintensität (DI) von Makroinvertebraten in unterschiedlichen Habitattypen unterscheidet. So führten ein Anstieg der Fließgeschwindigkeit (V_{40}) und der Froude-Zahl in schnell durchflossenen Habitaten zu einer um 30 Prozent geringeren DI als in langsam durchflossenen Habitaten (QR_9 und QR_5 ; Bild 7). Interessanterweise hatte die Anstiegsrate der Fließgeschwindigkeit (V_{40rate}) hauptsächlich in den mittleren und unteren Reaktionsbereichen (QR_5 und QR_1) in schnell durchflossenen Habitaten einen Einfluss, wo sie die DI im Vergleich zu langsam durch-

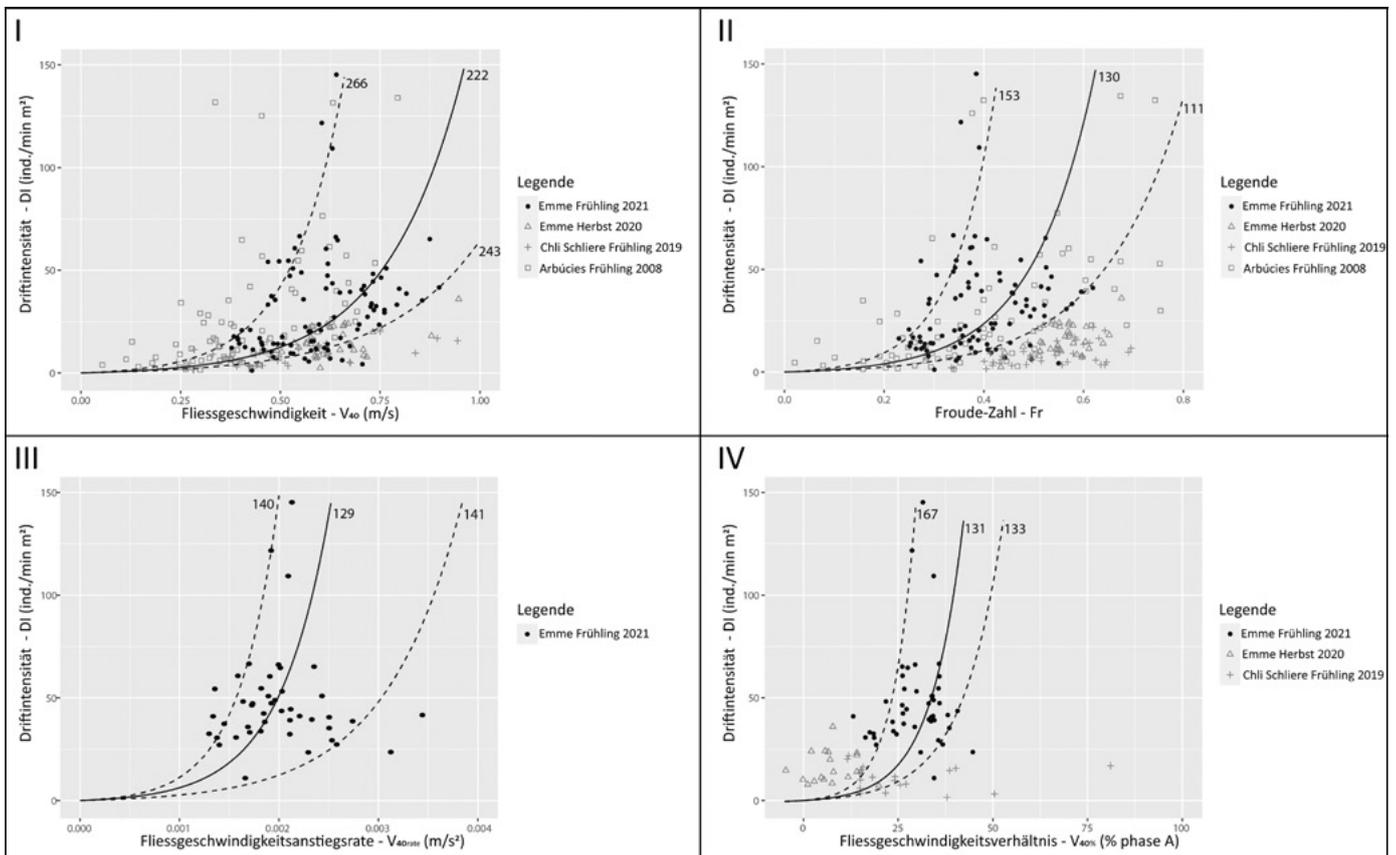


Bild 6: Ergebnisse der Quantilregressionen zwischen der Driftintensität und den verschiedenen hydraulischen Kräften. I: Fließgeschwindigkeit (V_{40}); II: Froude-Zahl (Fr); III: Fließgeschwindigkeitsanstiegsrate (V_{40rate}); IV: Fließgeschwindigkeitsverhältnis ($V_{40\%}$). Die Regressionslinien (obere gestrichelte Linie = 0,9-Quantil; mittlere ausgezogene Linie = 0,5-Quantil; untere gestrichelte Linie = 0,1-Quantil) beziehen sich auf die in dieser Studie gesammelten Daten (schwarz markierte Punkte). Zum Vergleich wurden Ergebnisse aus vergleichbaren Studien in grau hinzugefügt: Emmen Herbst 2020: nicht publizierte Vorversuche; Chli Schliere Frühlings 2019 = Friese (2019); Arbúcies Frühlings 2008 = Gibbins *et al.* (2016). Alle Modelle sind signifikant ($p < 0,05$). Die Zahlen neben jeder Kurve repräsentieren den AIC-Wert (Akaike-Informationskriterium), welcher die Modellgüte anzeigt. Ein niedrigerer Wert bedeutet ein besseres Modell.

flossenen Habitaten um 13 bis 21 Prozent reduzierte. Ein gegensätzlicher Trend zeigte sich beim Fließgeschwindigkeitsverhältnis ($V_{40\%}$), welches in schnell durchflossenen Habitaten eine Zunahme der DI um 20 bis 30 Prozent bewirkte.

Betrachten wir nun die standardisierten Exponenten der QRs, welche eine Einschätzung der relativen Wichtigkeit der hydraulischen Größen zwischen den beiden Habitattypen ermöglichen: In den langsam durchflossenen Habitaten hat die Fließgeschwindigkeit (V_{40}) den grössten Einfluss auf die Drift, gefolgt von der Froude-Zahl (Fr) und der Anstiegsrate der Fließgeschwindigkeit (V_{40rate}). Die prozentuale Veränderung der Fließgeschwindigkeit ($V_{40\%}$) hat den geringsten Einfluss. Diese Resultate für die langsam durchflossenen Habitats sind vergleichbar mit jenen ohne Unterscheidung in Habitattypen (Kap. 3.2).

In den schnell durchflossenen Habitats gibt es dagegen Unterschiede in der relativen Bedeutung der hydraulischen Kräfte. $V_{40\%}$ ist hier besonders wichtig und hat einen bis zu 49 Prozent höheren Einfluss (QR_9) als

V_{40} . Die Anstiegsrate der Fließgeschwindigkeit (V_{40rate}) folgt diesem Trend mit einem 26 Prozent höheren Einfluss (QR_9) im Vergleich zu V_{40} . Die Froude-Zahl (Fr) hat insgesamt wenig Einfluss.

In langsam durchflossenen Habitats ergab die Redundanzanalyse einen signifikanten Zusammenhang zwischen den hydraulischen Kräften und der Driftzusammensetzung ($F = 2,22$, $p = 0,007$), wobei $V_{40\%}$ einen deutlichen Einfluss auf die Driftzusammensetzung zeigte ($F = 2,64$, $p = 0,030$). Für schnell durchflossene Habitats konnte keine der hydraulischen Kräfte die Drift signifikant erklären.

Zusammengefasst reagieren langsam und schnell durchflossene Habitats unterschiedlich auf eine Erhöhung der hydraulischen Kräfte. In langsam durchflossenen Habitats ist die Reaktion auf eine Erhöhung der V_{40} sowie der Froude-Zahl und V_{40rate} stärker als in schnell durchflossenen Habitats. Dagegen ist in langsam durchflossenen Habitats die Reaktion auf das Fließgeschwindigkeitsverhältnis ($V_{40\%}$) weniger ausgeprägt, welches jedoch die Drift-

zusammensetzung in langsam durchflossenen Habitats bestimmt. Diese Beobachtungen werden durch die Studie von Aksamit *et al.* (2021) unterstützt, die in langsam durchflossenen Habitats (Pools) eine höhere Drift feststellte als in schnell durchflossenen (Riffles).

Auch wenn die Zusammensetzung der Makroinvertebraten-Gemeinschaft und damit die Driftproportion in den langsam bzw. schnell durchflossenen Habitats von einem Fließgewässer zum nächsten variieren kann, legt der Vergleich mit anderen Jahreszeiten und Fließgewässern (siehe Kapitel 3.2 und Bild 6) jedoch nahe, dass die hier beobachteten Trends sich nur geringfügig ändern dürften. Es ist zu beachten, dass die Häufigkeit von Schwall-Sunk-Ereignissen und somit von Drift-Ereignissen in dieser Untersuchung nicht berücksichtigt wurde (Bätz *et al.*, 2023). Selbst wenn die passive Drift pro Ereignis gering ausfällt, kann eine hohe Häufigkeit von Drift-Ereignissen langfristig zu einer Verarmung der Makroinvertebraten-Gemeinschaft und einer Verringerung der Biomasse führen.

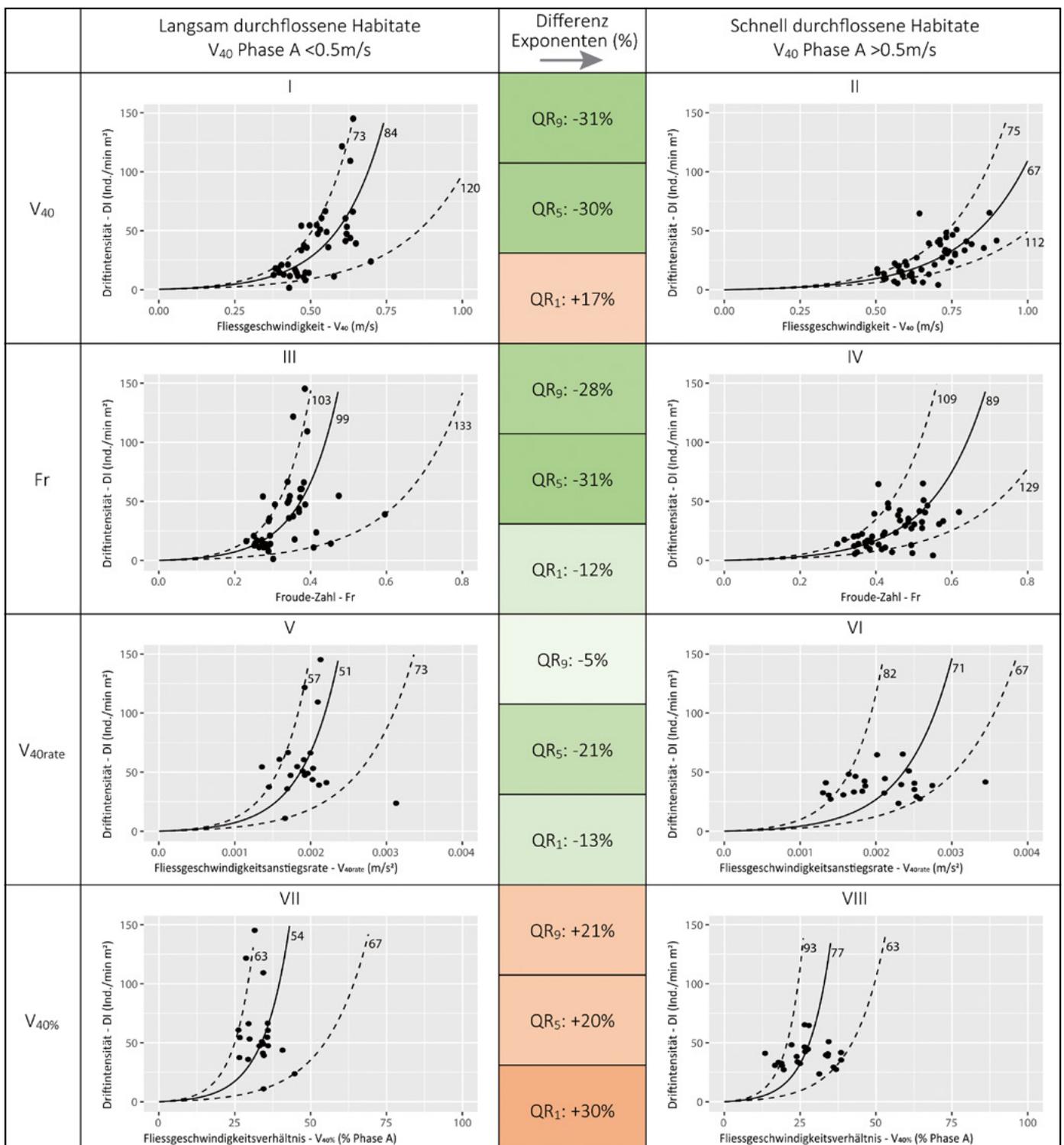


Bild 7: Reaktionsvergleich von langsam und schnell durchflossenen Habitats auf die Erhöhung der Fließgeschwindigkeit (V_{40}), Froude-Zahl (Fr), Fließgeschwindigkeitsanstiegsrate (V_{40rate}) und Fließgeschwindigkeitsverhältnis ($V_{40\%}$). Die angegebenen Differenzen der Exponenten beziehen sich auf Zu-/Abnahme in Bezug auf die langsam durchflossenen Habitats. Alle Modelle sind signifikant ($p < 0,01$). Die Zahlen neben jeder Kurve repräsentieren den AIC-Wert (Akaike-Informationskriterium), welcher die Modellgüte anzeigt. Ein niedrigerer Wert bedeutet ein besseres Modell.

4. Zusammenfassung und Schlussfolgerung

Makroinvertebraten sind ein wesentlicher Bestandteil der Biodiversität unserer Fließgewässer. Sie spielen eine wichtige Rolle im Nahrungsnetz und tragen zur Funktionsfähigkeit des Ökosystems bei (Box 1). Der Verlust der Artenvielfalt und Biomasse von Makroinver-

tebraten durch Schwall-Sunk-Betrieb kann daher weitreichende Auswirkungen auf das gesamte Fließgewässerökosystem haben. Die passive Drift von Makroinvertebraten ist eine wesentliche Auswirkung des Schwall-Sunk Betrieb. Sie ist eng mit den zeitlichen Veränderungen der hydraulischen Kräfte in den einzelnen Habitats des Habitatmosaiks verbunden, d.h. der Schwall-Sunk-Betrieb

wirkt sich auf der Ebene eines einzelnen Habitats aus (Bätz *et al.*, 2023). Mittels einer tragbaren Versuchsrinne haben wir die passive Drift von Makroinvertebraten durch die Erhöhung der hydraulischen Kräfte, wie sie beim Schwall-Sunk-Betrieb auftreten können, in unterschiedlichen Habitattypen quantifiziert.

Unsere Ergebnisse unterstreichen die Bedeutung der Fließgeschwindigkeit (V_{40})

für die Gesamtdrift, wie sie auch schon in anderen Studien nachgewiesen wurde (Gibbins et al., 2016; Schülting et al., 2023; Tonolla et al., 2023). So konnten wir zeigen, dass eine Erhöhung der Fließgeschwindigkeit auf der Ebene eines einzelnen Habitats zu einer Erhöhung der Gesamtdrift führt. Auch die Erhöhung des Fließgeschwindigkeitsverhältnisses ($V_{40\%}$) führt zu einer Erhöhung der Gesamtdrift und stellt dabei die zweitwichtigste Variable dar. Bei der ausschliesslichen Betrachtung von langsam durchflossenen Habitaten verstärkt sich der Effekt der Erhöhung der Fließgeschwindigkeit auf die Drift. In schnell durchflossenen Habitaten wird die Erhöhung der Drift hingegen stärker durch die Erhöhung der $V_{40\%}$ beeinflusst. In langsam durchflossenen Habitaten bestimmt die $V_{40\%}$ massgeblich die Driftzusammensetzung. Keine der verwendeten hydraulischen Kräfte konnte die Zusammensetzung der Drift in schnell durchflossenen Habitaten erklären.

Diese Erkenntnisse liefern wertvolle Informationen für die Planung und Umsetzung von Schwall-Sunk-Massnahmen. So zeigt sich, dass effektive Massnahmen zur Minimierung der negativen Auswirkungen des Schwall-Sunk-Betriebs auf die Makroinvertebraten-Drift gezielt auf Ebene einzelner Habitats des Habitatmosaiks ausgerichtet werden sollten, anstatt auf generelle Zusammenhänge zwischen Abflüssen und Drift auf Abschnittebene zurückzugreifen. Mit anderen Worten, Schwall-Sunk-Massnahmen sollten darauf abzielen, die hydraulischen Bedingungen in den einzelnen Habitaten so zu beeinflussen, dass das Driftrisiko für Makroinvertebraten langfristig minimiert wird. Die Modellierung der zeitlichen Veränderung der hydraulischen Kräfte in verschiedenen Habitaten ermöglicht beispielsweise, die Veränderungen der Fließgeschwindigkeit in langsam durchflossenen Habitaten und das Fließgeschwindigkeitsverhältnis in schnell durchflossenen Habitaten genau abzubilden. Zusätzlich zu

dieser räumlich differenzierten Betrachtung kann durch Modellierung auch die Frequenz von potenziellen Drift-Ereignissen quantifiziert und damit der langfristige Einfluss des Schwall-Sunk-Betriebs auf die Makroinvertebraten-Gemeinschaften eingeschätzt werden. Diese kleinräumige Perspektive ermöglicht, direkt die spezifischen ökologischen Anforderungen der Makroinvertebraten-Gemeinschaften in den vorkommenden Habitaten zu berücksichtigen.

Im Andenken an Nathalie Friese

Nathalies Ziel war es, das Bewusstsein für die Ökologie der Makroinvertebraten im Gewässermanagement zu schärfen, um ihren Erhalt und Schutz zu fördern. Wir wünschen uns, dass dieser Artikel dazu beitragen kann, diesem Ziel näher zu kommen. Nathalies Engagement und Leidenschaft werden uns immer inspirieren und in unseren Herzen weiterleben.

Quellen:

Aksamit, C. K., Carolli, M., Vanzo, D., Weber, C., Schmid, M. (2021). Macroinvertebrate recovery to varying hydropeaking frequency: a small hydropower plant experiment. *Frontiers in Environmental Science* 8: 602374.

Bätz, N., Judes, C., & Weber, C. (2023). Nervous habitat patches: The effect of hydropeaking on habitat dynamics. *River Research and Applications*, 39(3), 349–363.

Bosco, I. J., Perry, J. A. (2000). Drift and benthic invertebrate responses to stepwise and abrupt increases in non-scouring flow. *Hydrobiologia* 436: 191–208.

Bretschko, G., Moog, O. (1990). Downstream effects of intermittent power generation. *Water Science and Technology* 22: 127–135.

Brittain, J. E., Eikeland, T. J. (1988). Invertebrate drift – a review. *Hydrobiologia* 166: 77–93.

Bruno, M. C., Cashman, M. J., Maiolini, B., Biffi, S., Zolezzi, G. (2016). Responses of benthic invertebrates to repeated hydropeaking in semi-natural flume simulations. *Ecology* 9: 68–82.

Bruno, M. C., Maiolini, B., Carolli, M., Silveri, L. (2010). Short time-scale impacts of hydropeaking on benthic invertebrates in an Alpine stream (Trentino, Italy). *Limnologia – Ecology and Management of Inland Waters* 40: 281–290.

Cushman, R. M. (1985). Review of ecological effects of rapidly varying flows downstream from hydroelectric facilities. *North American Journal of Fisheries Management* 5: 330–339.

Friese, N. (2019). The influence of flow velocity and sediment characteristics on macroinvertebrate drift. Master thesis at: Eawag, University Duisburg-Essen, Radboud University.

Friese, N., Weber, C., Rachely, C., Weitbrecht, V., Bätz, N. (2022). Kleinräumige baulich-morphologische Massnahmen in der Schwall-Sunk-Sanierung: Wirksamkeit für das Makrozoobenthos? *WEL* 114: 9–17.

Gibbins, C. N., Vericat, D., Batalla, R.J. (2007). When is stream invertebrate drift catastrophic? The role of hydraulics and sediment transport in initiating drift during flood events. *Freshwater Biology* 52: 2369–2384.

Gibbins, C. N., Vericat, D., Batalla, R.J., Buendia, C. (2016). Which variables should be used to link invertebrate drift to river hydraulic conditions? *Fundamental and Applied Limnology / Archiv für Hydrobiologie* 187: 191–205.

Hauer, C., Holzappel, P., Leitner, P., Graf, W. (2017). Longitudinal assessment of hydropeaking impacts on various scales for an improved process understanding and the design of mitigation measures. *Science of The Total Environment* 575: 1503–1514.

Kjærstad, G., Arnekleiv, J. V., Speed, J. D. M., Herland, A. K. (2018). Effects of hydropeaking on benthic invertebrate community composition in two central Norwegian rivers. *River Research and Applications* 34: 218–231.

Lagarrigue, T., Céréghino, R., Lim, P., Reyes-Marchant, P., Chappaz, R., Lavandier, P., Belaud, A. (2002). Diel and seasonal variations in brown trout (*Salmo trutta*) feeding patterns and relationship with invertebrate drift under natural and hydropeaking conditions in a mountain stream. *Aquatic Living Resources*, 15, 129–137.

Leitner, P., Hauer, C., Graf, W. (2017). Habitat use and tolerance levels of macroinvertebrates concerning hydraulic stress in hydropeaking rivers – A case study at the Ziller River in Austria. *Science of The Total Environment* 575: 112–118.

Lubini V., Knispel S., Sartori M., Vicentini H., Wagner A. 2012: Rote Listen Eintagsfliegen, Steinfliegen, Köcherfliegen. Gefährdete Arten der Schweiz, Stand 2010. Bundesamt für Umwelt, Bern, und Schweizer Zentrum für die Kartographie der Fauna, Neuenburg. *Umwelt-Vollzug* Nr. 1212.

Macadam, C. R., Stockan, J. A. (2015). More than just fish food: ecosystem services provided by freshwater insects. *Ecological Entomology* 40: 113–123.

Mason, R. J., Sanders, H. (2021). Invertebrate zoogeomorphology: A review and conceptual framework for rivers. *WIREs Water* 8: e1540.

Miller, S. W., Judson, S., Rosenfeld, J. (2014). Responses of macroinvertebrate drift, benthic assemblages, and trout foraging to hydropeaking. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 71: 675–687.

Naman, S. M., Rosenfeld, J. S., Richardson, J.S. (2016). Causes and consequences of invertebrate drift in running waters: from individuals to populations and trophic fluxes. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 73: 1292–1305.

Schülting, L., Dossi, F., Graf, W., Tonolla, D. (2023). Flow amplitude or up-ramping rate? Quantifying single and combined effects on macroinvertebrate drift during hydropeaking simulations, considering sensitive traits. *River Research and Applications*.

Schülting, L., Dossi, F., Tonolla, D., Di Cugno, N., Hauer, C., Graf, W. (2018). Assessment of hydropeaking impacts on the drift of aquatic macroinvertebrates – Flume and field experiments. Preliminary Report.

Siegel, A. F. (2016). Chapter 12 – Multiple regression: predicting one variable from several others. Pages 355–418 in Siegel AF, ed. *Practical Business Statistics* (Seventh Edition), Academic Press.

Tanno, D., Wächter, K., Gerber, R. 2021. Stranden von Wasserwirbellosen bei Schwallrückgang – Fallstudie am Hinterrhein. *Wasser Energie Luft* 113: 89–96.

Tanno, D., Wächter, K., Schmidlin, S. 2016. Stranden von Wasserwirbellosen bei Schwallrückgang – Ergebnisse einer Pilotstudie. *Wasser Energie Luft* 108: 277–284.

Timusk, E.R., Smokowski, K. E., Jones, N. E. (2016). An experimental test of sub-hourly changes in macroinvertebrate drift density associated with hydropeaking in a regulated river. *Journal of Freshwater Ecology* 31: 555–570.

Tonolla, D., Chaix, O., Meile T. Zurwerra A., Büsler P., Oppliger S., Essyad, K. (2017). Schwall-Sunk-Massnahmen. Ein Modul der Vollzugshilfe Renaturierung der Gewässer. Bundesamt für Umwelt, Bern. *Umwelt-Vollzug* Nr. 1701: 133 S.

Tonolla, D., Dossi, F., Kastenhofer, O., Doering, M., Hauer, C., Graf, W., Schülting, L. (2023). Effects of hydropeaking on drift, stranding and community composition of macroinvertebrates: A field experimental approach in three regulated Swiss rivers. *River Research and Applications*, 39(3), 427–443.

Tonolla, D., Schülting, L., Dossi, F., Di Cugno, N., Hauer, C., Döring, M., Graf, W. (2019). Assessment of hydropeaking impacts on the drift of aquatic macroinvertebrates – Flume and field experiments. *Wädenswil (CH) & Vienna (AT)*.

Twining, C. W., Weber, C., Kowarik, C., Gossner, M. M., Graham, C. H., Matthews, B., Shipley, J. R. (2022). Zum Fressen gern: unsere Gewässer aus der Vogelperspektive. *Wasser, Energie, Luft*, 114(2), 68–74.

Westaway, R. M., Lane, S. N., Hicks, D. M. (2003). Remote survey of large-scale braided, gravel-bed rivers using digital photogrammetry and image analysis. *International Journal of Remote Sensing* 24 (4): 795–815.

Whiting, P.J., Dietrich, W.E. (1990). Boundary shear stress and roughness over mobile alluvial beds. *Journal of Hydraulic Engineering* 116: 1495–1511.

Autorinnen und Autoren:

Nathalie Friese, Eawag: Das Wasserforschungsinstitut des ETH-Bereichs, Seestrasse 79, 6047 Kastanienbaum

Diego Tonolla, ZHAW, Institut für Umwelt und Natürliche Ressourcen, Schloss, 8820 Wädenswil

Christine Weber, Eawag: Das Wasserforschungsinstitut des ETH-Bereichs, Seestrasse 79, 6047 Kastanienbaum, christine.weber@eawag.ch

Kate Mathers, Loughborough University, Geography and Environment, Loughborough (UK)

Nico Bätz, Eawag: Das Wasserforschungsinstitut des ETH-Bereichs, Seestrasse 79, 6047 Kastanienbaum