

Zeitschrift:	Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria
Herausgeber:	Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
Band:	108 (2016)
Heft:	4
Artikel:	Stranden von Wasserwirbellosen bei Schwallrückgang : Ergebnisse einer Pilotstudie
Autor:	Tanno, David / Wächter, Kurt / Schmidlin, Stephanie
DOI:	https://doi.org/10.5169/seals-939535

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 23.02.2026

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

Stranden von Wasserwirbellosen bei Schwallrückgang – Ergebnisse einer Pilotstudie

David Tanno, Kurt Wächter, Stephanie Schmidlin

Zusammenfassung

Die durch den Schwall-/Sunkbetrieb in einem Fließgewässer entstehenden Wasserwechselzonen stellen potenzielle Strandungsflächen nicht nur für Fische, sondern auch für Wasserwirbellose dar. Der Versuchsansatz der hier vorliegenden Pilotstudie geht davon aus, dass die strandenden Wasserwirbellosen auf der Wasserwechselzone mit engmaschigen Flachnetzen aufgefangen und der Strandungsverlust so pro Schwallereignis quantifiziert werden kann. Damit werden zusätzliche Informationen zur Schwallwirkung erzielt.

Die Methode wurde in 14 Feldversuchen an 10 Schwallstrecken der ganzen Schweiz und mit unterschiedlichen Schwallkennzahlen geprüft und optimiert. Je Versuch wurden 8 quadratische Netze von 52 cm Kantenlänge in der Wasserwechselzone verankert und nach einem Schwalldurchgang wieder eingeholt. Die Auswertung der gestrandeten Organismen erfolgte im Labor. Um die für das Strandnen massgeblichen Faktoren zu ermitteln, wurden jeweils verschiedene Begleitparameter erhoben und statistisch ausgewertet (multiples Regressionsmodell).

Insgesamt konnten auf den 112 Netz-Stichproben 48 verschiedene Taxa unterschieden werden. Die mittlere Strandungsdichte lag zwischen 6 und 181 Individuen/m². Sie streute zwischen den einzelnen Kampagnen erheblich. Mit rund 50 % bildeten die Zuckmückenlarven anteilmässig die weitaus grösste Gruppe. Die statistische Auswertung ergab signifikante Zusammenhänge bei 8 Parametern. Davon sind das Schwall/Sunk-Verhältnis ($V_{S/S}$) und die Pegelrückgangsrate besonders erwähnenswert. Demnach steigt die Strandungsdichte mit zunehmendem $V_{S/S}$, dagegen nimmt sie mit abnehmender Pegelrückgangsrate zu. Letzteres widerspricht der gängigen Theorie.

Die bisherigen Ergebnisse können durch eine breite Anwendung der Flachnetzmethode im Zusammenhang mit der Schwallsanierung noch ergänzt und auch teilweise korrigiert werden. Gesamthaft betrachtet stellt die – im Feld einfach umzusetzende – Flachnetzmethode eine wertvolle Ergänzung zu den bisher angewandten Wirkungsanalysen im Zusammenhang mit der Schwallsanierung dar.

Kroger 1973; Perry & Perry 1986), allerdings stehen diese Untersuchungen nicht im Zusammenhang mit täglichem Schwallbetrieb. Detaillierte Untersuchungen an Schwallstrecken fehlen daher weitgehend (Bruder 2012). Ebenso fehlt eine standardeierte Methode, mit welcher der ereignisbezogene Strandungsverlust des Makrozoobenthos in der Wasserwechselzone quantitativ erfasst werden kann.

Im Rahmen der vorliegenden Pilotstudie wurde eine neue Methode getestet, mit welcher das Strandnen von Wasserwirbellosen quantitativ erfasst werden soll. Dazu wurden neuartige Flachnetze in der Wasserwechselzone exponiert, um die gestrandeten Wasserwirbellosen aufzufangen. Das Ziel der Studie bestand darin, zu testen, ob die Flachnetzmethode feldtauglich und praktikabel ist und unter welchen Bedingungen sie angewendet werden kann. In einem weiteren Schritt wurde untersucht, in welchem Ausmass und unter welchen Bedingungen Strandnen von Wasserwirbellosen stattfindet und ob dieser Parameter grundsätzlich für die Wirkungsanalyse in der Schwallsanierung geeignet ist.

1. Einleitung

Bei Schwallbetrieb werden durch die Pegelschwankungen Areale der Gewässersohle kurzzeitig benetzt und fallen bei Sunk wieder trocken. Die regelmässige Änderung der benetzten Fläche führt in diesen Wasserwechselzonen zu potenziellen Strandungsflächen für Gewässerorganismen. In der wissenschaftlichen Literatur wurde bislang vor allem das Strandungsrisiko von Jungfischen betrachtet (z. B. Saltveit et al. 2001; Halleraker et al. 2003), welches auch im Rahmen der Schwallsanierung nach revidiertem Gewässerschutzgesetz einen wichtigen Parameter darstellt (Baumann et al. 2012). Das Strandnen von Wasserwirbellosen wurde in der Literatur mehrfach nachgewiesen (z. B.



Bild 1. Übersichtskarte zu den Standorten der Feldversuche (vgl. Tabelle 1), Quelle Karte: swisstopo.



Dieses Projekt wurde vom nature-made star-Fonds von ewz (Elektrizitätswerk der Stadt Zürich) finanziert.

2. Methodik

2.1 Untersuchungsperimeter

Der Untersuchungszeitraum dauerte von März 2015 bis Februar 2016. Insgesamt wurden 14 Feldversuche an 10 verschiedenen Gewässern mit täglichem Schwallbetrieb durchgeführt. *Bild 1* zeigt die Untersuchungsabschnitte im Überblick. Die beprobten Abschnitte unterschieden sich in Bezug auf morphologische, hydraulische und geografische Aspekte, sodass ein möglichst grosses Spektrum von verschiedenen Schwallstrecken untersucht werden konnte. Die Details zu den einzelnen Versuchen sind in *Tabelle 1* zusammengefasst.

2.2 Feldmethode

2.2.1 Behandlung der Flachnetze

Die verwendeten Flachnetze weisen eine Fläche von 0.27 m^2 ($52 \times 52 \text{ cm}$) auf und haben eine Maschenweite von $500 \mu\text{m}$ (analog zur Methodik nach Modul-Stufen-Konzept, *Stucki 2010*). An den Ecken verfügen die Netze über je eine Öse, damit man sie mit einem Stahlnagel oder Hering im Sediment verankern kann (vgl. *Bild 2*).

Um den Strandungsverlust von Wasserwirbellosen während eines Schwalls zu erfassen, wurden pro Versuch 8 Flachnetze in der Wasserwechselzone exponiert (*Bild 2, rechts, Bild 3*). Die Netze wurden dabei auf einer Länge von 30 bis 50 m an verschiedenen Stellen verankert. Auf jedem Flachnetz wurden Steine der dominierenden Korngrössenfraktion ausgelegt. Damit sollte die Sohlenrauigkeit auf

der betreffenden Kiesbank nachgebildet werden. Um Artefakte durch bereits zuvor gestrandete Tiere zu vermeiden, wurden die Steine jeweils gereinigt, bevor sie auf den Netzen verteilt wurden.

Nach einem Schwalldurchgang wurden die Flachnetze bei Sunk eingeholt und mit einer Giesskanne über einer flachen Wanne ausgespült und die Steine auf den Netzen abgewaschen. Die im Waschwasser vorhandenen Wasserwirbellosen wurden mit einem Makrozoobenthos-Netz herausgefiltert und die so gewonnene Probe wurde für die Weiterbearbeitung im Labor in Alkohol fixiert.

Die gestrandeten Organismen können sowohl aus der ständig benetzten Zone eingedriftet worden sein als auch aus der Wasserwechselzone selbst stammen (z. B. bereits zuvor gestrandete Organismen). Dies ist hier jedoch von untergeordneter Bedeutung.

2.2.2 Begleitmessungen

Bei jedem Versuch wurden verschiedene Begleitmessungen durchgeführt. Dabei sollte ermittelt werden, welche Parameter das Stranden von Wasserwirbellosen massgeblich beeinflussten. Die folgenden Parameter wurden dazu erhoben:

- Wasserwirbellosen-Fauna im ständig benetzten Bereich (Abundanz, Taxazusammensetzung und Grösse), Probenahme nach Modul-Stufen-Konzept (MSK)
- Wasserwirbellosen-Drift bei Schwallanstieg (Driftnetz)
- Pegeländerungsrate (horizontal und vertikal)
- Ausdehnung der Wasserwechselzone
- Steilheit des Ufers [in %]
- Mittlere Korngrösse auf der Kiesbank
- Fliesstiefe über den Netzen bei Schwall

Versuch	Datum	Gewässer	Standort	$Q_{\text{Schwall}} [\text{m}^3/\text{s}]$	$Q_{\text{Sunk}} [\text{m}^3/\text{s}]$	$V_{\text{SS}} [-]$
1	10.03.15	Linth	Tschachen GL	22	10	2.2
2	12.05.15	Sitter	Bruggen SG	14.5	0.62	24.2
3	20.08.15	Alpenrhein	Felsberg GR	150	60	2.5
4	01.09.15	Moesa	Lumino TI	27	8	3.4
5	29.09.15	Rhone	Brig VS	62	21	2.9
6	13.11.15	Vorderrhein	Ilanz GR	25	4.3	5.8
7	14.11.15	Hinterrhein	Bonaduz GR	60	8	7.5
8	03.12.15	Alpenrhein	Zizers GR	158	45	3.5
9	03.12.15	Alpenrhein	Oberriet SG	214	105	2.0
10	13.01.16	Inn	Martina GR	34	2.9	11.7
11	16.02.16	Linth	Tschachen GL	33	12	2.7
12	18.02.16	Linth	Schwanden GL	27	10	2.7
13	24.02.16	Engelberger Aa	Oberdorf NW	13	3.6	3.6
14	25.02.16	Hasliaare	Meiringen BE	18	9	2.0

Tabelle 1. Standort und Zeitpunkt der 14 Feldversuche, geordnet nach Datum.

Q_{Schwall} = maximaler Schwallabfluss, Q_{Sunk} = minimaler Sunkabfluss, V_{SS} = Schwall/Sunk-Verhältnis. Quelle Abflussdaten: Hydrologische Messstationen des BAFU.



Bild 2. In der Wasserwechselzone einer Kiesbank exponierte Flachnetze (links: Nahaufnahme, rechts: Versuchsanordnung in einem Seitenarm des Alpenrheins bei Oberriet).

- Strömungsgeschwindigkeit über den Netzen bei Schwall
- Strömungsgeschwindigkeit am Gewässerrand bei Sunk (in 1 m Uferdistanz)
- Trübung bei Schwallanstieg (Schätzung)

Die Wasserwirbellosen-Drift wurde mit einem Driftnetz erhoben (Bild 4, rechts), welches bei Sunk am Rande der Wasserwechselzone exponiert wurde. Die Drift wurde nur während des Schwallanstiegs erfasst (15–30 min). Die Pegeländerungsrate wurde mithilfe einer Drucksonde bestimmt, welche im Untersuchungsabschnitt installiert wurde. Der Pegelverlauf wurde im Intervall von einer Minute erfasst und aufgezeichnet. Die Ausdehnung der Wasserwechselzone wurde mit einem Messband erhoben. Die Steilheit des Ufers wurde mithilfe eines Smartphones gemessen (Wasserwaagen-App). Die Fliesstiefe und Strömungsgeschwindigkeit über den Flachnetzen sowie am Gewässerrand erfolgte mit einem Höntzschi-Strömungsmessgerät. Die Trübung bei Schwallanstieg wurde anhand einer dreistufigen Skala geschätzt (gering, mittel, gross).

Zusätzlich zu diesen Begleitmessungen vor Ort wurden noch folgende Parameter anhand von Kartenmaterial oder Daten von Abflussmessstationen einbezogen:

- Schwall/Sunk-Verhältnis (gemäß HYDMOD, Pfaundler et al. 2011)
- Schwall/Sunk-Amplitude (in m^3/s ; gemäß HYDMOD)
- Distanz zur Wasserrückgabe (Indikator für den Grad der Schwalldämpfung)
- Dauer des Schwalls (Zeitspanne von Schwallanstieg bis zum minimalen Sunkabfluss)

Ursprünglich sollte auch der Effekt der Saisonalität untersucht werden. Aus

organisatorischen Gründen war es aber nicht möglich, die Feldaufnahmen gleichmäßig über das Jahr zu verteilen. Zudem wäre die Stichprobengröße bei 14 Versuchen, verteilt auf 12 Monate, für eine statistische Auswertung zu klein.

2.3 Auswertung

2.3.1 Labor

Die fixierten Wasserwirbellosen-Proben wurden im Labor ausgezählt und die Organismen nach Möglichkeit bis auf Artniveau bestimmt. Zusätzlich zu den taxonomischen Bestimmungen wurde jeweils auch die Körpergrösse (Länge) der Wasserwirbellosen mithilfe von Millimeterpapier abgeschätzt.

2.3.2 Datenanalyse

Auswertung der Strandungsproben

Bei der Datenauswertung standen folgende Aspekte im Zentrum:

- Anzahl gestrandete Wasserwirbellose
 - Abundanz (Anzahl gestrandete Wasserwirbellose pro m^2)
 - Strandungsproportion in Bezug zur

benthischen Besiedelungsdichte, modifiziert nach dem Ansatz von Elliott (1967)

- Taxazusammensetzung
- Grösse der gestrandeten Wasserwirbellosen

Auswertung der Begleitmessungen

In einer Wirkungsanalyse wurde der Einfluss der verschiedenen Begleitparameter auf die Strandungsdichte untersucht. Dies erfolgte mithilfe eines multiplen linearen Regressionsmodells. In einem ersten Schritt wurde nach korrelierenden Variablen gesucht, damit redundante Parameter aus dem Modell ausgeschlossen werden konnten. Anschliessend wurde das beste Modell durch schrittweisen Ausschluss von Variablen nach Aikakes Informationskriterium (AIC) ausgewählt. Da es sich bei der Strandungsdichte um Zähldaten handelt, wurde diese Variable \log_{10} -transformiert. Eine Überprüfung der Residuen des Modells zeigte keine auffälligen Abweichungen von den Modellannahmen (z. B. QQ-Plot, Cooks-Distanz usw.). Die gesamte statistische Analyse wurde mit der Software R durchgeführt (R Core Team 2013).

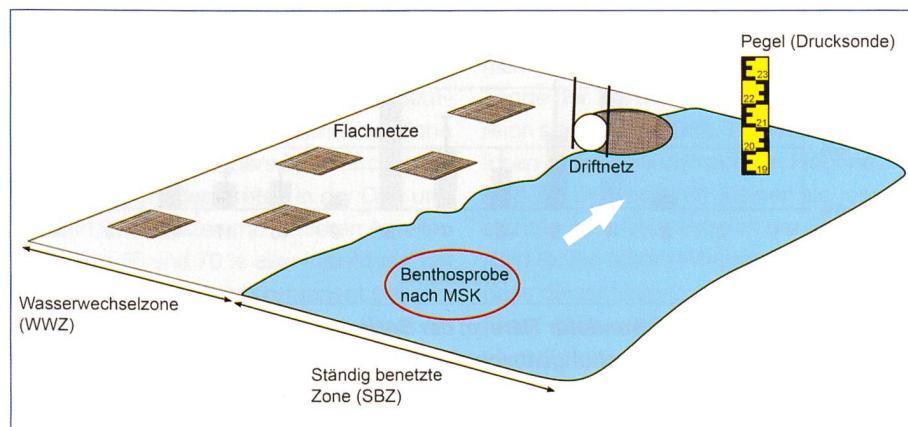


Bild 3. Skizzenhafte Darstellung der Versuchsanordnung. Die quadratischen Flachnetze wurden in der Wasserwechselzone (WWZ) exponiert. Nach dem Schwallrückgang wurden die auf den Flachnetzen gestrandeten Wasserwirbellosen aufgesammelt.



Bild 4. Messeinrichtung Feldversuche (links: überströmtes Flachnetz bei Schwall, rechts: Driftnetz bei Schwallanstieg).

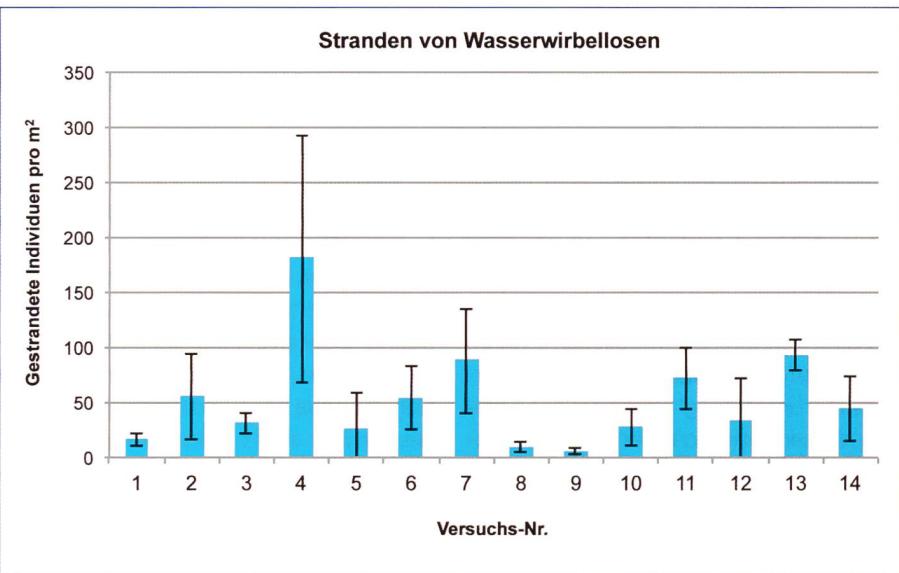


Bild 5. Mittlere Strandungsdichte pro Untersuchungsabschnitt mit Standardabweichung. Die Versuche sind in chronologischer Reihenfolge dargestellt (vgl. Tabelle 1).

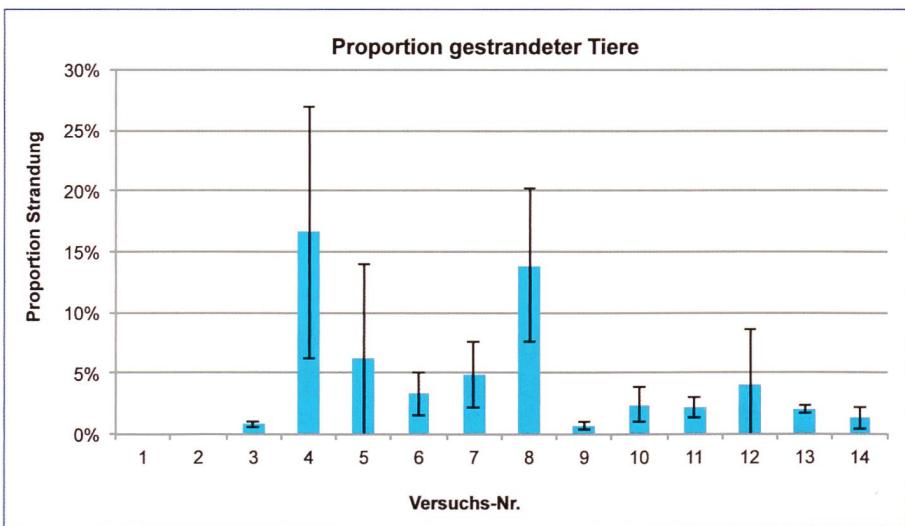


Bild 6. Mittlerer Anteil gestrandeter Tiere an der Besiedelungsdichte im dauernd benetzten Bereich pro Untersuchungsabschnitt mit Standardabweichung. Die Versuche sind in chronologischer Reihenfolge dargestellt (vgl. Tab. 1). Da bei den Versuchen 1 und 2 keine Makrozoobenthosproben im ständig benetzten Bereich genommen wurden, konnten hier keine Strandungsproportionen berechnet werden.

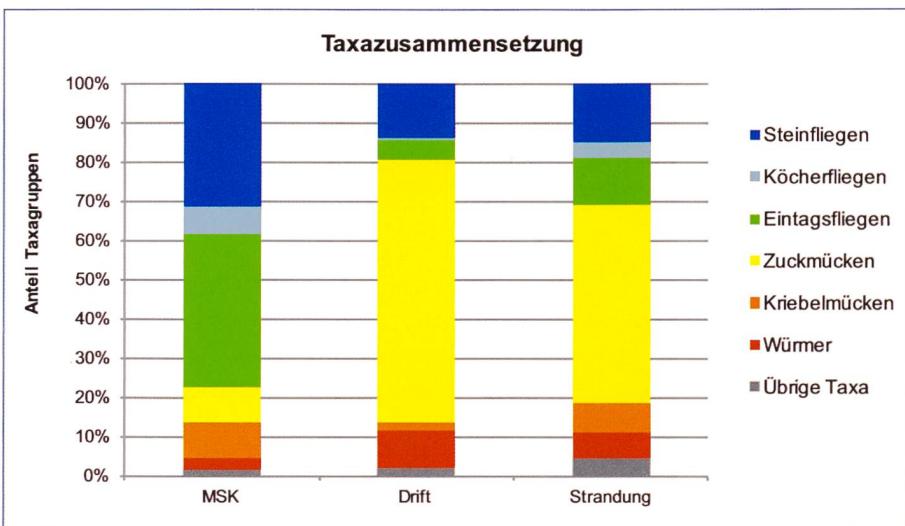


Bild 7. Taxazusammensetzung der Wasserwirbellosen im ständig benetzten Bereich (MSK), in der Drift (bei Schwalanstieg) und auf den Flachnetzen (Strandung), über alle 14 Versuche gemittelt.

3. Ergebnisse

3.1 Tauglichkeit der Feldmethode

Die Flachnetzmethode hat sich in den 14 Feldversuchen grundsätzlich bewährt. Die Flachnetze sind in der Handhabung einfach und können im Feld ohne grösseren Aufwand eingesetzt werden. Die Befestigung mit Stahlnägeln hat sich auch bei hohen Fließgeschwindigkeiten bewährt.

Das Auslegen von Steinen auf den Flachnetzen erwies sich als taugliche Methode, um die Struktur und Rauigkeit der betreffenden Kiesbank nachzubilden. So blieb an den grösseren Steinen eingeschwemmtes Material mit darauf festsitzenden Wasserwirbellosen hängen (z.B. Laub oder Algenbüschel).

Wie die Ergebnisse aus *Bild 5* zeigen, variiert die Anzahl gestrandeter Wasserwirbelloser innerhalb eines Untersuchungsabschnitts teilweise erheblich. Es ist deshalb notwendig, mehrere Flachnetze pro Versuch zu exponieren, um verlässliche Aussagen zum Strandten auf einem Abschnitt machen zu können.

Im Zuge der Arbeiten wurden auch die Grenzen des Einsatzbereichs der Flachnetze ausgelotet. So hat sich gezeigt, dass die trockengefallenen Netze bei Lufttemperaturen im Minusbereich sofort gefrieren und ein Auswaschen des abgelagerten Materials vor Ort nahezu unmöglich ist. Es ist darum nicht zu empfehlen, bei Temperaturen deutlich unter null Grad Flachnetzversuche durchzuführen.

3.2 Strandten von Wasserwirbellosen

3.2.1 Abundanz

In allen Versuchen konnten in der Wasserwechselzone gestrandete Wasserwirbellose nachgewiesen werden. Wie *Bild 5* zeigt, bestehen zwischen den verschiedenen Versuchen deutliche Unterschiede bei der Anzahl gestrandeter Tiere. Die Fehlerbalken zeigen zudem die Streuung innerhalb eines Versuchsabschnitts an. Die grösste durchschnittliche Strandungsdichte wurde an der Moesa festgestellt (181 Ind./m^2), die kleinste am Alpenrhein bei Oberriet (6 Ind./m^2). In einer Wasserwechselzone von beispielsweise 1 ha Fläche (10000 m^2) entspricht das 60 000 bis 1800 000 gestrandeten Organismen pro Schwall.

Um die Abundanz auf den Flachnetzen in einen Bezug zur benthischen Besiedelung der Flusssohle zu setzen, wird in Anlehnung an Elliott (1967) die Proportion gestrandeter Wasserwirbelloser berech-

net. Bild 6 zeigt die Werte für die verschiedenen Versuche. Der durchschnittliche Anteil gestrandeter Wasserwirbellose an der Besiedelungsdichte im dauernd benetzten Bereich beträgt 5 %. Der maximal festgestellte mittlere Anteil liegt 17 % (Moesa), der Kleinste bei 1 % (Hasliaare, Alpenrhein).

Eine Einordnung und eine Bewertung der Strandungsdichte ist aufgrund von fehlenden Vergleichsdaten schwierig. Die wenigen aus der Literatur bekannten Zahlen decken sich nicht mit den gefundenen Ergebnissen. So beschrieb beispielsweise Kroger (1973) in einem Fluss unterhalb eines Stausees in Nordamerika Individuendichten gestrandeter Wasserwirbelloser von bis zu 30 000 Ind./m². Die gestrandeten Tiere wurden bei diesem Versuch aber nicht mit Netzen gesammelt, sondern es wurden auf einer definierten Fläche Sedimentproben entnommen. Die Wasserwirbellosen wurden anschliessend durch Aufschlammung vom Sediment getrennt. Da es sich beim genannten Fluss aber nicht um eine Schwallstrecke mit täglichen Wasserstandsschwankungen handelt und sich die Methoden stark unterscheiden, können die Daten kaum miteinander verglichen werden.

Eine weitere wichtige Frage im Zusammenhang mit der Strandungsproportion ist, ob es einen Schwellenwert gibt, ab welchem übermäßig viele Wasserwirbellose stranden (analog «Katastrophen-drift»). Der Grenzwert für eine «Katastrophen-drift» wurde, basierend auf Erfahrungen aus verschiedenen Gewässern, bei einer Driftproportion zwischen 1 und 3 % angesetzt (Uhlmann, 2001, Meile et al. 2005, Limnex 2009). Um diese Frage auf das Stranden von Wasserwirbellosen auszuweiten, müssten auch Untersuchungen an Gewässern mit einem natürlichen Abflussregime durchgeführt werden.

3.2.2 Taxazusammensetzung und -anzahl

Gesamthaft wurden in 14 Versuchen 70 verschiedene Taxa im ständig benetzten Bereich der verschiedenen Schwallstrecken gefunden (MSK). In den Driftproben konnten insgesamt 44 Taxa und in den Flachnetzproben 48 Taxa unterschieden werden. Bezogen auf den ständig benetzten Bereich entspricht dies bei den Driftproben einem Taxaanteil von 63 %, bei den Flachnetzproben liegt der Anteil bei 68 %. Dieses Ergebnis deutet darauf hin, dass ein grosser Teil der in Schwallstrecken vorkommenden Arten verdriftet wird und in der Wasserwechselzone strandet. Bild 7 zeigt

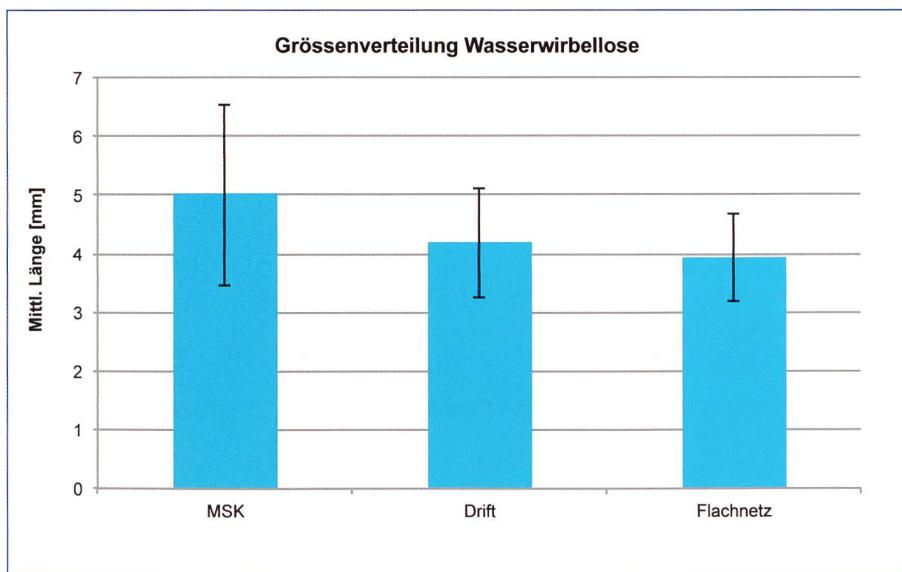


Bild 8. Mittlere Länge der Wasserwirbellosen im ständig benetzten Bereich (MSK), in der Drift (bei Schwallanstieg) und auf den Flachnetzen (Strandung), über alle 14 Versuche gemittelt.

die Zusammensetzung des Makrozoobenthos im ständig benetzten Bereich der Flusssohle sowie in der Drift und auf den Flachnetzen, über alle Versuche gemittelt. Die Organismen sind gegliedert nach den wichtigsten taxonomischen Gruppen. Die prozentualen Anteile der verschiedenen Organismengruppen in der Drift und auf den Flachnetzen unterscheiden sich deutlich von jenen in der ständig benetzten Zone (MSK-Probe). Besonders Zuckmückenlarven (Chironomiden) treten in der Drift und auf den Flachnetzen mit mittleren Anteilen zwischen 50 und 70 % aller Individuen viel häufiger auf als in der permanent benetzten Flusssohle (ca. 10 %). Dieses Ergebnis deckt sich mit den Resultaten von Versuchen an anderen Gewässern, wobei Zuckmückenlarven sowohl in der Drift (Bruno et al. 2010) als auch als Gestrandete in der Wasserwechselzone (Kroger 1973, Perry & Perry 1986) dominierten.

Stein- und Eintagsfliegen sind in der Drift und auf den Flachnetzen ebenfalls häufig vertreten. Im Vergleich zur ständig benetzten Zone (MSK) werden aber nicht alle vorhandenen Taxa dieser Gruppen verdriftet (bei Schwallanstieg) oder stranden bei Schwallrückgang auf den Flachnetzen. Besonders die Familien *Leuctridae* (Steinfliegen) und *Baetidae* (Eintagsfliegen) driften und stranden häufig. Die etwas weniger mobilen Köcherfliegen sind hingegen sowohl in der Drift als auch auf den Flachnetzen nur vereinzelt vorhanden, wobei hier vor allem Larven der *Limnephilidae* (Köcherfliegen) betroffen sind.

Die ähnlichen Dominanzverhältnisse in den Drift- und den Strandungsproben liefern einen Hinweis, dass Wasser-

wirbellose, welche beim Schwallanstieg verdriftet werden, beim Schwallrückgang auch vermehrt stranden.

3.2.3 Grösse der gestrandeten Organismen

Die mittlere Länge der gestrandeten Organismen wurde verglichen mit der mittleren Länge der Tiere im ständig benetzten Bereich sowie in der Drift. Die Wasserwirbellosen in der Drift und auf den Flachnetzen sind im Durchschnitt kleiner als jene im ständig benetzten Bereich der Flusssohle (Bild 8). Ein Mann-Whitney-U-Test ergab, dass dieser Unterschied statistisch signifikant ist ($p < 0.05$). Die Körperlängen der verdrifteten und der gestrandeten Wasserwirbellosen liegen dagegen im ähnlichen Bereich (kein signifikanter Unterschied).

Die Ergebnisse decken sich mit der Erwartung, dass vor allem kleine Tiere und frühe Larvenstadien beim Schwallanstieg verdriftet werden (z. B. Bruno et al. 2010). Die ähnliche Körpergrösse zwischen Drift und Strandung könnte auch bedeuten, dass die verdrifteten Wirbellosen beim Schwallrückgang auch stranden. Dies müsste aber mit separaten Untersuchungen erhärtet werden. Die Resultate zeigen, gesamthaft betrachtet, dass vor allem jüngere Larvenstadien und kleine Organismen ein erhöhtes Strandungsrisiko aufweisen. Vereinzelt wurden auf den Flachnetzen aber auch sehr grosse Wasserwirbellose wie beispielsweise Schnakenlarven (*Tipulidae*, Länge bis 35 mm) oder grosse Köcherfliegen (*Rhyacophila* sp., Länge bis 15 mm) gefunden. Dies spricht dafür, dass die angewendete Flachnetzmethode nicht grösenselektiv ist.



Parameter	Regress. Koeff.	Standardfehler	t-Wert	P-Wert
Ordinatenabschnitt	1.6151	0.2885	5.597	4.11e-07 ***
Pegelrückgangsrate (vertikal)	-1.0451	0.1189	-8.786	7.32e-13 ***
Drift	-0.0078	0.0038	-2.013	0.0480 *
IBCH	-0.0504	0.0119	-4.240	6.81e-05 ***
Mittlere Länge der Tiere	0.2349	0.0326	7.204	5.66e-10 ***
Schwall/Sunk-Verhältnis	0.1619	0.0249	6.492	1.09e-08 ***
Schwall/Sunk-Amplitude	-0.0064	0.0014	-4.444	3.29e-05 ***
Distanz zu Sunklinie	-0.0492	0.0188	-2.616	0.0109 *
Fliessstiefe über den Netzen	0.1041	0.0172	6.021	7.51e-08 ***

Tabelle 2. Modellzusammenfassung mit Regressionsparametern, Standardfehlern und den entsprechenden t- und p-Werten.

Signifikanz-Code: * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$

Multiple R² = 0.82, Bereinigtes R² = 0.80

F-Wert = 39.64

p-Wert < 2.2e-16 ***

durch das hier angewandte Regressionsmodell mit den Parametern aus Tabelle 2 rund 80 % der beobachteten Variation erklärt (vgl. R²). Der p-Wert für das gesamte Modell zeigt eine Irrtumswahrscheinlichkeit nahe null an ($p < 2.2e-16$).

3.4 Beispiel: Flachnetzuntersuchungen am Hinterrhein

Die Ergebnisse des Flachnetzversuches am Hinterrhein bei Bonaduz sind nachfolgend exemplarisch dargestellt. Im Untersuchungsabschnitt (Bild 9) unterhalb von Bonaduz überlagern sich die Schwälle von mehreren Kraftwerken, darunter auch das KW Solis von ewz. Die Eckwerte zur untersuchten Kiesbank und zum Schwalldurchgang sind in Tabelle 3 aufgeführt. Bild 10 illustriert den Verlauf der Wassersstandsschwankungen im Hinterrhein während des Flachnetzversuchs. Das Messdispositiv und die Flachnetze wurden am 12. November 2015 abends installiert. Nach einem 33-stündigen Schwall wurden die Netze am 14. November 2015 bei vollständigem Sunk geborgen. Zwischen den beiden Schwallspitzen herrschte am 13. November 2015 während mehrerer Stunden Sunk. Während dieser Phase fielen die Flachnetze teilweise kurzfristig trocken.

Die Strandungsdichten auf den einzelnen Flachnetzen streute deutlich zwischen 50 und 176 Individuen pro m². Die durchschnittliche Strandungsdichte betrug 88 Ind./m² (Bild 11). Über alle Versuche betrachtet, liegt die Strandungsdichte im Hinterrhein damit deutlich über dem Durchschnitt von 52 Ind./m².

4. Schlussfolgerungen

Im Rahmen des vorliegenden Pilotprojekts wurde die Flachnetzmethode in 14 Versuchen an insgesamt 10 verschiedenen schwallbeeinflussten Gewässern getestet und laufend optimiert. Die Methode

ven Prozess darstellt oder ob auch eine aktive Besiedelung der bei Schwall benetzten Flächen stattfindet (z. B. kurz vor der Emergenz oder während bestimmter Tageszeiten).

Das Schwall/Sunk-Verhältnis ($V_{S/S}$) korreliert positiv mit der Anzahl gestrandeter Organismen. Demnach könnte durch die Reduktion des $V_{S/S}$ das Strandungsrisiko für das Makrozoobenthos grundsätzlich gesenkt werden. Dies stellt einen wichtigen Ansatzpunkt für die Schwallsanierung dar. Die mittlere Länge der Tiere im ständig benetzten Bereich scheint ebenfalls das Strandungsrisiko mitzubeeinflussen, wobei dieser Parameter positiv mit der Strandungshäufigkeit korreliert ist. Je grösser die Wasserwirbellosen im ständig benetzten Bereich sind, desto mehr Tiere stranden demnach beim Schwallrückgang. Die weiteren Parameter wie Drift, IBCH, Schwall/Sunk-Amplitude, Distanz zur Sunklinie und Fliessstiefe über den Netzen haben dagegen eher einen schwachen Effekt auf die Strandungshäufigkeit (Tabelle 2).

Gesamthaft betrachtet werden

3.3 Wirkungsanalyse

In Tabelle 2 sind die Regressionskoeffizienten und die entsprechenden p-Werte des Regressionsmodells aufgeführt. Die aufgelisteten Parameter beeinflussen das Stranden von Wasserwirbellosen signifikant. Den stärksten Effekt hat dabei die vertikale Pegelrückgangsrate, welche im Zusammenhang mit dem Stranden von Jungfischen ebenfalls eine wichtige Rolle spielt. Entgegen den Erwartungen ist die Pegelrückgangsrate im vorliegenden Fall aber negativ mit der Anzahl gestrandeter Tiere korreliert. Das bedeutet, dass bei einem langsamen Schwallrückgang mehr Wasserwirbellose stranden als bei einem schnellen. Dieses Ergebnis deckt sich nicht mit dem Kenntnisstand, wonach ein langsamer Pegelrückgang das Strandungsrisiko minimiert. Die bisherigen Untersuchungen beschäftigten sich vorwiegend mit dem Stranden von Jungfischen. Inwiefern dies mit dem Stranden von Wasserwirbellosen vergleichbar ist, kann hier nicht beantwortet werden. Es stellt sich hier auch die Frage, ob das Stranden von Wasserwirbellosen gänzlich einen passi-

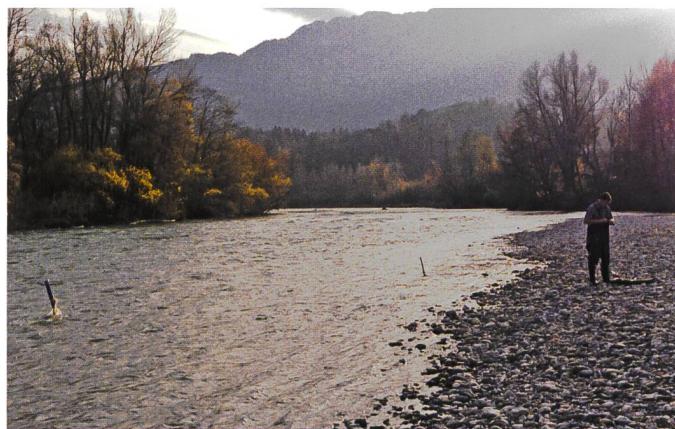
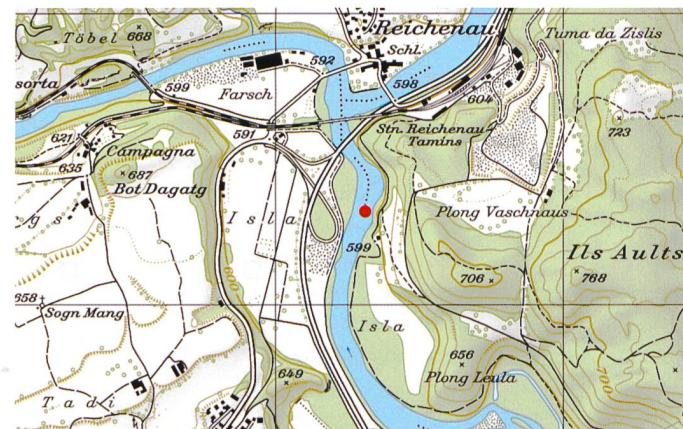


Bild 9. Untersuchungsabschnitt am Hinterrhein unterhalb von Bonaduz/GR (links: Foto bei ansteigendem Schwall mit Blick flussaufwärts, rechts: Übersichtskarte) (Quelle: swisstopo).



hat sich für die quantitative Erfassung von schwallverursachtem Strand von Wasserwirbellosen als gut geeignet erwiesen. In allen 14 Versuchen, welche ein breites Spektrum von verschiedenen Schwallstrecken und -regimes abdecken, konnte Strand in unterschiedlichem Ausmass nachgewiesen werden. Die mittlere Strandungsdichte lag zwischen 6 und 181 Individuen pro m^2 , die Proportion am Makrozoobenthos im ständig benetzten Bereich der Flussohle betrug im Durchschnitt 5 %, dies bei starker Streuung. Die *Chironomidae* (Zuckmücken) sind, über alle Versuche betrachtet, die am häufigsten strandende Gruppe, gefolgt von den Familien *Leuctridae* (Steinfliegen) und *Baetidae* (Eintagsfliegen). Die mittlere Länge der verdrifteten und gestrandeten Wasserwirbellosen war deutlich kleiner als bei den Organismen im ständig benetzten Bereich. Anhand der ähnlichen Dominanzverhältnisse und Körpergrössen kann von einem Zusammenhang zwischen Drift und Strand aus gegangen werden.

Die abiotischen Parameter, welche das Strand von massgeblich beeinflussen, sind gemäss statistischer Auswertung das Schwall/Sunk-Verhältnis und die Pegelrückgangsrate. Demnach steigt die Strandungsdichte mit zunehmendem Schwall/Sunk-Verhältnis ($V_{S/S}$) und mit abnehmender Pegelrückgangsrate. Letzteres widerspricht der gängigen Theorie und müsste eventuell durch weitere vergleichbare Versuche verifiziert werden.

Gesamthaft zeigt der Pilotversuch mit Flachnetzen, dass diese Methode eine wertvolle Ergänzung zu den bereits vorhandenen Untersuchungsmethoden im Zusammenhang mit der Schwallsanierung darstellt. Zugleich haben die Versuche auch diverse neue Fragen aufgeworfen, welche im Rahmen dieses Pilotprojekts aus Zeit- und Kostengründen noch nicht hinreichend geklärt werden konnten. Die bisherigen Ergebnisse können durch eine breite Anwendung der Flachnetzmethode noch ergänzt und sicher auch teilweise korrigiert werden.

5. Danksagung

Dieses Projekt wurde vom naturemade star-Fonds von ewz (Elektrizitätswerk der Stadt Zürich) finanziert. Wir bedanken uns herzlich beim Begleitgremium des Ökostromförderfonds von ewz für die Finanzierung und wohlwollende Unterstützung dieses Pilotprojekts. Wir danken auch Dr. Christoph Tellenbach (eawag) für die Unterstützung bei der statistischen Auswertung der Daten.

Eckwerte Hinterrhein	
Entfernung zur Wasserrückgabe (WRG)	6.2 km (bis zur nächstgelegenen WRG)
Mittlere Steilheit der Kiesbank	6 %
Dominierende Korngrössenfraktion auf der Kiesbank	6 - 20 cm (grössere mineralische Sedimente)
Mittlere Strömung bei Sunk (an Benetzungsgrenze)	70 cm/s (geschätzter Wert)
Mittlere Strömung über den Flachnetzen (bei Schwall)	68 cm/s
Mittlere Wassertiefe über den Flachnetzen (bei Schwall)	30 cm
Mittlere Breite der Wasserwechselzone	8.3 m
Trübung beim Schwallanstieg (gering/mittel/stark)	gering
Pegelanstiegsrate vertikal	1.8 cm/min
Pegelrückgangsrate vertikal	0.9 cm/min
Pegelanstiegsrate horizontal	32 cm/min
Pegelrückgangsrate horizontal	16 cm/min
Dauer des Schwalls	33 h
Schwall/Sunk-Verhältnis	7.5
Schwall/Sunk-Amplitude	52 m ³ /s

Tabelle 3. Eckwerte des Untersuchungsabschnitts Bonaduz am Hinterrhein.

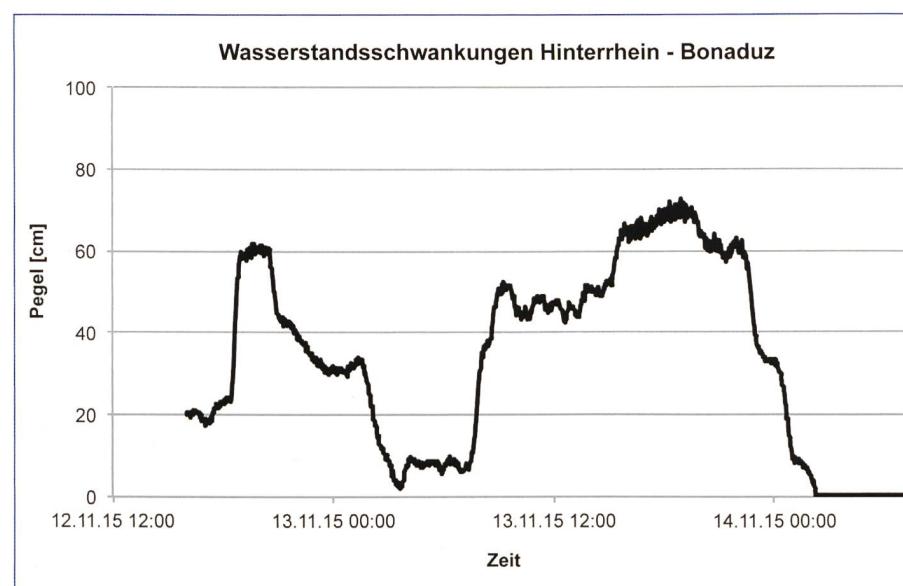


Bild 10. Wasserstandsschwankungen im Hinterrhein während des Flachnetzversuches (aufgezeichnet mit Drucksonde Orpheus Mini, Messintervall 1 Minute). Die Netze wurden am 12. November 2015 exponiert und nach einem 33-stündigen Schwall am 14. November 2015 wieder geborgen.

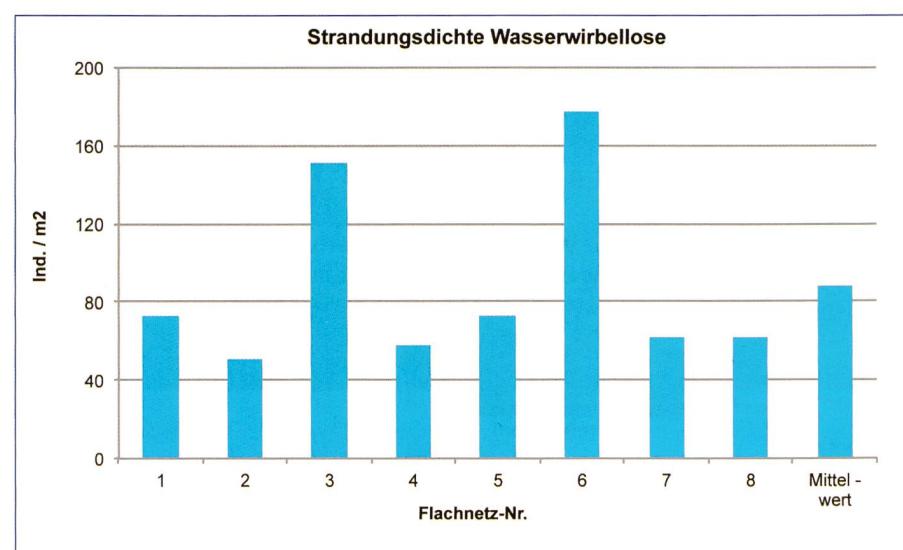


Bild 11. Strandungsdichte auf den einzelnen Flachnetzen am Hinterrhein.

Literatur

- Baumann, P., Kirchhofer, A., Schächli, U. 2012: Sanierung Schwall/Sunk – Strategische Planung. Ein Modul der Vollzugshilfe Renaturierung der Gewässer. Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Vollzug Nr. 1203: 126 S.
- Bruder, A. 2012: Bewertung von Massnahmen zur Beseitigung wesentlicher Beeinträchtigungen durch Schwall und Sunk. Grundlagen für den Vollzug. Bericht der EAWAG, 92 S.
- Bruno, M.C., Maiolini, B., Caronni, M., Silveri, L. 2010: Short time-scale impacts of hydro-peaking on benthic invertebrates in an alpine stream (Trentino, Italy). Limnologica 40 (2010): 281–290.
- Elliott, J.M. 1967: Invertebrate drift in a Dartmoor stream. Arch. Hydrobiol. 63:202–237.
- Halleraker, J. H., Saltveit, S. J., Harby, A., Arnekleiv, J. V., Fjeldstad, H.-P., Kohler, B. 2003: Factors influencing stranding of wild juvenile brown trout (*Salmo trutta*) during rapid and frequent flow decreases in an artificial stream. River Res. Applic. 19, 589–603.
- Kroger, R. L. 1973: Biological Effects of Fluctuating Water Levels in the Snake River, Grand Teton National Park, Wyoming. The American Midland Naturalist 89 (2), 478–482.
- Limnex AG, 2009: Schwall/Sunk in der Haslarena. Bericht im Auftrag der Kraftwerke Oberhasli AG, 40S. + Anhang.
- Meile, T., Fette, M., Baumann, P. 2005: Synthesebericht Schwall/Sunk. Publikation des Rhone-Thur-Projektes von EAWAG, WSL, LCH-EPFL, Limnex AG.
- Pfaundler M. et al. 2011: Methoden zur Untersuchung und Beurteilung der Fließgewässer. Hydrologie – Abflussregime Stufe F (flächendeckend). Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Vollzug Nr. 1107: 113 S.
- R Core Team, 2013: R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <http://www.R-project.org/>.
- Perry, S. A., Perry, W. 1986: Effects of experimental flow regulation on invertebrate drift and stranding in the Flathead and Kootenai Rivers, Montana, USA. Hydrobiologia 134 (2), 171–182.
- Saltveit, S. J., Halleraker, J. H., Arnekleiv, J. V., Harby, A. 2001: Field experiments on stranding in juvenile atlantic salmon (*Salmo salar*) and brown trout (*Salmo trutta*) during rapid flow decreases caused by hydropeaking. Regul. Rivers: Res. Mgmt. 17: 609–622.
- Stucki, P. 2010: Methoden zur Untersuchung und Beurteilung der Fließgewässer. Makrozoobenthos Stufe F. Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Vollzug Nr. 1026: 61 S.
- Uhlmann, V. 2001: Die Uferzönosen in natürlichen und regulierten Flussabschnitten. Diplomarbeit an der EAWAG, Dübendorf.

Anschrift der Verfasser:

Kurt Wächter, David Tanno,
Stephanie Schmidlin
Limnex AG, Neumarktplatz 18
CH-5200 Brugg, info@limnex.ch



**Werden Sie Mitglied
beim Schweizerischen
Wasserwirtschaftsverband**

**Abonnieren Sie unsere
Fachzeitschrift
«Wasser Energie Luft»**

**Bestellen Sie unsere
Verbandsschriften**

**Näheres finden Sie unter:
www.swv.ch**

Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
Association suisse pour l'aménagement des eaux
Associazione svizzera di economia delle acque