



© TiWiAG - Tiroler Wasserkraft AG / Foto: dionysproject.at

Schwallforschung auf unterschiedlichen Ebenen: Vom Einzugsgebiet zur Kiesbank

Wasserkraftwerke, die bedarfsabhängig betrieben werden, führen zu schnellen und häufigen Abflussschwankungen (Schwall und Sunk), welche flussabwärts gelegene Ökosysteme negativ beeinträchtigen. Dieser Artikel fasst aktuelle Forschungserkenntnisse über dessen Auswirkungen auf verschiedenen räumlichen Ebenen, von großen Flusseinzugsgebieten bis hin zur Kiesbankebene, zusammen. Feld-, Labor- und Modellierungsansätze werden integriert, um zielgerichtete Sanierungsmaßnahmen für ein nachhaltiges Gewässermanagement aufzuzeigen.

Daniel S. Hayes

1 Einleitung

Speicherwasserkraftwerke sind ein unverzichtbarer Baustein moderner, klimaneutraler Energiesysteme. Allerdings verursacht der bedarfsorientierte Betrieb dieser Kraftwerke schnelle und häufige Abflussschwankungen (Schwall und Sunk) [1], [2], welche eine erhebliche Belastung für Flussökosysteme darstellen, indem sie aquatische Organismen wie Fische gefährden und die ökologische Integrität von Flüssen beeinträchtigen [3]. Diese Schwankungen, u. a. verursacht durch die Kopplung von Speicherkraftwerken an volatile Energiequellen, wie Solar- und

Windkraft, sind ein zunehmendes Problem. Schwall und Sunk dient oft dazu, die Schwankungen der erneuerbaren Energien auszugleichen, um die Netzstabilität zu gewährleisten und den Spitzenbedarf im Stromnetz zu decken [4]. In der Europäischen Union machen Speicher- und Pumpspeicherkraftwerke den größten Anteil der installierten Wasserkraftleistung aus und sind somit wesentliche Komponenten des europäischen Energiemarkts [5].

Schwall und Sunk, in der englischen Fachliteratur Hydropeak-ing genannt, wurde erstmals in den 1930er-Jahren in Europa dokumentiert und ist seither eine weltweit verbreitete Technologie.

Kompakt

- Forschungsansätze auf unterschiedlichen räumlichen Ebenen sind notwendig, um ökologische Prozesse besser zu verstehen.
- Die Integration von Feld-, Labor- und Modellierungsansätzen bietet eine solide Basis für die evidenzbasierte Schwallisanierung.

Während erste Studien dazu seit Mitte des 20. Jahrhunderts durchgeführt wurden, stieg die wissenschaftliche Auseinandersetzung mit diesem Thema erst ab den 1990er-Jahren signifikant an. Insbesondere seit 2012 nimmt die Zahl der Veröffentlichungen stetig zu, was das wachsende Interesse an diesem Bereich widerspiegelt (**Bild 1**), insbesondere in Europa und Nordamerika (**Bild 2**).

Die Auswirkungen von Schwall und Sunk auf Fischpopulationen sind zunehmend besorgniserregend [3], insbesondere die Verdriftung flussabwärts und das Stranden von Jungfischen [4], [6]. Feldstudien bieten wichtige Einblicke in diese Prozesse in der natürlichen Umgebung, jedoch sind sie oft schwer zu quantifizieren. Versuche in Fließrinnen ermöglichen es, unter kontrollierten Bedingungen Reaktionen von Individuen auf verschiedene Einflussparameter zu untersuchen. Analysen von großräumigen Freilanduntersuchungen hingegen erlauben es, zusätzliche Stressfaktoren wie Flussregulierungen auf der Populationsebene zu bewerten (**Bild 3**). Die Kombination aus großräumigen Datenanalysen, Feldstudien und experimentellen Ansätzen ermöglicht Rückkopplungsschleifen zwischen den Bewertungsebenen und stellt sicher, dass die Ergebnisse fundierte Schlussfolgerungen zulassen.

Dieser Artikel fasst neue Ergebnisse fischökologischer Studien auf diesen drei räumlichen Ebenen [7] zusammen und integriert somit Wissen von Flusseinzugsgebieten bis hin zur Kiesbankebene. Diese Erkenntnisse werden in den Kontext der Schwallisanierung gestellt, indem Möglichkeiten zur Überbrückung der Schnittstelle zwischen Wissenschaft, Management und Politik aufgezeigt werden. Abschließend weist der Aufsatz auf dringende Forschungsfragen hin, insbesondere betreffend wiederkehrender Schwallereignisse.

2 Ökohydrologische Studien auf verschiedenen räumlichen Ebenen

2.1 Großräumige Analysen

Großräumige Analysen setzen Schwall und Sunk in den Kontext anderer menschlicher Eingriffe, wie Dämme und flussmorphologische Begradigungen [3]. Neue Analysen österreichischer Befischungsstellen zeigten, dass das Verbreitungsgebiet von Wanderfischarten, wie der Nase (*Chondrostoma nasus*) und der Barbe (*Barbus barbus*), gegenüber der Verbreitung gemäß Leitbild

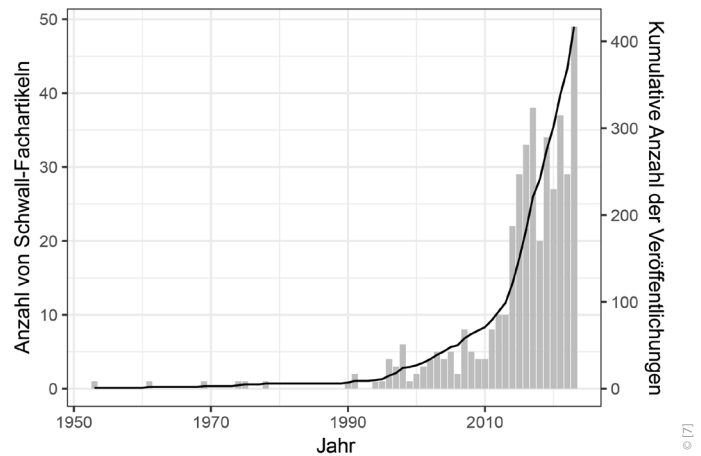


Bild 1: Anzahl wissenschaftlicher Veröffentlichungen pro Jahr zum Thema Schwall und Sunk (Scopus-Suche am 16. Oktober 2023 mit den Begriffen „hydropeaking“ oder „hydro-peaking“ oder „flow ramping“ oder „éclusées“ oder „Schwall-Sunk“, ausgenommen irrelevante Fachgebiete)

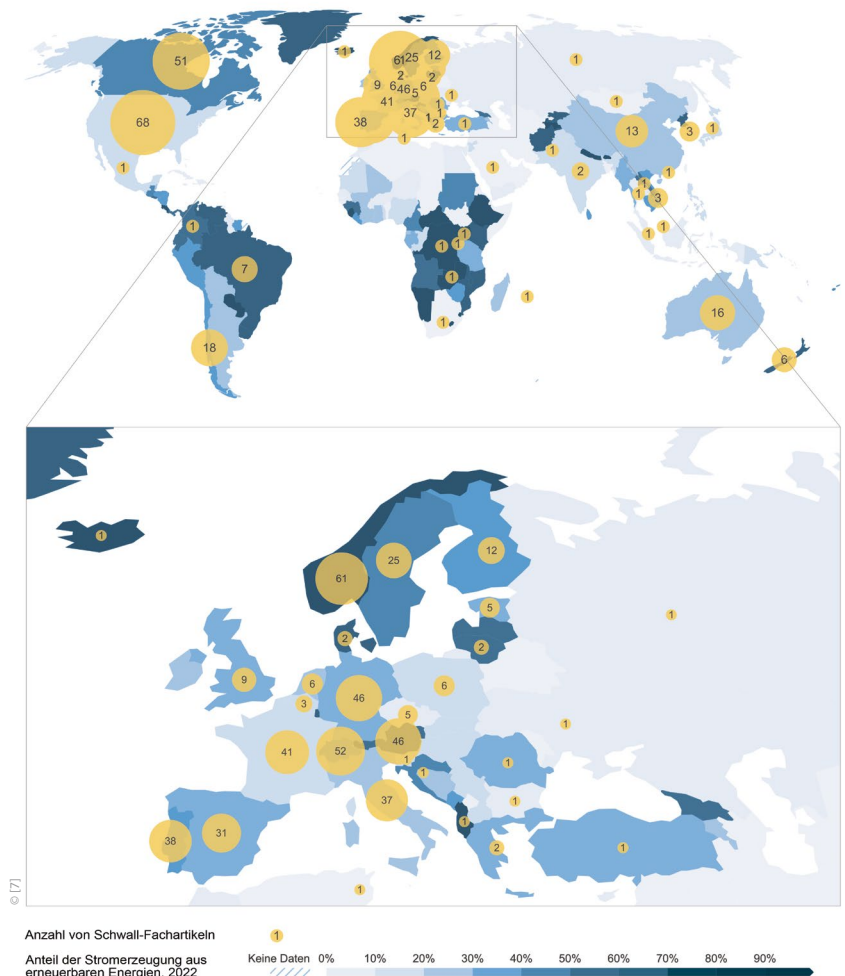


Bild 2: Schwallstudien in der wissenschaftlichen Literatur weltweit (oben) und für Europa (unten), basierend auf den Ländern der Zugehörigkeit der Autoren (Bild 1 für Details zu den verwendeten Suchbegriffen)

erheblich reduziert wurde [6]. Aber auch der Aitel (*Squalius cephalus*), eine euryöke Art, ist davon betroffen.

In Bezug auf Flussabschnitte mit unterschiedlichen hydromorphologischen Bedingungen zeigte sich, dass die Biomasse dieser drei cyprinidenartigen Fische in Stauen und vor allem in Schwallstrecken im Vergleich zu freifließenden Abschnitten und Restwasserstrecken deutlich reduziert ist [6]. In Flussabschnitten, die von anthropogenen Pegelschwankungen betroffen sind, ist auch die Biomasse der Äsche (*Thymallus thymallus*) rund acht Mal geringer als in hydrologisch kaum beeinflussten Kontrollabschnitten [8]. Detaillierte Analysen multipler Stressoren zeigten, dass die Intensität von Sunkereignissen (d. h. vertikale Abstiegsrate und Amplitude) Hauptursache für die starke Beeinträchtigung der Äschenpopulation ist [8]. Diese Bedingungen erschweren nicht nur die Fortpflanzung, sondern führen auch zu einer erhöhten Mortalität, vor allem von juvenilen Lebensstadien [4]. Die nachgewiesenen Wechselwirkungen von Schwall und Sunk mit Morphologie und Konnektivität unterstreichen, dass Maßnahmen zur Flussrenaturierung nur dann erfolgreich sind, wenn gleichzeitig die Intensität des Schwallbetriebs reduziert wird [8].

2.2 Feldstudien auf der Kiesbankebene

Schwall und Sunk führt zu einem häufigen Trockenfallen von Uferhabitaten, wodurch insbesondere für Jungfische ein hohes Strandrungsrisiko entsteht [2], [6]. Dieses Risiko hängt jedoch von mehreren Faktoren ab, darunter Fischgröße, Kiesbankneigung, Sedimentgröße sowie Sunkgeschwindigkeit [4], [8].

Eine Studie kombinierte Strandrungsbeobachtungen von Jungäschen an der Drau mit hydrodynamischen Modellen, um die Zusammenhänge zwischen hydraulischen Parametern und dem Stranden zu untersuchen [9]. Die Felduntersuchungen dokumentierten 50 bis 500 gestrandete Fische pro 100 m Uferlänge, mit einem Median von 90. Während nächtlicher Sunkereignisse strandeten dreimal so viele Äschen wie tagsüber. Die laterale Abstiegsrate hatte einen größeren Einfluss auf die Fischstrandung als die vertikale Sunkgeschwindigkeit, vermutlich da erstere die Kiesbankmorphologie integriert. Zudem zeigte sich eine negative Korrelation zwischen der Fläche der trockenfallenden Uferbereiche und des Sunkabflusses: Je niedriger der Sunkabfluss ist, desto größer ist das Strandrungsrisiko [9]. Diese Ergebnisse unterstreichen die Notwendigkeit maßgeschneiderter Sanierungsmaßnahmen, welche die lokale Flussmorphologie und den (Restwasser-) Basisabfluss berücksichtigen.

2.3 Experimentelle Ansätze mit Jungfischen

Schwallversuche in naturnahen Versuchsrinnen, wie der einzigartigen HyTEC-Anlage (<https://hydropeaking.boku.ac.at>), bieten die Möglichkeit, die direkten Auswirkungen von Sunkereignissen auf Fische unter realitätsnahen Bedingungen zu untersuchen. Frühere Schwallstudien konzentrierten sich hauptsächlich auf Salmoniden, doch für Cypriniden, wie der Nase und Barbe, fehlten bisher vergleichbare Untersuchungen [8].

Strandung von Cyprinidenlarven

Neue Studienergebnisse [6] zeigen, dass auch Nase und Barbe nachts eine höhere Strandung als tagsüber aufweisen. Fischlarven sind bei flachen Ufern einem erhöhten Strandrungsrisiko als bei steileren ausgesetzt. Die Versuche belegen eine deutliche Abnahme des Strandrungsrisikos mit zunehmender Fischlänge. Bei heterogenen Kiesbankstrukturen, etwa Ufer mit Gräben, können jedoch noch größere Fische einem signifikanten Strandrungsrisiko ausgesetzt sein, da die Fische in solchen Strukturen gefangen werden können - und dies vor allem nachts [6]. Die Ergebnisse verdeutlichen, dass eine (nächtliche) Schwallreduktion in den ersten Wochen nach Emergenz dazu beitragen kann, Fischpopulationen zu schützen.

Die Auswirkung der Abstiegsrate ist bei Cypriniden weniger stark ausgeprägt als bei Salmoniden. Schnellere Abstiegsraten erhöhen dennoch das Strandrungsrisiko, insbesondere nachts und auf flachen Uferbereichen. Überraschenderweise war die Sunkgeschwindigkeit jedoch nicht der alleinige entscheidende Faktor, sondern interagierte mit anderen Parametern, wie Uferneigung und Tageszeit [6].

Wassertemperatur

Zusätzlich wurde bei diesen Untersuchungen festgestellt, dass die Wassertemperatur eine bedeutende Rolle spielt: Nasenlarven waren bei kälteren Bedingungen kleiner und somit strandungsanfälliger als bei wärmeren Wassertemperaturen [6].

In Bezug auf kurzfristige Wassertemperaturänderungen durch Schwallbetrieb (engl. Thermopeaking), ein bis dato wenig untersuchtes Thema [10], zeigten zwei experimentelle Studien, dass Jungfische bei Kaltschwallen häufiger verdriften und stranden als bei Warmschwallen [11] oder reinem Schwall-Sunk-Betrieb [6]. Besonders auffällig war, dass die Fische bei Abnahme der Wassertemperatur sich näher am Ufer aufhielten, was zu einem erhöhten Strandrungsrisiko führte.

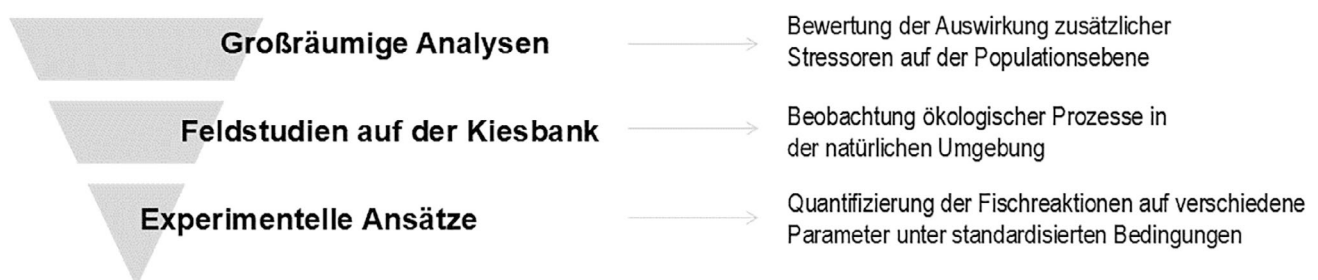


Bild 3: Drei unterschiedliche räumliche Ebenen, auf denen die Effekte von Schwall und Sunk auf Gewässerökosysteme untersucht werden, inkl. der methodischen Vorteile, die jeder Ebene zugrunde liegen

Diese ersten Erkenntnisse zeigen, dass Temperaturveränderungen das Fischverhalten wesentlich beeinflussen können. Zeitgleich betonen sie die Notwendigkeit, die Wassertemperatur in Schwall-Sanierungsansätze zu integrieren.

3 Schwall-Sunk-Sanierung

3.1 Überbrückung der Schnittstelle zwischen Wissenschaft, Management und Politik

Es besteht allgemeiner Konsens darüber, dass der Schutz der Biodiversität effektiver werden muss [12]. Der Austausch zwischen Wissenschaft und Praxis ist jedoch oft unzureichend. Wissenschaftliche Erkenntnisse fließen selten in konkrete Naturschutzmaßnahmen ein, während die Bedürfnisse der Praxis von Wissenschaftlern oft übersehen werden [12]. Die EU-Biodiversitätsstrategie 2030 zielt jedoch darauf ab, die Lücke zwischen Wissenschaft, Politik und Praxis zu schließen.

Interdisziplinäre Netzwerke können eine zentrale Rolle in der Überbrückung dieser Schnittstelle spielen. Das im Jahr 2020 gegründete HyPeak-Netzwerk [1] etwa fördert den Austausch zwischen Forschern, Praktikern und Interessengruppen, um zu nachhaltigen Ansätzen im Schwall-Management beizutragen. Das Netzwerk fördert den Wissenstransfer durch Webinare und bietet eine Plattform für den internationalen Erfahrungsaustausch.

Eine erfolgreiche Schwallsanierung benötigt evidenzbasierte, holistische Ansätze. Review-Arbeiten, die den aktuellen Stand des Wissens zusammenfassen und Best-Practice-Maßnahmen kommunizieren, sind hierfür von Bedeutung. Aus fischökologischer Sicht können etwa saisonale, lebenszyklusabhängige Sanierungsansätze [8], wie das „Larvenfenster“, eine Zeit, wo frisch emergierte Fischlarven durch deutlich reduzierte Schwallintensitäten geschützt werden, zielführend sein.

3.2 Ausblick

Viele Studien, die in den letzten Jahrzehnten veröffentlicht wurden (**Bild 1**) liefern wichtige Erkenntnisse für die laufende Schwallsanierung. Nichtsdestotrotz gibt es noch Forschungsbedarf, unter anderem im Global Süden und Asien (**Bild 2**).

100 zentrale Forschungsfragen

Ein großes Forscherteam identifizierte jüngst 100 wesentliche Forschungsfragen [10], deren Beantwortung die evidenzbasierte Schwallsanierung vorwärtsbringen sollen. Diese prioritären Fragen decken Bereiche, wie Hydrologie, Sedimentdynamik, Ökologie, Energiewirtschaft und Managementmaßnahmen, ab.

Wichtige Themen sind die Auswirkungen von Schwall und Sunk auf Organismen, Lebenszyklen und Lebensräume, inklusive der Identifizierung von spezifischen Schwellenwerte in Bezug auf Schwall und der Wassertemperatur für unterschiedliche Arten und Lebensstadien. Auch der Einfluss klimatischer

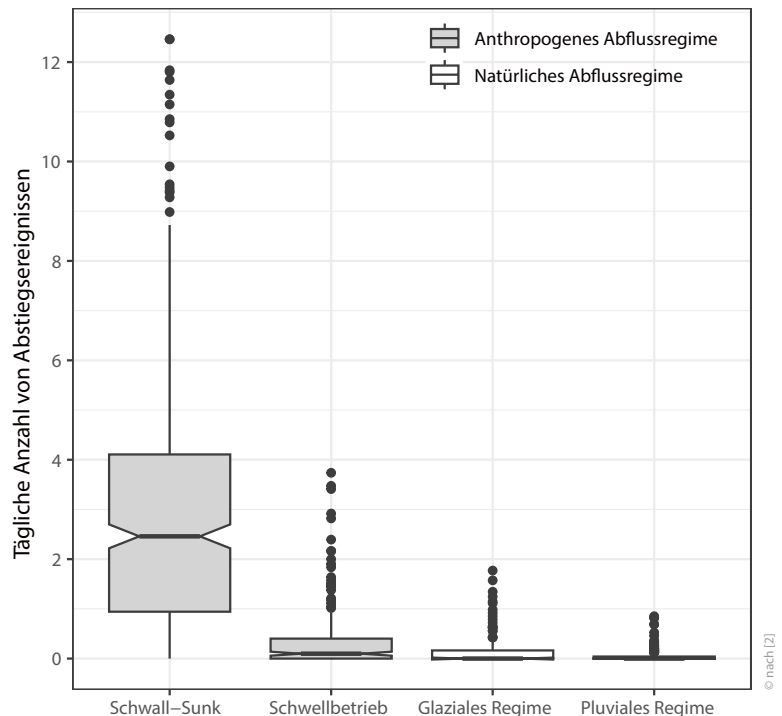


Bild 4: Tägliche Anzahl von Abstiegsereignissen an anthropogenen und natürlichen Pegeln an ausgewählten Standorten in Österreich und der Schweiz: Schwall und Sunk ($n = 36$); Schwellbetrieb (Stauketten bzw. Laufkraftwerke, $n = 21$); glaziales Regime ($n = 15$); pluviales Regime ($n = 36$); für jeden Pegel liegen zwölf Werte vor (jeweils ein Wert pro Monat)

Veränderungen und invasiver Arten soll thematisiert werden [10]. Fortschritte in der Fern- und Nahbereichserkundung sowie KI-gestützte Modellierungen können eine entscheidende Rolle bei der Beantwortung einiger Forschungsfragen spielen. Die Studie fordert die Entwicklung von Managementansätzen und Kosten-Nutzen-Werkzeugen, um die Wirkung von Schwall-dämpfungsmaßnahmen und deren gesellschaftliche Akzeptanz vorherzusagen. Zudem wird der Bedarf an interdisziplinären Forschungsprojekten und Managementstrategien betont, insbesondere angesichts des zunehmenden Baus von Wasserkraftanlagen inmitten der Biodiversitätskrise.

Wiederkehrende Schwallereignisse

Ein Thema höchster Priorität ist der Einfluss von Mehrfachschwallen auf aquatische Ökosysteme. Bis dato fokussierte sich die (experimentelle) Schwallforschung auf die Auswirkungen von einzelnen Schwallereignissen. In alpinen Schwallgewässern treten künstliche Abflussschwankungen jedoch durchschnittlich drei Mal täglich auf (**Bild 4**), was zu kumulativen Effekten auf der Populationsebene führen kann [2]. Daher sind Studien zu aufeinanderfolgenden Ereignissen besonders relevant, um die Mechanismen wiederkehrender Schwall-Sunk-Ereignisse auf Fische und andere Organismen besser zu verstehen. Dazu zählen auch Untersuchungen zum Erinnerungsvermögen von Gewässerlebewesen. Neue Projekte sind notwendig, um diese Effekte zu erforschen und ökologische Grenzwerte für Mehrfachschwallen zu definieren [2], [6], [10].

4 Résumé

Obwohl Schwall und Sunk für die Stromnetzstabilität derzeit unverzichtbar ist, erfordern seine ökologischen Auswirkungen dringende Sanierungsmaßnahmen [4], [8]. Es bedarf eines tieferen Verständnisses der ökologischen Effekte und anderer anthropogener Stressoren, um fundierte Ansätze zur Minderung der künstlichen Abflussschwankungen zu entwickeln [10]. Diese Sanierungsansätze müssen sowohl ökologische als auch sozio-ökonomische Interessen berücksichtigen und in umfassende Flussgebietsmanagementstrategien integriert werden.

Vorliegende Studie fasst neue Erkenntnisse von fischökologischen Studien auf drei verschiedenen räumlichen Ebenen und unterschiedlichen methodischen Herangehensweisen zusammen: großräumige Analysen, Feldstudien auf der Kiesbankebene und experimentelle Ansätze (**Bild 3**). Die Ergebnissynthese dieser Bewertungsebenen erlaubt fundierte Schlussfolgerungen und stellt einen wichtigen Erkenntnisgewinn in der Schwall und Sunk Forschung dar.

Dank

Diese Arbeit wurde ganz oder teilweise durch den Österreichischen Wissenschaftsfonds (FWF) [P 34 061-B] und das Forschungs- und Innovationsprogramm Horizon 2020 der Europäischen Union [101 022 905] gefördert. Herzlichen Dank an Justine Carey für ihre Hilfe bei der Gestaltung von **Bild 2** sowie an Stefan Schmutz für seine wertvollen Kommentare und Anregungen zum Entwurf dieses Manuskripts und meiner Habilitationsschrift, auf der dieser Artikel basiert.

Autor

Dr. Daniel S. Hayes

Institut für Hydrobiologie und Gewässermanagement
Department für Ökosystemmanagement, Klima und Biodiversität
Universität für Bodenkultur Wien
Gregor-Mendel-Straße 33
1180 Wien, Österreich
daniel.hayes@boku.ac.at

Literatur

- [1] Alp, M.; Batalla, R. J.; Bejarano, M. D. et al.: Introducing HyPeak: An International Network on Hydropeaking Research, Practice, and Policy. In: *River Research and Applications* 39 (2023), S. 283-291 (doi.org/10.1002/rra.3996).
- [2] Hayes, D. S.; Bätz, N.; Tonolla, D. et al.: Why Hydropeaking Frequency Matters: Effects of Recurring Stranding on Fish. In: *Journal of Eco-hydraulics*, 2024 (doi.org/10.1080/24705357.2024.2426820).
- [3] Schmutz, S.; Bakken, T. H.; Friedrich, T. et al.: Response of Fish Communities to Hydrological and Morphological Alterations in Hydropeaking Rivers of Austria. In: *River Research and Applications* 31 (2015), S. 919-930 (doi.org/10.1002/rra.2795).
- [4] Hayes, D. S.; Schülting, L.; Carolli, M. et al.: Hydropeaking: Processes, Effects, and Mitigation. In: *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences* (2022) (doi.org/10.1016/B978-0-12-819166-8.00171-7).
- [5] Quaranta, E.; Georgakaki, A.; Letout, S. et al.: Hydropower and Pumped Hydropower Storage in the European Union. 2022 Status Report on Technology Development, Trends, Value Chains and Markets. 2022.
- [6] Hayes, D. S.; Auer, S.; Schmutz, S. et al.: Auswirkungen von Schwall-Sunk auf Nase (*Chondrostoma Nasus*) und Barbe (*Barbus Barbus*): Ein Analyseansatz auf zwei Ebenen mit Fokus auf Larvenstrandung. In: *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft* (2024) (doi.org/10.1007/s00506-024-01082-z).
- [7] Hayes, D. S.: Flow-Ecology Relationships under Fluctuating River Flows: A Multi-Scale Approach to Study Hydropeaking Processes, Impacts and Mitigation in Integrated River Basin Management. Habilitation an der Universität für Bodenkultur, Wien, 2024.
- [8] Hayes, D. S.: Restoring Flows in Modified Rivers. Dissertation an der Universität Lisabon, 2021.
- [9] Hayes, D. S.; Hauer, C.; Unfer, G.: Fish Stranding in Relation to River Bar Morphology and Baseflow Magnitude: Combining Field Surveys and Hydrodynamic-Numerical Modeling. In: *Ecohydrology* 17 (2024), e2616 (doi.org/10.1002/eco.2616).
- [10] Hayes, D. S.; Bruno, M. C.; Alp, M. et al.: 100 Key Questions to Guide Hydropeaking Research and Policy. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 187 (2023), 113 729 (doi.org/10.1016/j.rser.2023.113729).
- [11] Auer, S.; Hayes, D. S.; Führer, S.; Zeiringer, B.; Schmutz, S.: Effects of Cold and Warm Thermoepiking on Drift and Stranding of Juvenile European Grayling (*Thymallus Thymallus*). In: *River Research and Applications* 39 (2023), S. 401-411 (doi.org/10.1002/rra.4077).
- [12] Farwig, N.; Ammer, C.; Annighöfer, P. et al.: Bridging Science and Practice in Conservation: Deficits and Challenges from a Research Perspective. In: *Basic and Applied Ecology* 24 (2017), S. 1-8 (doi.org/10.1016/j.baae.2017.08.007).

DOI dieses Beitrags: <http://doi.org/10.1007/s35147-025-2513-2>



Schwallsanierung



Schweizer, S. et al.: Schwall-Sunk-Sanierung: Strandrungsversuche mit Forellenlarven aus natürlicher Reproduktion und Empfehlungen für die Planung von Sanierungsmaßnahmen. In: *WasserWirtschaft*, Ausgabe 1/2025. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2025.
<https://sn.pub/iyfb4j>

Daniel S. Hayes

Hydropeaking research at different spatial levels: from the watershed to the gravel bar

Hydropower plants operated on demand cause rapid and frequent flow fluctuations (hydropeaking), which negatively impact downstream ecosystems. However, an improved understanding of the ecological effects of hydropeaking and confounding riverine stressors is needed to provide benchmark knowledge to mitigate impacts of hydropeaking. To this aim, multi-scale approaches are needed to better understand ecological processes. This article synthesizes key advances in our understanding of flow-ecology relationships in hydropeaked rivers at the national and the river bar scale, integrating data-driven, field, and experimental approaches, all targeting fish as an ecological indicator. These findings are placed in the context of hydropeaking mitigation by highlighting ways to bridge the gap between science, management, and policy. The article also points to urgent research questions, particularly regarding recurring hydropeaking events.