Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria
Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
Band: 94 (2002)
Heft: 11-12

Artikel: Trübung und Schwall im Alpenrhein
Autor: Baumann, Peter / Schälchli, Ueli
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-939665

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: 10.07.2025

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

Trübung und Schwall im Alpenrhein

Peter Baumann, Ueli Schälchli

Als Schwallbetrieb wird das intermittierende Turbinieren von gespeichertem Wasser bezeichnet, wie es in der Schweiz vor allem zur bedarfsgerechten Stromerzeugung in hydroelektrischen Mittel- und Hochdruckanlagen (Speicherkraftwerke) verbreitet ist. In den unterliegenden Fliessgewässern tritt in der Folge ein regelmässiger, oft täglicher bzw. werktäglicher Wechsel zwischen hoher (Schwall) und tiefer Wasserführung (Sunk) auf. Es wird davon ausgegangen, dass von den insgesamt rund 500 schweizerischen Zentralen mit installierter Leistung > 300 kW schätzungsweise 25% derartige Abflussschwankungen erzeugen oder dazu beitragen. Ein Grossteil der schwallbeeinflussten Strecken entfällt auf die grossen Haupttalflüsse oder auf ihre grösseren, direkten Zuflüsse (Limnex, 2001).

In den USA und in verschiedenen europäischen Ländern, darunter Österreich und Frankreich, werden die Auswirkungen des Schwallbetriebes auf den Lebensraum und die Lebensgemeinschaft in Fliessgewässern schon seit längerem intensiv untersucht (z.B. Jungwirth et al., 1990; Moog, 1993; Lauters, 1995; Valentin, 1997). In der Schweiz sind bisher an ungefähr zehn Bächen und Flüssen entsprechende Arbeiten durchgeführt worden oder noch im Gange. In jüngerer Zeit sind vor allem die grossen Gebirgsflüsse Reuss (seit 1996), Alpenrhein (seit 1997) und Rhone (seit 2000) zum Gegenstand grossangelegter, teilweise interdisziplinärer Untersuchungs- und Forschungsprojekte geworden.

Der vorliegende Artikel fasst die wesentlichen Resultate und Schlussfolgerungen des Projektes «Trübung und Schwall im Alpenrhein» zusammen, das von 1998 bis 2001 im Auftrag der Internationalen Regierungskommission Alpenrhein (IRKA) durchgeführt worden ist. Es handelte sich dabei um ein Teilprojekt innerhalb des Aktionsprogrammes «Alpenrhein 2000+» (IRKA, 2001).

1. Einleitung

Als Alpenrhein wird der Oberlauf des Rheins zwischen dem Zusammenfluss von Vorder- und Hinterrhein bei Reichenau (Nullpunkt der Fluss-Kilometrierung) und der Mündung in den Bodensee (Fluss-km 90) bezeichnet. Schon 1989/90 wurden anlässlich einer Umweltverträglichkeits-Untersuchung in diesem Flusslauf ausserordentlich geringe Bestände von Fischen und wirbellosen Organismen (Makroinvertebraten) festgestellt (BOKU, 1991). Als mögliche Ursachen für diese schwache tierische Besiedlung wurden vor allem die Kanalisierung und der Schwallbetrieb hervorgehoben. Eberstaller et al. (1997) haben in der Folge darauf hingewiesen, dass es im Alpenrhein besonders während des Winters zu einer schwallbedingten Erhöhung der Schwebstofffracht und der Trübung kommt. Sie haben weiter vermutet, dass die damit verbundene, verstärkte Kolmation des Schotterlückenraumes (Interstitial) massgeblich zu einer verminderten ökologischen Funktionsfähigkeit der Gewässersohle (und damit des ganzen Gewässers) beiträgt.

Aufgrund dieser Befunde beauftragte die Projektgruppe Gewässer- und Fischökologie der IRKA eine Arbeitsgemeinschaft (Arge Trübung Alpenrhein) mit einer umfassenden Untersuchung zum Einfluss der Schwall- und Trübeverhältnisse auf Sohlsubstrat, Benthos und Fische im Alpenrhein. Dieses Projekt hatte zum Ziel,

- die Ursachen für den geringen Benthos- und Fischbestand besser zu verstehen,
- Randbedingungen für anthropogene Aktivitäten zu formulieren, welche den Abfluss und die Trübung des Alpenrheins beeinflussen, sowie
- Stossrichtungen für Revitalisierungsmassnahmen herzuleiten, die zu einer morphologischen und biologischen Aufwertung des Alpenrheins führen.

In der Arge Trübung Alpenrhein waren vier Partner zusammengeschlossen, die verschiedene, sich ergänzende Fachbereiche bearbeiteten:

- Schälchli, Abegg & Hunzinger, Zürich (Co-Projektleitung, Fachbereich Trübung, Strömung, Geschiebetrieb, Kolmation);
- Limnex AG, Zürich (Co-Projektleitung, Fachbereich Trübung, Licht, Bewuchs, Drift);
- Arge Limnologie, Innsbruck (Fachbereich Phyto- und Makrozoobenthos);
- Universität für Bodenkultur (BOKU), Wien (Fachbereich Fischökologie).

Das Gesamtprojekt gliederte sich in einen physikalischen Teil (Kapitel 3) und einen biologischen Teil (Kapitel 4), die jeweils verschiedene Fragestellungen aus den einzelnen Fachbereichen umfassten. Die Felduntersuchungen am Alpenrhein konzentrierten sich auf die Hochwinterperioden 1998/99 und 1999/2000. Letzte Messungen wurden im Winter 2000/01 durchgeführt.

Die Untersuchungen wurden zuerst innerhalb jedes Fachbereiches ausgewertet und in je einem ausführlichen Fachbericht dargestellt. Im Rahmen eines gemeinsamen Workshops wurden die Befunde ausserdem fachübergreifend besprochen und miteinander verknüpft. Die wesentlichen Resultate und Schlussfolgerungen der einzelnen Fachbereiche sowie deren Synthese zu einer Gesamtschau wurden schliesslich in einem separaten Bericht zusammengefasst. Diese Kurzfassung kann bei der Projektgruppe Gewässer- und Fischökologie der IRKA bezogen werden.[1]

2. Die Teststrecken

Die Untersuchungen am Alpenrhein wurden grossenteils in vier Teststrecken durchgeführt, die jeweils einen typischen morphologischen Flussabschnitt repräsentieren (Bilder 1 bis 3):

- Mastrils: Unverbaute, verzweigte Strecke der Mastrilser Rheinauen (Fluss-km 19,8 –23,7), repräsentativ für zukünftige Aufweitungen;
- Bad Ragaz: Kanalisierte Erosionsstrecke mit Schrägbänken (Fluss-km 25,0–27,8), repräsentativ für den Abschnitt Landquart bis Ellhorn;
- Buchs/Schaan: Kanalisierte Auflandungsstrecke mit alternierenden Bänken (Fluss-km 49,6–52,0), repräsentativ für den Abschnitt Ellhorn bis Illmündung;
- Diepoldsau/Mäder: kanalisierte, durch das Fehlen von morphologischen Strukturen stark naturfremde Strecke (km 73,0 –78,0), repräsentativ für die Internationale Rheinstrecke (Illmündung bis Bodensee).

Andere Aufnahmen gingen, der Fragestellung gemäss, über die Teststrecken hinaus und erstreckten sich auf das ganze Einzugsgebiet oder auf die ganze Fliessstrecke zwischen Reichenau und dem Bodensee.

Der gesamte Alpenrhein und damit auch die vier Teststrecken sind im Winter-

[1] Amt für Umweltschutz des Fürstentums Liechtenstein, Postfach, FL-9490 Vaduz. Telefon 00423 236 61 91 (Sekretariat).

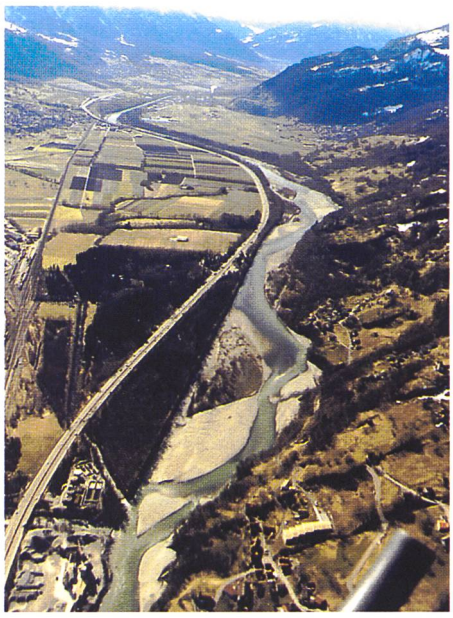


Bild 1. Rhein Zizers – Landquart mit den Mastrilser Rheinauen (Teststrecke Mastrils). Blick gegen die Fliessrichtung.

Bild 2. Rhein Triesen – Vaduz mit alternierenden Bänken (ähnlich wie Teststrecken Bad Ragaz und Buchs). Blick in Fliessrichtung.

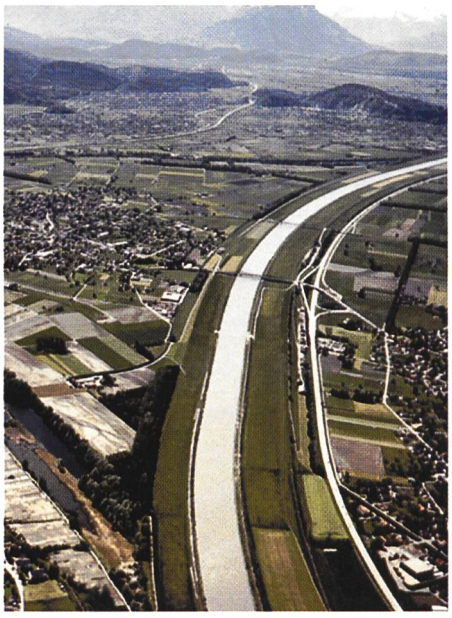


Bild 3. Rhein, Internationale Rheinstrecke beim Diepoldsauer Durchstich (Teststrecke Diepoldsau). Blick flussaufwärts.

halbjahr einem ausgeprägten Schwallbetrieb unterworfen (Kapitel 3). Eine hydrologisch unbeeinflusste Referenzstrecke existiert nicht. Die Auswirkungen des Schwallbetriebes mussten deshalb durch Vergleiche zwischen verschiedenen Teststrecken, Flussbettbereichen und Abflusszuständen (Schwall bzw. Sunk) sowie durch den Vergleich mit anderen alpinen Flüssen ermittelt werden.

Durch die Abfolge von alternierenden Kiesbänken im Mittellauf des Alpenrheins wird die Strukturvielfalt und -güte in diesem Flussabschnitt v.a. bei Niederwasser (Sunk) stark beeinflusst: In den Teststrecken Bad Ragaz und Buchs (mit Kiesbänken) zeigt die Breiten- und Tiefenvariabilität ähnliche, in der Teststrecke Diepoldsau (ohne Kiesbänke) hingegen wesentlich geringere Werte als in der morphologisch natürlichen Strecke Mastrils (Bild 4). Bei Schwall nimmt diese Variabilität auch in den übrigen Strecken ab, was durch ein teilweises Überfluten der Kiesbänke bedingt ist. In der Teststrecke Buchs wird die bei Sunk vergleichsweise hohe Breitenvariabilität durch das Steigen des Wasserspiegels fast bis auf das tiefe Niveau der Teststrecke Diepoldsau herabgesetzt.

3. Physikalischer Teil

3.1 Abflussschwall und Strömungsverhältnisse

Der Alpenrhein zeigt einen ausgeprägten werktäglichen Winterschwall, der sich aus der Überlagerung von zurückgeleitetem Triebwasser verschiedener Kraftwerksanlagen aufbaut. Bei Domat/Ems setzt der Schwall am Morgen ein und steigt von etwa 30 m^3/s bis vor den Mittag auf 150–190 m^3/s an (Bild 5). Der Schwallrückgang erfolgt zwischen dem späten Abend und den frühen Morgenstunden. Das Verhältnis zwischen Schwallspitze und Sunk erreicht einen Faktor 5–6. Rheinabwärts führen die zunehmend unterschiedlich langen Fliessstrecken von den Wasserrückgabestellen dazu, dass sich die einzelnen Schwallganglinien weniger überlagern und stärker ausgleichen. Bei Diepoldsau tritt die Schwallspitze am Abend auf, und das Verhältnis zwischen Schwallspitze und Sunk liegt bei einem Faktor 2,5.

Seit den 70er-Jahren und vor allem Ende der 90er-Jahre hat der Abflussschwall im Alpenrhein deutlich zugenommen (Bild 5). Der Median (50% der Werte) aller Schwallanstiege lag Ende der 70er-Jahre bei 89 m^3/s, Ende der 80er-Jahre bei 92 m^3/s und Ende der 90er-Jahre bei 130 m^3/s (Abflussmessstation Domat/Ems, Perioden November bis Februar, inkl. Wochenenden und Feiertagen). Dies bedeutet, dass der durchschnittliche Schwallanstieg seit Ende der 70er-Jahre um knapp 50% zugenommen hat.

Die Abflusszunahme bei Schwall führt zu einem Ansteigen der Fliessgeschwindigkeit und des Wasserspiegels sowie einer Zunahme der benetzten Breite. Die Auswirkungen hängen stark von der Morphologie der jeweiligen Strecke ab. Beispielsweise steigt die mittlere Fliessgeschwindigkeit in den tiefen Rinnenstrecken entlang der Kiesbänke von ca. 0,5 m/s auf 1,6 m/s an, der Wasserspiegel wird um 0,8–1,4 m angehoben und die benetzte Breite kann in einzelnen Profilen um bis zu 60 m zunehmen. Der werktägliche Abflussschwall führt dazu, dass sich die Strömungsverhältnisse im Alpenrhein täglich zweimal grundsätzlich verändern.

3.2 Schwebstoffaufkommen im Einzugsgebiet

Das Schwebstoff- bzw. Trübeaufkommen im Einzugsgebiet des Alpenrheins zeigt grosse regionale Unterschiede, die im Wesentlichen auf die Geologie, die Morphologie, das Relief und die Vegetation zurückzuführen sind. Bedeutende Schwebstofflieferanten des Alpenrheins sind der Glenner und die Rabiusa im Einzugsgebiet des Vorderrheins, die Plessur, alle Seitenbäche im unteren Einzugsgebiet der Landquart sowie die Ill. Aus Schuttkegeln, Gräben, Hang- und Uferanrissen werden bereits bei geringen Regenmengen oder bei Besonnung, die zum Auftauen des Bodens und zum Schmelzen von Schnee führt, bedeutende Schwebstofffrachten mobilisiert.

Das Trübeaufkommen im Alpenrhein ist hauptsächlich natürlich bedingt. In der Winterperiode wird bei den Kieswerken nur selten Material entnommen. Lediglich Kiesbaggerungen an den Seitenbächen der Landquart führen zu einer bedeutenden Erhöhung der Trübung, wie sie von Natur aus bei Regen in tieferen Lagen oder Besonnung auftritt.

Der Transport der Schwebstoffe aus den Hauptzuflüssen wie Vorderrhein, Plessur, Landquart und Ill in den Rhein wird durch den Schwallabfluss in diesen Gewässern begünstigt (Bild 6). Dabei werden die eingetragenen Feinsedimente bei Schwall direkt weitertransportiert und praktisch täglich dem Rhein zugeführt. Eine allfällige Zwischen- oder Umlagerung von Schwebstoffen in den Hauptzuflüssen ist von deren Morphologie abhängig.

Breite Gerinne mit Bänken (z.B. Vorderrhein) verfügen über eine grössere Speicherkapazität als eingeengte Gerinne (Landquart, Ill). Ohne Schwall würden die Schwebstoffe aus den Seitenbächen verstärkt in den Hauptzuflüssen abgelagert und erst bei natürlichem Abflussanstieg in den Rhein weitertransportiert.

3.3 Trübung im Alpenrhein

Die im Rahmen des Projekts durchgeführten Trübemessungen (Winter 98/99, 99/00, 00/01) zeigen eine Basistrübung (bei Niederwasserabfluss ohne Schwall) zwischen 1 und 17 mg/l. Bei der Mündung von Zuflüssen mit grösserer Schwebstoffkonzentration (als im Rhein) steigt die Trübung im Rhein leicht an. Durch die Landquart ist eine Erhöhung der Basistrübung von 1–6 mg/l auf 2,5–17 mg/l festzustellen. In der verzweigten Fliessstrecke von Mastrils und in reduziertem Mass in den Strecken mit alternierenden Kiesbänken sedimentieren Schwebstoffe, sodass die Trübung zwischen den Zuflüssen tendenziell etwas abnimmt.

Durch den Kraftwerkschwall im Alpenrhein ist eine deutliche Erhöhung der Trübung festzustellen (auf 10–40 mg/l vor der Landquartmündung, auf 15–30 mg/l zwischen der Landquart und der Ill und auf 20–40 mg/l nach der Illmündung). Die höchsten Schwebstoffkonzentrationen treten beim Schwallanstieg durch die Resuspension von abgelagerten Feinsedimenten auf. In der verzweigten Fliessstrecke von Mastrils ist auch bei Schwall eine deutliche Abnahme der Trübung festzustellen.

Die regelmässigen Trübeschwälle der Landquart können die Schwebstoffkonzentration im Rhein weiter auf über 200 mg/l ansteigen lassen (Bild 7). Bei diesen Trübeschwällen wird ein bedeutender Teil der zugeführten Schwebstoffe auf der Rheinsohle abgelagert, und die Trübung nimmt in Fliessrichtung bis in die Internationale Rheinstrecke auf rund 70 mg/l ab.

3.4 Geschiebetrieb

Unter natürlichen Abflussverhältnissen ist die Rheinsohle in den Wintermonaten in Ruhe, und Geschiebeablagerungen bleiben dort liegen, wo sie während der letzten Sommer- oder Herbsthochwasser abgelagert worden sind. Die tieferen Schwallabflüsse, die Ende der 70er-Jahre auftraten, lagen mehrheitlich noch unter dem Grenzwert des Geschiebetriebbeginns.

Demgegenüber kann mit den ausgeprägten Schwallabflüssen, wie sie in den vergangenen Wintern beobachtet werden konnten, Geschiebe im Hauptstrombereich durch alle morphologischen Strukturen (Furt,

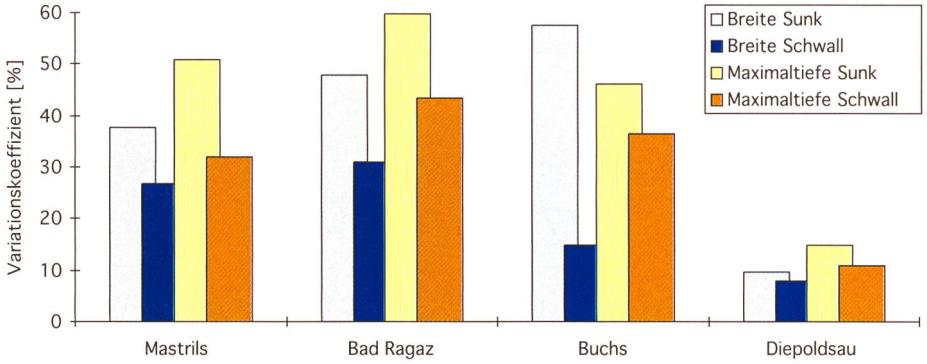


Bild 4. Variationskoeffizienten als Mass für die Variabilität der benetzten Breiten und der Maximaltiefen, berechnet für die Abflusszustände Schwall und Sunk in den Teststrecken Mastrils (in 21 Querprofilen), Bad Ragaz (14 Querprofile), Buchs (7 Querprofile) und Diepoldsau (26 Querprofile).

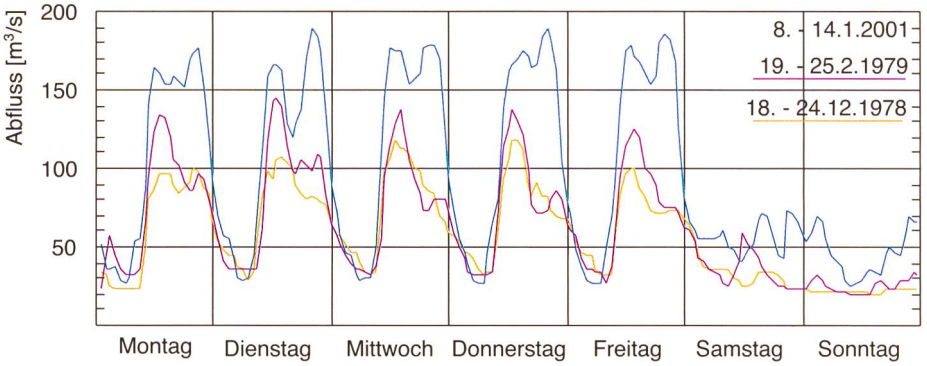


Bild 5. Typische Abfluss-Wochenganglinien mit Schwall. Rhein bei Felsberg (1978 und 1979) sowie bei Domat/Ems (2001). Die zwei Abflussmessstationen sind vergleichbar.

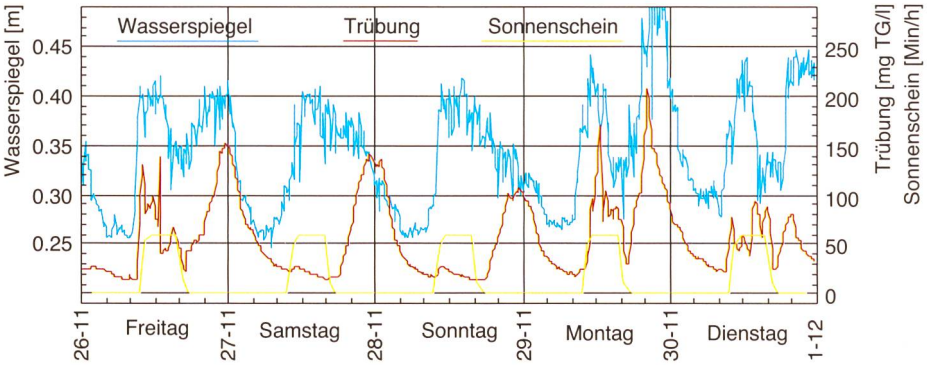


Bild 6. Pegel- und Trübemessungen an der Landquart bei Landquart vom 26.11. bis 30.11.99 sowie Sonnenscheindauer (Chur). Die Trübeschwälle stehen in direktem Zusammenhang mit der Besonnung des unteren Einzugsgebiets und dem Abflussschwall in der Landquart. TG = Trockengewicht.

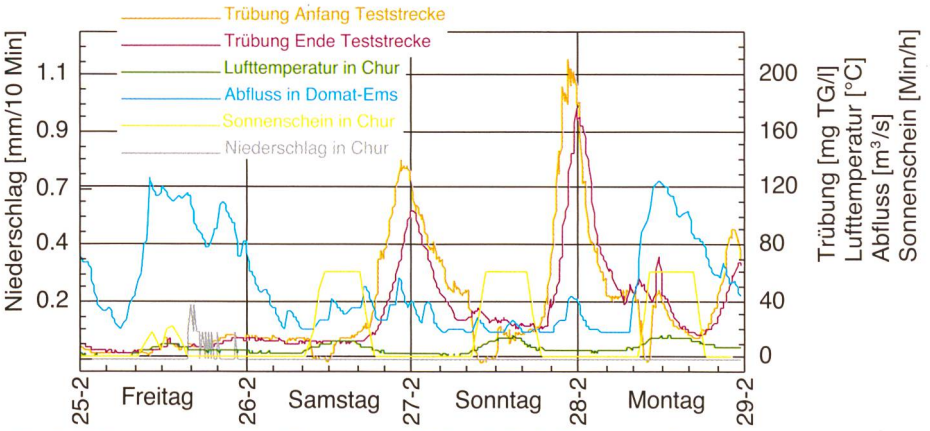


Bild 7. Trübemessung Bad Ragaz vom 25.2. bis 28.2.00 an zwei Standorten (Abstand Sonden Anfang und Ende Teststrecke ca. 2,4 km), Abfluss bei Domat/Ems sowie Verlauf der Lufttemperatur, der Besonnung und des Niederschlags bei Chur.

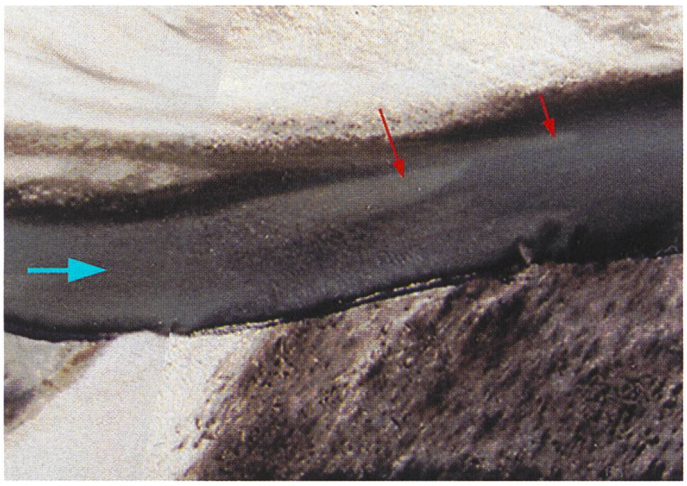


Bild 8. Teststrecke verzweigte Fliessstrecke Mastrils. Geschiebeablagerungen (rote Pfeile), Luftbild vom 7.3.00.

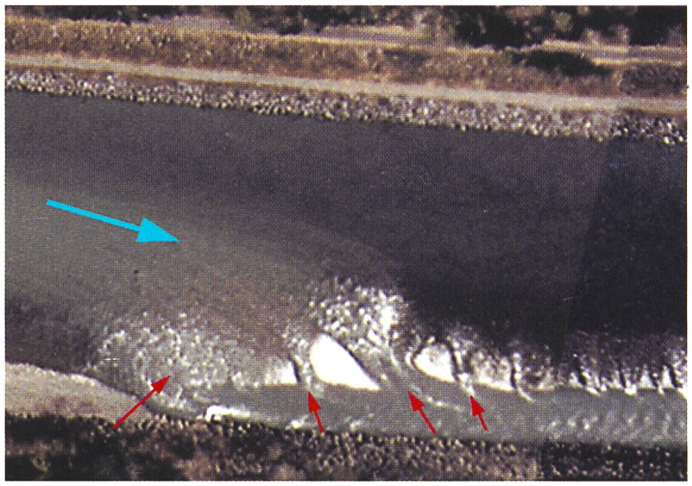


Bild 9. Teststrecke Bad Ragaz, Erosionen im Bereich einer Schnelle (rote Pfeile). Luftbild vom 7.3.00.

Schnelle, Kolk und Rinne) rheinabwärts transportiert werden. Bei abnehmendem Schwall wird das mobilisierte Geschiebe in Rinnen oder entlang von Ufern als Längsstreifen zwischen- oder abgelagert (Bild 8). Dies bedeutet, dass im Hauptstrombereich keine stabile Sohle vorhanden ist (Rinnen) oder ein regelmässiger Geschiebetrieb über die stabile Deckschicht stattfindet. Das mobilisierte Geschiebe stammt von Kiesablagerungen früherer Hochwasser oder aus Schnellenbereichen, die bei Schwall zunehmend erodiert werden (Bild 9).

Der bei Schwall einsetzende Geschiebetrieb ist jedoch nicht mit den Verhältnissen bei Hochwasserabfluss (im Sommer) zu vergleichen, wo ein flächendeckender Geschiebetrieb mit der Verlagerung von Kiesbänken auftritt.

3.5 Äussere Kolmation

Die äussere Kolmation betrifft die Ablagerung von Schwebstoffen auf der Gewässersohle (Bilder 10 und 11). Eine äussere Kolmation kann sich bei schwebstoffführenden Abflüssen in Zonen mit kleiner Fliessgeschwindigkeit entwickeln. Dementsprechend lässt sich die benetzte Gewässersohle aufgrund der Fliessgeschwindigkeit in Bereiche ohne äussere Kolmation (Transportzonen mit $v > ca. 0{,}5$ m/s) und solche mit äusserer Kolmation (Ablagerungszonen mit $v < 0{,}5$ m/s) aufteilen. Bei einer Abflusszunahme verschieben sich diese Zonen, wobei abgelagerte Feinsedimente resuspendiert, flussabwärts transportiert und zum Teil in neuen Ruhigwasserzonen abgelagert werden. Je grösser die Abflussschwankungen sind, desto grösser werden diese Übergangszonen, wo bei tiefen Abflüssen Schwebstoffe abgelagert und bei hohen Abflüssen Sedimente resuspendiert werden (Resuspensionszonen).

Unter natürlichen Abflussverhältnissen dominieren im Winterhalbjahr die Transport- und die Ablagerungszonen. Bei den nur kleinen Abflussschwankungen verlagern sich die Zonen wenig, und die Fläche mit möglicher Resuspension ist klein. Die gegenüber heute geringere und feinere Schwebstofffracht aus den Zuflüssen wird mehrheitlich durchtransportiert, und ein kleinerer Teil sedimentiert in den Ablagerungszonen.

Mit dem Schwall weiten sich die Transportzonen aus, und die Ablagerungszonen verlagern sich in die neu benetzten Uferbereiche. Dadurch werden Feinsedimente resuspendiert, weitertransportiert und umgelagert (Erhöhung der Trübung). In den breiten Resuspensionszonen werden täglich alternierend Schwebstoffe abgelagert (Sunk) und resuspendiert (Schwall). Gleichzeitig nimmt wegen der höheren Trübung des Rheins die Bedeckung der Sohle mit Feinsedimenten und damit auch die äussere Kolmation zu.

3.6 Innere Kolmation

Die innere Kolmation betrifft die Einlagerung von Schwebstoffpartikeln im Porenraum der Gewässersohle infolge des hydrodynamischen Druckes der in die Sohle gerichteten Sickerströmung. Dabei bildet sich unter der Deckschicht eine kompakte, wenig durchlässige Kolmationsschicht (Bild 11). Die Entwicklung der inneren Kolmation ist im Wesentlichen abhängig von der Schwebstoffkonzentration, vom hydraulischen Gradienten der Sickerströmung und der Morphologie.

Bild 10. Uferbereich mit äusserer Kolmation (vor allem Sand). Teststrecke Mastrils, Blick flussaufwärts.

Bild 11. Sohlenbereich mit äusserer und innerer Kolmation. Die innere Kolmation zeigt sich beim Entfernen der Deckschichtsteine (in Bildmitte). Ablagerungen von Feinsand und kohäsiven Schwebstoffpartikeln (Silt, Ton).

Unter natürlichen Verhältnissen ist im Winterhalbjahr wegen des tiefen und vergleichsweise klaren Abflusses von einer nur langsamen Kolmationsentwicklung auszugehen. Umfangreiche Kolmationsberechnungen ergaben, dass der Abflussschwall von Anfang Dezember bis Ende Februar (vor allem wegen der erhöhten Trübung) zu einer massgebenden Verstärkung der inneren Kolmation führt, wobei gegenüber den natürlichen Verhältnissen durchschnittlich etwa 40% mehr Feinsedimente eingelagert werden und die Sohlendurchlässigkeit auf die Hälfte abnimmt.

In den Furten werden bei starker Infiltration am meisten Schwebstoffe eingelagert, in den Rinnen entwickelt sich die Kolmation vergleichsweise langsam und in den Schnellen findet wegen exfiltrierenden Grundwassers keine Kolmation statt.

Der Abflussschwall und die gegenüber den natürlichen Verhältnissen verstärkte Kolmation beeinflussen die Grundwasserneubildung gegenläufig. Der bei Schwall höhere Flusswasserspiegel führt zu höheren Gradienten der Sickerströmung und damit zu höherer Sickerleistung. Umgekehrt führt die verstärkte Kolmation zu einer Abnahme der Durchlässigkeit und damit zu reduzierter Sickerleistung. Die Berechnungen ergaben in Abhängigkeit von den lokalen Verhältnissen bei kleinen Gradienten praktisch keine Änderung und bei hohen Gradienten eine Abnahme des Sickerwasservolumens um maximal 75%. Bei diesen Angaben ist die Infiltration in der Wasserwechselzone bei Schwall (im zusätzlich benetzten Uferbereich) nicht berücksichtigt.

4. Biologischer Teil

4.1 Phyto- und Makrozoobenthos

Auf den Luftbildern der Fliessstrecken bei Zizers und Triesen (Bilder 1 und 2) sind schon aus grosser Distanz braune, den hellen Kiesbänken vorgelagerte Zonen im Fluss zu erkennen. Es handelt sich dabei um dichten Bewuchs durch die Goldalge Hydrurus foetidus in den untiefen Uferbereichen. In der Teststrecke Diepoldsau fehlt dieser Bewuchs (Bild 3).

Bei näherer Betrachtung bestätigte sich, dass der Bewuchs durch Hydrurus und andere festsitzende Algenarten (Phytobenthos) vom Ufer zur Flussmitte hin abnimmt (Bild 12). Die durchgehende tiefe Fliessrinne, die sich, oft von einem Ufer zum anderen pendelnd, zwischen den Kiesbänken hinzieht, war nahezu vollständig bewuchsfrei. Dies konnte durch Unterwasser-Videoaufnahmen über die ganze Flussbreite in den einzelnen Teststrecken belegt werden.

Parallel zum Algenbewuchs veränderte sich auch die Abundanz (Besiedlungsdichte) der Lebensgemeinschaft von wirbellosen Tieren auf der Flusssohle (Makrozoobenthos). Ein enger Zusammenhang zwischen Phyto- und Zoobenthos ist aus vielen alpinen Gewässern bekannt. Die Algenbüschel bieten den Invertebraten Lebensraum, Schutz und Nahrungsgrundlage zugleich.

Wie das Beispiel von Mastrils zeigt, nahm das Makrozoobenthos vom Ufer gegen die Flussmitte zahlenmässig stark ab und erreichte in der Tiefenrinne ausserordentlich geringe, fast vernachlässigbare Abundanzen (Bild 13). In der Teststrecke Diepoldsau ist eine derartige biologische Verödung über die gesamte Breite festgestellt worden (Bild rechts unten). Ganz ähnlich wie die Individuendichte veränderte sich auch die Biomasse des Makrozoobenthos und damit auch die gewässereigene (autochthone) Nahrungsgrundlage für die Fische.

In allen Testrecken des Alpenrheins waren Zuckmückenlarven (Chironomiden) mit Abstand die dominierende Invertebraten-Gruppe (Bild 13). Dabei handelte es sich hauptsächlich um Arten, die den oberflächlichen Algenaufwuchs besiedeln. Auch andere Vertreter dieser «Hydrurusfauna», z.B. einzelne Arten von Eintagsfliegenlarven, waren zumindest in den algenbewachsenen Uferbereichen der Teststrecken Mastrils bis Buchs in ähnlicher Dichte anzutreffen wie in anderen Alpenflüssen (z.B. am hydrologisch unbeeinflussten Lech in Tirol). Starke zahlen- bzw. mengenmässige Defizite ergaben sich demgegenüber für die wirbellosen Bewohner des oberflächlichen Sedimentlückensystems (v.a. Stein- und einzelne Eintagsfliegenarten) sowie für die kleinwüchsigen Besiedler tieferer Sedimentschichten oder feinkörnigerer Substrate (v.a. Ringelwürmer und einzelne Chironomiden-Arten). Diese biologischen Befunde bestätigen die im physikalischen Teil festgestellte, durch den Abfluss- und Trübeschwall bedingte Zunahme der äusseren und inneren Kolmation (Kapitel 3).

4.2 Drift

Auf die Abnahme des pflanzlichen Bewuchses mit zunehmender Wassertiefe und das Fehlen jeglichen Bewuchses in den tiefen Fliessrinnen des Alpenrheins hatte das abnehmende Lichtangebot nur einen untergeordneten Einfluss. In erster Linie handelte es sich vielmehr um die Folgen einer starken hydraulischen und mechanischen Belastung der Flusssohle durch die starke Strömung und durch transportiertes Feingeschiebe bei Schwall. Dabei geraten die oberflächlichen Sedimentschichten in Bewegung («Kugelmühlen-Effekt»), und die Sohlenoberfläche

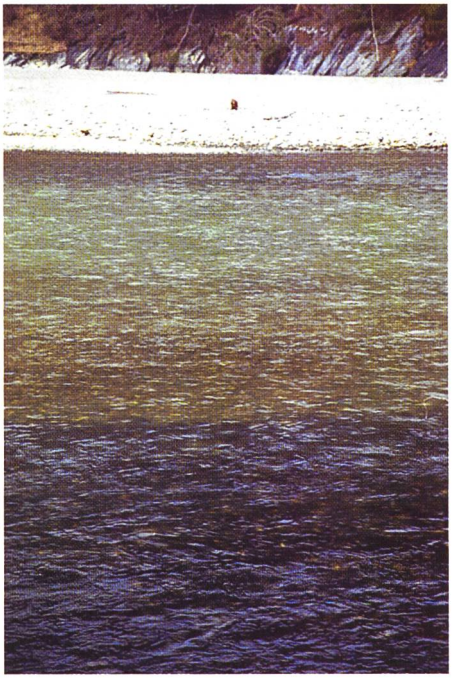


Bild 12. Ausbildung eines randlichen Gürtels der Goldalge Hydrurus foetidus (dunkler Streifen) in der Teststrecke Mastrils.

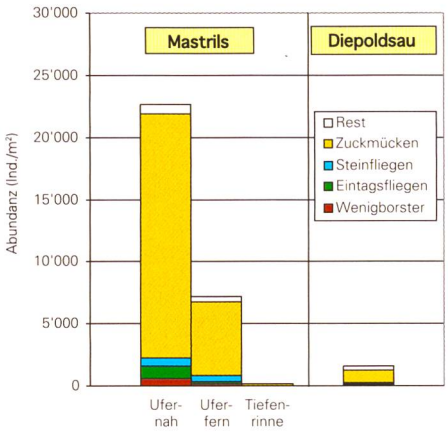


Bild 13. Mittlere Besiedlungsdichten und Anteile der Grossgruppen von wirbellosen Tieren (Makroinvertebraten) im Spätwinter 2000 auf der Sohle der Teststrecken Mastrils und Diepoldsau.

wird durch mitgeführte Schwebstoff- bzw. Sandpartikel abgescheuert («Sandstrahl-Effekt»). Auf diese Weise wird das Aufkommen des Algenbewuchses und damit auch eine standortgerechte Entwicklung des Makrozoobenthos in tieferen Flussbereichen verhindert.

Wie stark die abrasive Wirkung der Schwälle ist, zeigte sich eindrücklich bei einer Messung der abtreibenden (driftenden) Algen, Makroinvertebraten und anorganischen Partikel in der fliessenden Welle des Alpenrheins bei Untervaz. Dabei ergaben sich für die abflussarme Zeit (von Sonntag, 13.2., bis Montagmorgen, 14.2.2000) ziemlich konstante, tiefe «Konzentrationen» an Wirbellosen (Driftdichten) von einigen wenigen Indi-

viduen/m³ (Bild 14). In den Dämmerungsphasen zeigte das Makrozoobenthos keine ausgeprägten Driftspitzen, wie dies in vielen Gewässern der Fall ist. Auch die «künstliche» Verdunkelung durch eine regenbedingte Trübungszunahme am Montagmorgen bewirkte noch keine Zunahme der Wirbellosen-Drift, solange die Wasserführung auf tiefem Niveau blieb. Erst mit dem Einsetzen des Abflussschwalls gegen Mittag stieg die Invertebraten-Drift massiv an und erreichte beim Übergang von ansteigendem zu konstant hohem Schwallabfluss ihren Spitzenwert, welcher um einen Faktor 34 über der relativ gleichmässigen Basisdrift bei Niederwasser lag. Dass die Trübung in dieser Phase abnahm, entspricht nicht dem normalen Verlauf (Kapitel 3), ermöglichte aber die separate Erfassung der sonst synchron auftretenden Einflüsse von Wasserführung und Trübung.

Gleichzeitig mit dem Maximum der Makroinvertebraten wurden bei Schwallanstieg auch die höchsten Mengen an organischen (v.a. Hydrurus-Fäden) und anorganischen Partikeln (v.a. Sand) abgetrieben. Im weiteren Verlauf des Schwalles nahm die Drift bei unverändert hoher Wasserführung wieder deutlich ab (Bild 14).

Die Drift des Makrozoobenthos wird im Alpenrhein somit weniger durch das natürliche, tagesrhythmische Verhalten der Tiere selbst gesteuert, sondern vielmehr «erzwungen» durch die Destabilisierung der Sohle und das mechanische Abreissen jener Algenbüschel, welche den bevorzugten Aufenthaltsort vieler Invertebraten-Arten bilden. Diese durch den Schwall ausgelöste und deshalb regelmässig auftretende, so genannte Katastrophendrift bliebe im Winter natürlicherweise auf seltene Hochwasserereignisse beschränkt.

4.3 Fischbestand und Fischreproduktion

Die zu verschiedenen Jahreszeiten durchgeführten Befischungen in Kiesbankbereichen bestätigten die ausserordentlich schwache fischereiliche Besiedlung im Alpenrhein, wie sie bereits bei früheren Untersuchungen festgestellt worden war (Kapitel 1). Parellel zum zunehmenden Regulierungsgrad ging die Individuendichte der Fische in Ufernähe von der strukturreichen Teststrecke Mastrils bis zur eingeengten, morphologisch äusserst monotonen Teststrecke Diepoldsau stark zurück (Bild 15). Bei den Biomassen war in der Teststrecke Diepoldsau hingegen ein Anstieg zu verzeichnen, weil sich die Artenzusammensetzung in der Internationalen Rheinstrecke im Vergleich zu den flussaufwärts gelegenen Abschnitten grundlegend änderte und weil anteilmässig mehr grosse (schwere),

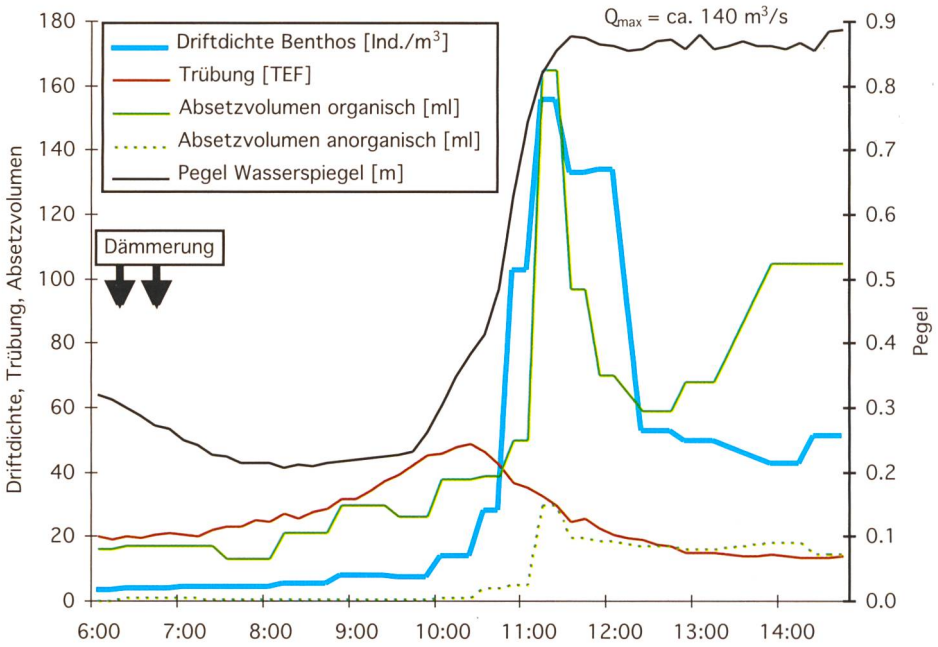


Bild 14. Dichte bzw. Volumen der driftenden Makroinvertebraten (Benthos), Algen (organisch) und Sandpartikel (anorganisch) am 14.2.00 in der Flussmitte des Alpenrheins bei Untervaz (Schwalldurchgang).

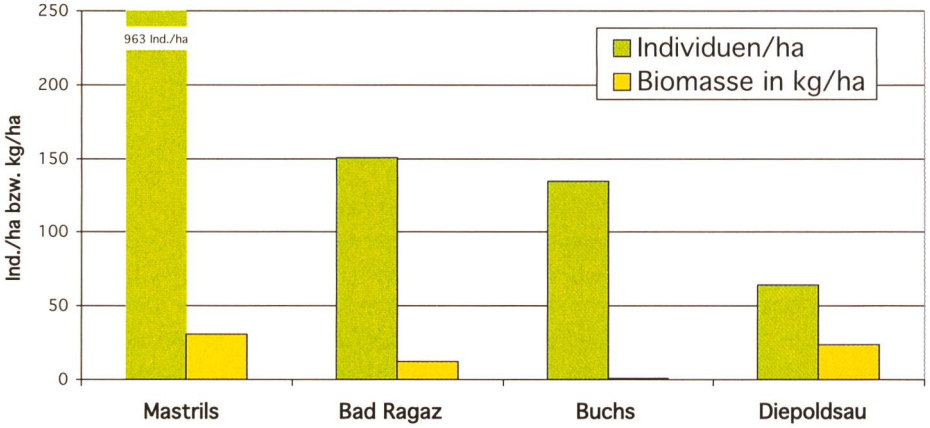


Bild 15. Individuendichte und Biomasse des Fischbestandes (ohne Koppe) in den Uferbereichen der vier Teststrecken entlang des Alpenrheins. Mittelwerte aus den drei Aufnahmen vom Oktober 1999 sowie vom Februar und August 2000.

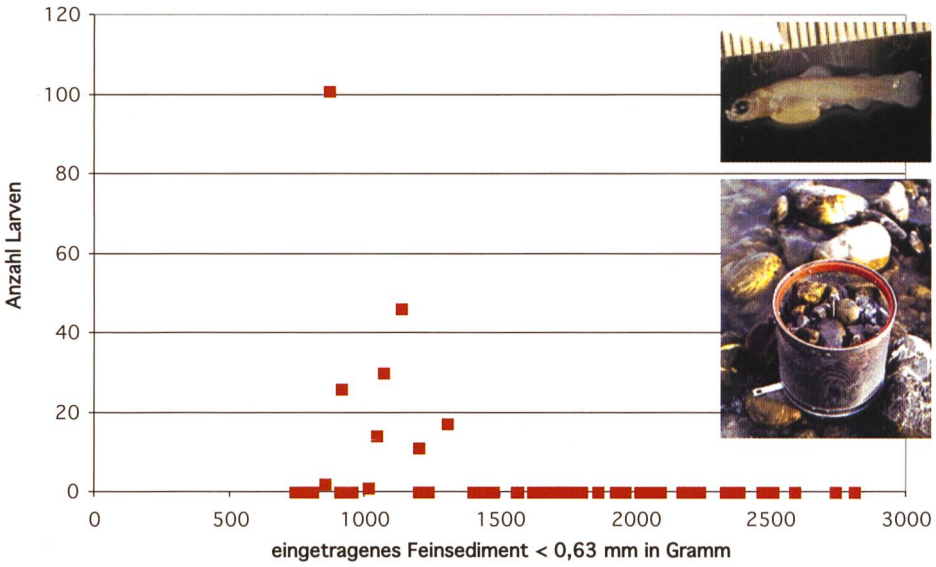


Bild 16. Zusammenhang zwischen dem Auftreten von Forellenlarven (kleines Bild oben) und der Menge an eingetragenem Feinsediment in den exponierten Vibert-Kästen (kleines Bild unten) in den Teststrecken des Alpenrheins.

teilweise aus dem Bodensee eingewanderte Fische gefangen wurden. Insgesamt konnten im Hautpstrom des Alpenrheins zehn Fischarten nachgewiesen werden.

Mit mittleren Häufigkeiten zwischen 64 und 963 Individuen/ha bzw. Biomassen zwischen 1 und 31 kg/ha wiesen die Teststrecken des Alpenrheins (Bild 15) deutlich geringere Fischbestände auf als andere, z.T. ebenfalls regulierte und schwallbeeinflusste Alpenflüsse ähnlicher Typologie. Eine wesentlich höhere Fischdichte (über 8000 Individuen/ha) wurde im August 2000 auch im naturnah umgestalteten Mündungsbereich des Liechtensteiner Binnenkanals festgestellt.

Um die Entwicklung von Fischeiern in situ zu untersuchen, wurden spezielle Behälter (modifizierte Vibert-Kästen, Bild 16) mit Substrat der jeweiligen Stelle gefüllt, mit je 200 Seeforelleneiern bestückt und in folgenden Gewässern sohleneben eingegraben:

- drei Teststrecken des Alpenrheins (ohne Diepoldsau);
- Dorfbach Mastrils, einer der letzten noch naturnahen, niveaugleich an den Rhein angeschlossenen direkten Zuflüsse;
- je ein Alpenfluss mit (Inn) und ohne Schwallbetrieb (Lech) in Tirol.

Alle Vibert-Kästen wurden bei Sunk in permanent benetzte, flache Flussbettbereiche eingebracht. Wo möglich, wurden die Kästen auf die für Forellen noch am ehesten geeigneten Laichareale oberhalb und unterhalb von Schnellen (Riffel) sowie entlang der Kiesbänke aufgeteilt. Insgesamt wurden im Herbst 1999 100 Vibert-Kästen exponiert, gegen Ende des Winters wieder entnommen und auf den Entwicklungsstand der exponierten Eier überprüft.

In den geborgenen Vibert-Kästen aus dem Alpenrhein wurden nur für die Teststrecke Mastrils Forellenlarven nachgewiesen – und auch dort nur in den Flussbettbereichen unterhalb von Riffeln. An allen anderen Stellen wurden nur Eier im Augenpunktstadium und in noch früheren Entwicklungsstadien vorgefunden. Auch im Inn und im Lech blieb die Schlüpfrate sehr gering, was teilweise auf die (im Vergleich zum Alpenrhein) tieferen Wassertemperaturen zurückzuführen war. Einzig im Dorfbach Mastrils (mit höheren Temperaturen, aber dafür auch früher geborgenen Kästen) wurden über 50% der eingebrachten Eier als Larven vorgefunden, entsprach die Entwicklung also den Erwartungen.

Betrachtet man alle exponierten Vibert-Kästen im Überblick, so ergibt sich ein klarer Zusammenhang zwischen dem Vorhandensein von Larven und der in die Kästen eingetragenen Menge an Feinsediment (Bild 16): Nur in Kästen mit geringem Silteintrag konnten sich die Eier, der Jahreszeit entsprechend, überhaupt bis zu Larven entwickeln. Diese zeitliche Verzögerung hätte im weiteren Verlauf dazu geführt, dass die Larven – wenn überhaupt – das schwimmfähige Stadium nicht mehr rechtzeitig (d.h. vor dem Einsetzen der Frühjahrs-Hochwasser) erreicht hätten und deshalb kaum erfolgreich aufgekommen wären.

Es wird vermutet, dass eine ungenügende Durchströmung des Flussbettes und in der Folge eine ungenügende Versorgung der Fischeier mit Sauerstoff für die verzögerte Entwicklung verantwortlich ist. Die Ursache dafür liegt in der inneren Kolmation der Flusssohle, die durch den Schwallbetrieb verstärkt wird (Kapitel 3).

5. Synthese

5.1 Physikalisches System

In Bild 17 ist das physikalische System eines Fliessgewässers mit den Einflussgrössen, den physikalischen Prozessen und den aquatischen Teillebensräumen dargestellt. Die Einflussgrössen Morphologie, Abfluss und Trübung bestimmen die im Fliessgewässer ablaufenden Prozesse. Dazu gehören im Wesentlichen die Strömungsverhältnisse (inkl. Wasserspiegellage), das Lichtklima, der Geschiebetrieb (inkl. Sohlenstabilität) und die Kolmation. Die Prozesse ihrerseits prägen den aquatischen Lebensraum, der sich in den fliessenden Wasserkörper, die Sohlenoberfläche, die Sohlenmatrix und den Uferbereich gliedern lässt.

In Bild 18 ist die Wirkungsmatrix zwischen den Einflussgrössen und den Prozessen dargestellt. Dabei wird zwischen starkem, bedeutendem, mässigem und keinem Einfluss unterschieden. Eine Abflussänderung zeigt einen starken Einfluss auf die Strömung und den Geschiebetrieb sowie einen bedeutenden Einfluss auf alle anderen Prozesse. Die Trübung zeigt einen dominanten Einfluss auf das Lichtklima (Lichtadsorption) und die innere Kolmation. Die Morphologie hat einen starken Einfluss auf die Strömungsverhältnisse (Unterschiede bei Furt, Schnelle und Rinne).

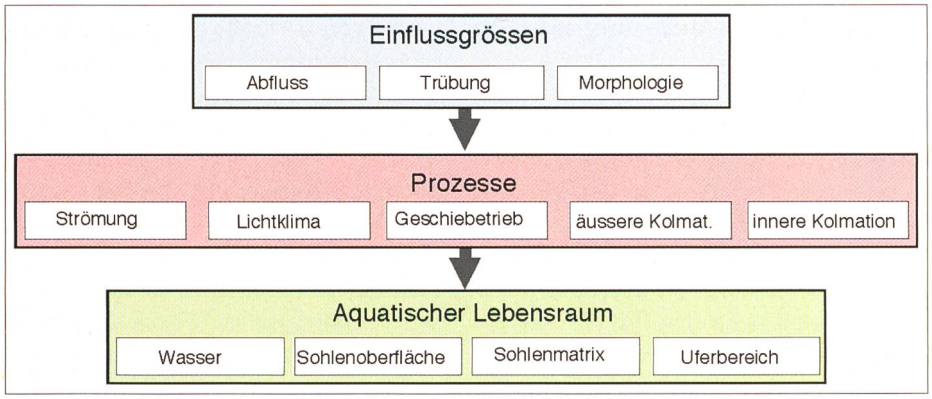


Bild 17. Physikalisches System eines Fliessgewässers mit den Einflussgrössen, den Prozessen und dem betroffenen aquatischen Lebensraum.

Prozess \ Einflussgrösse	Abfluss, Schwall	Trübung	Morphologie
Strömung, Wasserwechselzone	**X**	-	**X**
Licht	X	**X**	X
Geschiebetrieb, Sohlenerosion	**X**	-	X
Äussere Kolmation	X	X	X
Innere Kolmation	X	**X**	X

Bild 18. Wirkungsmatrix der Einflussgrössen auf die Prozesse. Fettes Kreuz = starker, massgebender Einfluss, normales Kreuz = bedeutender Einfluss, schwaches Kreuz = mässiger Einfluss, Strich = kein Einfluss.

Teillebensraum \ Prozess	Strömung	Licht	Geschiebe	Äussere Kol	Innere Kol
Wasser	**X**	X	-	-	-
Sohlenoberfläche	**X**	X	**X**	**X**	-
Sohlenmatrix	X	-	X		**X**
Uferbereich	**X**	-	-	X	-

Bild 19. Wirkungsmatrix der Prozesse bezüglich der Teillebensräume. Fettes Kreuz = starker, massgebender Einfluss, normales Kreuz = bedeutender Einfluss, schwaches Kreuz = mässiger Einfluss, Strich = kein Einfluss.

Die Zusammenhänge zwischen den physikalischen Prozessen und den Teillebensräumen sind in Bild 19 dargestellt. Die Strömung wirkt sich als einziger Prozess auf den gesamten aquatischen Lebensraum aus. Das Lichtklima beeinflusst den Lebensraum bis zur Sohlenoberfläche, zeigt jedoch keine Wirkung im Uferbereich und in der Sohlenmatrix. Der Geschiebetrieb betrifft die Sohlenoberfläche oder die obere Schicht der Sohle im Bereich der Hauptströmung (bei Schwall im Winterhalbjahr, im Sommer bei Hochwasserabfluss die gesamte Sohle). Die äussere Kolmation betrifft die Sohlenoberfläche und den Uferbereich inklusive die Wasserwechselzone. Die innere Kolmation beeinflusst den Teillebensraum in der Sohlenmatrix.

5.2 Auswirkungen auf das biologische System und massgebende Beeinträchtigungen

Zwischen dem physikalischen und dem biologischen System besteht ein komplexes Wirkungsgefüge, wobei die verschiedenen Tier- und Pflanzenarten nicht nur in vielfältiger Weise von den physikalischen Prozessen geprägt werden, sondern sich auch gegenseitig beeinflussen.

Beim Phytobenthos führen, als massgebende Prozesse, die Schwallströmung und der Geschiebetrieb zu einer Abrasion und einem Abschwemmen des Algenbewuchses. Ein markanter Anstieg des driftenden Phyto- und Makrozoobenthos wurde in Untervaz bei einem Abfluss über 90 m^3/s festgestellt (Katastrophendrift, Bild 14). Der praktisch fehlende Bewuchs in Wassertiefen > 1 m (bei Sunk) ist weniger auf das Lichtklima als vielmehr auf den regelmässigen Geschiebetrieb in der Hauptstromrinne zurückzuführen. In der Wasserwechselzone wird die Verbreitung von Grün- und Kieselalgen begünstigt. Generell sind die Auswirkungen des Abfluss- und Trübeschwalls auf das Phytobenthos in der Uferzone als vergleichsweise gering, in den Tiefenrinnen jedoch als hoch einzustufen.

Das Makrozoobenthos wird durch verschiedene Prozesse beeinträchtigt, die durch den Abfluss- und Trübeschwall verursacht oder gefördert werden. Die innere Kolmation führt ausgeprägt in den Furten sowie im unteren Bereich der Rinnen zu Defiziten bei den kleinen Kieslückenbewohnern und erschwert das Aufkommen von Juvenilformen. Die äussere Kolmation beeinträchtigt den Lebensraum der Gewässersohle in Resuspensions- (geringere Substratstabilität) und Ablagerungszonen. Betroffen sind in erster Linie die grösseren Sedimentlückenbewohner. Der regelmässige Geschiebetrieb im Hauptstrombereich verhindert die Ansiedlung von Makrozoobenthos. Als Folge dessen sind die Tiefenrinnen des Alpenrheins (und in der Internationalen Rheinstrecke die gesamte Flusssohle) biologische Verödungszonen, deren tierische Besiedlung weit hinter anderen alpinen Flüssen zurückbleibt. Die Beanspruchung der Sohle durch die Strömung führt bei ansteigendem Abfluss (Schwallanstieg) zu einer Katastrophendrift. Die Driftfracht ist im Verhältnis zur stehenden Individuendichte nicht vernachlässigbar.

Die Fischpopulation im Alpenrhein wird durch mehrere Prozesse massiv beeinträchtigt, die mit dem Abfluss- und Trübeschwall in direkter Verbindung stehen. Die Wasserspiegelschwankungen erschweren das Ablegen des Laichs. Bei Schwall günstige Standorte fallen bei Sunk trocken, und umgekehrt können bei Sunk günstige Standorte bei Schwall erodiert werden. Die Fischlarven und Jungfische werden durch Stress, Stranden (Trockenfallen in Flachwasserzonen) und Abdrift gefährdet. Die innere Kolmation verzögert und beeinträchtigt die Ei- und Larvalentwicklung, sodass eine erfolgreiche Reproduktion verhindert wird. Die verschiedenen Prozesse führen dazu, dass unter den heute bestehenden Verhältnissen praktisch die gesamte Gewässersohle des Alpenrheins für eine erfolgreiche Eiablage resp. Larvalentwicklung ausfällt. Die Prozessanalyse deckt sich mit der Beobachtung, dass keine natürliche Reproduktion mehr stattfindet. Das Nahrungsangebot (in Form von Makrozoobenthos) ist eher bescheiden, dürfte jedoch bei dem äusserst geringen Fischbestand noch nicht limitierend sein.

5.3 Sanierungsansätze

Die Wirkungsanalyse zwischen physikalischem und biologischem System zeigt, dass zur Verbesserung der Lebensraumverhältnisse primär die folgenden Anforderungen erfüllt werden müssen:

- Verhindern des Geschiebetriebs in den Wintermonaten durch Herabsetzen der Schwallspitze.
- Verkleinerung der Wasserspiegelschwankungen und damit der Wasserwechselzone durch Reduktion der Schwallamplitude.
- Reduzieren der inneren Kolmation durch Verringern der Trübung und durch Absenken der Schwallspitzen (kleinerer Sickergradient und tiefere Sohlenschubspannung).
- Reduzieren der äusseren Kolmation durch Verringern der Trübung und durch Dämpfen des Abflussschwalls (Verkleinern der Resuspensionszonen).

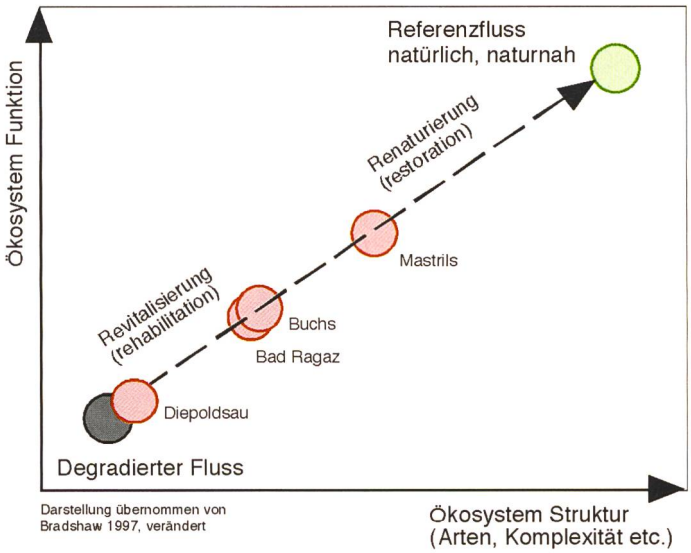
Beim Abfluss müssen die Schwallspitze abgesenkt und die Schwallamplitude verringert werden. Als minimale Anforderung kann das Ausbleiben des Geschiebetriebs in den Rinnen resp. eines durchgehenden Geschiebetriebs festgelegt werden. In der verzweigten Fliessstrecke von Mastrils beginnt der Geschiebetrieb zwischen 140 und 150 m^3/s, bei Bad Ragaz und Buchs zwischen 160 und 170 m^3/s und in der Internationalen Rheinstrecke bei Diepoldsau zwischen 150 und 200 m^3/s. Bei einer weiterführenden Senkung der Schwallspitze unter 90–100 m^3/s bei Untervaz kann die regelmässige massive Abschwemmung des Phyto- und Makrozoobenthos verhindert werden.

Zur Verminderung der Trübung im Alpenrhein ist prioritär die Schwebstoffzufuhr aus den Hauptzuflüssen zu reduzieren. Dazu ist der Schwall in den Hauptzuflüssen, der erheblich zur hohen Trübung des Alpenrheins beiträgt, zu reduzieren oder das Triebwasser direkt in den Rhein abzuleiten. Kanalisierte Hauptzuflüsse sind zudem aufzuweiten, sodass sich Schwebstoffe ablagern können. Derartige Massnahmen sind vor allem am Vorderrhein, der Plessur, der Landquart und der Ill angezeigt. Als weitere Massnahme zur Verminderung der Trübung eignet sich eine Dämpfung des Abflussschwalls im Alpenrhein selbst, wodurch weniger Feinsedimente resuspendiert werden.

Neben dem Abfluss und der Trübung beeinflusst die Morphologie sämtliche im Gewässer ablaufenden Prozesse. Die Untersuchungen in den vier Teststrecken Mastrils, Bad Ragaz, Buchs und Diepoldsau haben gezeigt, dass Gewässerabschnitte mit weitgehend natürlicher Morphologie die grösste Strukturvielfalt und damit den vielfältigsten Lebensraum bieten. Strecken mit alternierenden Bänken zeigen die typische Abfolge von Furten, Schnellen und Rinnen, gegenüber den verzweigten Abschnitten fehlen jedoch die verschiedenen Übergangsformen. In der Internationalen Rheinstrecke fehlen die natürlichen Strukturen gänzlich.

Der Natürlichkeitsgrad eines Ökosystems kann gemäss Bild 20 bewertet werden aufgrund der vorhandenen Strukturen (Lebensräume und Lebensgemeinschaften) sowie der ökologischen Funktionen (abiotische und biotische Prozesse). Natürliche Fliessgewässer sind im Diagramm von Bild 20 oben rechts anzusiedeln. Demgegenüber verfügt ein massiv beeinträchtigtes Fliessgewässer über banale Strukturen und kaum entwickelte Funktionen. Ein solch degradiertes System liegt nahe dem Schnittpunkt der beiden Achsen. Von den im Alpenrhein untersuchten Teststrecken ist die Internationale Rheinstrecke (Diepoldsau) nahe dem degradierten System einzuordnen. Die Teststrecke Mastrils zeigt zwar noch weitgehend natürli-

che Strukturen, die ökologischen Funktionen sind jedoch durch den Abfluss- und Trübeschwall stark beeinträchtigt (fehlende Reproduktion der Fische). Die Teststrecke Mastrils ist daher zwischen dem degradierten und dem natürlichen Gewässer einzuordnen. Die Teststrecken Bad Ragaz und Buchs liegen zwischen Diepoldsau und Mastrils. Bild 20 zeigt, dass allein durch Revitalisierungsmassnahmen (Erhöhung der Strukturvielfalt und der morphologischen Dynamik) im Alpenrhein höchstens ein Natürlichkeitsgrad erreicht werden kann, welcher der Teststrecke Mastrils entspricht und die Lebensraumverhältnisse nicht so weit aufgewertet werden können, dass z.B. eine erfolgreiche Reproduktion von Fischen zur adäquaten Bestandeserhaltung möglich ist. Die Untersuchungen zeigen, dass dazu Massnahmen zur Dämpfung des Abfluss- und Trübeschwalls unumgänglich sind.



Darstellung übernommen von Bradshaw 1997, verändert

Bild 20. Verbesserung eines degradierten Systems. Schematische Darstellung.

6. Ausblick

Die Untersuchungen zur Trübung und zum Schwall im Alpenrhein haben aufgezeigt, dass für den tiefen Fisch- und Makrozoobenthosbestand der Kraftwerkschwall in den Hauptzuflüssen (Vorderrhein, Plessur, Landquart, Ill) und der Abflussschwall im Rhein massgebend verantwortlich sind. Daneben spielen auch die Morphologie (insbesondere in der Internationalen Rheinstrecke) und die Vernetzung mit den Seitengewässern eine zentrale Rolle.

Durch den Weiterausbau der Wasserkraft sowie betriebliche Anpassungen hat der Kraftwerkschwall in den vergangenen 20 Jahren deutlich zugenommen und im Winterhalbjahr ein Mass erreicht, wo massgebende ökologische Funktionen stark beeinträchtigt oder gar verunmöglicht werden.

Im Auftrag der Regierungskommission Alpenrhein wird in den kommenden zwei Jahren ein Entwicklungskonzept Alpenrhein ausgearbeitet werden, wo schutzwasserwirtschaftliche, nutzerische und gewässerökologische Aspekte berücksichtigt werden. Mit dem Konzept soll unter anderem aufgezeigt werden, welche Massnahmen geeignet sind, den Alpenrhein zu revitalisieren und den aquatischen Lebensraum aufzuwerten. Wegen der grundsätzlichen Bedeutung des Kraftwerkschwalls auf den aquatischen Lebensraum sind im Rahmen des Entwicklungskonzeptes auch Massnahmen zu evaluieren, die geeignet sind, den Abfluss- und Trübeschwall im Alpenrhein auf ein umweltverträgliches Mass zu reduzieren.

Die Eignung von Massnahmen ist durch Kosten-Nutzen-Vergleiche zu prüfen und ein Etappierungsplan für die Umsetzung ist zu erstellen.

Die Planung und Realisierung von Massnahmen zur Reduktion des Abfluss- und Trübeschwalls hat unter Zusammenarbeit von Behörden, Ökologen, Flussbauern und Kraftwerkbetreibern zu erfolgen. Nur durch den Einbezug aller Beteiligten und Betroffenen können konsensfähige Lösungen entwickelt, die nötige Akzeptanz in der Bevölkerung gefunden und die Finanzierung sichergestellt werden.

Literatur

Arge Trübung Alpenrhein (2001): Trübung und Schwall im Alpenrhein. Synthesebericht, Fachberichte und Literaturstudie im Auftrag der Internationalen Regierungskommission Alpenrhein, Projektgruppe Gewässer- und Fischökologie. Total ca. 500 S., Beilagen.

BOKU (1991): Rheinkraftwerke Schweiz-Liechtenstein. Umweltverträglichkeitsbericht zum Konzessionsprojekt 1979/80 mit Ergänzungen 1991. Fachgutachten C10: Fischerei und Gewässerökologie. Bericht der Universität für Bodenkultur, Wien, 264 S.

Bradshaw, A.D. (1997): What do we mean by restoration? In: Urbanska, K.M., Webb, N.R., Edwards, P.J. (Hrsg.): Restoration Ecology and Sustainable Development. Cambridge University Press, Cambridge, S. 8–14.

Eberstaller, J., Haidvogl, G., Jungwirth, M. (1997): Gewässer- und fischökologisches Konzept Alpenrhein. Grundlagen zur Revitalisierung mit Schwerpunkt Fischökologie. Kurzfassung, herausgegeben von der Internationalen Regierungskommission Alpenrhein, Projektgruppe Gewässer- und Fischökologie, 90 S.

IRKA (2001): Gemeinsam am Alpenrhein. Internationale Regierungskommission Alpenrhein 1995 bis 2000. Herausgegeben von der IRKA, St. Gallen, 36 S.

Jungwirth, M., Moog, O., Schmutz, S. (1990): Auswirkungen der Veränderungen des Abflussregimes auf die Fisch- und Benthosfauna anhand von Fallbeispielen. Landschaftswasserbau 10, S. 193–233.

Lauters, F. (1995): Impacts sur l'écosystème aquatique de la gestion par éclusées des ouvrages hydroélectriques. Diss. Univ. Paul Sabatier, Toulouse, 189 S., Anhang.

Limnex (2001): Schwall/Sunk-Betrieb in schweizerischen Fliessgewässern. Grundlagenstudie im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern, 30 S.

Moog, O. (1993): Quantification of daily peak hydropower effects on aquatic fauna and management to minimize environmental impacts. Regulated Rivers: Research & Management 8, S. 5–14.

Valentin, S. (1997): Effets écologiques des éclusées en rivière. Etudes «gestion des milieux aquatiques» 13, Cemagref, Lyon, 79 S.

Anschrift der Verfasser

P. Baumann, dipl. phil. II, Limnex AG, Schaffhauserstrasse 343, CH-8050 Zürich.

Dr. *U. Schälchli,* Schälchli, Abegg + Hunzinger, dipl. Ing. ETH/SIA, Wasser- und Flussbau, Reinhardstrasse 14, CH-8008 Zürich.