



Trübung und Schwall im Alpenrhein

Synthesebericht

November 2001



Schälchli, Abegg + Hunzinger
dipl. Ing. ETH/SIA, Fluss- und Wasserbau



Inhaltsverzeichnis

1. EINLEITUNG	2
1.1 Das Projekt Trübung und Schwall im Alpenrhein	2
1.2 Untersuchungskonzept	3
1.3 Auswertung und Berichterstattung	4
2. GRUNDLAGEN	5
2.1 Schwallbetrieb	5
2.2 Trübung	6
2.3 Wasserqualität	7
2.4 Morphologie	7
2.5 Benthos- und Fischbestand	9
2.6 Revitalisierung	9
2.7 Grundwasser	10
2.8 Stauraumspülungen	10
3. FACHBEREICH STRÖMUNG, TRÜBUNG, GESCHIEBE UND KOLMATION	11
3.1 Morphologie und Strömungsverhältnisse	11
3.2 Schwallganglinien im Alpenrhein	12
3.3 Geschiebetransport	12
3.4 Trübeaufkommen im Einzugsgebiet	13
3.5 Schwebstofftransport in den Hauptzuflüssen des Alpenrheins	14
3.6 Trübung des Alpenrheins	14
3.7 Äussere Kolmation	15
3.8 Innere Kolmation	15
4. FACHBEREICH TRÜBUNG, LICHT, BEWUCHS UND DRIFT	17
4.1 Schwebstoff-Frachten und -Bilanz	18
4.2 Trübung und Lichtklima	16
4.3 Substrat- und Bewuchsverhältnisse	19
4.4 Drift	20
5. FACHBEREICH PHYTO- UND MAKROZOOBENTHOS	22
5.1 Korngrößenverteilung	22
5.2 Aufwuchsalgen	22
5.3 Makrozoobenthos	24
6. FACHBEREICH FISCHÖKOLOGIE	27
6.1 Befischungen	27
6.2 Reproduktionsverhältnisse	28
6.3 Auswirkungen der wichtigsten Schadensfaktoren auf die Fischpopulation	29
6.4 Möglichkeiten zur Reduktion der Schädigung	32
7. SYNTHESE	33
7.1 Physikalisches System	33
7.2 Auswirkungen auf das biologische System	36
7.3 Massgebende Zusammenhänge	40
8. FOLGERUNGEN	42
8.1 Sanierungsansätze	42
8.2 Mögliche Massnahmen und Ausblick	44
9. LITERATURVERZEICHNIS	46

Auftraggeber: Internationale Regierungskommission Alpenrhein, Projektgruppe Gewässer- und Fischökologie
Verfasser: ARGE Trübung Alpenrhein (Zusammenfassungen Fachberichte)
 Limnex AG, Schälchli, Abegg & Hunzinger (Übrige Teile)
Gestaltung: Limnex AG
 Wenn nicht anders erwähnt, stammen die Abbildungen von den Verfassern
Titelbilder: Alpenrhein in den Mastrilser Auen, Blick flussaufwärts (grosses Bild)
 Modifizierter Vibertkasten für die Exposition von Fischeiern (kleines Bild)

Zürich, Innsbruck und Wien, im November 2001



Gefördert aus Mitteln des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung,
 INTERREG II-Programm Alpenrhein-Bodensee-Hochrhein

1. Einleitung

1.1 Das Projekt

Trübung und Schwall im Alpenrhein

Mit Brief vom 27. August 1998 gab die Internationale Regierungskommission Alpenrhein, vertreten durch die Projektgruppe Gewässer- und Fischökologie, eine Untersuchung zum Einfluss der Abfluss- und Trübeschwankungen auf Sohlsubstrat, Benthos und Fische am Alpenrhein in Auftrag. Es handelt sich dabei um ein Teilprojekt (A4) innerhalb des Aktionsprogrammes "Alpenrhein 2000+" der Internationalen Regierungskommission (IRKA, 2001).

Den Anlass zu diesem Projekt bildeten vorangegangene Untersuchungen, die auf eine schwallbedingte Erhöhung der Trübung im Winter sowie auf eine Beeinträchtigung des Benthos- und Fischbestandes durch die Abfluss- und Trübeverhältnisse hinwiesen (Kapitel 2).

Die Untersuchung zu den Abfluss- und Trübeverhältnissen im Alpenrhein wurde von einer Arbeitsgemeinschaft durchgeführt (ARGE Trübung Alpenrhein). Die vier in der ARGE zusammengeschlossenen Firmen bearbeiteten verschiedene, sich ergänzende Fachbereiche (Abbildung 1).

Die Felduntersuchungen am Alpenrhein konzentrierten sich auf die Hochwinterperioden 1998/99 und 1999/2000. Letzte Messungen wurden im Winter 2000/01 durchgeführt.

Projektziele:

Das vorliegende Projekt hatte zum Ziel, jene natürlichen Prozesse und anthropogenen Aktivitäten zu identifizieren, welche den Abfluss und die Trübung des Alpenrheins bestimmen, sowie den Einfluss dieser Faktoren auf die Flusssohle (Morphologie und Kolmation), das Benthos und die Fische zu untersuchen. Damit sollen

1. Die Ursachen für den geringen Makrozoobenthos- und Fischbestand besser verstanden werden,
2. Randbedingungen für anthropogene Aktivitäten formuliert werden, welche den Abfluss und die Trübung des Alpenrheins beeinflussen,
3. Stossrichtungen für Revitalisierungsmassnahmen hergeleitet werden, die zu einer morphologischen und biologischen Aufwertung des Alpenrheins führen.

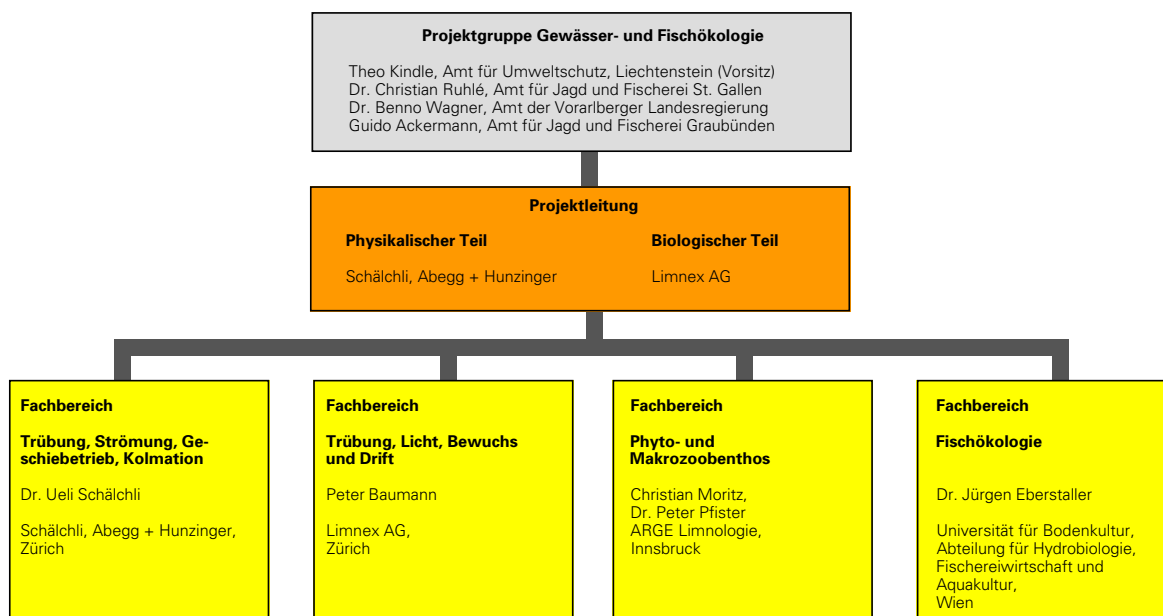


Abb. 1 Organigramm des Projektes zur Untersuchung von Schwall- und Trübeverhältnissen im Alpenrhein.

1.2 Untersuchungskonzept

Aus der Fragestellung und den am Alpenrhein herrschenden Randbedingungen ergaben sich an die Untersuchung der Schwall- und Trübeverhältnisse hohe konzeptionelle und methodische Anforderungen, denen v.a. durch die Wahl von vier morphologisch möglichst unterschiedlichen Teststrecken entsprochen wurde (Tabelle 1). Auf diese "Kernbereiche" wurden die Feldaufnahmen und Berechnungen der einzelnen Fachbereiche soweit als möglich konzentriert. Andere Aufnahmen gingen, der Fragestellung entsprechend, über die Teststrecken hinaus und erstreckten sich auf das ganze Einzugsgebiet des Alpenrheins oder auf dessen gesamte Fliessstrecke zwischen Reichenau und der Mündung in den Bodensee (Abbildung 2).

Das Gesamtprojekt gliederte sich in zwei Hauptteile (Abbildung 1), die jeweils verschiedene Fragestellungen aus den einzelnen Fachbereichen umfassten.

Im **physikalischen Teil** wurden einerseits alle massgebenden abiotischen Einflussfaktoren des "fluvialen Systems Alpenrhein" erfasst, andererseits deren Auswirkungen auf die Flusssohle untersucht. Der physikalische Teil umfasste im Einzelnen:

- Trübequellen und Schwebstoff-Transport im Einzugsgebiet;
- Trübefracht, Abfluss und Pegelstände im Fliessverlauf (speziell in den Teststrecken);
- Lichtverhältnisse im Fliessverlauf (speziell in den Teststrecken);
- Gerinnegeometrie und -morphologie im Fliessverlauf (speziell in den Teststrecken);
- Substrat- und Strömungsverhältnisse sowie Geschiebetrieb in den Teststrecken;
- Kolmations- und Infiltrationsverhältnisse in den Teststrecken.

Im **biologischen Teil** wurden einerseits Bestandesaufnahmen der pflanzlichen und tierischen Lebensgemeinschaften durchgeführt, andererseits spezielle Untersuchungen zum Einfluss der abiotischen Faktoren auf qualitative

Die Teststrecken

Die vier Teststrecken wurden zu Beginn des Projektes ausgewählt und repräsentieren jeweils einen typischen morphologischen Abschnitt des Alpenrheins (Abbildung 2):

- **Mastrilser Rheinauen**; Fluss-km 19.8 - 23.7; naturnahe, verzweigte Strecke; repräsentativ für zukünftige Aufweitungen;
- **Bad Ragaz**; Fluss-km 25.0 - 27.8; kanalisierte Erosionsstrecke mit Schrägbänken; repräsentativ für den Abschnitt Landquart bis Ellhorn;
- **Buchs/Schaan**; Fluss-km 49.6 - 52.0; kanalisierte Auflandungsstrecke mit alternierenden Kiesbänken; repräsentativ für den Abschnitt Ellhorn bis Illmündung;
- **Diepoldsau/Mäder**; Fluss-km 73.0 - 78.0; kanalisierte, durch das Fehlen von morphologischen Strukturen stark naturfremde Strecke; repräsentativ für die Internationale Rheinstrecke (Illmündung bis Bodensee);

Einen Eindruck der einzelnen Rheinabschnitte geben die Luftbilder in Kapitel 3.

und quantitative Aspekte der Besiedlung. Dabei wurden erfasst:

- Algenbewuchs der Flusssohle (Phytobenthos) in den Teststrecken;
- Wirbellosen-Fauna der Flusssohle (Makrozoobenthos) in den Teststrecken;
- Abschwemmung (Drift) von Wirbellosen in der fliessenden Welle bei Untervaz;
- Fischbestand in den Teststrecken und in einzelnen Zubringern;
- Reproduktionserfolg der See- und Bachforelle in den Teststrecken, in einigen Zubringern und in Vergleichsflüssen (Inn, Lech).

Tab. 1 Methodische Probleme und Vorgehensweise bei der Untersuchung der Schwall- und Trübeverhältnisse im Alpenrhein.

Problemkreis	Anforderungen an die Untersuchungen	Vorgehen
Keine vergleichbaren natürlichen bzw. naturnahen Referenzstrecken ohne Schwallbetrieb im Rhein vorhanden	Möglichst weitgehende Aussagen über den ursprünglichen, anthropogen noch nicht beeinflussten Zustand des Lebensraumes und der Lebensgemeinschaft (pflanzliche und tierische Besiedlung) im Hinblick auf zukünftige Revitalisierungsmassnahmen	Wahl der Mastrilser Auen als morphologische Referenzstrecke (mit Schwallfluss) sowie Vergleich mit dem Gewässerzustand (v.a. Trübung, Biologie) in anderen Alpenflüssen und im Rhein vor Beginn des Schwallflusses
Örtliche und zeitliche Überlagerung von unterschiedlichen anthropogenen Einflüssen	Ermittlung der wesentlichen Einflussfaktoren (z.B. Kanalisierung des Gerinnes, Schwallbetrieb, künstliche Trübung) und speziell ihrer Einzelwirkung auf abiotische und biotische Vorgänge im Gewässer	Wahl von morphologisch und hydrologisch möglichst unterschiedlichen Teststrecken sowie Ermittlung der Einzelfaktoren und ihrer Wirkung durch Quervergleich dieser Strecken
Untersuchung der zentralen Flussbereiche	Gewährleistung einwandfreier Messungen und Probenahmen auch unter methodisch schwierigen Verhältnissen	Einsatz spezieller Probenahmegeräte sowie Verwendung der bestehenden Infrastruktur

1.3 Auswertung und Berichterstattung

Die Untersuchungsergebnisse wurden zuerst innerhalb jedes Fachbereiches ausgewertet und dargestellt. Anschliessend wurden die Befunde im Rahmen eines gemeinsamen Workshops fachübergreifend besprochen und miteinander verknüpft.

Der vorliegende Synthesebericht fasst die wesentlichen Resultate und Schlussfolgerungen der Fachbereiche einzeln (Kapitel 3 bis 6) und in der Gesamtschau (Kapitel 7) zusammen. Er enthält ausserdem eine Übersicht über weitere

Grundlagen zum Alpenrhein (Kapitel 2) und Vorschläge für das weitere Vorgehen im Hinblick auf eine zukünftige ökologische Aufwertung (Revitalisierung) des Alpenrheins (Kapitel 8). In Kapitel 9 ist die zitierte Literatur verzeichnet.

Der Gesamtbericht zum Projekt “Trübung und Schwall im Alpenrhein” umfasst neben dem vorliegenden Synthesebericht noch die ausführlichen Fachberichte der vier beteiligten Firmen (Sachbereiche) sowie eine separate Literaturstudie zur Trübung im Alpenrhein (s. Kapitel 2).

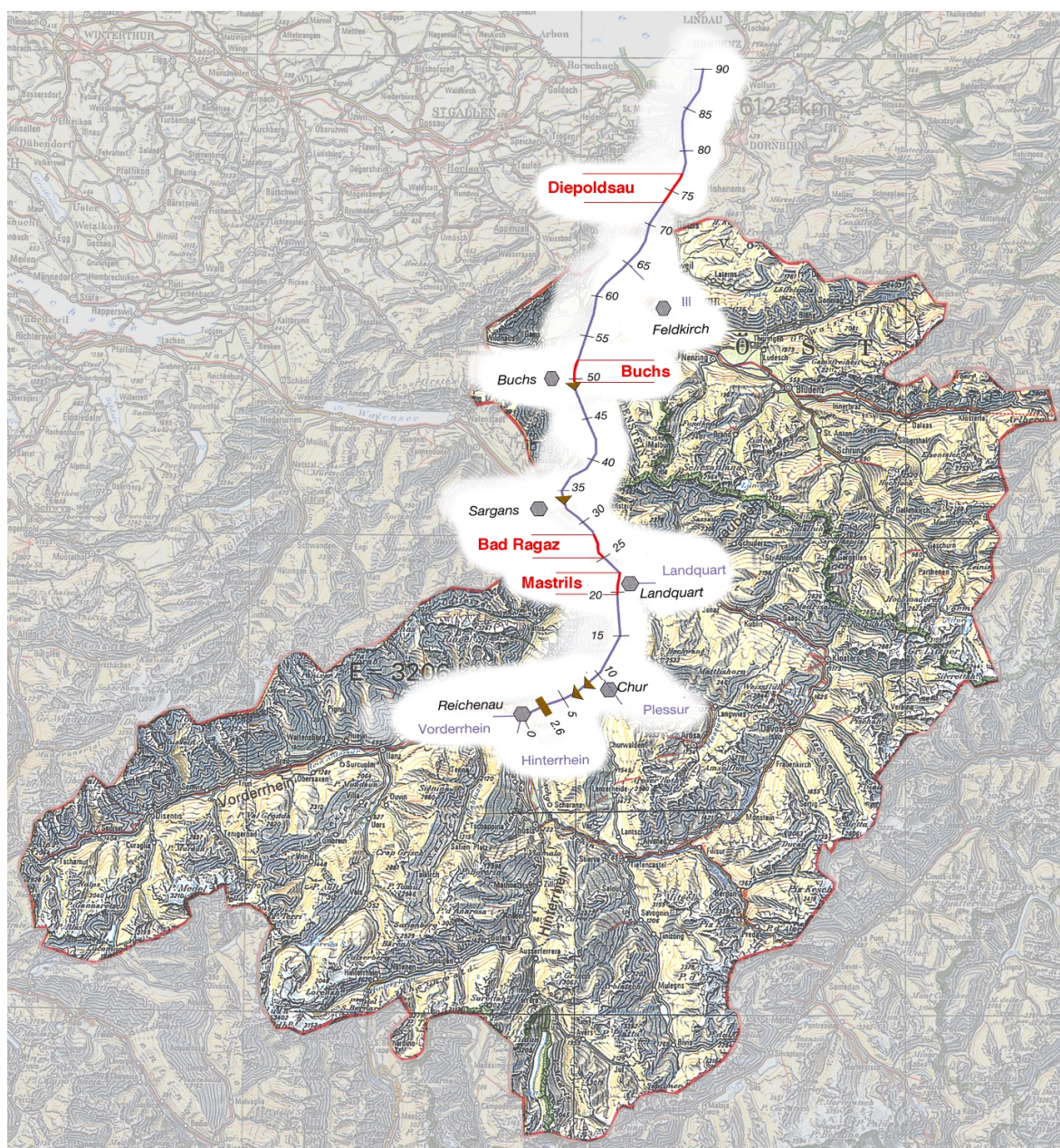


Abb. 2 Einzugsgebiet des Alpenrheins. Speziell hervorgehoben ist die ca. 90 km lange Flie遝sstrecke des Alpenrheins zwischen Reichenau (Zusammenfluss von Vorder- und Hinterrhein) und der Mündung in den Bodensee (aus Zarn, 1999, verändert). Die Zahlen bezeichnen die Fluss-Kilometrierung. Bei Fluss-km 2.6 befindet sich das Wehr des Kraftwerkes Reichenau. Braune Dreiecke = Blockrampen; Rote Abschnitte = Teststrecken.

2. Grundlagen

Die Studie zu den Schwall- und Trübeverhältnissen stützt sich auf zahlreiche Erkenntnisse ab, welche aus dem Alpenrhein selbst oder aus anderen Flüssen stammen. Im vorliegenden Kapitel werden einige der verwendeten Grundlagen angeführt, die thematisch nahestehende Fragestellungen behandeln und so zum Verständnis der nachfolgenden Ausführungen beitragen können. Diese kurzen Streiflichter vermitteln kein vollständiges Bild; auf weiterführende Literaturzusammenstellungen wird wo möglich verwiesen. Weitere Hinweise auf sachbezogene Literatur werden in den ausführlichen Fachberichten gegeben.

2.1 Schwallbetrieb

Der Schwallbetrieb (oder gleichbedeutend: Schwellbetrieb) im Alpenrhein geht zurück auf die hydroelektrischen Speicherwerke, welche v.a. in den 1950er und 1960er Jahren in grosser Zahl errichtet wurden. Heute sind im total 6'122 km² grossen Einzugsgebiet über 20 Speicherseen und grössere Ausgleichsbecken in Betrieb, die über ein Speichervolumen von insgesamt ca. 770 Mio. m³ verfügen (Schaller, 1993). Das entspricht einem Anteil von etwas über 10% der mittleren jährlichen Abflussmenge, welche der Alpenrhein bei Diepoldsau führt. Durch den Bau der Speicher ist dieser Anteil vom Sommer in den natürlicherweise abflussarmen Winter verlagert worden: bei Diepoldsau nahm der mittlere Abfluss während des Winterhalbjahres zwischen den Perioden 1931 - 1950 bzw. 1971 - 1990 um 32% zu (von 105 auf 137 m³/s; Schaller, 1993).

Neben dieser saisonalen Verlagerung führen die Speicherkraftwerke in den unterliegenden Fliessgewässern während des Winters auch zu grossen tagesrhythmischen Abflussschwankungen, indem sie das gespeicherte Wasser zur Deckung des Spitzenbedarfes intermittierend abarbeiten (turbिनieren). Die hohe Wasserführung während des Turbinierbetriebes wird als Schwall, die tiefe während der übrigen Zeiten als Sunk bezeichnet.

Um das Ausmass des Schwallbetriebes in verschiedenen Gewässern zu vergleichen, sind für eine hochwinterliche Woche im Februar 2001 die Abflussdaten von 30 Messstationen an mittleren bis grösseren, schwallbeeinflussten Gewässern der Schweiz ausgewertet worden (Limnex, 2001). An den beiden berücksichtigten Messstationen des Alpenrheins (Domat/

Ems im Ober- und Diepoldsau im Unterlauf) erreichte die maximale Schwankung des Wasserspiegels (Pegeldifferenz) zwischen Schwall und Sunk in dieser Woche — und gemessen an den Werten aller untersuchter Stellen — hohe bis sehr hohe Werte (Abbildung 3). Das maximale Verhältnis zwischen Schwall und Sunk lag dagegen in einem mittleren bis relativ tiefen Bereich. Bei Domat/Ems zeigten beide Schwallkennzahlen deutlich ungünstigere Werte als bei Diepoldsau, was v.a. an der im Vergleich zum Schwallabfluss viel geringeren Niedrigwasserführung lag.

Bei Untersuchungen in verschiedenen österreichischen Rhithralgewässern ist festgestellt worden, dass die Fisch-Biomasse mit zunehmendem Verhältnis von Schwall- zu Sunkabfluss signifikant zurückging (Jungwirth, 1992).

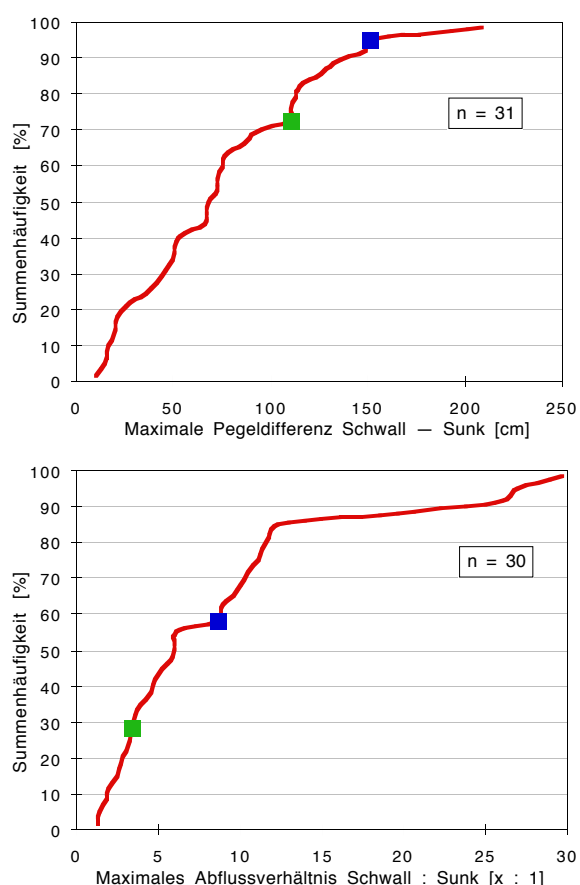


Abb. 3 Summenhäufigkeiten der maximalen Pegeldifferenz (oberes Bild) und des maximalen Abflussverhältnisses (unteres Bild) für verschiedene schwallbeeinflusste Stellen an schweizerischen Fliessgewässern in der Woche vom 22.2. bis 28.2.2001. Hervorgehoben sind die Stationen am Alpenrhein bei Domat/Ems (blau) und bei Diepoldsau (grün).

Die Literatur zu den Auswirkungen von Schwall- und Sunkerscheinungen auf den Lebensraum und die Lebensgemeinschaft der unterliegenden Fließgewässer ist u.a. in Cushman (1985), Moog (1993), Valentin (1997) und Schöb (1998) zusammengestellt. Als mögliche Folgen des Schwall/Sunk-Betriebes werden angeführt:

- Schwankungen der Wassertemperatur und des Sauerstoffangebotes;
- Schwankungen der Fließgeschwindigkeit und der Wassertiefe;
- Deposition und Resuspension von Feinsedimenten;
- Erhöhte Trübung;
- Erhöhte Abschwemmung von Benthosorganismen ("Katastrophen-drift");
- Trockenfallen von Benthosorganismen, Fischeiern und Fischen;
- Verminderte Produktivität des gesamten Gewässers;
- Vermindertes Nahrungsangebot für Fische;
- Beeinträchtigung der Reproduktion bei Fischen.

2.2 Trübung

Der Kenntnisstand über die natürlichen Trübe-verhältnisse im Alpenrhein und über die gewässerökologischen Auswirkungen der Trübung sind in einer Literaturstudie zusammengefasst (Limnex, Schälchli & Abegg, 1997), welche Bestandteil des Gesamtberichtes Alpenrhein ist. Ergänzende Angaben dazu finden sich auch in den einzelnen Fachberichten.

Die spärlichen Grundlagen zur Trübung im Alpenrhein unter natürlichen Abflussbedingungen (vor dem Schwallenfluss) weisen darauf hin, dass der Fluss im Winter überwiegend klares Wasser führte. Die Schwebstoff-Konzentration (ausgedrückt als Gewicht der abfiltrierten und getrockneten Feststoffe pro Liter Flusswasser) dürfte dabei im Bereich von <1 mg/l bis einige wenige mg/l gelegen haben. Zusammen mit der konstant tiefen Abflussmenge (Niedrigwasser) und einer entsprechend stabilen Zusammensetzung der Sedimente (Sohlenruhe) ergaben sich dadurch vergleichsweise günstige Bedingungen für die Entwicklung der wirbellosen Lebensgemeinschaft (Benthos) und der Fischbrut. Im Gegensatz dazu herrschen im Alpenrhein während des Sommers schon natürlicherweise sehr unwirtli-

che Verhältnisse: Der Schwebstoff-Gehalt steigt, beginnend mit der Schneeschmelze, auf Werte von 50 bis einigen 100 mg/l, liegt also eine bis zwei Grössenordnungen über den natürlichen Winterwerten. Bei den regelmässigen Hochwasserereignissen werden Konzentrationen von 5'000 bis (im Extremfall) >50'000 mg/l (entsprechend 5 bis >50 g/l) erreicht, und auch ein grosser Teil der gröberen Sedimente auf der Flusssohle wird umgelagert (Geschiebe-trieb).

Welche Folgen die Trübung für aquatische Organismen hat, hängt von vielen verschiedenen Faktoren ab. Über das mögliche Ausmass einer Schädigung entscheidet einerseits die absolute Höhe des Feststoffgehaltes sowie der zeitliche Verlauf und die Dauer der Einwirkung. Ebenfalls massgebend ist auf der anderen Seite aber, wie hoch die Trübung relativ zu den natürlichen Verhältnissen („Background“) ist. So kann im Alpenrhein eine Erhöhung der Trübung während des natürlichen winterlichen „Klarwasserstadiums“ auch dann schwerwiegende Auswirkungen haben, wenn sie absolut betrachtet noch weit unter den (ebenfalls natürlichen) Sommerwerten liegt.

Die Trübung wird im Alpenrhein hauptsächlich durch mineralische Schwebstoffe (Gesteinsabrieb) verursacht. Für derartige, chemisch inerte Partikel sind u.a. folgende Auswirkungen auf die Lebensgemeinschaft der Gewässer belegt (siehe auch Abbildung 4):

- Eine Verminderung der Produktivität auf allen Stufen der Nahrungskette;
- Eine direkte körperliche Schädigung von Fischen und Benthosorganismen durch mechanische Verletzung oder Verstopfung von Kiemen und anderen feinen Körperteilen (z.B. Filtrierorgane);
- Eine Beeinträchtigung des Lebensraumes und speziell der Laichareale von Fischen durch Ablagerung von Feinsedimenten (Versiltung, Kolmation);
- Eine Beeinflussung des Bewegungs- und Wanderungsverhaltens der Fische durch Verkleinerung der Sichtdistanz;
- Eine Verringerung des Nahrungsangebotes für Fische durch verminderte Produktion und schlechtere Sichtbarkeit der Futterorganismen (hauptsächlich Makroinvertebraten).

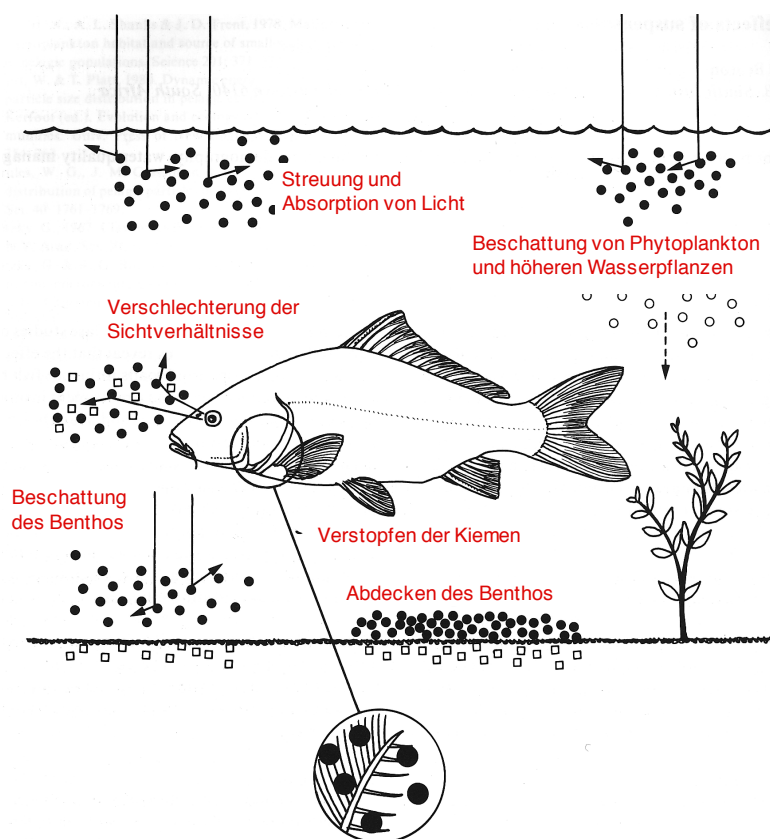


Abb. 4 Vereinfachte Darstellung einiger Auswirkungen von mineralischen Schwebstoffen auf aquatische Organismen in stehenden und fliessenden Gewässern. Schwarze Kreise: Schwebstoffe; weisse Kreise: Phytoplankton; weisse Quadrate: Zooplankton und Zoobenthos. Aus Bruton (1985), verändert.

2.3 Wasserqualität

Die physikalisch-chemische Wasserqualität des Alpenrheins wird an mehreren Stellen regelmässig anhand von Stich- oder Sammelproben untersucht (AfU SG, 1998; Buhmann & Hutter, 1998). Dabei zeigt das Rheinwasser bezüglich der untersuchten Parameter (anorganische Phosphor- und Stickstoff-Verbindungen, gelöste organische Stoffe, Keimzahl) eine durchwegs geringe bis höchstens mässige Belastung an. Bei der von den Kantonen Graubünden und St. Gallen gemeinsam betriebenen Messstation Maienfeld ist im Februar 1994 eine on-line Messkampagne durchgeführt worden, welche speziell auf die winterlichen Niedrigwasserverhältnisse ausgerichtet war (Limnex, 1994). Dabei erwies sich der Alpenrhein auch unter ungünstigsten Bedingungen (minimale Wasserführung bei maximalem Abwasseranfall infolge hoher touristischer Auslastung) bezüglich Nitrat-Stickstoff, Gesamt-Phosphor und gelösten organischen Verbindungen als unbelastet bis höchstens schwach belastet. Eine höhere Be-

lastung wurde beim Nitrit-Stickstoff und beim biologischen Sauerstoff-Verbrauch (BSB_5) ermittelt. Insbesondere das Nitrit erreichte bei tiefen Abflüssen Konzentrationen, die für Fische potentiell schädlich sind.

In jüngster Zeit ist in den Rheintal-Gewässern intensiv nach fischtoxischen Stoffen geforscht worden (ARGE Fischgesundheit, 2001). Es handelt sich dabei um eine ganze Palette von komplexen organischen Verbindungen aus Haushaltsprodukten, die in den Kläranlagen (ARA) nicht vollständig abgebaut werden und daher mit dem gereinigten Siedlungsabwasser in die Vorflut gelangen. Diese Stoffe gelten als mögliche Ursache für den seit ca. 1980 beobachteten Rückgang der Bachforellen in den Gewässern der Talebene (einschliesslich des Alpenrheins). Zu den anderen diskutierten Ursachen gehört z.B. eine langfristige erhöhte Wassertemperatur.

Im Alpenrhein ist seit 1974 eine tendenzielle Zunahme der jährlichen Temperaturmaxima festzustellen, während die Jahresmittel und minima gleichzeitig keinen klaren Trend aufweisen (ARGE Fischgesundheit, 2001).

2.4 Morphologie

Die Entstehungsgeschichte des Alpenrheintals und die verschiedenen Phasen der Rheinregulierung vom 18. bis ins 20. Jahrhundert sind in IRR (1993) beschrieben. Heute ist der Alpenrhein fast durchgehend begradigt und kanalisiert, nur im Bündner Rheintal sind noch zwei Abschnitte mit dem natürlichen, gewundenen (bei Trimmis) oder verzweigten Flusslauf (Masstriser Auen) erhalten geblieben (BWG, 1992). In den vergangenen Jahren sind im Auftrag der Anstösser umfangreiche ökomorphologische Aufnahmen der Gewässerstruktur (Natürlichkeitsgrad von Gewässerbett, Wasserkörper und Uferbereich, Unterbrüche im Längsverlauf, Raumbedarf) am Alpenrhein selbst und in grossen Teilen seines Einzugsgebietes durchge-

führt worden (siehe z.B. Buhmann et al., 2001). Dabei wurde, der starken Kanalisierung und Uferverbauung entsprechend, ein über weite Strecken stark beeinträchtigter, naturferner Zustand festgestellt. Eine grössere strukturelle Natürlichkeit findet sich nur mehr in den erwähnten, mehr oder weniger unverbauten Abschnitten (Abbildung 5).

Im gesamten Mittellauf des Alpenrheins, zwischen der Landquart- und der Illmündung, ist das Gerinne des Alpenrheins durch eine Abfolge von Kiesbänken geprägt (Kapitel 3). Diese in der Regel alternierend angeordneten Bänke erhöhen die Strukturvielfalt und -güte in den entsprechenden Flussabschnitten v.a. bei Niedrigwasser (Sunk) stark: Eine Auswertung von Querprofilmessungen hat ergeben, dass die Breiten- und Tiefenvariabilität in den Teststrecken Bad Ragaz und Buchs (mit Kiesbänken) in der gleichen Grössenordnung liegt wie in der morphologisch natürlichen Strecke Mastrils, in der Teststrecke Diepoldsau (ohne Kiesbänke) hingegen wesentlich geringer ist (Abbildung 6). Bei Schwall nimmt diese Variabilität in den vielfältigeren Strecken deutlich bis stark ab, was durch das teilweise Überfluten der Kiesbänke bedingt ist. Insbesondere in der Teststrecke Buchs wird deutlich, wie stark die vergleichsweise hohe Breitenvariabilität bei Sunk durch den steigenden Wasserspiegel bei Schwall vermindert wird. Die als Indikator für die morphologische Vielfalt verwendete Breiten- und Tiefenvariation hat sich in verschiedenen schweizerischen und österreichischen Untersuchungen als eine der massgebenden Grössen für die Diversität und Biomasse des Fischbestandes erwiesen (Peter, 1986; Jungwirth, 1981).

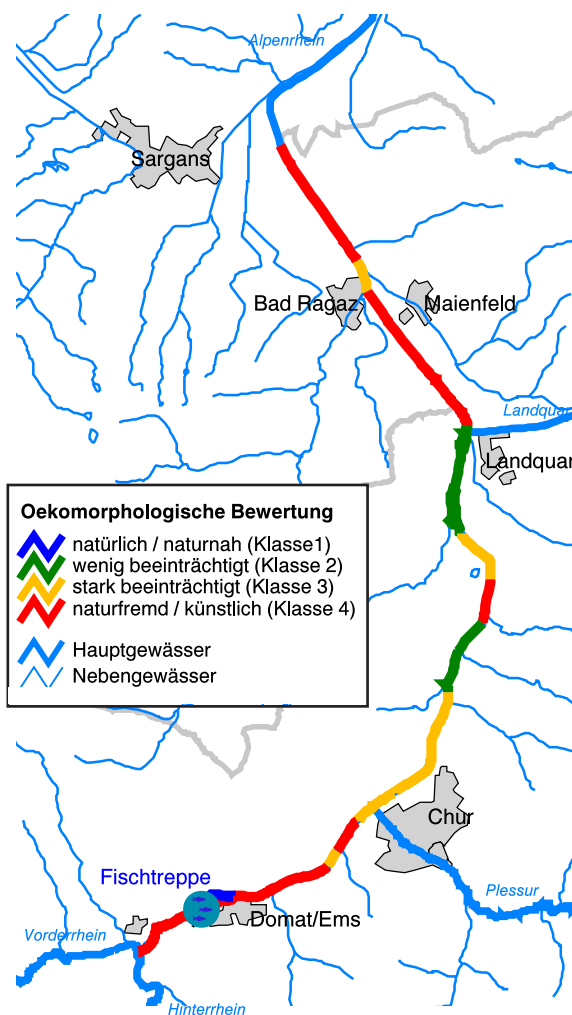


Abb. 5 Ökomorphologische Einstufung des Alpenrheins in seinem Oberlauf (Kantonsgebiet Graubünden). Aufnahmen und Darstellung: Amt für Umwelt Graubünden.

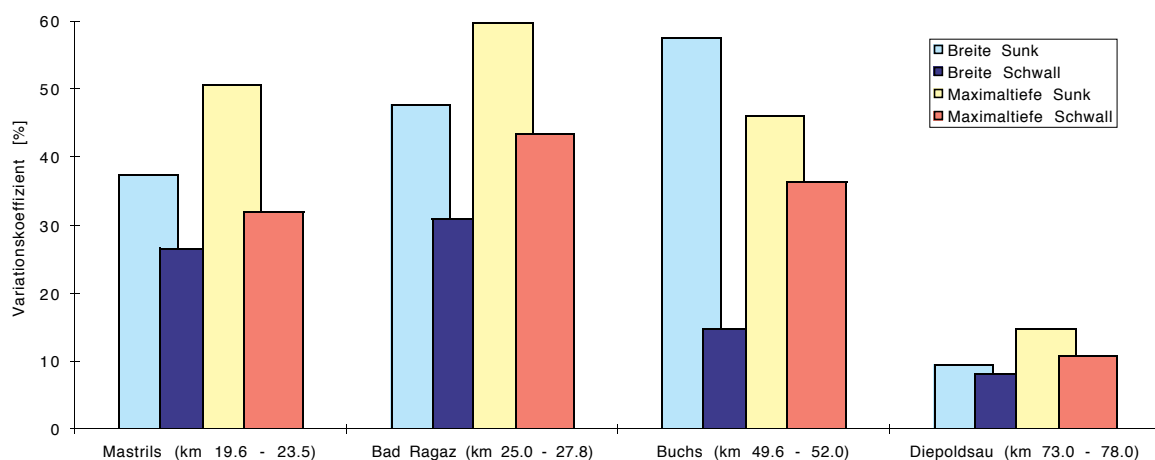


Abb. 6 Variationskoeffizient der benetzten Breite und der Maximaltiefe, berechnet für die Abflusszustände Schwall und Sunk in den Teststrecken Mastrils (in 21 Querprofilen), Bad Ragaz (14 Querprofile), Buchs (7 Querprofile) und Diepoldsau (26 Querprofile). Die Querprofilaufnahmen stammen von der Rheinbauleitung des Kantons St. Gallen.

Zum Feststoffhaushalt und dessen Auswirkungen auf die Sohle des Alpenrheins liegen zwei grundlegende Studien vor:

- Zarn et al. (1995) und Hunziker & Zarn (1998) untersuchten für den gesamten Flusslauf die Entwicklung des Geschiebetransportes und der Sohlenlage über die vergangenen Jahrzehnte in Abhängigkeit von der Zufuhr aus Seitenflüssen und von Kiesentnahmen;
- Ausführliche Modellversuche zur Ablagerung von Feinsedimenten und zur dadurch bedingten Kolmation der Flusssohle wurden von Schälchli (1993) durchgeführt.

2.5 Benthos- und Fischbestand

Die pflanzliche und tierische Besiedlung der Flusssohle wird an zwei Stellen im Unterlauf des Alpenrheins (Bangs und Fussach) seit den 1970er Jahren periodisch aufgenommen (Buhmann & Hutter, 1998). Die Internationale Rheinstrecke wurde aufgrund der benthischen Indikatoren für den Gewässerzustand sowohl 1978 als auch 1998 in die Güteklasse II (mässig belastet) eingestuft. In dieser Einstufung kommt hauptsächlich die Abwasserbelastung zum Ausdruck, und es wird ausdrücklich darauf verwiesen, dass die ökologische Funktionsfähigkeit des Gewässers durch andere Einflussfaktoren (Strukturarmut, Schwallbetrieb) stärker beeinträchtigt ist.

Ältere Angaben zum Benthos des Alpenrheins sind nur sehr spärlich vorhanden (Limnex, Schälchli & Abegg, 1997 sowie ergänzende Angaben in den Fachberichten).

Über den ursprünglichen Fischbestand im Alpenrhein bestehen recht gute Kenntnisse, die in Jungwirth et al. (1991) sowie Schmutz & Eberstaller (1993) aufgearbeitet und dargestellt sind. Daraus geht hervor, dass die Artenvielfalt der Fische in den vergangenen 150 Jahren stark abgenommen hat. Zurückgeführt wird dies von Eberstaller et al. (1997) einerseits auf die zunehmenden strukturellen Defizite als Folge der Kanalisierung und Verbauung (Morphologie des Hauptgerinnes, Abtrennung der Seitengewässer), andererseits auf die zunehmende Beeinträchtigung durch andere anthropogene Einflüsse (Schwallbetrieb, Trübung, Stauraumspülungen, Störungen des Geschiebehaushaltes, Abwasser- und Schadstoffbelastung, Konkurrenz durch neu eingeführte Arten).

2.6 Revitalisierung

Um die Rheinsohle zu stabilisieren, wurde bereits 1995 ein Abschnitt des Alpenrheins bei Felsberg aufgeweitet (Abbildung 7) und damit auch die monotone Morphologie des verbauten Gerinnes (Kapitel 2.4) zumindest örtlich durchbrochen.

Eine morphologische Umgestaltung und, damit verbunden, eine ökologische Aufwertung (Revitalisierung) des Alpenrheins, zählte von Anfang an auch zu den Hauptzielen und -aktivitäten der Projektgruppe Gewässer- und Fischökologie in der Internationalen Regierungskommission Alpenrhein (IRKA, 2001). In ihrem Auftrag wurde zuerst ein Gewässer- und Fischökologisches Konzept erarbeitet, welches für den ganzen Hauptfluss und für seine Seitengewässer wesentliche Grundlagen zu einer zukünftigen Revitalisierung enthält (Eberstaller et al., 1997). Dazu zählen insbesondere eine Bestandesaufnahme zur Entwicklung und aktuellen Situation des Flussraumes (Ist-Zustand), ein typspezifisch-visionäres Leitbild (Soll-Zustand), eine Defizitanalyse sowie ein Massnahmenkonzept mit vier Beispielen von möglichen Revitalisierungsabschnitten. Für einen dieser Abschnitte, den Illspitz, ist die ökologische Aufwertung in der Folge durch eine Machbarkeitsstudie konkretisiert worden (ARGE Illspitz, 2000).

In einem weiteren, noch laufenden Projekt der Internationalen Regierungskommission werden am Alpenrhein schliesslich Möglichkeiten zur Erhöhung des Struktureichtums durch das Einbringen von Totholz in Zuflüsse untersucht (IRKA, 2001).



Abb. 7 Die Flussaufweitung im Alpenrhein bei Felsberg. Aufnahme des Tiefbauamtes Graubünden vom 22. Oktober 2001.

2.7 Grundwasser

Die Grundwasserverhältnisse des gesamten Alpenrhein-Tals sind in einem kürzlich abgeschlossenen Projekt durch ein grenzüberschreitendes, numerisches Grundwasser-Haushaltsmodell erfasst worden (ARGE Grundwasser, 2000). Damit wurden auch die theoretischen Voraussetzungen geschaffen, um die Infiltration der grundwassergespiesenen Seitenbäche in der Talebene (Giessen) zukünftig verbessern zu können.

2.8 Stauraumspülungen

Die Spülungen von Stauräumen (Flussstauhaltungen, Ausgleichsbecken, Speicherseen) im Einzugsgebiet finden in der Regel während der abflussreichen Frühjahrs- und Sommermonate statt, wenn der Alpenrhein schon natürlicherweise eine hohe Schwebstoff-Konzentration und Trübung aufweist (Kapitel 2.2). Spülereignisse wurden im vorliegenden Projekt deshalb nicht systematisch untersucht, sondern nur vereinzelt — im Zuge der zahlreichen Trübmessungen im Rhein und seinen Zuflüssen — mit erfasst. Ein Beispiel dafür zeigt Abbildung 8.

Werden Stauräume in Perioden mit zu geringer Wasserführung gespült, so kann das unterliegende Flusssystem stark beeinträchtigt werden (BUWAL, 1994). Dies bestätigte sich auch im

Ober- und Mittellauf des Alpenrheins, wo eine Entleerung des Stauraums Reichenau im November 1989 zu einer starken Verschlammung und Versandung der Flusssohle, zu einer Überdeckung des Algenbewuchses (v.a. die fädige Goldalge *Hydrurus foetidus*) und zu einer deutlichen bis starken Reduktion von Taxazahl, Individuendichte und Biomasse des Makrozoobenthos führte (Jungwirth et al., 1991). Das Spülregime des Kraftwerkes Reichenau ist in der Zwischenzeit an diese Erkenntnisse angepasst worden.

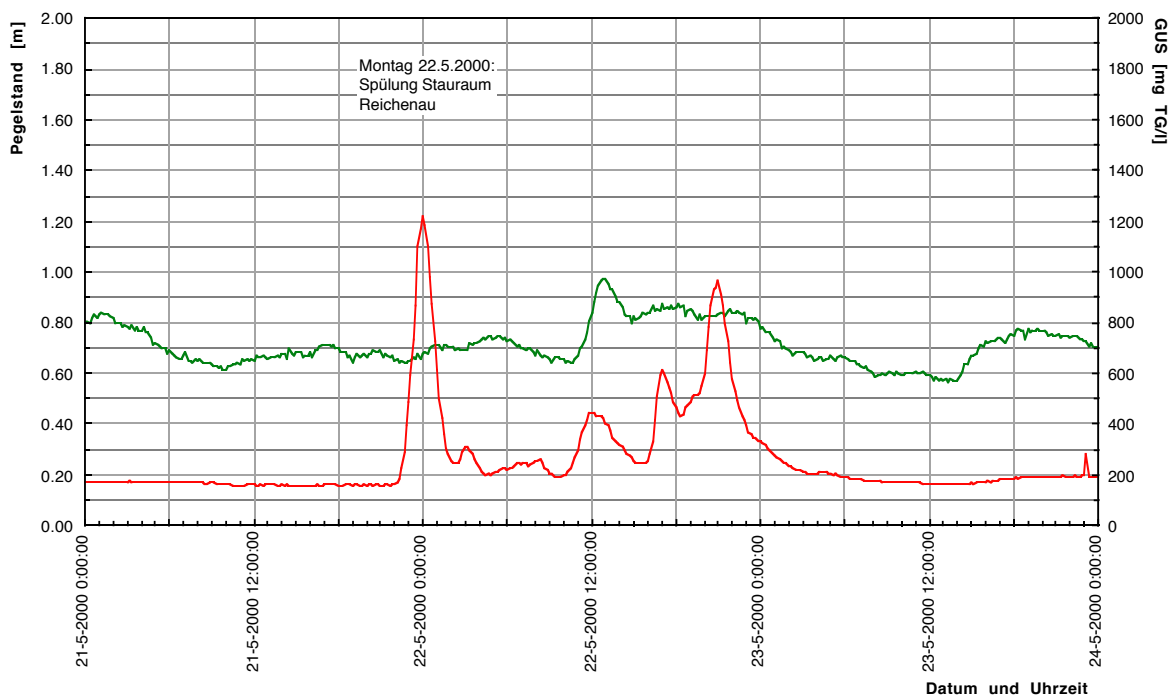


Abb. 8 Pegelstand (grüne Kurve) und Schwebstoffgehalt (GUS, rote Kurve) im Alpenrhein bei Bangs vom 21.5. bis 23.5.2000. Am Montag, 22.5. wurde der Stauraum des Kraftwerkes Reichenau gespült.

3. Fachbereich Trübung, Strömung, Geschiebetrieb und Kolmation

Der Fachbereich Trübung, Strömung, Geschiebetrieb und Kolmation befasst sich mit dem Fließregime, dem Feststofftransport und dem Substrat im Alpenrhein. Das Fließregime betrifft das Abflussgeschehen und die Strömungsverhältnisse. Der Feststofftransport beschreibt das Trübeaufkommen sowie den Geschiebe- und Schwebstofftransport im Alpenrhein. Die Untersuchungen des Substrats beziehen sich auf die Kornverteilung der Gewässersohle sowie die innere und die äussere Kolmation.

Im folgenden werden die wesentlichen Untersuchungsergebnisse vorgestellt. Die entsprechenden Nachweise (Felderhebungen, Berechnungen) sind im Fachbericht Schälchli, Abegg + Hunzinger zu finden.

3.1 Morphologie und Strömungsverhältnisse

Die Strömungsverhältnisse werden geprägt durch das Gefälle, die Morphologie und den Abfluss. Bei Niederwasserabfluss bilden sich in den Streckenabschnitten mit Bänken die ausgeprägtesten Strömungsunterschiede aus. Furten und Schnellen zeigen eine hohe Fließgeschwindigkeit bei kleiner Abflusstiefe und Rinnen eine kleine Fließgeschwindigkeit bei grosser Abflusstiefe. Bei ansteigendem Abfluss gleicht sich die Fließgeschwindigkeit in der Rinne langsam an diejenige in der Schnelle

Der Alpenrhein kann aus morphologischer Sicht in die folgenden Strecken eingeteilt werden:

1. Domat Ems - Untervaz (16 km) mit gestrecktem Lauf, eingegengtem Profil mit ausgeglichener Sohle und vereinzelter Kiesbänken,
2. Verzweigte Flussaue von Mastrils (3 km) mit weitgehend natürlichem Flusslauf mit einer unregelmässigen Abfolge von Furten, Schnellen und Rinnen (Abbildung 9),
3. Landquart - Illmündung (42 km) mit einer regelmässigen Abfolge von alternierenden Bänken mit Furten, Schnellen und Rinnen (Abbildung 10),
4. Internationale Rheinestrecke (25 km) mit stark eingegengtem Hauptgerinne und ebener Flusssohle, keine Bänke (Abbildung 11).

an, sodass bei erhöhtem Mittelwasserabfluss (oder der Schwallspitze) ein mehr oder weniger ausgeglichenes Geschwindigkeitsprofil zu beobachten ist.

Dementsprechend führt der Winterschwall zu einer grundlegenden Veränderung der Strömungsverhältnisse im Alpenrhein. Bei Schwall



Abb. 9 Rhein Zizers - Landquart mit den Mastrilser Rheinauen. Blick gegen die Fließrichtung.



Abb. 10 Rhein Triesen - Vaduz mit alternierenden Bänken. Blick in die Fließrichtung.



Abb. 11 Rhein, Diepoldsauer Durchstich. Internationale Rheinestrecke, Blick flussaufwärts (schmales Hauptgerinne mit Vorländern).

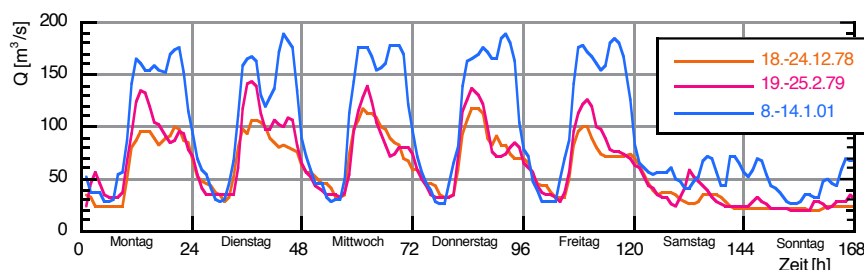


Abb. 12 Typische Wochenganglinien mit Schwall, Rhein bei Felsberg (1978 und 1979) sowie bei Domat Ems (2001). Die zwei Abflussmessstationen sind vergleichbar.

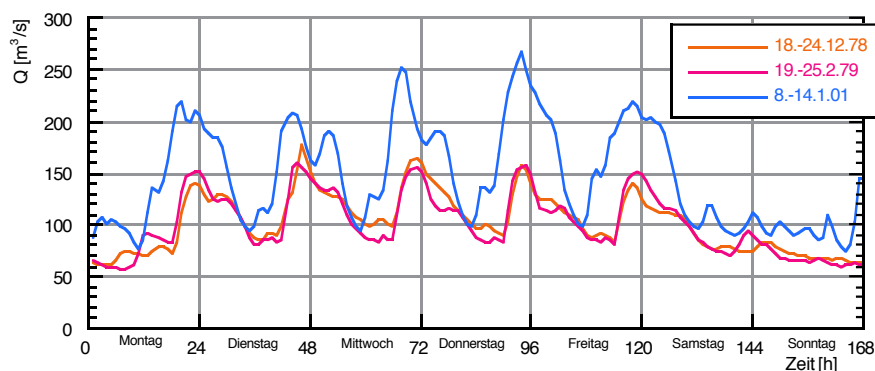


Abb. 13 Typische Wochenganglinie mit Schwall, Rhein Diepoldsau 1978, 1979 und 2001.

verschwinden die charakteristischen Strömungsverhältnisse des Niederwasserabflusses. In den Rinnen steigt die mittlere Fließgeschwindigkeit von ca. 0.5 m/s auf 1.6 m/s an, der Wasserspiegel wird um 0.8 - 1.4m angehoben und die benetzte Breite kann in einzelnen Profilen um bis zu 60m zunehmen (in anderen Profilen um wenige Meter).

3.2 Schwallganglinien im Alpenrhein

Der Alpenrhein zeigt einen ausgeprägten werktäglichen Winterschwall, der sich aus der Überlagerung von zurückgeleitetem Triebwasser verschiedener Kraftwerksanlagen aufbaut. In den Abbildungen 12 und 13 sind typische Wochenganglinien der Abflussmessstationen bei Domat Ems (früher Felsberg) und Diepoldsau von 1978, 1979 und 2001 dargestellt.

Die Abflussganglinien der letzten zwei Winter (99/00 und 00/01) zeigen für Domat Ems Basisabflüsse von 20 - 40 m^3/s , Schwallanstiege von 120 - 160 m^3/s und Tagesspitzenabflüsse von 150 - 190 m^3/s (Domat Ems). Für Diepoldsau betragen die entsprechenden Werte 70 - 90 m^3/s (Basisabfluss), 130 - 220 m^3/s (Schwallanstieg) und 200 - 300 m^3/s (Tagesspitzenabfluss). Die statistische Auswertung der Winter

1978 - 80, 1988 - 90 und 1998 - 2001 zeigt, dass der Kraftwerkschwall im Alpenrhein deutlich zugenommen hat. Ende der 70er Jahre betrug der Median (50% der Werte) aller Schwallanstiege vom 1.11. bis zum 28.2. (inkl. Wochenenden und Feiertage) 89 m^3/s , Ende der 80er Jahre 92 m^3/s und während der letzten drei Winter 130 m^3/s . Dies bedeutet, dass der Schwall durchschnittlich um knapp 50% angestiegen ist. Dieselbe Tendenz ist auch an der Land-

quart, dem Rhein bei Diepoldsau und wahrscheinlich an der Ill festzustellen.

3.3 Geschiebetransport

In den Teststrecken wurde der Geschiebetrieb für charakteristische Abflüsse sowie für die Schwallganglinien der Abbildungen 12 und 13 berechnet.

Unter natürlichen Abflussverhältnissen ist die Rheinsohle in den Wintermonaten in Ruhe. Feingeschiebeablagerungen bleiben dort liegen, wo sie während den letzten Sommer- oder Herbsthochwassern abgelagert worden sind.

Mit den Schwallabflüssen, wie sie in den vergangenen Wintern beobachtet werden konnten, ergeben sich folgende Veränderungen. In den Schnellen sind lokale Sohlenerosionen festzustellen (Abbildung 14). Das erodierte Material wird zum Teil in den Kolken abgelagert (grobes Material) oder durch die Rinne flussabwärts weitertransportiert. Gleichzeitig können (bei Schwall) Feingeschiebeablagerungen mobilisiert und ebenfalls rheinabwärts transportiert werden. Bei abnehmendem Schwall wird das mobilisierte Geschiebe in Senken als Geschiebezungen oder entlang von Ufern in Form von

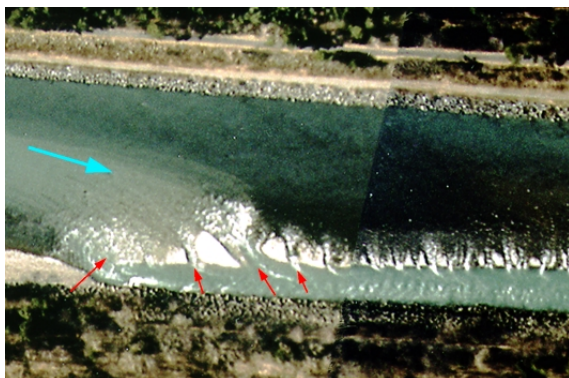


Abb. 14 Teststrecke Bad Ragaz, Erosion im Bereich der Schnellen (rote Pfeile). Luftbild vom 8.3.00.

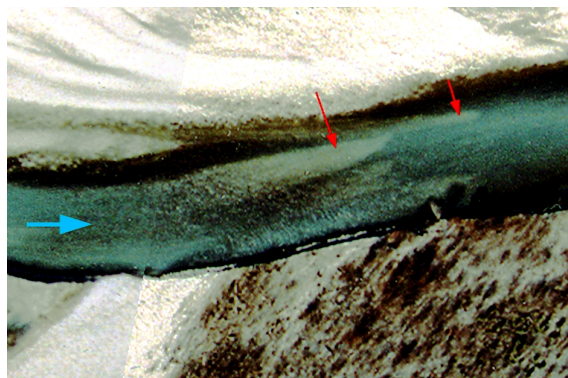


Abb. 15 Teststrecke Mastrils. Geschiebeablagerungen (rote Pfeile). Luftbild vom 8.3.00.

Längsstreifen abgelagert (Abbildung 15). Der nachfolgende Schwall führt wieder zu einer Teilmobilisierung dieses Materials.

Dies bedeutet, dass im Hauptstrombereich des Flusslaufs ein in Fließrichtung durchgehender Sohlenbereich mit instabilem Sohlenmaterial (Umlagerung von Geschiebe in Rinnen) oder regelmäßigem Geschiebetransport über die stabile Deckschicht (untere Rinnenabschnitte und Furten) vorhanden ist. Vom Geschiebetrieb am wenigsten betroffen sind (neben den Hinterwassern) die Uferbereiche und die Flachwasserzonen.

Der bei Schwall einsetzende Geschiebetrieb ist nicht mit den Verhältnissen bei Hochwasserabfluss zu vergleichen, wo ein flächendeckender Geschiebetrieb mit der Verlagerung von Kiesbänken stattfindet. Der Schwallabfluss liegt leicht über dem Grenzwert bezüglich Geschiebetriebbeginn, wo erst im Bereich der Hauptströmung Geschiebe transportiert werden kann.

3.4 Trübeaufkommen im Einzugsgebiet

Das Trübeaufkommen im Einzugsgebiet des Alpenrheins zeigt grosse regionale Unterschiede, die im wesentlichen auf die Geologie, die Morphologie, das Relief und die Vegetation zurückzuführen sind. Alle Teileinzugsgebiete, de-

ren Gestein aus Flysch oder Bündnerschiefer bestehen, zeigen eine grosse Verfügbarkeit von Feinsedimenten. Aus Schuttkegeln, Hang-, Uferanrissen und Gräben werden bereits bei geringen Niederschlagsmengen oder bei Besonnung, die zum Auftauen des Bodens und zum Schmelzen von Schnee führen, bedeutende Schwebstofffrachten mobilisiert, die regelmäßig zu einer starken Trübung der Gewässer führen. Besonders ausgeprägt zeigt sich dieses Phänomen im unteren Einzugsgebiet der Landquart (Abbildung 16).

Bedeutende Schwebstofflieferanten des Alpenrheins sind der Glenner und die Rabiusa im Einzugsgebiet des Vorderrheins, die Plessur, alle Seitenbäche im unteren Einzugsgebiet der Landquart (insbesondere Ariesch-, Furner-, Schrau- und Schranggabach) sowie die Ill. Das Trübeaufkommen im Einzugsgebiet des Al-

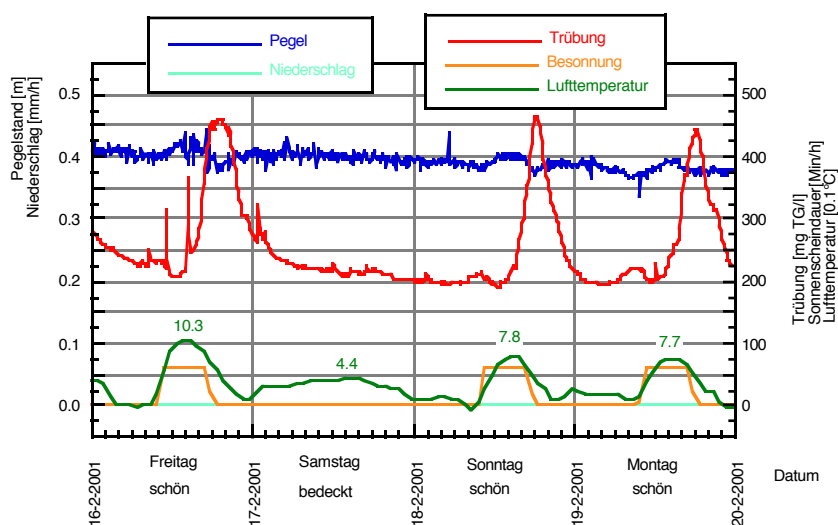


Abb. 16 Pegel- und Trübemessung am Furnerbach vom 16.2. - 19.2.01. Die Trübeschwälle sind auf die vorausgegangene Besonnung zurückzuführen (Sonnenscheindauer, Temperatur und Niederschlag ANETZ-Station Chur).

penrheins 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 Niederschlag mit Regen in tieferen Lagen oder durch Schneeschmelze infolge starker Besonnung auftreten. Kiesbaggerungen im Rhein (Kieswerke Calanda und Zindel) führen zu keiner wesentlichen Erhöhung der Schwebstofffracht.

3.5 Schwebstofftransport in den Hauptzuflüssen des Alpenrheins

Der Transport der Schwebstoffe aus den Hauptzuflüssen in den Rhein wird begünstigt durch den Schwallbetrieb. Beim Vorderrhein, der Plessur, der Landquart und der Ill (Abbildung 17) werden die eingetragenen Feinsedimente bei Schwall direkt weitertransportiert und praktisch täglich dem Rhein zugeführt. Gleichzeitig können auf der Sohle abgelagerte Feinsedimente resuspendiert werden, was beim Schwallanstieg zu einer ausgeprägten Trübespitze führt.

Eine allfällige Zwischen- oder Umlagerung von Schwebstoffen in den Hauptflüssen ist von deren Morphologie abhängig. Breite Gerinne mit Bänken (z.B. Vorderrhein) verfügen über eine grössere Speicherkapazität als eingeeengte 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.

3.6 Trübung des Alpenrheins

Der Alpenrhein kann bezüglich Trübung in die zwei Abschnitte Domat Ems - Landquart und Landquart - Bodensee aufgeteilt werden.

Die **Strecke bis zur Landquart** ist geprägt durch eine tiefe Basistrübung, die in Fließrichtung, vor allem infolge der Schwebstoffzufuhr aus der Plessur, leicht ansteigt (Schwebstoffkonzentration 1 - 6 mg/l). Innerhalb der verzweigten Fließstrecke von Mastrils ist eine Sedimentation von Schwebstoffen mit einer Abnahme der Trübung festzustellen.

Während dem Kraftwerkschwall ist eine Erhöhung der Trübung auf 10 - 40 mg/l zu beobachten, wobei die höchsten Schwebstoffkonzentrationen bei der Abflusszunahme infolge Resuspension abgelagerter Feinsedimente auftreten. In der verzweigten Fließstrecke von Mastrils ist wiederum eine deutliche Abnahme der Trübung festzustellen.

Bei Niederschlagsereignissen mit Regen in tieferen Lagen sind ebenfalls erhöhte Trübungen mit Konzentrationen um 40 mg/l zu beobachten.

Die **Strecke flussabwärts der Landquart** zeigt eine Basistrübung von 2.5 - 17 mg/l. Eine gewisse Ablagerung von Schwebstoffen wird durch die Zufuhr aus Seitengewässern (v.a. Ill) etwa kompensiert, sodass im Längenprofil keine wesentliche Änderung der Trübung festzustellen ist.

Mit dem Abflussschwall erreicht die Trübung zwischen der Landquart und der Ill 15 - 30 mg/l und in der Internationalen Rheinstrecke 20 - 40 mg/l (Erhöhung der Rheintrübung durch die Ill).

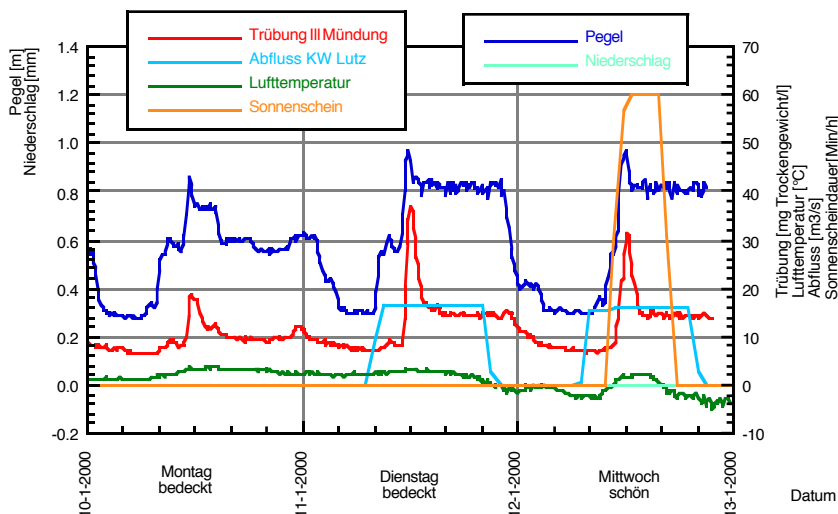


Abb. 17 Pegel- und Trübemessung an der Ill (Mündung) vom 10.1. - 13.1.00. Zusammenhang zwischen Abfluss- und Trübeschwall. Höchste Schwebstoffkonzentration beim Schwallanstieg. Bei konstantem Schwallabfluss gegenüber Sunk erhöhte Trübung. Kein signifikanter Zusammenhang mit Besonnung (Sonnenscheindauer, Temperatur und Niederschlag ANETZ-Station Chur).

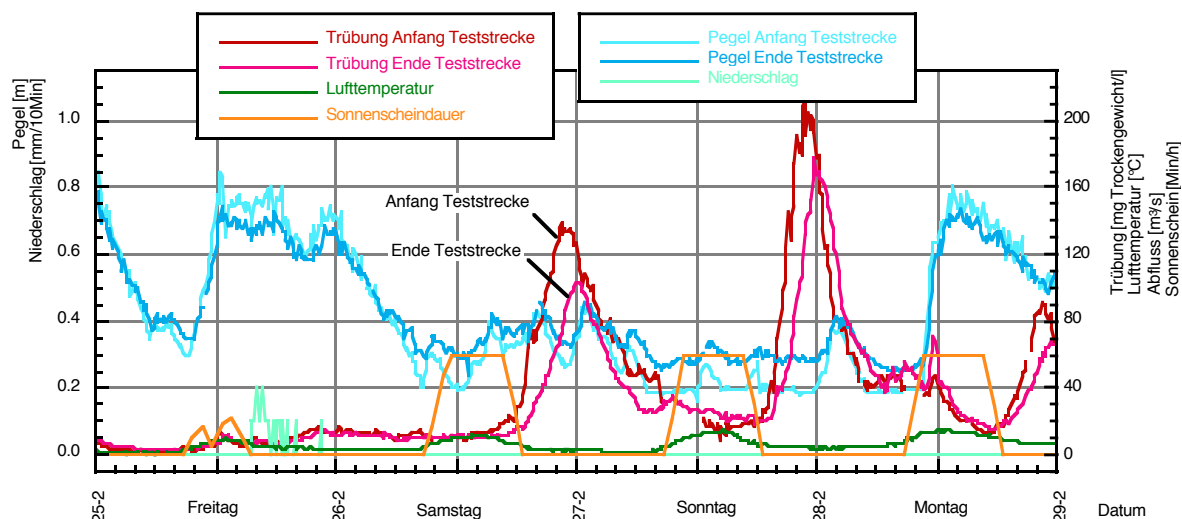


Abb. 18 Pegel- und Trübungsmessung Bad Ragaz vom 25.2. - 28.2.00. Ganglinien der Trübung und des Wasserstandes an zwei Sondenstandorten (Abstand Sonden Anfang und Ende Teststrecke ca. 2.4 km) sowie Verlauf der Lufttemperatur, der Besonnung und des Niederschlags bei Chur.

Bei den regelmässigen Trübeschwällen aus der Landquart kann die Schwebstoffkonzentration im Rhein auf über 200 mg/l ansteigen (Abbildung 18). Bei diesen Trübeschwällen wird ein Teil der zugeführten Schwebstoffe auf der Rheinsohle abgelagert, womit die Trübung in Fliessrichtung bis in die Internationale Rhein-strecke auf rund 70 mg/l abnimmt.

3.7 Äussere Kolmation

Die äussere Kolmation betrifft die Ablagerung von Schwebstoffen auf der Gewässersohle (Abbildung 19). Die Flusssohle kann aufgrund der Fliessgeschwindigkeit eingeteilt werden in Bereiche, wo keine äussere Kolmation möglich ist (Transportzonen mit $v > 0.5$ m/s), in solche, wo bei Sunk Schwebstoffe (v.a. Sand) abgelagert und bei Schwall resuspendiert werden (Resuspensionszonen) sowie in Bereiche, wo bei Sunk und Schwall Schwebstoffe abgelagert werden (Ablagerungszonen).

Unter natürlichen Abflussverhältnissen dominieren die Transport- und die Ablagerungszonen. Bei kleineren Abflussschwankungen verlagern sich die Zonen nur wenig und die Fläche mit möglicher Resuspension ist klein. Die Transportzonen mit sauberer Kiessohle befinden sich in den Furten, den Schnellen sowie in den gut durchströmten Rinnenabschnitten. Ablagerungszonen sind in den langsam strömenden Rinnenabschnitten, in abseits der Strömung liegenden Flachwassern, Uferbereichen

und den Hinterwassern zu finden. Die gegenüber heute geringere und feinere Schwebstofffracht aus den Zuflüssen wird mehrheitlich durchtransportiert und ein kleinerer Teil lagert sich in den Sedimentationszonen ab.

Mit dem Schwall werden die Strömungsverhältnisse und damit die äussere Kolmation wesentlich beeinflusst. Insbesondere dehnen sich die Resuspensionszonen weit in die Ablagerungszonen aus. Gleichzeitig verlagern sich die Ablagerungszonen in die bei Schwall neu benetzten Uferbereiche. Die praktisch tägliche Verlagerung von Resuspensions- und Ablagerungszonen führt zu einer beträchtlichen Umlagerung von Schwebstoffen und damit zu einer Erhöhung der Trübung vor allem beim Schwallanstieg. Die gegenüber den natürlichen Verhältnissen erhöhte Schwebstoffzufuhr aus den Hauptzuflüssen (infolge Schwall) führt zu einem höheren Deckungsgrad der Sohle mit Feinsedimenten und zu einer verstärkten äusseren Kolmation.

3.8 Innere Kolmation

Die innere Kolmation betrifft die Einlagerung von Schwebstoffpartikeln in den Lückenraum der Gewässersohle infolge der Infiltration von Flusswasser (Abbildung 20). Dabei bildet sich unter der Deckschicht eine kompakte, wenig durchlässige Kolmationsschicht. Für die Durchlässigkeitsabnahme und die Verfestigung der Sohle massgebend sind die feinen Schweb-

stoffpartikel der Silt- und Tonfraktion. Bei einer Exfiltration von Grundwasser ist keine innere Kolmation der Sohle möglich (Schnellen).

Für den Winter 99/00 wurden in den Teststrecken Bad Ragaz, Buchs und Diepoldsau Kolmationsberechnungen durchgeführt. Die Berechnungen basieren auf den gemessenen Ganglinien des Abflusses, der Schwebstoffkonzentration, der Wassertemperatur (LHG Domat Ems und Diepoldsau) sowie verschiedener Grundwasserpegel. In der Teststrecke Mastrils konnten keine Kolmationsberechnungen durchgeführt werden.

Die Berechnungen zeigen einen massgebenden Einfluss der Morphologie, der Trübung und in reduziertem Mass des Abflusses auf die Kolmationsentwicklung. In den Furten ist bei hohem Sickerwasservolumen die grösste Durchlässigkeitsabnahme und die grösste eingelagerte Kolmationsmasse festzustellen. Die Schwallspitzen können zu einer örtlichen Dekolmation der Gewässersohle führen (Freispülen der Filterschicht). Eine eher langsame Kolmation mit geringem Sickerwasservolumen entwickelt sich in den Rinnen.

Der Abfluss- und Trübeschwall führt im Verlauf des Winters zu einer massgebenden Verstärkung der inneren Kolmation. Gegenüber den Verhältnissen ohne Schwall sinkt die Durchlässigkeit der Rheinsohle um 30% bis über 200% und die Masse der eingelagerten Feinsedimente steigt um durchschnittlich 40%, was einer Abnahme des Porenvolumens um ca. 1.4 l/m² entspricht.

Rheinabwärts der Landquartmündung (Teststrecke Bad Ragaz) führt die hohe Trübung im Verlauf des Winters zu einer starken (Rinnen) bis sehr starken (Furten) Kolmation. Vom Ellhorn bis zur Illmündung wechseln sich In- und Exfiltration ab. Bei der Infiltration von Rheinwasser (Abschnitt Triesen - Eschen) stellt sich bis zum Ende des Winters eine mittlere (Rinnen) bis starke (Furten) Kolmation ein. Ebenfalls stark kolmatiert ist die Sohle in der Internationalen Rheinstrecke.

Bezüglich der Grundwasserneubildung führt der Abfluss- und Trübeschwall zu einer Abnahme des Sickerwasservolumens um wenige bis maximal 75%. Eine bedeutende Reduktion der Infiltration ist in Gewässerabschnitten mit hohen Sickergradienten festzustellen (Bad Ra-

gaz). Bei kleinen bis mittleren Sickergradienten ist keine signifikante Änderung des Sickerwasservolumens festzustellen. Bei den Berechnungen nicht berücksichtigt ist die Infiltration von Rheinwasser in der Wasserwechselzone bei Schwall.



Abb. 19 Uferbereich mit äusserer Kolmation (vor allem Sand). Teststrecke Mastrils. Blick flussaufwärts.

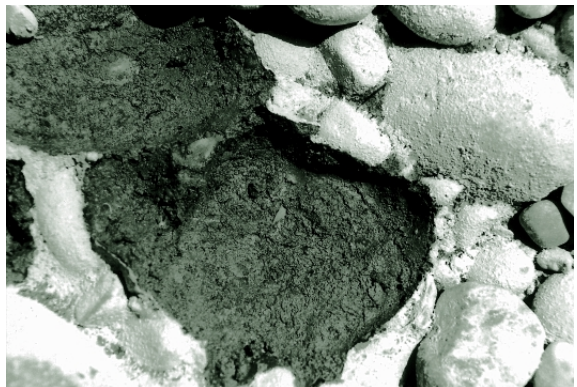


Abb. 20 Sohle mit starker innerer Kolmation. Der Lückerraum ist mit kohäsiven Partikeln praktisch vollständig aufgefüllt.

4. Fachbereich Trübung, Licht, Bewuchs und Drift

Vom Fachbereich „Trübung, Licht, Bewuchs und Drift“ sind in den Wintermonaten der Jahre 1999 bis 2001 im Alpenrhein folgende Faktoren näher untersucht worden (Hauptfaktoren hervorgehoben):

- Die physikalischen Einflussgrößen **Wasserführung** (Abfluss), **Schwebstoffgehalt und -transport**, **Trübung**, **Lichtklima**, Substratzusammensetzung, Strömung;
- Die biologischen Größen **Algenbewuchs** (Phytobenthos), **Drift des Phyto- und Makrozoobenthos**.

Nachfolgend werden die wesentlichen Resultate dieser Untersuchungen zusammengefasst und daraus soweit als möglich die fachspezifischen Schlussfolgerungen zu möglichen Aufwertungsmassnahmen gezogen.

4.1 Schwebstoff-Frachten und -Bilanz

Die Schwebstoff-Führung im Alpenrhein und seinen wichtigsten Zuflüssen zwischen Reichenau und dem Bodensee wurde für die hochwinterliche Periode vom 7.2. bis 9.2.1999 anhand zahlreicher Wasserproben von einzelnen Stellen im Längsverlauf erfasst und bilanziert. Die Bilanzierungsperiode erstreckte sich über eine 24-stündige Niedrigwasserphase (Sunk) am Wochenende (Sonntag/Montag) und anschliessend über einen vollständigen, ca. 24-stündigen Schwall/Sunk-Zyklus (Montag/Dienstag). Während der Niedrigwasserphase kamen Abfluss und Trübung im Alpenrhein bis zur Illmündung den natürlichen Verhältnissen vermutlich recht nahe. Die Ill und die unterliegenden Abschnitte des Alpenrheins standen dagegen auch am Sonntag unter Schwallenfluss. Während der Schwall/Sunk-Phase wurden im Alpenrhein vergleichsweise geringe Schwebstoff-Konzentrationen erfasst, welche unter den gegebenen Randbedingungen

(Schwall) fast die bestmögliche Situation darstellen dürften.

Über die ganze Periode stammten die grössten Beiträge zur gesamten Schwebstoff-Fracht und damit auch zur Trübung des Alpenrheins aus den Zuflüssen Vorderrhein, Landquart und Ill. Die übrigen Einzugsgebiete (einschliesslich der darin betriebenen Kraftwerks-Anlagen) lieferten im Vergleich dazu nur untergeordnete Beiträge. Bei Niedrigwasser nahm die (über die ganze Phase gemittelte) Schwebstoff-Fracht im Alpenrhein von 27 g/s bei Felsberg um fast das 20-fache auf 500 g/s bei Diepoldsau zu. Umgerechnet auf eine 24-stündige Niedrigwasserphase entspricht dies einer Zunahme von 2.3 auf 43.2 t/24h. Diese Differenz ist nur wenig kleiner als die erfasste Frachtsumme der dazwischen einmündenden Zuflüsse (Abbildung 21); Während der Schwall/Sunk-Phase waren sowohl die absoluten Werte der Schwebstoff-Fracht als auch deren Zunahme wesentlich grösser (von 387 g/s bei Felsberg auf 2090 g/s bei Diepoldsau). Von dieser Frachtzunahme erklärt sich nur ungefähr die Hälfte durch Zufluss-

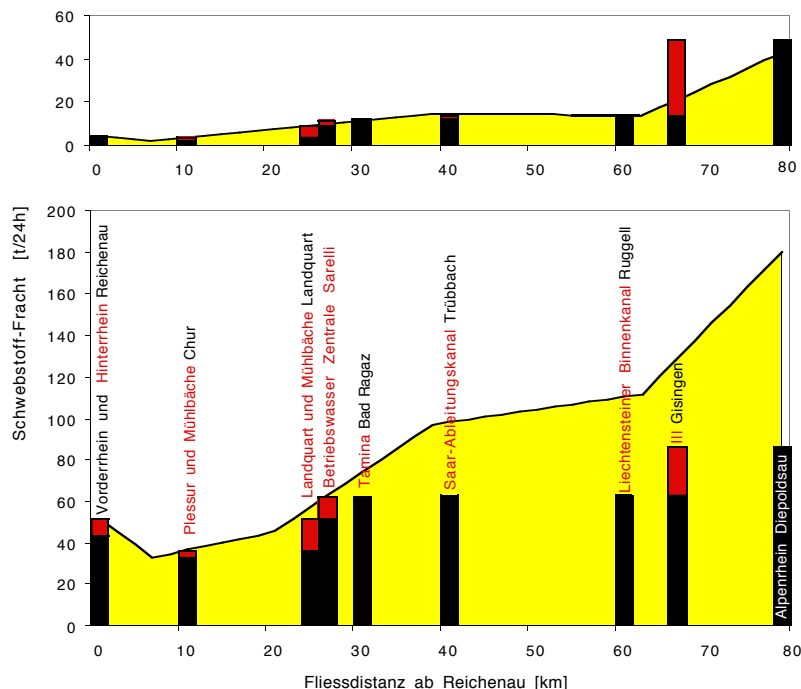


Abb. 21 Frachtverlauf der Schwebstoffe im Alpenrhein zwischen Reichenau und Diepoldsau für die Niedrigwasserphase (oberes Bild) und die Schwall/Sunk-Phase (unteres Bild) während der Messkampagne vom 7.2. bis 9.2.1999. Säulen: Berechnete Frachten im Rhein (schwarz) und in den Zuflüssen (rot). Gelbe Fläche: Gemessene Frachten an den Messstellen im Alpenrhein mit linearer Interpolation der Zwischenwerte.

beiträge. Die andere Hälfte stammt vermutlich aus Schwebstoff-Depots in der Rheinsohle, welche durch die höheren Schwall-Abflüsse mobilisiert werden; das Ausmass dieser Mobilisierung ist in jenen Abschnitten am höchsten, in die ein schwebstoffreicher Zufluss (Landquart, Ill) einmündet.

Für die Fliessstrecke zwischen Felsberg und Mastrils wird der Grenzabfluss für den Beginn der Schwebstoff-Mobilisierung aufgrund der Messkampagne vom Februar 1999 auf ungefähr 90 bis 100 m³/s geschätzt; dieser Wert wird in der Regel von den winterlichen Schwallen im Oberlauf des Alpenrheins mit Abflussspitzen bis 170 m³/s deutlich übertroffen. In weiter flussabwärts gelegenen Strecken ist infolge unterschiedlicher Gerinnegestalt und Substrat-Beschaffenheit mit anderen Grenzabflüssen zu rechnen.

Das Aufkommen und Verhalten der Schwebstoffe im Alpenrhein hängt hauptsächlich vom Abfluss und vom Schwebstoff-Eintrag ab. Unter natürlichen winterlichen (Niedrigwasser-) Verhältnissen ist über den gesamten Alpenrhein mit einem quantitativen Weitertransport oder mit einer geringfügigen Sedimentation der zufließenden Schwebstoffe zu rechnen. Demgegenüber werden durch den Schwall auch bei vergleichsweise geringen Abflussspitzen umfangreiche, bestehende Schwebstoff-Depots auf und in der Rheinsohle mobilisiert und über die ganze Fliessstrecke bis zum Bodensee transportiert. Besonders ausgeprägt ist dieser Mobilisierungs-Effekt auf den Fliessstrecken nach der Einmündung grösserer, schwebstoffreicher Zuflüsse (v.a. Landquart und Ill). Dadurch wird das im Winter natürlicherweise klare bis sehr klare Wasser des Alpenrheins fast täglich relativ stark eingetrübt.

Der Stauraum Reichenau hat bereits heute eine gewisse regulierende Wirkung auf den winterlichen Schwebstoff-Haushalt, indem er einen kleinen Teil der gesamten, entlang des Alpenrheins anfallenden Schwebstoff-Fracht zurückhält. Wie weit sich durch eine antizyklische Bewirtschaftung des Stauraums und/oder durch betriebliche Massnahmen an den oberliegenden Kraftwerken der Schwebstoff-Rückhalt steigern und die Schwebstoff-Mobilisierung durch die Abflussschwälle vermindern liesse, bleibt abzuklären.

Unabhängig davon tragen die nachfolgenden, zwischen Reichenau und dem Bodensee in den Alpenrhein einmündenden Zuflüsse den grössten Teil zur gesamten Schwebstoff-Fracht (v.a. Landquart und Ill) sowie einen beträchtlichen Teil zum Gesamtabfluss bei (v.a. Landquart, Zentrale Sarelli, Ill). Eine weitgehende Reduktion der bei Schwall zufließenden oder im Rhein selbst mobilisierten Trübung setzt daher in jedem Fall voraus, dass die Kraftwerksbedingten Abflussspitzen während des Winters deutlich gesenkt werden.



Abb. 22 Feinsedimentbänke entlang des abgesenkten Stauraums Reichenau am 4.10.1999. Blick flussabwärts. Von der Wehrbrücke im Hintergrund aus wurden die Lichtmessungen durchgeführt.

4.2 Trübung und Lichtklima

Der Einfluss der Schwebstoffe auf das Lichtklima im Alpenrhein wurde anhand von Vertikalmessungen im Stau Reichenau untersucht (Abbildung 22).

Für die mehr oder weniger natürliche Schwebstoff-Führung bei Niedrigwasser („Basisstrübung“) von 1 bis 5 mg/l (Trockengewicht) ergibt sich an den tiefsten untersuchten Stellen des Alpenrheins (in 2.5m Tiefe) eine Abnahme der Lichtintensität auf 60% bis 25% des Oberflächenwertes. Unter Schwallenfluss nimmt die Schwebstoff-Konzentration auf 5 bis 25 mg/l zu, und der Wasserstand steigt gleichzeitig um mindestens 50cm. Unter diesen Bedingungen sinkt die Lichtintensität an den tiefsten Stellen auf 20% bis <5% des Oberflächenwertes (Abbildung 23).

Die durchschnittlichen absoluten Lichtintensitäten an den tiefsten Stellen liegen im oder leicht

über dem Bereich der minimalen Lichtansprüche verschiedener substratgebundener (benthischer) Algenarten.

Die bei Schwall mit 60 bis 80% des Oberflächenwertes noch am stärksten belichteten Bereiche der Flusssohle fallen bei Sunk trocken (Abbildung 23). In diesem Übergangsbereich (Wasserwechselzone) können sich zum vornherein nur jene Arten ansiedeln, die gegen das regelmässige Austrocknen resistent sind.

Die winterlichen Abfluss- und Trübungsverhältnisse im Alpenrhein wirken sich limitierend auf den pflanzlichen Bewuchs der Flusssohle (Phytobenthos) aus. Unter natürlichen Verhältnissen, wie sie an einzelnen Wochenenden auch heute noch annähernd herrschen, führte der Rhein im Winter meist konstant tiefe Mengen an recht klarem Wasser. Bei Schwall bewirkt der Anstieg des Wasserstandes und der Trübung im Rhein selbst oder in seinen Zuflüssen ein insgesamt vermindertes Lichtangebot, was wiederum eine geringere Produktivität des Phytobenthos zur Folge hat. Gegenüber dem natürlichen Zustand ist daher mit zunehmender Tiefe eine Abnahme der maximal möglichen Bewuchsdichte und eine Beschränkung auf weniger lichtbedürftige Arten zu erwarten. Das verbleibende Lichtangebot sollte aber auch in den tiefsten Bereichen der Flusssohle noch für einen minimalen Algenbewuchs ausreichen.



Abb. 24 Praktisch bewuchsfreies Substrat des Alpenrheins in 1.7m Wassertiefe. Standbild einer Untewasser-Videosequenz vom 24.2.2000 in der Teststrecke Bad Ragaz (Fluss-km 26.8).

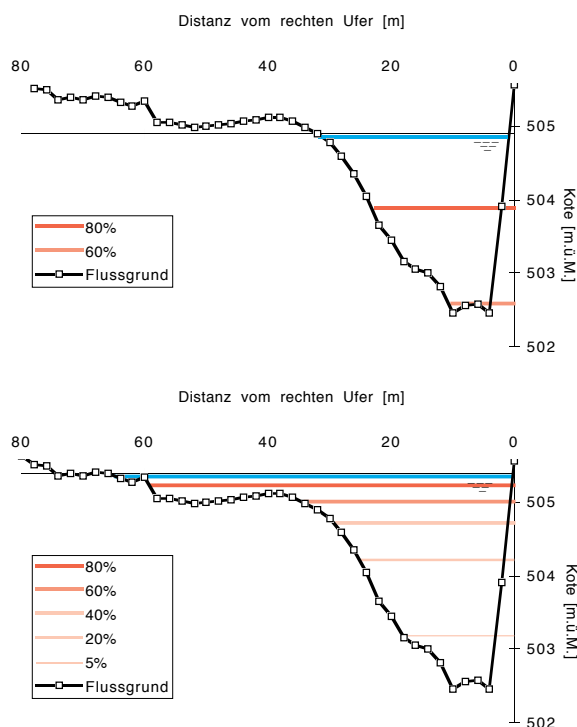


Abb. 23 Auswirkungen der winterlichen Trübung auf das Lichtklima im Alpenrhein bei Niedrigwasser mit einer Schwebstoff-Konzentration von 1 mg/l (oberes Bild) und bei Schwall mit einer Schwebstoff-Konzentration von 25 mg/l (unteres Bild). Dargestellt sind die Ebenen innerhalb des Flussquerschnittes mit unterschiedlicher Lichtintensität (in Prozent der Oberflächenintensität).

4.3 Substrat- und Bewuchsverhältnisse

Die prozentualen Anteile verschiedener Substratklassen an der Sohlenoberfläche sowie der Deckungsgrad und die Zusammensetzung des pflanzlichen Bewuchses auf der Sohle (Phytobenthos) wurden im Winter 1999/2000 in insgesamt 10 Querprofilen der Teststrecken Mastrils, Bad Ragaz, Buchs und Diepoldsau ein- bis zweimal aufgenommen. Anhand der Profilaufnahmen wurde der Einfluss von Uferdistanz, Wassertiefe und Strömung auf die Ausprägung des Bewuchses phänomenologisch und statistisch untersucht.

Das sichtbare Substrat auf der Sohlenoberfläche (Deckschicht) des Alpenrheins bestand hauptsächlich aus den mittleren Korngrößenklassen Kies, Schotter und Steine mit Durchmessern von 0.2 bis 20cm (Abbildung 24).

Der pflanzliche Bewuchs der Flusssohle wurde fast ausschliesslich durch Algen gebildet, wobei Kiesel- und Goldalgen regelmässig und teils in hoher Dichte, fädige Grünalgen dagegen nur zerstreut auftraten. Die optisch hervorstechendsten, auch aus grosser Entfernung zu er-

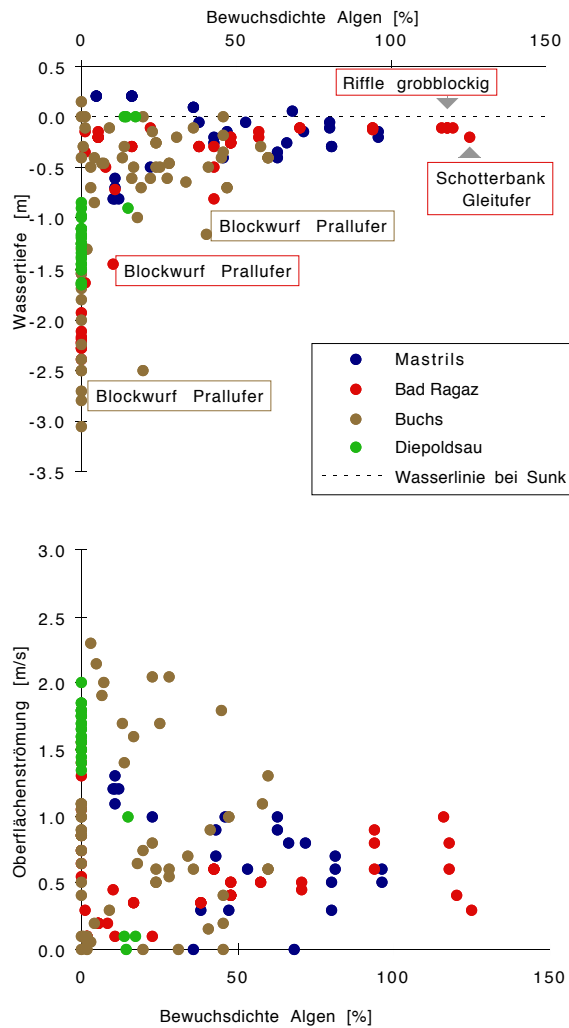


Abb. 25 Dichte (Deckungsgrad) des Algenbewuchses in den untersuchten Teststrecken des Alpenrheins in Abhängigkeit von Wassertiefe (linkes Bild) und Fließgeschwindigkeit an der Wasseroberfläche (rechtes Bild).

kennenden Bestände bildete die Goldalge *Hydrurus foetidus* („Wasserschweif“) aus. Das Phytobenthos auf den ständig benetzten Teilen der Flusssohle beschränkte sich im Alpenrhein mit wenigen Ausnahmen auf den Bereich zwischen der Uferlinie und 1m Wassertiefe (bezogen auf Niedrigwasser-Verhältnisse). Auf der internationalen Rheinstrecke flussabwärts der Illmündung, vertreten durch die Teststrecke Diepoldsau, war die gesamte, durchwegs unter 1m Tiefe gelegene Sohle praktisch bewuchsfrei.

Innerhalb der bewachsenen Sohlenbereiche wurden Dichte und Zusammensetzung des Phytobenthos von unterschiedlichen Faktoren beeinflusst, worunter die Wassertiefe, die Strömung und die Zusammensetzung des Substrates den grössten Effekt hatten (Abbil-

dung 25). Bei den statistischen Auswertungen wurde darüber hinaus in einzelnen Regressionsmodellen noch ein Einfluss der Teststrecke festgestellt. Unterhalb von 1m Tiefe war das weitgehende Fehlen des Bewuchses hingegen weniger durch das Licht, als vielmehr durch die starke hydraulische Einwirkung des in Bewegung geratenden und flussabwärts transportierten Feingeschiebes bei Schwall bedingt („Kugelmühlen-Effekt“, „Sandstrahl-Effekt“).

In den Teststrecken Mastrils, Bad Ragaz und Buchs haben sich neben einer tiefen Hauptrinne noch flussmorphologische Strukturen mit einer grösseren Vielfalt an Tiefen-, Strömungs- und Substratmustern erhalten oder ausgebildet (Seitengerinne, alternierende Kiesbänke). In diesen Randbereichen kann sich trotz des Schwallbetriebes mit seinen starken Abfluss- und Trübeschwankungen örtlich noch ein standortgerechter Algenbewuchs entwickeln, der auch Nahrungsgrundlage und Lebensraum für viele wirbellose Kleintiere (Makroinvertebraten) bietet.

Mit einer Revitalisierung des Flusses sind die Voraussetzungen für eine noch stärkere Entwicklung derart artenreicher und produktiver Sohlenbereiche („hot spots“) zu schaffen. Dazu ist in erster Linie eine (zumindest lokale) Reduktion der hydraulischen Belastung durch den Abfluss-Schwall notwendig, welche die grössten Defizite beim pflanzlichen Bewuchs verursachen dürfte. Eine Erhöhung des Lichtangebotes durch die Verminderung der schwallbedingten Trübung hat demgegenüber vermutlich geringere Wirkung und ist deshalb als untergeordnete Massnahme einzustufen.

4.4 Drift

Die in der fließenden Welle des Alpenrheins treibenden (driftenden) Algen, wirbellosen Tiere (Makroinvertebraten, Plankton) und anorganischen Partikel (Feinsedimente) wurden am 13./14.2.00 (Sonntag/Montag) mittels quantitativer Driftproben aus der Flussmitte bei Untervaz erfasst. Begleitend dazu wurden der Pegelstand, die Trübung und die Schwebstoffkonzentration gemessen.

Die Drift zeigte im Verlauf der Niedrigwasserphase keine Maxima bei Einbruch der Dunkelheit oder bei Tagesanbruch, wie dies in vielen anderen Gewässern der Fall ist. Auch die „künstliche“ Verdunkelung durch eine regenbe-

dingte Trübespitze bewirkte noch keine Zunahme der driftenden Organismen, solange die Wasserführung auf tiefem Niveau blieb (Abbildung 26).

Mit dem Einsetzen des Schwalls stieg die Invertebraten-Drift trotz sinkender Trübung massiv an und erreichte beim Übergang von ansteigendem zu konstant hohem Schwallabfluss ihren Spitzenwert. Gleichzeitig wurden auch maximale Mengen von organischen (v.a. Fäden der Goldalge *Hydrurus foetidus*) und anorganischen Partikeln (v.a. Sand) abgetrieben. Im weiteren Verlauf des Schwallabflusses nahm die Drift bei unverändert hoher Wasserführung wieder deutlich ab.

Die höchste erfasste Konzentration von Makroinvertebraten in der Drift (Driftdichte) lag um einen Faktor 34 über der relativ gleichmässigen Basisdrift bei Niedrigwasser. Die Zusammensetzung des driftenden Makrozoobenthos blieb über die ganze Untersuchungsperiode vergleichsweise konstant. Sowohl bei Niedrigwasser als auch bei Schwall stellten die Zuckmückenlarven mit 84% bis >95% den weitaus grössten Anteil an Individuenzahl und Biomasse in der Drift.

Verglichen mit anderen untersuchten, hochwasser- oder schwallbeeinflussten Gewässern erreichte im Alpenrhein sowohl die relative Driftzunahme bei einer Abflusserhöhung als auch die absolute Driftdichte der Makroinvertebraten während der Abflussspitze sehr hohe, aber noch nicht aussergewöhnliche Werte.

Die Drift des Makrozoobenthos wird im Alpenrhein 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 bilden. Diese Katastrophendrift würde während des Winters natürlicherweise nur bei seltenen Hochwasserereignissen auftreten. Sie setzte an der Untersuchungsstelle bei einem ähnlichen Abfluss ein, bei dem in einer flussabwärts anschliessenden Fliegsstrecke auch die Mobilisierung der Schwebstoff-Depots auf der Flusssohle begann (ca. 90 - 100 m³/s).

In hydraulisch exponierten Sohlenbereichen kann die regelmässige, starke Abschwemmung eines Teils der Organismen nicht kompensiert werden; die zentralen, tiefen Fliegsrinnen bleiben im Winter deshalb weitgehend bewuchsfrei und entsprechend arm an Makroinvertebraten. In anderen Sohlenbereichen kann sich trotz der täglichen, schwallbedingten Verluste durch Abdrift während des Winters teilweise ein standortgerechtes Phyto- und Makrozoobenthos entwickeln.

In den biologisch verödeten Tiefenrinnen ist ein nennenswerter Rückgang der Katastrophendrift nur durch eine starke Verminderung der Spitzenabflüsse bei Schwall zu erreichen. Für weniger exponierte Bereiche ist zu prüfen, ob und wie weit die hydraulische Belastung auch durch andere Massnahmen (z.B. Fluss-Aufweitungen) weiter gesenkt werden kann.

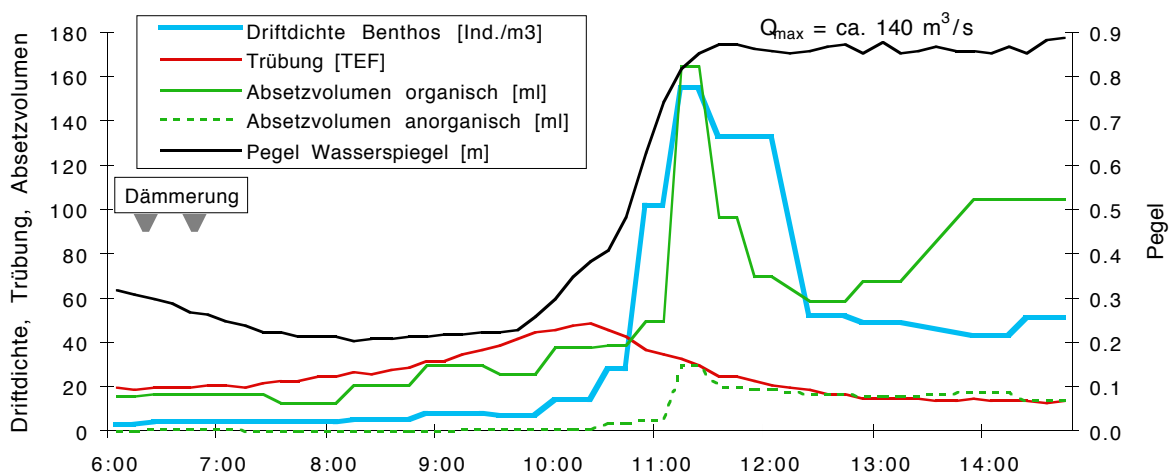


Abb. 26 Verlauf der untersuchten Parameter während der Driftmessung vom 13./14.2.2000 im Alpenrhein bei Untervaz (Schwalldurchgang).

5. Fachbereich Phyto- und Makrozoobenthos

Der vorliegende Berichtsteil beinhaltet die Darstellung der Auswirkungen der Abfluss- und Trübeschwankungen auf die Bodenfauna (Makrozoobenthos) und Aufwuchsalgen (Phytobenthos; makroskopische Wuchsformen). Wichtige Zusatzinformationen ergaben sich aus der Korngrössenzusammensetzung an den Zoobenthos-Entnahmepunkten.

Die Probenentnahmen erfolgten bei ausgeprägter Sinksituation an 2 Terminen im Herbst 1999 (20./21. November) und Spätwinter 2000 (12.-15. Februar) an flussmorphologisch unterschiedlichen Teststrecken. An jeder Teststrecke wurden verschiedene Entnahmebereiche mit unterschiedlichen Kolmationsverhältnissen besammelt.

5.1 Korngrößenverteilung

Die Auswertungen erfolgten zum Teil ohne die Kornfraktion $>32\text{mm}$, um entnahmebedingte Zufälligkeiten bei grösseren Fraktionen auszuschliessen. Es zeigte sich ein grundsätzlicher Unterschied zwischen der Tiefenrinne und den flacheren Bereichen (Abbildung 27).

In den **flacheren Zonen** zeigt die Korngrössenverteilung generell eine ausgeprägte zweipipfelige Verteilung mit dem Hauptmaximum erwartungsgemäss bei der grössten Fraktion (16 - 32mm), ein Defizit zeigt sich ca. um die Klasse 2 - 4mm. Das Sekundärmaximum liegt im Sandanteil, im Detail jedoch je nach Teststrecke unterschiedlich:

In Mastrils ist auffallend viel Grobsand (Fraktion 0.5 - 2mm) festzustellen, der auch die dort augenscheinliche äussere Kolmation prägt. In Bad Ragaz und Buchs hingegen sind die Mittel-/Feinsandanteile (0.25 - 0.5 mm) deutlich höher.

Im Vergleich zu Mastrils liegt die Zunahme v.a. in der Feinsandfraktion 0.13 - 0.25mm. Zum Teil dürfte die Ursache für die gestiegenen Feinsandanteile im Abrieb liegen, zum Teil aber sicherlich mit dem hohen Trübstoffeintrag durch die Landquart in Verbindung stehen.

Im Vergleich zu dieser zweigipfiligen Verteilung zeigt ein verzweigter, naturnaher alpiner Fluss (Tiroler Lech) eine gleichmässige Abnahme der Prozentanteile der verschiedenen Kornfraktionen (Abbildung 27). Am Alpenrhein weist nur die verzweigte Strecke in Mastrils abschnittsweise (im Bereich der Schnellen und der Tiefenrinne) noch eine grössere Ähnlichkeit mit dem naturnahen Lech auf.

In der **Tiefenrinne** weisen die Airlift-Proben durchwegs deutlich weniger grobes Material auf. An allen Stellen sind nahezu keine bzw. nur geringe Anteile an Korngrössen $>64\text{mm}$ (die in flacheren Bereichen einen wesentlichen Anteil des Substrates bilden) festzustellen. Gleichzeitig jedoch sind auch weniger Feinsandanteile $0.13 - 0.25 (0.5) \text{ mm}$ vorhanden. Unterhalb der Landquartmündung (Stellen Bad Ragaz und Buchs) wird das Sediment in der Tiefenrinne zusehends feinkörniger, die Zunahme erfolgt vor allem in der Grobsand-Fraktion $0.5 - 1\text{mm}$.

Damit ist das oberflächliche Sohlmaterial in der Rinnenstrecke als relativ einheitliches Korn von ca. 4 - 64mm charakterisiert, welches vor allem bei Schwall leicht mobilisierbar ist und einen ständigen Geschiebetrieb bewirkt. Dies hat tiefgreifende Folgen für die (schlechte) Besiedelbarkeit dieses Teils des Flussbettes, wie auch die Ergebnisse der Aufwuchsalgen und Bodenfauna bestätigen.

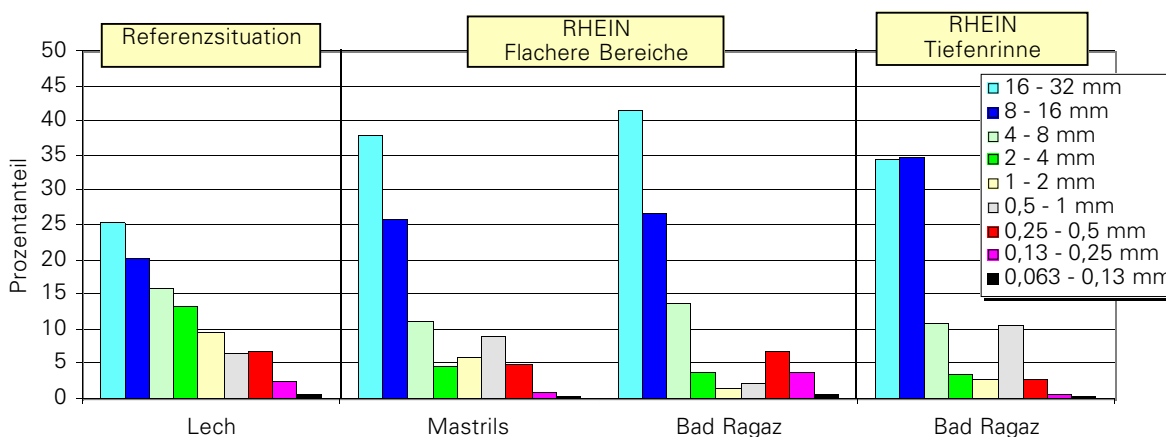


Abb. 27 Charakteristische, ausgewählte Korngrössenverteilungen am Rhein und Lech. Darstellung ohne Anteile >32mm.

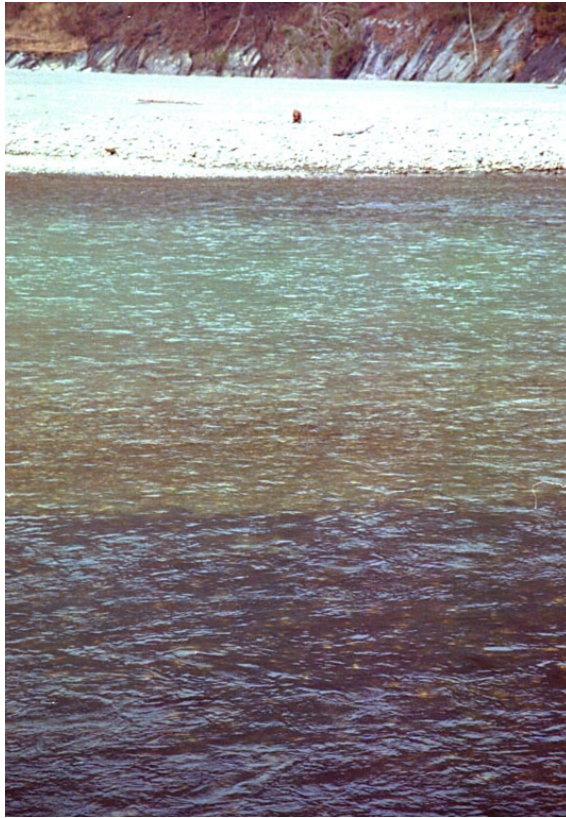


Abb. 28 Ausbildung eines randlichen "Gürtels" der Goldalge *Hydrurus foetidus* (dunkler Streifen).

5.2 Aufwuchsalgen

Die Aufnahme der makroskopischen Algenarten erfolgte anhand einer Flächen-Kartierungsmethode, wobei an jeder Probenstelle 2 - 3 jeweils 1m breite Profile durchgehend aufgenommen wurden

Folgende Algengruppen traten makroskopisch in Erscheinung: Die Goldalgen *Hydrurus foeti-*

us (Abbildung 28) und *Phaeodermatium rivulare*, die Grünalge *Ulothrix* spp. (*U. zonata*) sowie nicht näher differenzierte Kieselalgenlager. Alle 3 genannten Arten sind charakteristische Leitformen für diesen Gewässertyp. Die Gesamtzahl der Makroalgen ist damit im Vergleich zu anderen alpinen Flüssen als gering einzustufen. Es ergeben sich jedoch keine zwingenden Hinweise auf ein schwallbedingtes Ausfallen oder Neuauftreten einer Makroalgenart.

Die räumliche Verteilung der nachgewiesenen Makroalgen ist charakteristisch und entspricht den Präferenzen und Toleranzen dieser Taxa (Abbildung 29):

Die wechselfeuchte Spiegelschwankungszone wird nur von Kieselalgen und der Grünalge *Ulothrix zonata* besiedelt. Beide Formen reichen bis in den obersten Bereich der schwallbeeinflussten (periodisch benetzten) Zone und erreichen ihre stärkste Entwicklung jeweils im Bereich der Sunk-Wasserlinie. Während die Kieselalgen auch im anschliessenden ständig überflossenen Uferbereich deutlich in Erscheinung treten, verschwindet *Ulothrix* meist nach einigen Metern flusswärts der Sunk-Wasserlinie.

Im Gegensatz zu *Ulothrix* und den Kieselalgen finden sich die beiden strömungsliebenden Goldalgen *Hydrurus foetidus* und *Phaeodermatium rivulare* ausschliesslich im ständig überflossenen Bereich. Insbesondere *Hydrurus* bildet meist einen richtiggehenden Gürtel aus mit den höchsten Dichten bei mittleren Tiefen (20 - 50 cm) und mittleren Strömungsgeschwindigkeiten (25 - 100 cm/s – jeweils bezogen auf die Sunk-Wasserlinie).

Im anschliessenden Hauptstromstrich der Tiefenrinne fehlen die Makroalgen praktisch völlig

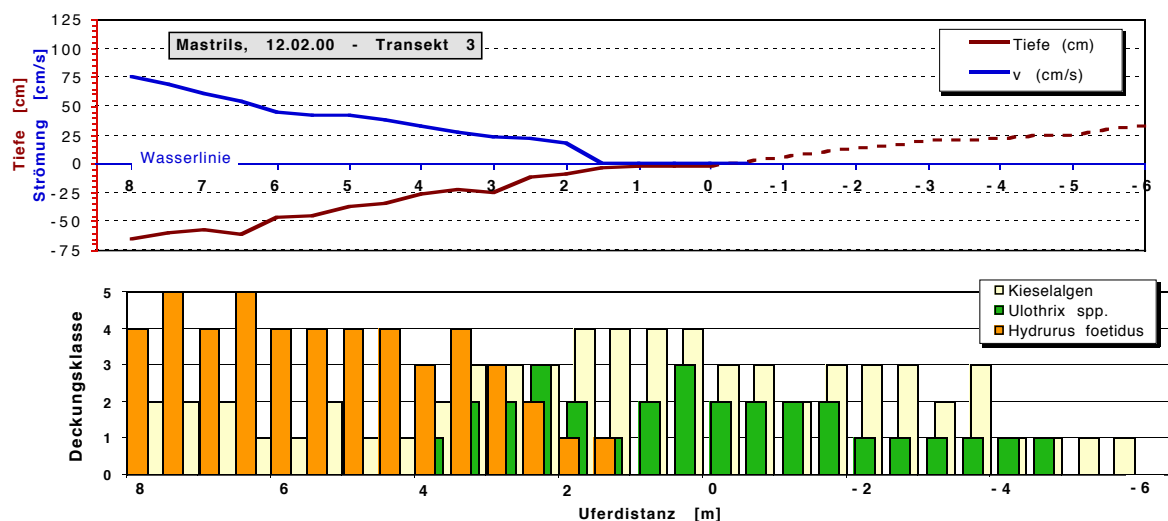


Abb. 29 Charakteristische Zonierung makroskopischer Algenformen (exemplarischer Transekt Mastrils).

(Fachbericht Limnex). Auch unter natürlichen Bedingungen sind Makroalgen aufgrund der hydraulischen Belastung bzw. des Geschiebetriebes im Hauptstromstrich oft fehlend oder reduziert. Am Alpenrhein wird dieser Effekt jedoch durch Schwellbetrieb zusätzlich verstärkt. Diese Makroalgen-Zonation entspricht grundsätzlich auch der Situation, wie sie ohne Schwellbetrieb zu erwarten wäre. Jedoch wäre die räumliche Ausdehnung der amphibischen Spiegelschwankungszone dann deutlich eingeschränkt. Die in der schwallbedingt ausgedehnten Spiegelschwankungszone (in den insgesamt 7 erfassten Transekten zwischen etwa 5 und 35m breit) dominanten Kieselalgen und *Ulothrix* treten daher überdurchschnittlich stark in Erscheinung. Ihre Biomassen stellen ein Vielfaches dessen dar, was sich unter natürlichen Abflussverhältnissen entwickeln würde.

Zusammenfassend weicht die Phytobenthosbesiedlung zwar in einigen Punkten merklich von der Situation unter natürlichen Abflussbedingungen ab. Die Auswirkungen des Schwellbetriebes sowie der erhöhten Schwebstoffführung auf die Makroalgen insgesamt allerdings sind als vergleichsweise gering einzustufen.

5.3 Makrozoobenthos

Für die Bodenfauna-Probenentnahmen wurden je nach Wassertiefe 2 Gerätschaften eingesetzt: bis in eine Wassertiefe von ca. 70cm erfolgten die Entnahmen händisch mit einem geschlossenen Zylindersampler ("Hess-Sampler"). In der Tiefenrinne ab ca. 70 - 100cm Tiefe wurde ein "Airlift-sampler" verwendet.

Flache ufernähere

Bereiche: Auffallend sind die im Vergleich zu anderen alpinen Flüssen generell sehr geringen Besiedlungsdichten (insgesamt 3'000 bis maximal 25'000 Ind./m²) und extrem niedrigen Biomassen (0.2 - 2.8 g FG/m²) im Herbst 1999 (Abbildung 30). Im Spätwinter 2000 ist eine deutliche Erholung festzustellen:

die Besiedlungsdichten (zumeist zwischen 17'000 und 44'000 Ind./m²) liegen immer noch im unteren Bereich der Schwankungsbreite ähnlicher schwallbeeinflusster Flüsse, die Biomassen liegen mit Werten von 13.2 bis 29.9 g/m² aber durchaus im gewohnten Rahmen.

Charakteristisch ist die Abnahme der Besiedlungsdichten in Richtung Strommitte. Die Tiefenrinne wird schliesslich nur noch von einer spärlichen Rumpffauna besiedelt (s.unten).

Vergleicht man die relative Zusammensetzung der Bodenfauna mit einer naturnahen Referenzsituation (Tiroler Lech: naturnahe, verzweigte Gerinnemorphologie; kein Schwellbetrieb), wird die Fauna an allen Teststrecken im Alpenrhein deutlich stärker von den Zuckmückenlarven dominiert (Abbildung 31). Besonders auffallend ist dies in Mastrils, wo die Zuckmücken an allen Bereichen mit 75% - 92% stark dominieren. In erster Linie sind es Vertreter der sogenannten "Hydrurusfauna" (z.B. diverse Arten der Gattungen *Eukiefferiella*, *Orthocladus rivicola*-Gruppe). Diese Hydrurusfauna ist am Alpenrhein von Schwall- und Trübeeinflüssen nicht nachweisbar beeinträchtigt. Aussagekräftig ist in diesem Zusammenhang auch das relativ häufige Auftreten der ansonsten gegen Störungen ausserordentlich empfindlichen Eintagsfliegen-gattung *Baetis*.

Ein schwallbedingter Abrasionseffekt bei Bewohnern der oberflächlichen Sedimente mit filtrierender Lebensweise (Kriebelmückenlarven) ist ebenfalls nicht sicher nachweisbar.

Generell starke Defizite hingegen sind bei grösseren Besiedlern des oberflächlichen Lückensystems zu verzeichnen. Insbesondere die Eintagsfliegengruppe der Heptageniiden (v.a. *Rhithrogena spp.*) und Steinfliegen fallen weitgehend aus.

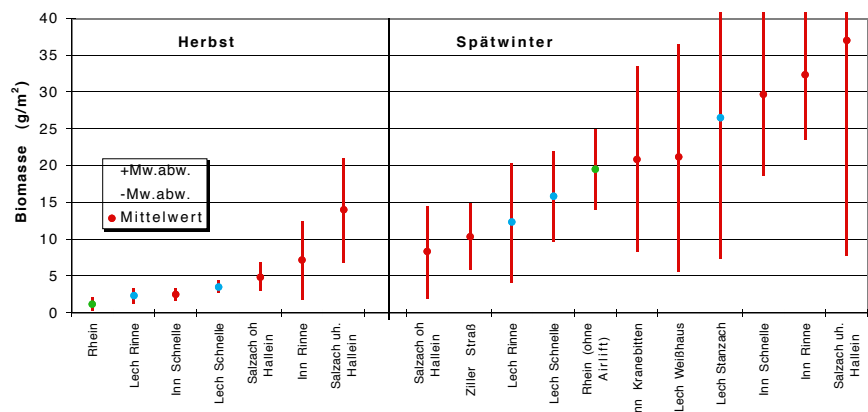


Abb. 30 Vergleich der Zoobenthos-Biomasse im Rhein (grün) mit anderen alpinen Flüssen mit (rot) und ohne (blau) Schwellbetrieb.

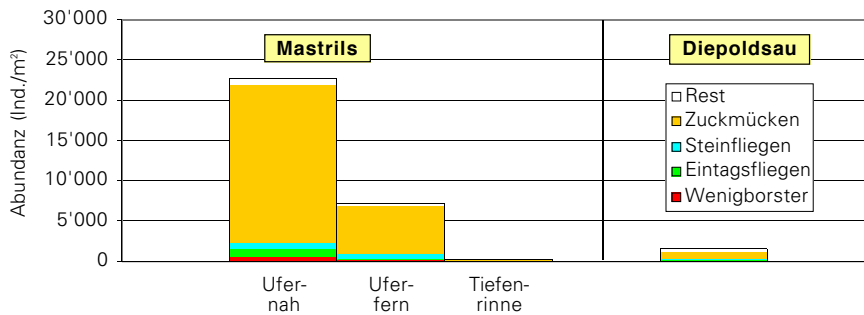


Abb. 31 Besiedelungsdichten und Grossgruppendominanz im Spätwinter 2000 beispielhaft in Mastrils und Diepoldsau (internationale Rheinstrecke).

In Mastrils können einzig die in tiefere Sedimentschichten vordringenden Steinfliegengattungen *Leuctra* und *Capnia* Bestände in "normalen" Dichten ausbilden. Ursache für diese Defizite in Mastrils dürfte die verstärkte äussere Kolmation mit Grobsand sein. Bei entsprechend häufiger Umlagerung, die schwallbedingt auch im Winter ständig gegeben ist, ist der Grobsand zudem auch für kleine Kieslückenbewohner (z.B. die Zuckmücken *Heleniella* sp., *Parametrioctenemus stylatus* sowie *Parakiefferiella* sp.) kaum nutzbar.

Eine innere Kolmation ist in Mastrils weniger limitierend für die Bodenfauna als in den Teststrecken unterhalb der Landquart. Am besten ist die Auswirkung der inneren Kolmation in Bad Ragaz mit teilweise sehr stark verfestigten Sedimenten, v.a. im Furtbereich festzustellen:

- Defizite bei kleinen Kieslückenbewohnern wie *Parakiefferiella* sp. oder den sauerstoffbedürftigen Oligochaeten *Propappus volki*, *Stylodrilus heringianus*;
- In Verbindung mit dem erhöhten Feinsedimentanteil auch ein erhöhter Saprobitätsgrad bzw. stärkere Anteile von Detritusfressern;
- Hinweise auf einen erschwerten Nachschub und Aufkommen von Juvenilstadien aus tieferen Sedimentschichten.

Auch ohne Schwallbetrieb dürfte früher eine ausgeprägte Kolmation im Rhein der Fall gewesen sein. Darauf weisen Untersuchungsprotokolle aus den Jahren 1946/47 hin. Qualitative Hinweise in diesen Berichten sprechen jedoch gleichzeitig dafür, dass die heute festgestellten Defizite bei grösseren Lückenraumbewohnern, insbesondere bei Eintags- und Steinfliegenlarven, früher nicht in diesem Ausmass gegeben waren und durch den Schwallbetrieb verstärkt wurden. Dies deckt sich auch mit den Ergebnissen im Fachbericht Schälchli, Abegg + Hunzinger, die die Verstärkung der Kolmation durch den Schwallbetrieb dokumentieren.

Ein dichter Bestand von Köcherfliegen (*Allogamus auricollis*) im Furt- und Rinnenbereich von Bad Ragaz und Buchs ist auch auf die Flussmorphologie bzw. Strömungsverhältnisse zurückzuführen. Durch die hohen Strömungsgeschwindigkeiten bei Schwall (im gesamten

Längenprofil auch in den langsamer durchströmten Furten und Rinnen immer über 1 m/s; vgl. Fachbericht Schälchli, Abegg + Hunzinger) dürfte *Allogamus* regelmässig verdriftet werden und in strömungsberuhigten Bereichen stärker akkumulieren. Vermutlich wäre auch der durch eine schwallbedingte Resuspension charakterisierte Flächenanteil (je nach Teststrecke Anteil von 33% - 40%; vgl. Fachbericht Schälchli, Abegg + Hunzinger) ein potentieller Lebensraum von *Allogamus*, der durch den Schwallbetrieb jedoch nur sehr eingeschränkt nutzbar ist.

Die Analyse der relativen Anteile verschiedener funktioneller Ernährungstypen spiegelt die Charakteristika der Probenstellen bzw. die Veränderungen der Artengemeinschaften wieder. In Mastrils verursacht die durch Schwall und Trübe am wenigsten beeinträchtigte Hydrurusfauna eine übermässige Weidegängerdominanz. Bad Ragaz und Buchs weisen infolge der höheren Feinsedimentanteile und (v.a. in Bad Ragaz) verstärkten inneren Kolmation zunehmende Detritusfresseranteile in den Rinnen auf.

Aufschlussreich ist auch die Charakterisierung der Biozönotischen Region: Auf Grundlage der Temperatur- und Gefällsverhältnisse wäre der Alpenrhein in Graubünden ursprünglich dem Übergang Untere Forellenregion/Äschenregion, flussab der Äschenregion zuzuordnen. Im Unterlauf treten zunehmend potamale Einflüsse hinzu.

Durch das Zusammenwirken von Schwallbetrieb und Begradigung ist ein starker Rhithralisierungseffekt gegeben. Die Furten und Schnellen entsprechen meist dem Übergang zwischen Oberer und Unterer Forellenregion. Im Vergleich zur natürlichen Situation entsprechen diese Veränderungen einer Verschiebung um mindestens 1 biozönotische Region.

Die stärkste Differenzierung zwischen den verschiedenen Teststrecken zeigt sich in den Rinnen. V.a. in Buchs kommt das verstärkte Auf-

treten von Arten tieferer Regionen zum Tragen. Dennoch resultiert selbst in dieser tiefen, langsam durchströmten Gleithangssituation noch eine Zuordnung zur Unteren Forellenregion mit beginnendem Übergang zur Äschenregion.

Besiedelung der Tiefenrinne: An allen Teststrecken sind die Besiedlungsdichten immer derart gering (die Biomassen beispielsweise liegen rund 1 - 2 Zehnerpotenzen (!) unter den Werten der flacheren Uferbereiche), dass dieser Lebensraum einheitlich für den ganzen Alpenrhein als extrem dünn besiedelt bezeichnet werden kann. Dieser Flussbereich ist als Lebensraum kaum nutzbar, im wesentlichen können sich hier nur noch Juvenilformen und kleine Arten halten.

Limitierender Faktor ist dabei der ständige Geschiebetransport, auf den bereits bei den Korngrössenanalysen hingewiesen wurde. Die Abhängigkeit der Besiedlungsdichten von der Substratstabilität (Ausnahme ufernahe Rinnen) und dem ebenfalls damit zusammenhängendem Algenbewuchs kann deutlich gezeigt werden (Abbildung 32).

Auch in anderen Flüssen sind deutlich verminderte Besiedlungsdichten in den Tiefenrinnen eine durchaus normale Erscheinung. Die Werte am Rhein sind aber vergleichsweise derart gering, dass hier von einer wesentlichen Verschärfung durch den Schwellbetrieb ausgegangen werden muss.

Der ausserordentlich spärlichen Besiedelung der Tiefenrinne kommt insofern eine grosse Bedeutung zu, als dieser Lebensraum einen grossen Flächenanteil am Flusssystem einnimmt. In Mastrils, Bad Ragaz und Buchs liegt dieser Anteil zwischen 41% und 52%.

Die Internationale Rhein-strecke (Teststrecke Diepoldsau) stellt mehr oder weniger eine einzige Tiefenrinne, randlich begrenzt vom Blockwurf, dar. Die gesamte Internationale Rhein-strecke ist daher hinsichtlich der Bodenfauna als weitgehend degra-

diert Abschnitt zu bezeichnen. Bezüglich des Renaturierungspotentials setzt eine Verbesserung in der Internationalen Rhein-strecke daher in erster Linie durchgreifende morphologische Massnahmen voraus. Ziel ist die Wiederherstellung besser nutzbarer Lebensräume (flacher überströmte Furten, Schnellen etc.). Dies kann nur über entsprechende Aufweitungen des Flussquerschnittes erfolgen.

Zusammenfassend müssen die auffallendsten Defizite der Bodenfauna mit dem Feststofftransport in Verbindung gebracht werden. Schwallbedingter Geschiebetransport ist einer der massgeblichsten Faktoren für die generell niedrigen Besiedlungsdichten und Biomassen, insbesondere in den Tiefenrinnen. Äussere und innere Kolmation sind ein zweiter massgeblicher Faktor, auf den sich die beobachteten Defizite zurückführen lassen (insbesondere der weitgehende Ausfall v.a. grösserer Sedimentlückenbewohner). Die Kolmation wird dabei durch den Schwellbetrieb verstärkt, unter anderem durch die Remobilisierung und den Weitertransport eingetragener Feinsedimente auch im Winterhalbjahr.

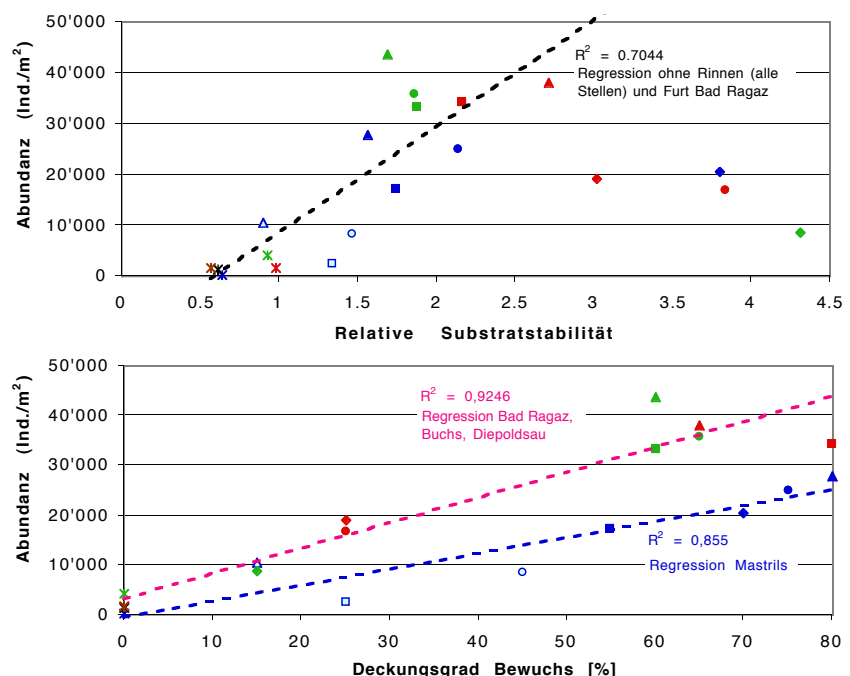


Abb. 32 Abhängigkeit der Besiedlungsdichte (Abundanz) von Substratstabilität und Bewuchsdichte. **Blau gefüllt:** Mastrils (ufernah); **Blau leer:** Mastrils (uferfern); **Rot:** Bad Ragaz; **Grün:** Buchs; **Braun/schwarz:** Diepoldsau. Symbole: Kreis = Furt; Dreieck = Schnelle (Beginn); Quadrat = Schnelle (Ende); Rhombus = Rinne (ufernah); Kreuz = Tiefenrinne.

6. Fachbereich Fischökologie

Die Fischpopulationen des Alpenrheins sind durch vielfältige Faktoren beeinträchtigt. Wesentliche Bedeutung kommt neben den Regulierungsmassnahmen und der Abtrennung der Zubringer vor allem dem Schwall und der damit in Verbindung stehenden, erhöhten Trübefracht im Winterhalbjahr zu. Die Fischbestände im Alpenrhein liegen dabei aber deutlich niedriger als jene in vom Gewässertyp ähnlichen Flüssen, wie Salzach und Inn, die ebenfalls reguliert und schwallbeeinflusst sind (siehe Tabelle 2).

Die stärkere Beeinträchtigung der Fischpopulationen am Alpenrhein ist zwar vermutlich generell auf den Summationseffekt der zahlreichen Schadensfaktoren zurückzuführen. Im Rahmen des vorliegenden Projektes soll aber durch die interdisziplinäre Bearbeitung der spezifische Einfluss von Schwall und erhöhter Trübe sowie insbesondere deren Kombination erfasst werden.



Abb. 33 Befischungen erfolgen entlang der Kiesbänke an 3 Terminen (Okt. 99, Feb. 00, Aug. 00) mit dem mittleren E-Fangboot bzw. watend.

6.1 Befischungen

Die fischökologischen Erhebungen umfassen vor allem Befischungen der vom Schwall be-

sonders betroffenen Kiesbankbereiche. Andere Uferstrukturen, wie Hinterrinner etc. werden nur im Nahbereich der Kiesbänke erfasst (Abbildung 33). Zusätzlich finden Befischungen in den Mündungsbereichen von mit dem Alpenrhein niveaugleich vernetzten Zubringern (Dorfbach, Liechtensteiner Binnenkanal) statt. Insgesamt werden 12 Fischarten nachgewiesen. Der Anteil der im Oberlauf (Mastrils, Bad Ragaz) dominierenden Bachforelle geht dabei flussab stetig zurück; jener der Regenbogenforelle steigt hingegen zunehmend. In Diepoldsau ist sie häufigste Art, die Bachforelle fehlt völlig.

Parallel zum zunehmenden Regulierungsgrad geht der Fischbestand entlang der Kiesbänke

Fluss	Schwallamplitude		Fischbestand	
	m ³ /s	cm	Ind./ha	kg/ha
Alpenrhein (Domat/Ems)	150 (1:7,5)	100	50	10 (Mittel.)
Ill (Mündungsbereich)	40 (1:5-10)		169	23
Inn (Telfs)		90	145	48
Mittlere Salzach (Bischofsh.)	107 (1:3,7)	92	197	41
Bregenzer Ache	(1:60)		206	

Tab. 2 Schwallamplitude bei Niederwasser und Fischbestand in schwallbeeinflussten Flüssen (Jungwirth et al., 1991, Spindler, 1996, Jungwirth et al., 1989, Wiesbauer et al., 1991, Jungwirth et al., 1990).

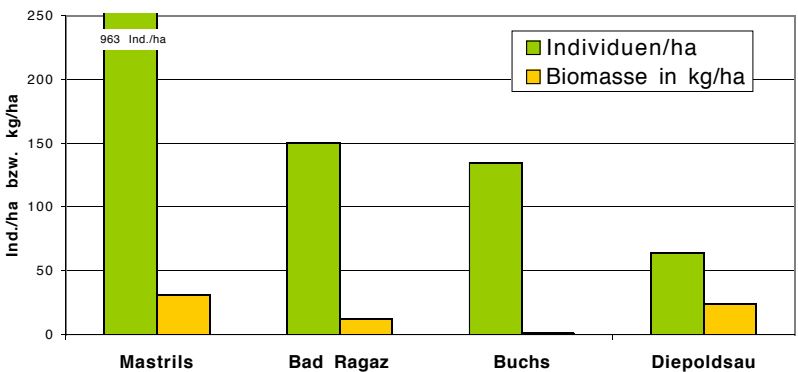


Abb. 34 Individuendichte und Biomasse in den Uferbereichen im Längsverlauf (Mittel aus 3 Terminen ohne Koppe).

vom strukturreichen Abschnitt der Mastrilser Auen mit intaktem Zubringersystem im Längsverlauf deutlich zurück (Abbildung 34). Für die naturnah umgestaltete Mündung des Liechtensteiner Binnenkanals werden hingegen über 8000 Individuen/ha belegt.

6.2 Reproduktionsverhältnisse

Einen weiteren Schwerpunkt bildet die Überprüfung der Reproduktionsverhältnisse für Bach- und Seeforelle mittels insgesamt 100 modifizierter Vibert-Kästen, die in den Alpenrhein, einem kleinen Zubringer in den Mastrilser Auen ("Dorfbach") sowie in Inn und Lech eingebracht werden (Abbildung 35).

Erfolgreiche Larvalentwicklung wird im Alpenrhein nur im unteren Teil der Riffel im Bereich von Mastrils dokumentiert. An allen anderen Stellen kommt es zu einer stark verzögerten Entwicklung der Eier, die ein rechtzeitiges Schlüpfen und die Entwicklung ausreichend schwimmfähiger Larven vor dem Frühjahrshochwasser verhindern. Diese verzögerte Entwicklung ist vermutlich Folge der verstärkten inneren Kolmation durch die bei Schwall erhöhte Trübefracht, die zu reduzierter Durchströmung und damit unzureichender Sauerstoffver-

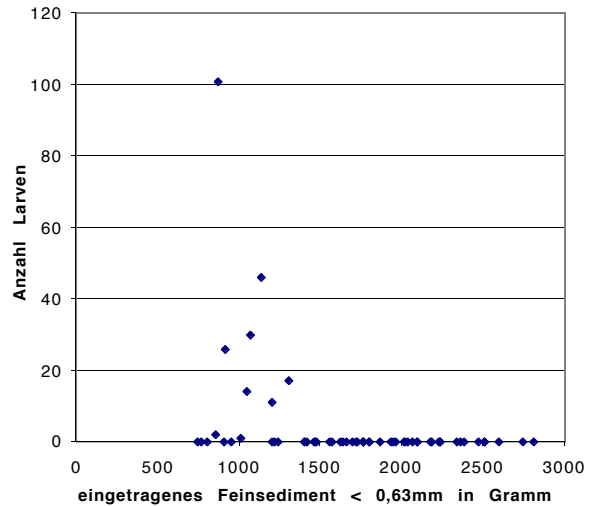


Abb. 36 Zusammenhang zwischen dem Auftreten von Larven und dem eingetragenen Feinsedimentanteil (<0.63mm) im Alpenrhein.

sorgung der im Substrat befindlichen Eier führt (Shumway et al., 1964). Larven treten im Alpenrhein daher nur in jenen Vibertkästen auf, die vergleichsweise geringe Anteile an eingetragenen Feinsediment <0.63mm aufweisen (Abbildung 36).

Demgegenüber werden im Dorfbach (Abbildung 38) und im Referenzfluss Lech in allen



Abb. 35 Die 100 modifizierten Vibert-Kästen werden an jeder Beprobungsstelle in 3 charakteristische Flussbettbereiche "oberhalb Riffel", "unterer Teil Riffel", und "entlang Kiesbank" eingebracht. In jeden Kasten werden im Spätherbst 200 Seeforelleneier eingeschwemmt. Die Kästen werden Ende Feb. (Dorfbach) bzw. Mitte März wieder entnommen und die Zahl der Larven, Eier im Augenpunktstadium und sonstiger lebender Eier bestimmt.



Kästen Larven belegt. Im schwallbeeinflussten Inn werden im unteren Teil der Riffel ebenfalls Larven nachgewiesen.

6.3 Auswirkung der wichtigsten Schadensfaktoren auf die Fischpopulationen

Auf Basis vorliegender Ergebnisse lassen sich die Auswirkungen von Schwall und erhöhter Trübe auf die Fischbestände folgendermassen beurteilen:

Trockenfallen oder Verdriften der Jungfische und Larven. Die flachen ufernahen Bereiche entlang der Kiesbänke stellen für Larven und Jungfische der meisten Fischarten in Rhythralgewässern die bevorzugten Habitate dar (Guthruf, 1996). Insbesondere Larven stellen aufgrund ihrer begrenzten Schwimmkapazität bzw. zum Schutz vor Räubern sehr spezifische Anforderungen an geringe Wassertiefen und niedrige Fliessgeschwindigkeiten. So suchen frisch emergierte Bachforellenlarven in den Nachtstunden stehende, sehr seichte Bereiche (0 - 2cm) zum Rasten auf (Roussel & Bardonnnet, 1999).

Gerade an flachen Kiesbänken verschieben sich diese Zonen aber zwischen Schwall und Sunk am Alpenrhein um beträchtliche Entfernungen. Bei eher geringer Schwallamplitude von 20 auf 140 m³/s schwankt die Wasseranschlagslinie im Winter entlang der Kiesbänke in Bad Ragaz um 12m bis über 73m bei einer Wasserspiegeldifferenz von bis zu 95cm (Abbildung 37). In Mastrils ist die Wasserspiegeländerung und das Ausmass der Wasserwechselzone als Folge heterogener Gerinnemorphologie noch grösser. Zusätzlich fallen hier mehrere Hinterrinnen trocken.

Diese massiven täglichen Änderungen der Lebensraumverhältnisse zwi-

schen Sunk und Schwall zwingen die Larven und Jungfische bei Schwall mit der stark steigenden Wasseranschlagslinie mitzuwandern, um stets ihre präferierten Habitate aufzusuchen. Dabei verbleiben bei jedem Abflussrückgang Individuen in kleinen, trocken fallenden Tümpeln zurück. Im Rahmen der Befischungen können in den Flachuferbereichen bei Schwall nur vergleichsweise geringe Dichten von juvenilen (einsömmrigen) Bach- und Regenbogenforellen belegt werden; auch unmittelbar vor Rückgang des Schwalles kurz vor Mitternacht werden in Mastrils entlang einer Kiesbank in den bei Sunk trocken fallenden Hinterrinnen bzw. Flachuferbereichen nur 200 Ind./ha nachgewiesen. Dies entspricht ca. 10% der Dichte in den flusswärts anschliessenden, permanent benetzten Bereichen. Über den Winter können jedoch auch Ausfälle von wenigen Prozent pro Sunkphase aufgrund ihres täglichen Auftretens zu einer starken Ausdünnung der Jungfische führen.

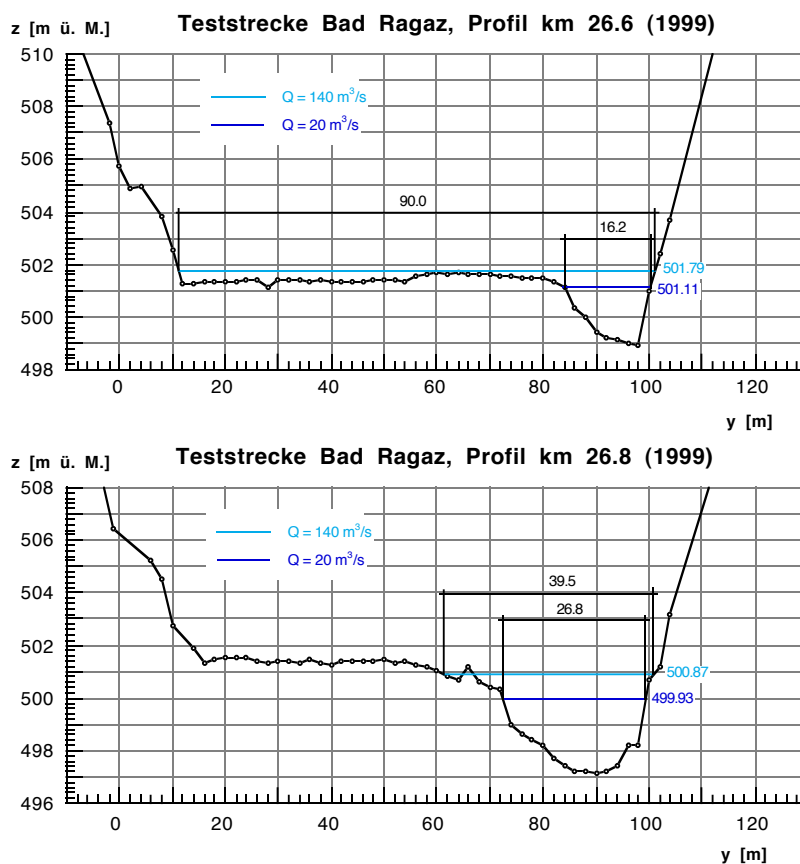


Abb. 37 Wasserspiegel bei Sunk (20 m³/s) und Schwall (140 m³/s) in 2 Profilen (km 26.6 und 26.8) im Abschnitt Bad Ragaz (aus Fachbericht Schälchli, Abegg + Hunzinger).



Abb. 38 Im Dorfbach (Vibertkasten) belegte Forellenlarve.

Die in Graubünden besetzten juvenilen Bachforellen weisen beim Einsatz Ende Juli bereits eine Länge von 50 - 70mm auf und sind daher im Vergleich zu Forellenlarven weniger gefährdet. So werden auch im Oktober in Mastrils diese Stadien noch in grösseren Stückzahlen belegt. Der Rückgang der Fangzahlen im Februar ist zwar teilweise methodisch bedingt, könnte jedoch auf die oben angeführte Ausdünnung hinweisen.

Forellenlarven werden im Rahmen vorliegender Untersuchung nur Ende Februar in Mastrils flussab der Dorfbachmündung nachgewiesen. Unter Berücksichtigung der kaum funktionierenden natürlichen Reproduktion (siehe unten) sind Larven im Alpenrhein auch nicht oder nur in äusserst geringen Stückzahlen zu vermuten. Bei funktionierender Reproduktion wären für Larven aber infolge der deutlich geringeren Schwimmleistung und noch stärkerer Präferenz für seichte Flachwasserzonen wesentlich stärkere Auswirkungen der Schwankungen der Wasseranschlagslinien als für Jungfische anzunehmen (vgl. z.B. Ottaway & Forrest, 1983). Zudem erfordern die permanenten grossräumigen Standortwechsel hohen energetischen Aufwand, der gerade für Larven kaum aufbringbar erscheint. So müssten die Larven und Jungfische, um auch bei Schwall in Habitaten mit geringen Fliessgeschwindigkeiten und geringen Wassertiefen zu verbleiben, je nach Profilform täglich 15 bis 70m weit zum Ufer und bei Sunk wieder zurück wandern (vgl. Abbildung 37).

Bleiben die Larven und Jungfische hingegen an den bei Sunk geeigneten Habitaten, so besteht aufgrund der bei Schwall an diesen Stellen

auch bodennah auftretenden hohen Fliessgeschwindigkeiten die Gefahr der Abdrift. Insbesondere, wenn die Larven und Jungfische den strömungsgeschützten, unmittelbaren Bereich zwischen den Steinen (Grenzschicht) verlassen, ist mit deren Verdriftung zu rechnen. Dies gilt auch für die meisten anderen strömungsliebenden Fischarten wie z.B. die Äsche. Die Koppe dürfte hingegen dauerhaft in permanent benetzten Bereichen im Substrat bleiben und dadurch vom Schwall nicht so sehr wie andere Fischarten betroffen sein (Slavik et al., 2000). Dies zeigen auch die im Vergleich zum Gesamtfischbestand vergleichsweise hohen Dichten dieser Art.

Beeinträchtigung der Reproduktion. Untersuchungen über die Beeinträchtigung des Laichvorganges von Bachforellen in Schwallstrecken liegen den Verfassern nicht vor, sind aber in Analogie zu dem für viele Fischarten bekannten Abbruch der Laichaktivitäten bei einsetzendem Hochwasser anzunehmen. Aufgrund ihrer täglichen Periodizität würden diese Auswirkungen aber stärker ins Gewicht fallen.

Trockenfallen der bei Schwall abgelaichten Eier bzw. Erosion der bei Sunk abgelaichten Eier. Praktisch alle Hauptfischarten des Alpenrheins laichen an flacheren, rasch fliessenden Bereichen mit lockerem Kiessubstrat, wobei jede Fischart sehr spezifische hydromorphologische Anforderungen an die Laichplätze stellt. Verortet man die potentiellen Laichplätze für Bach- und Seeforelle am Alpenrhein bei Schwall und vergleicht diese mit der Wasseranschlagslinie bei Sunk, so ergibt sich bei der während der Laichzeit der Bach- und Seeforelle (Nov./Dez.) typischen Schwallamplitude von 100cm keine Überlappung. Das heisst, praktisch alle potentiellen Laichplätze bei Schwall fallen bei Sunk trocken. Dies gilt umso mehr, als der minimale Abfluss im Jänner gegenüber der Laichzeit nochmals zurückgeht.

Potentielle Laichplätze bei Sunk weisen hingegen bei Schwall sehr hohe Fliessgeschwindigkeiten auf, die zur Erosion der Eier führen können. Bei den Schwallspitzen kommt es zudem immer wieder zur Erosion und Verlagerung von Geschiebe, wovon gerade die optimalen Laichplätze mit lockerem Kiessubstrat unterhalb der Riffel besonders betroffen sind (Fachbericht Schälchli, Abegg + Hunzinger). So werden im

Rahmen der Untersuchungen zweimal sogar die im unteren Teil des Riffels eingebrachten Vibertkästen in Buchs durch Umlagerung derartiger Bereiche erodiert. Insgesamt dürfte daher alleine aus diesem Grund keine oder nur mehr sehr geringe natürliche Reproduktion für die Bach- und Seeforelle im Alpenrhein möglich sein.

Ungenügende Ei- bzw. Larvalentwicklung durch Kolmation des Kieslückenraumes infolge der erhöhten Trübefracht. Wie die Ergebnisse der Vibertkästen zeigen, verhindert die starke innere Kolmation (Abbildung 39) als Schadensfaktor im Alpenrhein eine erfolgreiche natürliche Reproduktion (insbesondere der See- und Bachforelle). Lediglich in den naturnahen Riffelausformungen in Mastrils wäre hinsichtlich Kolmation möglicherweise eine Reproduktion in sehr eingeschränktem Umfang möglich. Die bereits aufgeführten Schadensfaktoren lassen jedoch in Summe eine erfolgreiche Reproduktion auch in Mastrils sehr fraglich erscheinen.

Die Zubringer in den Mastrilser Auen, vor allem der Dorfbach, bieten hingegen diesbezüglich optimale Bedingungen. Den Ausfall der Reproduktion im Alpenrhein können diese wenigen, kleinen Zubringer aber nicht kompensieren.

Indirekte Schädigung durch zu geringes Nahrungsangebot. Die Biomassewerte des Makrozoobenthos liegen vor allem im Herbst deutlich unter jenen vergleichbarer Gewässer (Fachbericht ARGE Limnologie). Im Winter (Jänner) steigen die Bestandesdaten jedoch wieder an.

Im Herbst bei minimalem Nahrungsangebot weisen die untersuchten Regenbogenforellen Konditionsfaktoren von lediglich 0.85 auf (Entnahme allerdings nur in Diepoldsau). Im Winter und Sommer mit höherem Nahrungsangebot ändern sich die Konditionsfaktoren aber nicht. Die Magenanalysen zeigen eine gleichmässige Verteilung des Füllungsgrades der Mägen.

Dabei ist zu beachten, dass nicht die gesamte Benthosbiomasse für das Nahrungsangebot entscheidend ist, sondern der Anteil der für die Fische tatsächlich nutzbaren Taxa. So wird die Bodenfauna im Alpenrhein derzeit vor allem von Zuckmücken (Chironomiden) dominiert, die aufgrund ihrer geringen Grösse für Fische nur beschränkt nutzbar sind. In den Magenanalysen

erreicht diese Gruppe nur geringe Anteile. Gleichzeitig sind die Stein- und Eintagsfliegenlarven im Alpenrhein unterrepräsentiert, wobei sie in den Magenanalysen aber neben den Kriebelmücken (Simuliiden) häufig vorkommen. Insgesamt ist somit anzunehmen, dass die festgestellten niedrigen Benthosbiomassen zwar derzeit für den extrem geringen Fischbestand im Alpenrhein nicht den massgeblichen Schadensfaktor darstellen. Bereits bei geringfügig erhöhtem Fischbestand könnte das sehr eingeschränkte Nahrungsangebot aber zu einem limitierenden Faktor werden.

Gesamtbeurteilung

Auf Basis vorliegender Ergebnisse dürfte die massgebende Schädigung der praktisch völlige Ausfall der natürlichen Reproduktion im Alpenrhein, insbesondere auch für Bach- und Seeforelle, sein. Verstärkt wird dies durch die Abtrennung der meisten Zubringer, wodurch sie als Reproduktionsareale für die Populationen des Alpenrheins ausfallen. Die nur mehr wenigen vernetzten, zudem kleinen Zuflüsse wie der Dorfbach können diesen Ausfall trotz teilweise optimaler Reproduktionsbedingungen nicht annähernd kompensieren.

Insbesondere Forellenlarven würden durch den Schwall ebenfalls massivst geschädigt werden. Dies wird aber derzeit aufgrund der fehlenden Reproduktion und dadurch fehlenden Larven im Alpenrhein nicht wirksam. Der Ausfall von Jungfischen hat zusätzliche Beeinträchtigung der Bestände zur Folge, ist hinsichtlich der Prioritätenreihung aber sicherlich hinter die zuvor genannten Parameter zu setzen.

Das sehr eingeschränkte Nahrungsangebot durch die extrem geringen Benthosbiomassen stellt ebenfalls eine wesentliche Beeinträchtigung der Fischfauna dar.

6.4 Möglichkeiten zur Reduktion der Schädigung

Unter den zuvor dargestellten Schadensfaktoren besitzt die Verbesserung der Reproduktionsbedingungen aus fischökologischer Sicht absolute Priorität. Neben der generellen Reduktion von Schwall und Trübefracht kommt daher der Vernetzung und Revitalisierung der Zubringer besondere Bedeutung zu, um diese wichtigen Reproduktionsareale für die Fischpopulationen des Alpenrheins wieder zugänglich zu machen. Wie die niveaugleiche, naturnahe Umgestaltung des Liechtensteiner Binnenkanals zeigt, können durch derartige Massnahmen schon kurzfristig deutliche Verbesserungen erreicht werden.

Darüber hinaus ist aber auch die Revitalisierung des Alpenrheins selbst erforderlich. So werden in der naturnahen Referenzstrecke in Mastrils die mit Abstand höchsten Fischbestände nachgewiesen. Zwar treten hier die grössten Wasserwechselzonen und somit vermutlich auch die höchsten Ausfälle von Larven und Jungfischen durch den Schwallenfluss auf. Das insgesamt grössere und heterogenere Lebensraumangebot gleicht dies aber mehr als aus. Insgesamt zeigen diese Ergebnisse anschaulich die massiven Beeinträchtigungen der Fischpopulationen durch Schwall und erhöhte Trübefracht im Alpenrhein und belegen somit den dringenden Handlungsbedarf. Dies gilt umso mehr, als die Schwallamplitude in den letzten Jahren kontinuierlich weiter gestiegen ist (Kapitel 3.2).



Abb. 39 Am Alpenrhein war der "Klarwasserraum" an der Sohle der modifizierten Vibertkästen vielfach durch eingeschwemmtes Sediment vollständig verlegt.

7. Synthese

In der Synthese werden die Zusammenhänge zwischen den fachspezifischen Untersuchungsergebnissen dargelegt und die Auswirkungen von Abfluss, Trübung und Morphologie auf das Ökosystem des Alpenrheins untersucht. Insbesondere gilt es, die massgebenden schädigenden Einflüsse auf das Benthos und die Fische nachzuweisen und damit die limitierenden Faktoren für deren Bestand im Alpenrhein zu bestimmen.

Das Kapitel 7.1 befasst sich mit dem physikalischen System des Alpenrheins. Es wird aufgezeigt, inwiefern der Abfluss, die Trübung und die Morphologie die Prozesse und die verschiedenen Teillebensräume im Fließgewässer beeinflussen, resp. beeinträchtigen.

In Kapitel 7.2 werden die Einflüsse des physikalischen Systems auf das biologische System untersucht. In einer Wirkungsanalyse wird dargelegt, wie sich die einzelnen physikalischen Prozesse auf die Fische, das Makrozoo- und das Phytobenthos auswirken. Daraus wird abgeleitet, welches die limitierenden Faktoren des biologischen Systems sind.

In Kapitel 7.3 wird aufgezeigt, welche Prozesse und welche Einflussgrößen sich ändern müssen, damit die Lebensbedingungen im Alpenrhein massgeblich verbessert werden können.

7.1 Physikalisches System

Überblick. In Abbildung 40 ist das physikali-

sche System eines Fließgewässers mit den Einflussgrößen, den physikalischen Prozessen und den aquatischen Teillebensräumen schematisch dargestellt.

Der aquatische Lebensraum gliedert sich in den fließenden Wasserkörper, die Sohlenoberfläche, die Sohlenmatrix (Sohlenmaterial mit Lückenraum) und den Uferbereich mit der Wasserwechselzone (Kiesbank oder Blockwurf). Der Lebensraum wird geprägt durch die Prozesse Strömung, Lichtklima, Feststofftransport (Geschiebe und Schwebstoffe) sowie äussere und innere Kolmation. Diese Prozesse werden hauptsächlich durch die Einflussgrößen Abflussgeschehen, Feststoffzufuhr (im Winter v.a. Schwebstoffe) und Morphologie bestimmt. Andere Einflussgrößen (wie etwa die Einstrahlung oder die Geologie des Einzugsgebietes) sind hier nicht dargestellt.

Wirkungsmatrix Einflussgrößen - Prozesse.

In Tabelle 3 ist die Wirkungsmatrix zwischen den Einflussgrößen und den Prozessen dargestellt. Die Matrix zeigt, wie stark sich die Änderung einer Einflussgrösse (Abfluss, Trübung, Morphologie) auf die Prozesse auswirkt.

Die Abflussänderung zeigt einen starken Einfluss auf die Strömung und den Geschiebetrieb. Die Abflusszunahme ist ausschlaggebend, ob Geschiebe transportiert werden kann. Der Einfluss auf die Strömung ist abhängig von der Morphologie. Die Abflussänderung zeigt

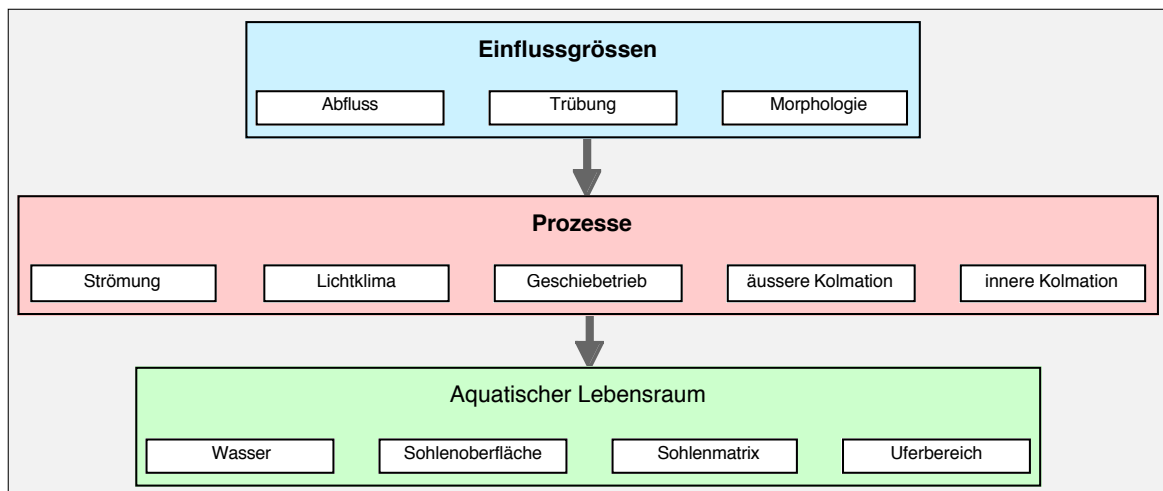


Abb. 40 Physikalisches System eines Fließgewässers mit den Einflussgrößen, den Prozessen und dem betroffenen aquatischen Lebensraum.

einen bedeutenden Einfluss auf die äussere und die innere Kolmation sowie auf das Lichtklima.

Eine Änderung der Trübung zeigt einen starken (dominanten) Einfluss auf das Lichtklima und die innere Kolmation. Der Einfluss auf die äussere Kolmation ist von grundlegender Bedeutung (ohne Schwebstoffe keine Kolmation). Demgegenüber hat die Trübung keinen Einfluss auf die Strömung und den Geschiebetrieb. Die Morphologie zeigt einen starken Einfluss auf

die Strömung, mit Unterschieden zwischen verzweigten Flussstrecken, eingengten Flussabschnitten mit alternierenden Bänken oder kanalisierten Abschnitten mit ebener Sohle. Bei den ersten zwei Flusstypen ergeben sich auch innerhalb eines Abschnitts grosse Unterschiede im Längenprofil (Furt, Schnelle, Rinne, etc.). Die Morphologie zeigt einen bedeutenden Einfluss auf den Geschiebetrieb, sowie die äussere und die innere Kolmation. Das Lichtklima wird indirekt über die Abflusstiefe beeinflusst. Die Matrix zeigt umgekehrt, auf welche Einflussgrössen eingewirkt werden muss, damit ein bestimmter Prozess in die gewünschte Richtung verändert werden kann. Beispielsweise muss zur Verminderung der inneren Kolmation oder zur Verbesserung des Lichtklimas in erster Linie die Trübung reduziert werden.

Relevanzmatrix Prozesse - Teillebensräume.

In Abbildung 41 ist die Relevanz der Prozesse bezüglich der vier Teillebensräume gemäss Abbildung 40 dargestellt. Die Strömung wirkt sich als einziger Prozess auf den gesamten

Tab. 3 Wirkungsmatrix der Einflussgrössen und der Prozesse, die den Lebensraum eines Fliessgewässers bestimmen. ++ = starker, massgebender Einfluss, + = bedeutender Einfluss, (+) = mässiger Einfluss, - = kein Einfluss.

Prozesse	Einflussgrössen		
	Schwall	Trübung	Morphologie
Strömung Wasserwechselzone	++ Auswirkung auf Wasserspiegellage, benetzte Breite, Fliessgeschwindigkeit, Hauptstromrichtung, Wirbelbildung	- Kein Einfluss	++ Bedeutende Unterschiede zwischen Furt, Schnelle, Rinne und ebener Sohle
Licht	+ Wasserspiegelanstieg reduziert das Licht an der Gewässersohle	++ Massgebend für Lichtextinktion, resp. für Lichtverhältnisse an der Gewässersohle	(+) Beeinflusst das Lichtklima über die Abflusstiefe
Geschiebetrieb Sohlenerosion	++ Massgebend für Geschiebetransportkapazität In Schnellen bezüglich Sohlenerosion	- Kein Einfluss	(+) Beeinflusst die Geschiebeum- und -ablagerung Sohlenerosion nur in Schnellen
Äussere Kolmation	+ Resuspension, Um- und Ablagerung der Schwebstoffe, beeinflusst die Ausdehnung der äusseren Kolmation	+ Verfügbarkeit von Schwebstoffen, beeinflusst vorallem Mächtigkeit der äusseren Kolmation	+ Beeinflusst den Ablagerungsort der Schwebstoffe, resp. wo die Schwebstoffe abgelagert werden
Innere Kolmation	+ Erhöhte Sohlenschubspannung bewirkt Verfestigung der Sohle und beschleunigte innere Kolmation	++ Massgebend für innere Kolmation (Trübung bestimmt die für die innere Kolmation verfügbare Partikelmasse)	+ Deutliche Unterschiede zwischen Furt, Schnelle, Rinne

aquatischen Lebensraum aus. Das Lichtklima beeinflusst den Lebensraum bis zur Sohlenoberfläche, zeigt jedoch keine Wirkung im Uferbereich und der Sohlenmatrix. Der Geschiebetrieb betrifft die Sohlenoberfläche oder die obere Schicht der Sohle im Bereich der Hauptströmung. Im Winter vom Geschiebetrieb nicht betroffen sind relativ breite Uferbereiche. Die äussere Kolmation betrifft die Sohlenoberfläche und den Uferbereich inklusive die Wasserwechselzone. Die innere Kolmation beeinflusst den Teillebensraum in der Sohlenmatrix.

Lebensraum Gewässersohle. Die Gewässersohle (Oberfläche und Sohlenmatrix) als massgebender Lebensraum für das Makrozoobenthos, das Phytobenthos sowie für die Reproduktion der Fische, wird auf komplexe Art von den untersuchten Prozessen beeinflusst. Insbesondere bei gut strukturierten Gewässersohlen ist deren Wirkung von Ort zu Ort verschieden. In Abbildung 42 sind die Bedeutung des Geschiebetriebs, von Erosionserscheinungen, sowie der äusseren und der inneren Kolmation für

eine Flie遝sstrecke mit alternierenden Bänken dargestellt. Die obere Darstellung zeigt die Verhältnisse mit und die untere Darstellung jene ohne Abfluss- und Trübeschwall.

Der Geschiebetrieb beeinflusst die Sohlenoberfläche durch das Rollen, Springen oder Gleiten der Körner über die Sohle sowie die Ablagerung des Geschiebes. Ohne Abfluss- und Trübeschwall ist höchstens ein kleiner Sohlenanteil im Hauptstrombereich der Schnelle (Erosion) und im anschliessenden Kolkbereich (Ablagerung) betroffen. Mit dem heutigen Schwallregime ist ein durchgehender Geschiebetrieb zu beobachten, der sich auf die Breite der Hauptströmung konzentriert. Der Abflussschwall führt dazu, dass der zentrale tiefe Teil der Gewässersohle regelmässig von Geschiebe überrollt wird.

Sohlenerosion ist bei fehlendem Abflussschwall höchstens ganz lokal und nur am Anfang des Winters in den Schnellen möglich. Mit dem Abflussschwall breiten sich diese Erosionszonen über die gesamte Schnelle aus. Weil hier weder innere noch äussere Kolmation wirksam sind, wird durch diesen Prozess ein Sohlenbereich beeinträchtigt, der im unbeeinflussten Zustand im Winterhalbjahr einen ungestörten (und gut durchströmten) Lebensraum darstellen würde.

Bezüglich der äusseren Kolmation gliedert sich ohne Abflussschwall die Sohle einerseits in Flächen mit sauberer Kiessohle und andererseits

Prozess	Strömung	Licht	Geschiebe	äussere Kol	innere Kol
Teil-lebensraum					
Wasser	×	×			
Sohlenoberfläche	×	×	×	×	
Sohlenmatrix			×		×
Uferbereich	×				

Abb. 41 Relevanz der Prozesse bezüglich der Teil Lebensräume. Fette Kreuze bezeichnen eine grosse, dünne Kreuze eine eher geringe Bedeutung. Kol = Kolmation.

in Ablagerungszonen mit geringmächtigen Feinsedimenten (entweder vorwiegend Sand oder kohäsive Feinsedimente). Der Übergangsbereich (Resuspensionszonen) ist wegen der geringen Abflussschwankungen schmal. Bei vorhandenem Abfluss- und Trübeschwall verlagern sich die Ablagerungszonen an die neue Uferlinie. Zwischen der Fläche mit sauberer Kiessohle und den neuen Ablagerungszonen vergrössert sich die Resuspensionszone. Gegenüber den Verhältnissen ohne Schwall nimmt die Mächtigkeit der Ablagerungen deutlich zu. Bei der inneren Kolmation äussert sich der Unterschied zwischen den Verhältnissen mit bzw. ohne Schwall in der Kolmationsentwicklung im

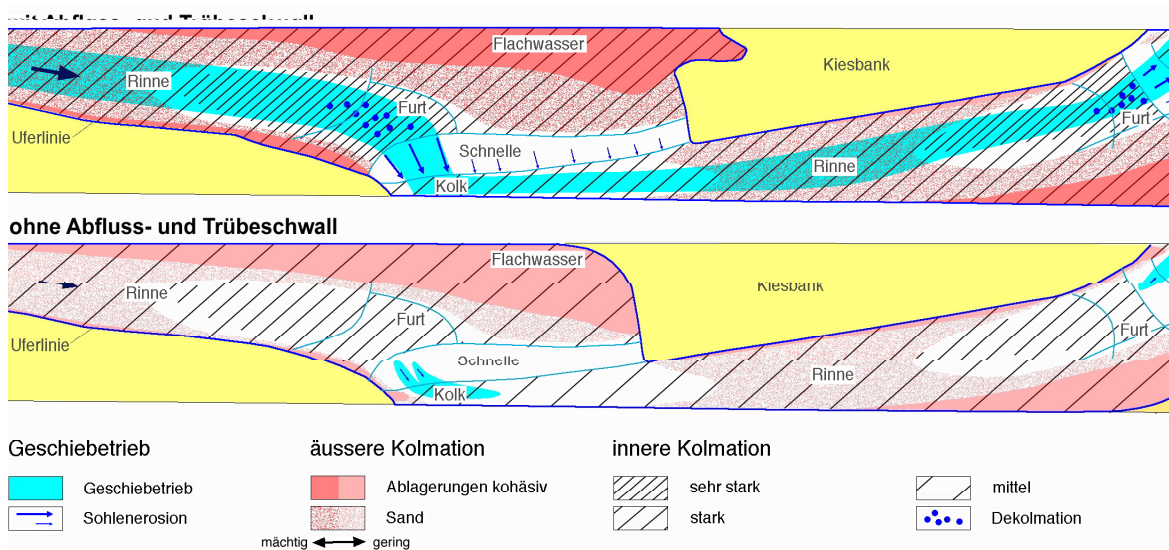


Abb. 42 Teil Lebensraum Sohlenoberfläche mit den massgebenden Prozessen mit bzw. ohne Abfluss- und Trübeschwall, dargestellt anhand eines Flussabschnitts mit alternierenden Bänken.

Verlauf des Winters. Mit Abfluss- und Trübeschwall werden mehr Feinpartikel in der Sohle eingelagert, wodurch die Durchströmung reduziert, der Lückenraum verringert und die Sohle stärker verfestigt wird. Ein weiterer Unterschied besteht in der örtlichen Dekolmation der Sohle in Furten bei Schwall, was zu einer Erhöhung der Durchlässigkeit und einer Verbesserung der Strömung, aber auch zu einem Freispülen des Sohlenmatrix und damit zu einer Abdrift der Lückenbewohner führt.

Folgerungen

Die Untersuchung des physikalischen Systems zeigt, dass der Alpenrhein mit bzw. ohne Abfluss- und Trübeschwall ein System mit stark unterschiedlichen Prozessen darstellt. Der natürliche Lebensraum der Winterperiode ist gekennzeichnet durch ein stabiles System mit geringen Veränderungen. Heute führt der Schwall zu einer ausgeprägten täglichen Dynamik der Strömungsverhältnisse und des Feststofftransports, wie sie in dieser Form auch im Sommer nicht auftritt.

Der Wasserkörper erfährt bei Schwall (fast täglich) eine Erhöhung der Fließgeschwindigkeit (Faktor 1.2 - 4) und eine massive Erhöhung der Trübung (Faktor 2 - 20). Bei Wasserspiegelschwankungen von 0.8 bis 1.3m verlagert sich die Uferlinie um wenige Meter bis zu 60 Meter hin und zurück. An der Sohlenoberfläche führt der Schwall zu einer grundsätzlichen Veränderung der physikalischen Prozesse. Abhängig von der Lage tritt entweder regelmässig Geschiebetrieb auf (Hauptstrombereich), es wird Sand abgelagert und wieder resuspendiert (Resuspensionszonen) oder es akkumulieren zunehmend Feinsedimente (Sedimentationszonen).

In der Sohle findet eine beschleunigte innere Kolmation statt, wobei durchschnittlich etwa 30% - 40% mehr Schwebstoffe im Lückenraum abgelagert werden.

7.2 Auswirkungen auf das biologische System

Zwischen dem physikalischen und dem biologischen System besteht ein komplexes Wirkungsgefüge. In Abbildung 43 sind die wesentlichen Zusammenhänge dargestellt, die vorab von den schwall- und trübebedingten physikalischen Prozessen und der Morphologie ausgehen. Grüne Pfeile bezeichnen die Einwirkungen der physikalischen Prozesse (rote Kreise) auf das Phytobenthos, das Makrozoobenthos sowie auf Fischbestand und -reproduktion (grüne Kreise). Die Zusammenhänge innerhalb des biologischen Systems sind ebenfalls mit grünen Pfeilen gekennzeichnet (u.a. Nahrungsketten).

Eingezeichnet sind ferner die Einflüsse der schwallführenden Hauptzuflüsse und der Kieswerke (Eintrag von Schwebstoffen), die Beziehung zum Grundwasser (In-, Exfiltration), die Vernetzung des Rheins mit den Seitengewässern (Kontinuum) sowie flussbauliche Eingriffe (Kanalisation, Revitalisierung).

Die Darstellung widerspiegelt die Komplexität des Gewässersystems. Sie zeigt, welche Veränderungen das System erfährt, wenn sich eine oder mehrere Einflussgrößen ändern. Damit können einerseits die verschiedenen Auswirkungen des Abfluss- und Trübeschwalls erkannt, andererseits aber auch die Veränderungen von bestimmten Einzelmassnahmen (z.B. zur Reduktion der unerwünschten Auswirkungen) qualitativ aufgezeigt werden.

In den Tabellen 4 bis 6 sind die Wirkungsmatrizen für das Phytobenthos, das Makrozoobenthos und die Fische dargestellt. Die erste Spalte zeigt die untersuchten Prozesse, die zweite Spalte beurteilt deren Relevanz, und in der dritten Spalte sind die Auswirkungen des Abfluss- und Trübeschwalls beschrieben.

Wirkungsmatrix Phytobenthos (Tabelle 4).

Die Phytobenthosbesiedlung weicht infolge des Abfluss- und Trübeschwalls in einigen Punkten merklich von den natürlichen Verhältnissen ab. Als massgebende Prozesse führen die Schwallströmung und der Geschiebetrieb zu einer Abrasion und einem Abschwemmen des Algenbewuchses. Eine Messung bei Unterzaz ergab einen markanten Anstieg des driftenden Phyto- und Makrozoobenthos bei einem Abfluss von 90 bis 100 m³/s. Dieser Abfluss liegt noch deutlich unter dem Wert für das Ein-

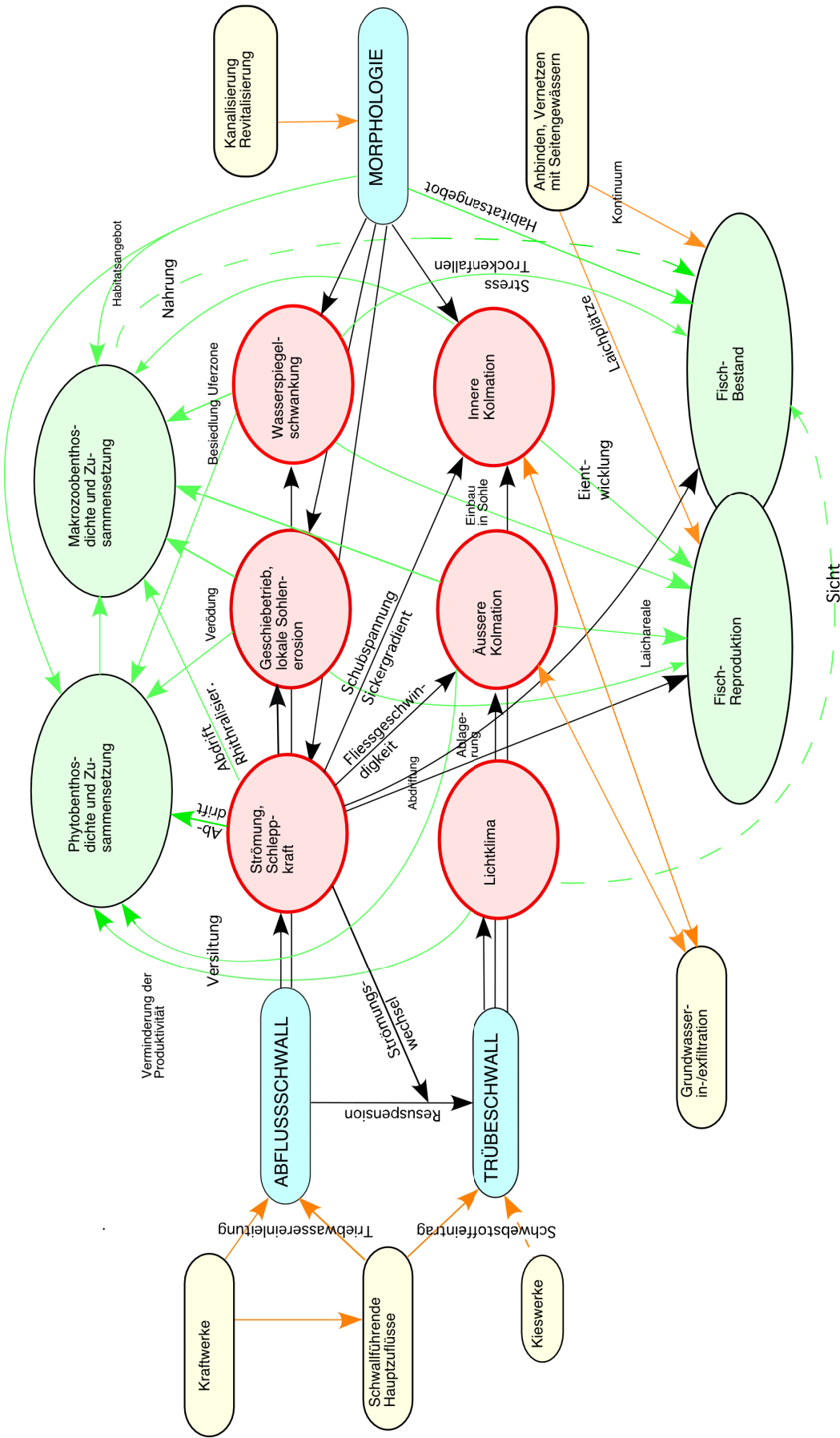


Abb. 43 Wirkungsgefüge zwischen physikalischem und biologischem System mit den Einflussgrößen (blau), den physikalischen Prozessen (rot), den Fischen, dem Makrozo- und dem Phytobenthos (grün). Gelb eingezeichnet sind anthropogene Einflüsse und weitere äussere Randbedingungen.

setzen des Geschiebetriebes; er stellt damit gleichsam einen unteren Grenzwert dar.

Der praktisch fehlende Bewuchs in Wassertiefen >1m (bei Sunk) ist weniger auf das Lichtklima (Beschränkung des Aufwuchses) als vielmehr auf den regelmässigen Geschiebetrieb in der Hauptstromrinne zurückzuführen.

Die äussere Kolmation und das Lichtklima beschränken den pflanzlichen Bewuchs in den Sedimentationszonen, respektive in Sohlenbereichen mit grösserer Wassertiefe. In der Wasserwechselzone wird andererseits die Verbreitung von Grün- und Kieselalgen begünstigt. Generell sind die Auswirkungen des Abfluss- und Trübeschwall auf das Phytobenthos als vergleichsweise gering einzustufen. Die grösseren Veränderungen ergeben sich infolge des Abflussschwalls.

Wirkungsmatrix Makrozoobenthos (Tabelle 5.) Die Rheinsohle zeigt im Vergleich zu anderen alpinen Flüssen sehr geringe Besiedlungsdichten und im Herbst extrem niedrige Biomassen des Makrozoobenthos. Dessen Bestand wird durch Zuckmückenlarven dominiert (Hydrurusfauna). Bei den Bewohnern des oberflächlichen Lückenraumes (z.B. Eintagsfliegenlarven der Familie Heptageniidae und Steinfliegenlarven) sowie des tieferen Lückenraums sind in verschiedenen Streckenabschnitten grosse Defizite festzustellen. Ausgesprochen dünn besiedelt sind generell die Tiefenrinnen, die als Lebensraum kaum mehr nutzbar sind. Tabelle 5 zeigt, dass für die Beeinträchtigungen des Makrozoobenthos verschiedene Prozesse verantwortlich sind, die durch den Abfluss- und Trübeschwall verursacht oder gefördert werden.

Tab. 4 Phytobenthos: Wirkungsmatrix der physikalischen Prozesse. Legende der Symbole siehe Tabelle 3.

Prozess	Relevanz	Veränderung durch Schwall
Licht	+	- Schwallbedingte Trübung vermindert das Lichtangebot gegenüber den natürlichen Niedrigwasserverhältnissen stark Abnehmendes Lichtangebot führt zu - Insgesamt verringerter Produktivität der Primärproduzenten - Beschränkung auf weniger lichtbedürftige Algenarten in tieferen Bereichen
Feinsediment-Transport (Sand + Silt <2mm)	+	- Erhöhter Feinsediment-Transport bei Schwall führt zu zusätzlicher Abrasion ("Sandstrahl-Effekt") und Abschwemmung des Algenbewuchses und der darauf bzw. darin lebenden wirbellosen Tiere ("Katastrophendrift")
Feinsediment-Einlagerung (innere Kolmation)	-	- Keine Auswirkungen erfasst
Feinsediment-Ablagerung (äussere Kolmation)	+	- Zunehmende Sand- und Siltablagerungen beeinträchtigen die Entwicklung des Aufwuchses
Strömung / Hydraulik	++	- Erhöhte Fliessgeschwindigkeit bei Schwall führt zu zusätzlicher Abschwemmung des Algenbewuchses und der darauf bzw. darin lebenden wirbellosen Tiere ("Katastrophendrift")
Wasserwechselzone	+/-	- Sohlenbereiche mit hohem Lichtangebot bei Schwall fallen bei Sunk trocken - Mit schwallbedingt zunehmendem Schwankungsbereich des Wasserspiegels verändert sich die Zusammensetzung des Gesamtbewuchses zugunsten von Kieselalgen und fädigen Grünalgen (<i>Ulothrix zonata</i>)
Feingeschiebe-Transport	++	- Feingeschiebe-Transport bei Schwall führt zu zusätzlicher Abrasion und Abschwemmung des Algenbewuchses und der darauf bzw. darin lebenden wirbellosen Tiere ("Katastrophendrift")
Lokale Sohlenerosion	+	- Aufwuchs wird durch Destabilisierung der Feingeschiebe-Auflage und (bei stärkerer Strömung) durch Aufreissen der Deckschicht (Schnellen) abgeschauert ("Kugelmühlen-Effekt")

den. Abbildung 42 zeigt, in welchen Sohlenbereichen die verschiedenen Prozesse wirksam sind.

Die innere Kolmation führt vor allem in den Furchen und im unteren Bereich der Rinnen zu Defiziten bei den kleinen Kieslückenbewohnern (z.B. sauerstoffbedürftige Oligochaeten) und erschwert das Aufkommen von Juvenilformen. Die stärksten Auswirkungen der inneren Kolmation zeigen sich flussabwärts der Landquartmündung (höchste Konzentration an Schwebstoffen), die geringsten in der Teststrecke Masttrils.

Die äussere Kolmation beeinträchtigt den Lebensraum der Gewässersohle in Resuspensionszonen (geringere Substratstabilität) und den Sedimentationszonen (höherer Flächenanteil, mächtigere Feinsedimentschichten). Betroffen sind vor allem die grösseren Sedimentlückenbewohner (z.B. weitgehender Ausfall von Heptageniiden). Die äussere Kolmation führt umgekehrt zu einer Zunahme von Detritus- und Sedimentfressern (Siltablagerungen) sowie von Räubern.

Der regelmässige Geschiebetrieb innerhalb des

Hauptstrombereiches verhindert die Ansiedlung von Makrozoobenthos in der Tiefenrinne (regelmässige Umlagerung des Substrats, z.B. in Rinnen, oder Transport von Geschiebekörnern über die stabile Deckschicht, z.B. in Furchen). Bei lokalem Aufreissen der Deckschicht wird die Besiedlung auch in tieferen Sedimentschichten ausgeräumt (Teilflächen in Schnellen).

Die Beanspruchung der Sohle durch die Strömung führt bei ansteigendem Abfluss (Schwallanstieg) zu einer Katastrophendrift (erzwungene Abdrift durch die Destabilisierung von Fein-

sedimenten oder Geschiebeablagerungen sowie durch das Abreissen von Fadenalgen). Die Driftfracht ist im Verhältnis zur stehenden Individuendichte nicht vernachlässigbar.

Der Schwall und die Morphologie bewirken einen Rhithralisierungseffekt mit einer Abweichung der biozönotischen Region um mindestens 1 Region vom unbeeinflussten Zustand.

In der Internationalen Rheinstrecke bewirkt die Kombination von Kanalisierung und Schwallbetrieb einen fast vollständigen Ausfall des Benthos, d.h. eine weitgehende Degradierung der Gewässersohle.

Tab. 5 Makrozoobenthos: Wirkungsmatrix der physikalischen Prozesse. Legende der Symbole siehe Tabelle 3.

Prozess	Relevanz	Veränderung durch Schwall
Phytobenthos	(+)	- Reduktion Lebensraumangebot (Hydrurus-Fauna) - Im Verhältnis zu anderen Schädigungen geringere Bedeutung
Abrasion / Transport	?	- Auswirkungen nicht nachweisbar - Bei Simuliiden keine Auswirkungen festgestellt - netzbauende Köcherfliegen kommen grundsätzlich nicht vor
Innere Kolmation	+/++	- Defizite bei kleinen Kieslückenbewohnern wie Parakiefferiella sp. oder den sauerstoffbedürftigen Oligochaeten Propappus volki, Stylodrilus heringianus. - Hinweise auf erschwertes Aufkommen und Nachschub von Juvenil-Formen aus tieferen Sedimentschichten (geringe relative Abundanz-zunahme über das Winterhalbjahr in Bad Ragaz mit deutlichster innerer Kolmation) - Zunahme Detritusfresser, Anteile in Verbindung auch mit äusserer Kolmation (Silt). - Höhere Anteile Prodiamesa (Sedimentfresser) – Dicranota – Empididae (Räuber)
Äussere Kolmation	++	- Ausfall grösserer Sedimentlückenbewohner (Bsp. Eintagsfliegen: weitgehender Ausfall Heptageniiden) - Dominanz der Hydrurusfauna als relativ unbeeinträchtigte Lebensformen (Bsp. Eintagsfliegen: Dominanz von Baetis) - Bei schwallbedingter öfterer Umlagerung (Resuspension / Sedimentation) Nutzbarkeit auch für kleine Kieslückenbewohner nicht gegeben - Flächenausdehnung: Ablagerungs- und Wechselzone in Plänen 2.1-2.3 (Fachbericht Schälchli, Abegg + Hunzinger)
Strömung / Hydraulik	+	- Abflussanstieg bei Schwall löst werktägliche Katastrophendrift aus, trägt ebenfalls zu der beobachteten spärlichen Besiedelung bei - Vermutung: Allogamus verstärkt verdriftet ($V_{\text{grenz}} = 0.4 \text{ m/s}$ bei Schwall deutlich überschritten) ⇒ Resuspensionsflächen (vgl. Pläne 2.1-2.3 im Fachbericht Schälchli, Abegg + Hunzinger) wären ohne Schwall potenzielle Lebensräume - Rheophile Arten können sich besser behaupten als Besiedler strömungs-beruhigter Zonen - Abweichung der biozönotischen Region um mind. 1 Region vom unbeeinflussten Zustand
Wasserwechselzone	(+)/+	Bei Sunk Austrocknen oder Gefrieren der bei Schwall in diese Zone verdrifteten Tiere ⇒ Beeinflussung der unmittelbaren Uferbereiche, in dieser Untersuchung nicht näher bearbeitet
Geschiebe-Transport	++	- Auslösen von Drift - Regelmässiger Transport verhindert Ansiedlung von Makrozoobenthos, vgl. extrem tiefe Besiedlungsdichte in Tiefenrinne (im Vergl. zu Uferbereichen und anderen Fließgew., z.B. Inn) - Driftfracht während Schwall im Verhältnis zu stehender Individuendichte nicht vernachlässigbar
Aufreissen Deckschicht (lokal)	(+)	- Löst Drift aus - Besiedlung auch in tieferen Sedimentschichten ausgeräumt (Schnelle / Riffel)

Wirkungsmatrix Fische

(Tabelle 6). Der Fischbestand im Alpenrhein ist, verglichen mit vom Gewässertyp her ähnlichen Flüssen, niedrig. Die natürliche Reproduktion der Hauptfischarten ist praktisch für den ganzen Rhein auszuschliessen. Eine erfolgreiche Larvenentwicklung war bei den eingebrachten Vibertkästen nur im unteren Teil der Schnellen in Mastrils zu beobachten.

Verantwortlich für diese massive Beeinträchtigung der Fischpopulation im Alpenrhein sind verschiedene Prozesse, die hauptsächlich mit dem Abfluss- und Trübeschwall zusammenhängen.

Die Wasserspiegelschwankungen beeinträchtigen das Ablegen des Laichs. Bei Schwall günstige Standorte fallen bei Sunk trocken, und umgekehrt können bei Sunk günstige Stand-

orte bei Schwall erodiert werden (erhöhte Schubspannung, Geschiebetrieb). Gerade die von der Substratzusammensetzung her günstigen Standorte sind vom regelmässigen Geschiebetrieb betroffen.

Die täglich wiederkehrenden Wasserspiegelschwankungen gefährden Fischlarven und Jungfische durch Stress, Trockenfallen in Flachwasserzonen und Abdrift.

Die innere Kolmation verzögert und beeinträchtigt die Ei- und Larvalentwicklung (durch Verfestigung der Sohle und verminderte Sauerstoffzufuhr), so dass eine erfolgreiche Reproduktion verhindert wird. Betroffen sind alle Sohlenbereiche wo Rheinwasser infiltriert, insbesondere in den Furten und im unteren Teil der Rinnen inkl. die Uferbereiche.

Diese 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 (Makrozoobenthos) stellt

beim derzeit geringen Fischbestand nicht den massgebenden Schadensfaktor dar. Weil die Abundanz von Stein- und Eintagsfliegenlarven, welche die Hauptnahrung vieler Fischarten darstellen, im Alpenrhein aber stark vermindert ist, könnte das Nahrungsangebot bei leicht erhöhtem Fischbestand bald limitierend werden

7.3 Massgebende Zusammenhänge

In Abbildung 44 sind die massgebenden Zusammenhänge zwischen den Einflussgrössen, den physikalischen Prozessen sowie den Leit- und Algenarten (gemäss Wirkungsmatrizen) dargestellt.

Fische. Für die Population limitierend sind in erster Linie die Wasserspiegelschwankungen, der Geschiebetrieb und die innere Kolmation. Diese Prozesse verhindern unter den heutigen Verhältnissen die natürliche Reproduktion weitgehend. Von grosser Bedeutung sind ausserdem die stark schwankenden Strömungsverhältnisse (negativ) und der weitgehend fehlende Anschluss von Seitengewässern (mit positiven Ausnahmen, z.B. Dorfbach und Liechtensteiner Binnenkanal). Das Nahrungsangebot (in

Form von Makrozoobenthos) ist eher bescheiden, dürfte jedoch bei dem geringen Fischbestand knapp ausreichend sein.

Makrozoobenthos.

Stark limitierend wirken beim Makrozoobenthos die innere Kolmation (auf die kleinen Kieslückenbewohner und Juvenilformen), die äussere Kolmation (auf grössere Sedimentlückenbewohner) sowie der Geschiebetrieb (praktisch auf den gesamten Bestand in der Tiefenrinne). Von ebenfalls grosser Bedeutung sind die Schwallströmung und lokale

Tab. 6 Fische: Wirkungsmatrix der physikalischen Prozesse. Legende der Symbole siehe Tabelle 3.

Prozess	Relevanz	Veränderung durch Schwall
Schädigung Zoobenthos	+ / (+)	– Reduktion Nahrungsbasis, v. a. im Sommer/Herbst, stärkere Auswirkungen schon bei geringfügig erhöhtem Fischbestand (gegenüber extrem geringem derzeit) zu erwarten
Abrasion / Transport	–	– Kein Einfluss, auch bei Schwall zu tiefe Konzentrationen
Innere Kolmation	++	– Stark verzögerte Entwicklung bis Absterben der Eier der kieslaichenden Arten (auch bei endgültiger Larvenentwicklung erfolgreiche Reproduktion infolge Hochwasser nicht zu erwarten). Referenz Dorfbach und Lech (beide schnellere Entwicklung). Nur bei Mastrils ev. erfolgreiche Reproduktion, da relativer Anteil der Feinsedimente geringer (möglicherweise infolge naturnäherer Ausformung) – Verstopfung des Lebensraums für Fischlarven
Äussere Kolmation	+	– Einschränkung des Lebensraums für Fischlarven und Koppen
Strömung / Hydraulik, Wasserwechselzone	++	– Grossflächiges häufiges Wechseln der ufernahen Lebensräume im Tagesverlauf, v. a. Brutfische – bei Sunk Gefahr des Trockenfallens – Effekt aufgrund fehlender Brutfische nicht nachweisbar Wahl optimaler Laichplätze wird durch Schwall beeinträchtigt: – bei Schwall Freispülen der Eier – bei Sunk Trockenfallen und Ausfrieren der Eier – Erosion vorhandener potenzieller Laichplätze infolge Schwall (v. a. Schnellen)
Geschiebetransport und Aufreissen Deckschicht	+	– Erosion vorhandener potentieller Laichplätze infolge Schwall (v. a. Schnellen)

Erosionserscheinungen (Drift).

Phytobenthos. Beim Phytobenthos wird der Aufwuchs im Bereich der Hauptstromrinne durch den regelmässigen Geschiebetrieb verhindert (limitierender Prozess). Die Lichtverhältnisse würden (bei ausbleibendem Geschiebetrieb) in den tieferen Gewässerbereichen das Wachstum einschränken.

Massgebende physikalische Prozesse. Von den physikalischen Prozessen sind es demnach der Geschiebetrieb, die Wasserspiegelschwankungen sowie die äussere und innere Kolmation, welche unter den heute bestehenden Verhältnissen limitierend auf den Fisch- und Benthosbestand wirken.

Die mit dem Schwall stark schwankenden Strömungsverhältnisse (Fließgeschwindigkeit, Abflusstiefe) verursachen das Abschwemmen von Jungfischen und Larven sowie die Drift von Makroinvertebraten. Das Lichtklima führt zu einer Einschränkung des Algenwachstums in der Tiefenrinne. Diese Prozesse sind unter heutigen Verhältnissen aber (noch) nicht limitierend.

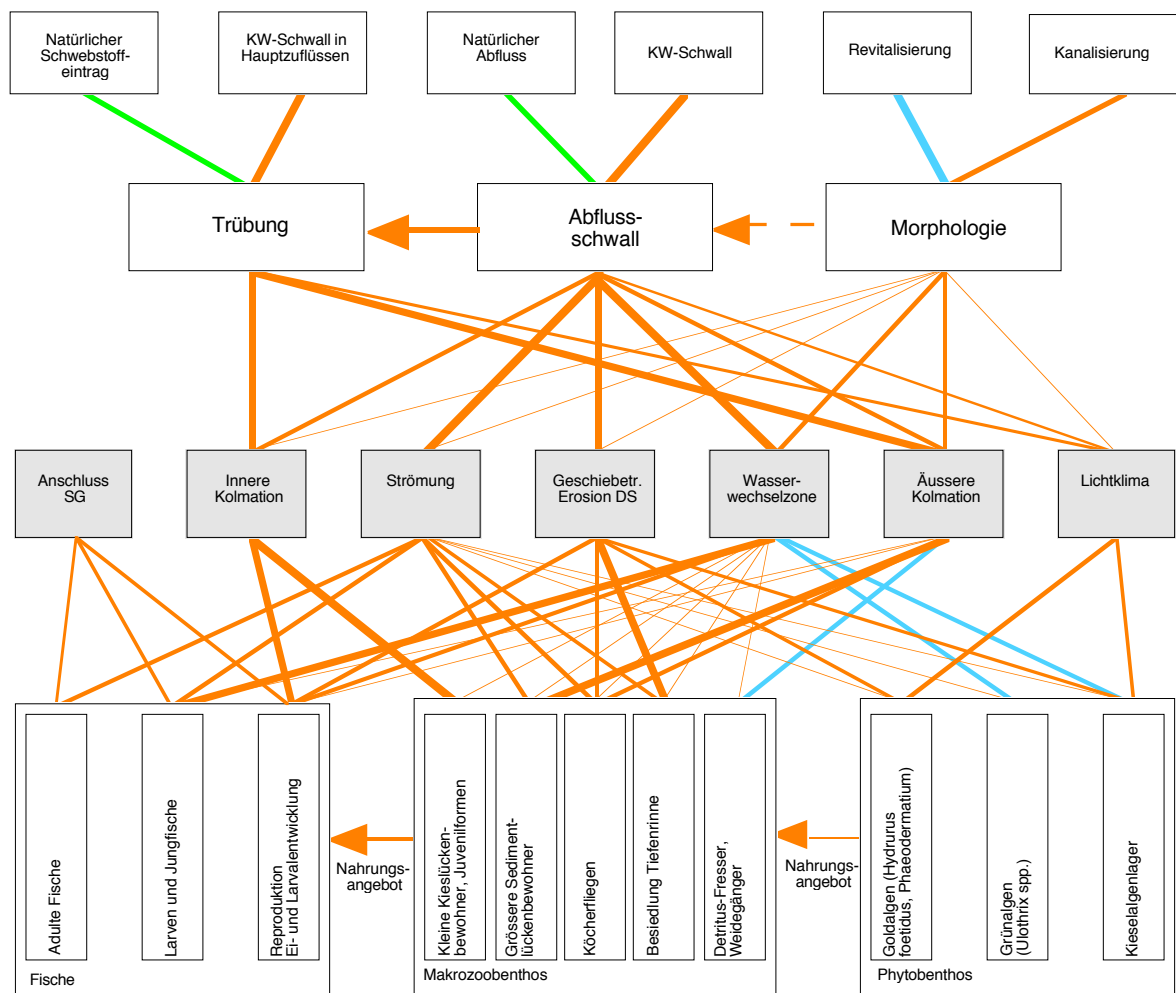


Abb. 44 Massgebende Zusammenhänge zwischen den Einflussgrössen, den physikalischen Prozessen sowie den Leittier- und Algengruppen. Die orangenen Linien symbolisieren eine anthropogene Beeinträchtigung, blaue Linien eine anthropogen bedingte Begünstigung und grüne Linien rein natürliche Zusammenhänge. Breite Linien bezeichnen einen dominanten, mittlere Linien einen starken und feine Linien einen bedeutenden Einfluss. KW = Kraftwerk; SG = Seitengewässer; DS = Deckschicht. Generell bewirken Schwall und Morphologie einen Rhithralisierungseffekt (+ 1 biozönotische Region).

8. Folgerungen

8.1 Sanierungsansätze

Im vorliegenden Kapitel wird diskutiert, welche Einflussgrößen verändert werden müssen, damit der Lebensraum des Alpenrheins massgebend aufgewertet werden kann. Als Einflussgrößen gelten der Abfluss, die Trübung und die Morphologie (Abbildung 40).

Beim **Abfluss** muss die Schwallspitze abgesenkt und die Schwallamplitude verringert werden. Zur Verringerung der Amplitude kann auch eine Erhöhung des Basisabflusses zwischen den Schwallen (bei Sunk) beitragen. Die vorliegende Untersuchungen der Schwall- und Trübeverhältnisse liefern erste, vorläufig noch grobe Anhaltspunkte zum notwendigen Ausmass der Abflussreduktion:

- Bei Untervaz wurde festgestellt, dass der Transport von Feinsediment (Schwebstoffen) sowie die massive Abschwemmung des Phyto- und Makrozoobenthos ("Katastrophendrift") bei einem Grenzabfluss von 90 bis 100 m³/s einsetzt. In den unterliegenden Fließstrecken ist dieser Grenzabfluss nicht bekannt.
- Als minimale Bedingung kann das Ausbleiben des Geschiebetriebs in den Rinnen, resp. das Ausbleiben eines durchgehenden Geschiebetriebs, festgelegt werden. Der Geschiebetrieb beginnt bei Mastrils zwischen 140 und 150 m³/s, bei Bad Ragaz (und Buchs) zwischen 160 und 170 m³/s und bei Diepoldsau zwischen 150 und 200 m³/s. Diese Angaben gelten für die mittleren Korndurchmesser des Sohlenmaterials (Mastrils 5.2cm, Bad Ragaz 4.5cm, Buchs 3.3cm, Diepoldsau 2.3cm). Bei dem ökologisch wichtigen Feingeschiebe beginnt der Transport bei etwas tieferen Abflüssen.

Bei der **Trübung** ist prioritär eine geringere Schwebstoffzufuhr aus den Hauptzuflüssen anzustreben. Diesbezüglich von grösster Bedeutung ist die Landquart, wo das von Natur aus hohe Feinsediment-Aufkommen einzelner Seitenbäche mit dem Kraftwerkschwall direkt in den Rhein transportiert wird. Ebenfalls von grösserer Bedeutung sind entsprechende Einträge aus dem Vorderrhein, der Plessur und der Ill. Weil das Trübeaufkommen in den Seitenbächen mehrheitlich natürlich bedingt ist, kann

Anforderungen an eine Sanierung

Für die Sanierung des Alpenrheins als Lebensraum müssen **in Bezug auf die Schwall- und Trübeverhältnisse** primär die folgenden qualitativen Anforderungen erfüllt werden:

1. Verhindern des Geschiebetriebs in den Wintermonaten (Anfang November - Mitte März) durch Herabsetzen der Schwallspitze.
2. Verkleinerung der Wasserspiegelschwankungen und damit der Wasserwechselzone durch Reduktion der Schwallamplitude.
3. Reduzieren der inneren Kolmation durch (1) Verringern der Trübung und (2) durch Absenken der Schwallspitzen (kleinerer Sickergradient und tiefere Sohlenschubspannung).
4. Reduzieren der äusseren Kolmation durch Verringern der Trübung (weniger mächtige Feinsedimentablagerungen) und durch Dämpfen des Abflussschwalls (Verkleinern der Resuspensionszonen).

Weitere Verbesserungen betreffen:

5. Verringern der Schwankungen der Strömungsverhältnisse durch Absenken der Schwallspitze.
6. Aufwerten des Lichtklimas durch Verringern der Trübung.

die Trübung im Rhein nur reduziert werden, wenn die Schwebstoffe in den Hauptzuflüssen abgelagert werden (was unter natürlichen Bedingungen teilweise bis weitgehend der Fall ist). Die Ablagerung der Schwebstoffe in den Hauptzuflüssen wird ermöglicht oder gefördert durch das Ableiten des Abflussschwalls oder eine Reduktion der Schwallspitze sowie durch die Aufweitung von kanalisierten Flussabschnitten.

Ein weiterer Ansatz zur Reduktion der Trübung im Alpenrhein besteht in der Dämpfung des Abflussschwalls (im Alpenrhein selbst), wodurch weniger Feinsedimente resuspendiert werden (kleinere Trübeschwälle).

Bei den Kieswerken an den Seitengewässern

und im Alpenrhein sind in der Winterperiode Kiesentnahmen möglichst zu vermeiden (entsprechend der bestehenden Praxis), und allfälliges Spülwasser darf nicht ungeklärt in das Fließgewässer geleitet werden.

Die **Morphologie** einer Flussstrecke beeinflusst sämtliche im Gewässer ablaufenden Prozesse (Tabelle 3). Daneben bestimmt die Morphologie die Vielfalt der als Lebensraum nutzbaren Strukturen. Der Vergleich der Teststrecken zeigt, 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. Bei Revitalisierungsvorhaben ist darauf zu achten, dass eine genügend grosse Gerinnebreite zur Verfügung gestellt wird, so dass sich die Morphologie uneingeschränkt entwickeln kann. Die Ufersicherungen sollen unregelmässig angelegt und gestaltet werden (kein durchgehender Längsverbau).

Aufwertung eines beeinträchtigten Ökosystems. Abbildung 45 zeigt ein schematisches Diagramm zur ökologischen Beurteilung eines Gewässers. Auf der horizontalen Achse ist die Struktur des Ökosystems (Morphologie, Artenvielfalt, Komplexität) und auf der vertikalen Achse die Funktionen des Ökosystems (Beziehungen zwischen den Teillebensräumen und Arten) qualitativ aufgetragen. Bei einem natürlichen Fließgewässer zeigt (in der Regel) die Struktur des Ökosystems eine hohe Diversität mit vielfältigen systeminternen Funktionen. Solche Gewässer sind im Diagramm oben rechts anzusiedeln. Demgegenüber verfügt ein massiv beeinträchtigtes Fließgewässer über banale Strukturen mit bescheidenen Funktionen. Ein solch degradiertes System ist nahe dem Schnittpunkt der beiden Achsen einzuordnen.

Von den im Alpenrhein untersuchten Teststrecken befindet sich Diepoldsau nahe dem

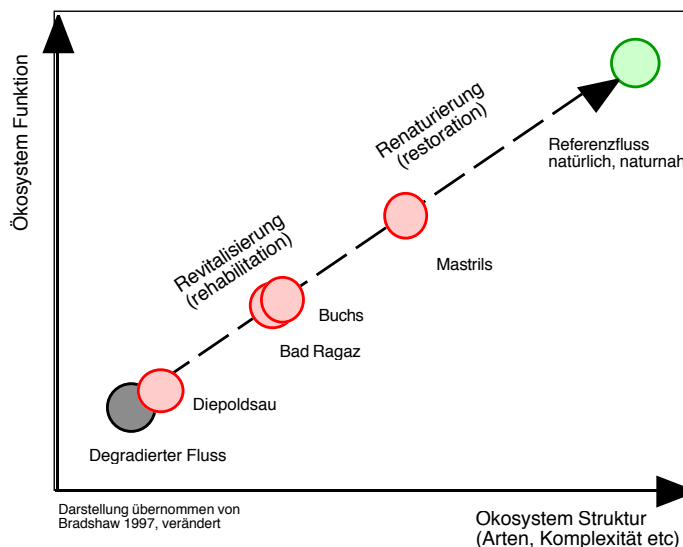


Abb. 45 Verbesserung eines degradierten Systems.

degradierten System. Die Teststrecke Mastrils zeigt (abgesehen vom Geschiebetrieb bei Schwallabfluss) weitgehend natürliche morphologische Strukturen. Die ökologische Struktur (z.B. Artenvielfalt) und Funktion des Ökosystems (z.B. Reproduktionsfähigkeit) sind jedoch durch den Abfluss- und Trübeschwall stark beeinträchtigt. Die Teststrecke Mastrils ist daher etwa in der Mitte zwischen dem degradierten und dem natürlichen (unbeeinflussten) Gewässer einzuordnen. Die Teststrecken Bad Ragaz und Buchs liegen zwischen Diepoldsau und Mastrils.

Abbildung 45 zeigt, dass allein durch Revitalisierungsmassnahmen bzw. bei Beibehaltung der heute vorherrschenden Abfluss- und Trübeverhältnisse, im Alpenrhein höchstens ein Natürlichkeitsgrad erreicht werden kann, welcher der Teststrecke Mastrils entspricht. Flussabwärts der Landquartmündung ist wegen der höheren Trübung ein etwas geringerer Natürlichkeitsgrad erreichbar. Dies bedeutet, dass mit Revitalisierungsmassnahmen allein eine ökologische Aufwertung des Alpenrheins nicht soweit möglich ist, dass die Lebensraumverhältnisse z.B. eine erfolgreiche Reproduktion von Fischen zur adäquaten Bestandeserhaltung erlauben. Die Untersuchungen zeigen, dass dazu Massnahmen zur Dämpfung des Abfluss- und Trübeschwalls im Winterhalbjahr unumgänglich sind.

In der Internationalen Rheinstrecke weist die Morphologie weit grössere Defizite auf als im

Tab. 7 Mögliche Massnahmen und Ansatzpunkte zur Verbesserung des Ökosystems im Alpenrhein.

Einflussgrösse (gewollte Veränderung)	Massnahmen und Ansatzpunkte
Abflussschwall (Senken Schwallspitze und Dämpfen Schwallganglinie)	- Bewirtschaftung Stau Reichenau - Beschränken der Abflussschwälle der Kraftwerke - Betriebliche Koordination der Triebwasserrückleitungen („antizyklischer Betrieb“) - Rückhaltebecken, -kavernen - Ableiten des Schwalls (Gerinne, Stollen, Kanalkraftwerk)
Trübung (Reduktion Schwebstoffkonzentration und Dämpfen Trübeschwälle)	In den Hauptzuflüssen: - Beschränken der Abflussschwälle der Kraftwerke - Ableiten des Schwalls (erzeugt Restwasserstrecke), ev. zusätzliche Kraftwerkstufe - Rückhaltebecken, -kavernen für Dämpfen Abflussschwall - Rückhaltebecken für Feinsedimente aus stark schwebstoffführenden Seitenbächen (z.B. Schraubach) - Renaturierung von kanalisierten Hauptflüssen zur Erhöhung des Speichervermögens - Einstellen des Betriebs der Kieswerke in den Wintermonaten Im Alpenrhein: - Dämpfen des Abflussschwalls, Reduktion der Schwallspitze (Massnahmen vgl. oben)
Morphologie (hohe Strukturvielfalt)	- Flussaufweitungen - Uferrevitalisierungen - Vernetzungen (niveaugleicher Anschluss von Seitengewässern)

Rhein flussaufwärts der Illmündung. Die Morphologie ist hier der limitierende Faktor bezüglich der Habitatsansprüche verschiedener Tierarten (strömungsmeidende Arten) und Altersgruppen (z.B. Jungfische). Die Aufwertung der Morphologie ist hier von noch grösserer Bedeutung als die Dämpfung des Abfluss- und Trübeschwalls.

8.2 Mögliche Massnahmen und Ausblick

Die Untersuchungen des physikalischen und biologischen Systems des Alpenrheins haben gezeigt, dass die Lebensraumverhältnisse im Winterhalbjahr, trotz zum Teil noch naturnaher Morphologie, von denjenigen eines natürlich funktionierenden Ökosystems weit entfernt sind. Massgebende Ursache für die damit verbundenen ökologischen Defizite ist der Abflussschwall im Alpenrhein und seinen Hauptzuflüssen. Die regelmässig hohe Trübung des Alpenrheins ist im wesentlichen das Resultat der Abflussschwälle in den Hauptzuflüssen sowie des Schwalls im Alpenrhein selbst.

Neben dem Abflussgeschehen als massgebender und limitierender Einflussgrösse zeigen auch die Morphologie und der Anschluss der

Seitengewässer einen bedeutenden Einfluss auf die Strukturen und die Funktionen des Ökosystems. Die Morphologie der Ufer und des anschliessenden Flussraums hat zudem eine Bedeutung, die weit über den aquatischen Bereich hinausgeht (z.B. für Avifauna).

Für die nachhaltige Verbesserung des aquatischen Lebensraums sind grundsätzlich Massnahmen erforderlich, welche die Schwallspitze, die Schwallamplitude und die Trübung im Alpenrhein reduzieren.

In der Internationalen Rheinstrecke sind für eine erfolgreiche Aufwertung Revitalisierungsmassnahmen unumgänglich. Weitergehende morphologische Massnahmen können die ökologische Funktionsfähigkeit bzw. Qualität des Flusses weiter verbessern und die aquatischen Lebensräume besser mit den terrestrischen vernetzen.

In Tabelle 7 sind verschiedene Massnahmen zusammengestellt, mit welchen prinzipiell eine Verbesserung des Ökosystems erreicht werden kann. Die Massnahmen sind weder auf ihre Machbarkeit noch auf die anfallenden Kosten überprüft worden. Die Liste der Massnahmen ist nicht abschliessend.

Mit dem vorliegenden Bericht wurde untersucht, welches die Ursachen für den geringen Fischbestand, die fehlende natürliche Reproduktion vieler Fischarten und die geringe Besiedlungsdichte des Makrozoobenthos sind. Gleichzeitig wurde aufgezeigt, welche Prozesse und Einflussgrößen verändert werden müssen, damit diese Defizite behoben werden können. Tabelle 7 zeigt, welche prinzipiellen Massnahmen dafür geeignet sind. Als nächsten Schritt empfiehlt sich die Durchführung einer Machbarkeitsstudie, worin die Massnahmen konkretisiert und die folgenden Fragen abgeklärt werden:

- (1) Um welches Ausmass müssen Schwall und Trübung im Alpenrhein reduziert werden, damit die ökologischen Defizite behoben werden können? Weil die verschiedenen ökologischen Funktionen unterschiedliche Anforderungen an den Lebensraum stellen, ergeben sich unterschiedliche Sanierungsstufen (z.B. Minimalwert: grösste Beeinträchtigungen behoben; Optimalwert: alle wesentlichen Beeinträchtigungen behoben).
- (2) Welche Massnahmen oder Massnahmenkombinationen sind geeignet, die unter Punkt 1 formulierten Anforderungen zu erfüllen? Die Machbarkeit der Mass-

nahmen ist unter Berücksichtigung energie- und betriebswirtschaftlicher Aspekte zu überprüfen. Für alle Massnahmen ist eine Kosten-Wirkungs-Analyse durchzuführen.

- (3) Abklärungen mit den Kraftwerkbetreibern. Gibt es z.B. im Rahmen von Ökostrom Möglichkeiten zur Beeinflussung der Schwallganglinie? Gibt es Koordinationsmöglichkeiten zwischen den Kraftwerkbetreibern, die zu einer Dämpfung des Schwalls führen, ohne dass grössere Ertragseinbussen entstehen?
- (4) Erstellen einer Präferenzliste aller untersuchten Massnahmen. Aufzeigen von Etappierungsmöglichkeiten und Synergieeffekten von Massnahmen und Massnahmenkombinationen (z.B. Revitalisierung und Schwallableitung bei der Landquart).

Die Korrektur des Alpenrheins und die weitgehende Nutzung der Wasserkraft haben zu einer starken Beeinträchtigung des aquatischen Ökosystems geführt, wodurch verschiedene ökologische Funktionen nicht mehr erfüllt werden können. Zur Korrektur dieser Eingriffe gilt es Lösungen zu finden, um der Natur wieder mehr Platz und einen höheren Stellenwert in der vom Menschen geprägten Umwelt einzuräumen.

Literaturverzeichnis

- AFU SG (1998): Zustand und Nutzung der Gewässer im Kanton St. Gallen. Herausgegeben vom Baudepartement des Kantons St. Gallen, Amt für Umweltschutz. Ausgabe 1998, Loseblattordner.
- ARGE FISCHGESUNDHEIT (2001): Gesundheitszustand der Fische im Rheintal. Untersuchungen 1997 bis 2000. Synthesebericht der Arbeitsgruppe "Gesundheitszustand der Fische im Rheintal", St. Gallen, 131 Seiten.
- ARGE GRUNDWASSER (2000): Grundwasserhaushalt Alpenrhein. Grundwassermodellierung für den Abschnitt Landquart bis Bodensee. Kurzbericht im Auftrag der Internationalen Regierungskommission Alpenrhein, 15 Seiten.
- ARGE ILLSPITZ (2000): Machbarkeitsstudie Revitalisierung Alpenrhein — Abschnitt Illspitz. Kurzbericht im Auftrag der Internationalen Regierungskommission Alpenrhein, 15 Seiten.
- 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, 8 - 14.
- BRUTON, M.N. (1985): The effect of suspensoids on fish. *Hydrobiologia* 125, 221 - 241.
- BUHMANN, D., HUTTER, G. (1998): Fliessgewässer in Vorarlberg. Gewässergüte und Wasserbeschaffenheit 1998. Schriftenreihe Lebensraum Vorarlberg 44, 67 Seiten.
- BUHMANN, D., HUTTER, G., LUTZ, S. (2001): Fliessgewässer in Vorarlberg. Gewässerinventar Teil 1. Schriftenreihe Lebensraum Vorarlberg 47, 36 Seiten.
- BUWAL (1994): Ökologische Folgen von Staurationsspülungen. Schriftenreihe Umwelt 219, 47 Seiten.
- BWG (1992): Hydrologischer Atlas der Schweiz. Herausgegeben von der schweizerischen Landeshydrologie und -geologie im Bundesamt für Wasserwirtschaft, Bern, Loseblattordner.
- CUSHMAN, R.M. (1985): Review of Ecological effects of Rapidly Varying Flows Downstream from Hydroelectric Facilities. *North Am. J. Fish. Man.* 5, S. 330 - 339.
- EBERSTALLER, J., HAIDVOGL, G., JUNGWIRTH, M. (1997): Gewässer- und Fischökologisches Konzept Alpenrhein. Grundlagen zur Revitalisierung. Bericht im Auftrag der Internationalen Regierungskommission Alpenrhein, Projektgruppe Gewässer- und Fischökologie, 90 Seiten.
- GUTHRUF, J. (1996): Populationsdynamik und Habitatwahl der Äsche (*Thymallus thymallus* L.) in drei verschiedenen Gewässern des Schweizerischen Mittellandes. Boko's Druck, Zürich.
- HUNZIKER, R., ZARN, B. (1998): Morphologie und Geschiebehaushalt des Alpenrheins. Zusammenfassender Bericht über die Untersuchungen zwischen 1991 und 1997 im Auftrag der Kantone St. Gallen und Graubünden.
- IRKA (2001): Gemeinsam am Alpenrhein. Internationale Regierungskommission Alpenrhein 1995 bis 2000. Herausgegeben von der IRKA, St.Gallen, 36 Seiten.
- IRR (1993): Der Alpenrhein und seine Regulierung. Herausgegeben von der Internationalen Rheinregulierung. 2. Auflage. Kommissionsverlag BuchsDruck und Verlag, Buchs, 462 Seiten.
- JUNGWIRTH, M. (1981): Auswirkungen von Fliessgewässerregulierungen auf Fischbestände am Beispiel zweier Voralpenflüsse und eines Gebirgsbaches. Forschungsarbeiten Wasserwirtschaft - Wasserversorgung, Herausgegeben vom Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Wien, 104 Seiten.
- JUNGWIRTH, M. (1992): Fliessgewässer-limnologische und fischökologische Probleme. *Landschaftswasserbau* 13, 13 - 28.
- JUNGWIRTH, M., SCHMUTZ, S., WAIDBACHER, H. (1989): Fischökologische Studie Inn. Abteilung für Hydrobiologie, Fischereiwirtschaft und Aquakultur, Inst. f. Wasserversorgung, Gewässerökologie und Abfallwirtschaft, Universität für Bodenkultur, Wien. Im Auftrag des Fischerei-Revierausschusses Innsbruck.
- JUNGWIRTH, M., MOOG, O., SCHMUTZ, S. (1990): Auswirkungen der Veränderungen des Abflussregimes auf die Fisch- und Benthosfauna anhand von Fallbeispielen. Ökologische, wasserwirtschaftliche und technische Impulse zur natur- und landschaftsgerechten Nutzung von Fliessgewässern; 9. Seminar Landschaftswasserbau an der TU Wien. Inst. f. Wassergüte und Landschaftswasserbau, Abt. f. Gewässerregulierung, TU Wien, 193 - 234.
- JUNGWIRTH, M., MOOG, O., SCHMUTZ, S. (1991): Rheinkraftwerke Schweiz/Liechtenstein. Umweltverträglichkeitsbericht, Fachgutachten C11, Fischerei und Gewässerökologie. Abteilung für Hydrobiologie, Fischereiwirtschaft und Aquakultur, Inst. f. Wasserversorgung, Gewässerökologie und Abfallwirtschaft, Universität für Bodenkultur, Wien. Im Auftrag des Studienkonsortiums Rheinkraftwerke, 263 Seiten.
- LIMNEX (1994): Chemischer Zustand des Alpenrheins. Bericht im Auftrag der kantonalen Ämter für

Umweltschutz Graubünden und St. Gallen, 101 Seiten.

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

LIMNEX, SCHÄLCHLI & ABEGG (1997): Trübung im Alpenrhein. Ergebnisse einer Literaturstudie. Bericht zuhanden der Projektgruppe Gewässer- und Fischökologie der Internationalen Regierungskommission Alpenrhein, 20 Seiten.

MOOG, O. (1993): Quantification of daily peak hydropower effects on aquatic fauna and management to minimize environmental impacts. Regulated Rivers: Res. & man. 8, 5 - 14.

OTTOWAY, E., FORREST, D. (1983): The influence of water velocity on the downstream movement of alevins and fry of brown trout (*Salmo trutta* L.). J. Fisch Biol. 23, 221 - 227.

PETER, A. (1986): Abgrenzung zwischen Fisch- und Nichtfischgewässern. Schriftenreihe Fischerei 45, Herausgegeben vom Bundesamt für Umweltschutz, Bern, 55 Seiten

ROUSSEL, J.-M., BARDONNET, A. (1999): Ontogeny of diel pattern of stream — margin habitat use by emerging brown trout, *Salmo trutta*, in experimental channels: influence of food and predator presence. Environmental biology of fishes 56, 253 - 262.

SCHÄLCHLI, U. (1993): Die Kolmation von Fliessgewässersohlen: Prognose und Berechnungsgrundlagen. Mitteilung Nr. 124 der Versuchsanstalt für Wasserbau der ETH Zürich.

SCHALLER, K. (1993): Der Einfluss der Stauseen auf Rhein und Bodensee. In IRR (1993), 328 - 330.

SCHMUTZ, S., EBERSTALLER, J. (1993): Die Fischfauna des Alpenrheins und der Nebengewässer. Ber. Bot.-Zool. Ges. Liechtenstein-Sargans-Werdenberg 20, 133 - 158.

SCHÖB, P. (1998): Untersuchung des Fischbestandes in der vom Schwellbetrieb des Kraftwerkes Kumbel beeinflussten Sitter. Praktikumsarbeit an der EAWAG, Kastanienbaum, 8 Seiten.

SHUMWAY, D.L., WARREN, C.E., DOUDOROFF, P. (1964): Influence of oxygen concentration and water movement on the growth of steelhead trout and coho salmon embryos. Transactions of the American Fisheries Society 93(4), 342 - 356.

SLAVIK, O., MATTAS, D., BARTOS, L., JIOINEC, P. (2000): Effects of variable discharge produced by hydropower station on habitat use of *Phoxinus phoxinus* and *Cottus gobio*: Comparison between riffle

and pool mesohabitats. 8. International symposium of regulated streams, River restoration, July 17 - 21, 2000 Toulouse, Seite 85.

SPINDLER, T. (1996): Ökologische Funktionsfähigkeit der Fliessgewässer des Ill-Frutz-Schwemmfächers. Vorarlberger Naturschau 2, 39 - 82.

VALENTIN, S. (1997): Effets écologiques des éclusées en rivière. Etudes "gestion des milieux aquatiques 13 du Cemagref, Lyon, 79 Seiten.

WIESBAUER, H., BAUER, T., JAGSCH, A., JUNGWIRTH, M., UIBLEIN, F. (1991): Fischökologische Studie — Mittlere Salzach. Abteilung für Hydrobiologie, Fischereiwirtschaft und Aquakultur, Inst. f. Wasserversorgung, Gewässerökologie und Abfallwirtschaft, Universität für Bodenkultur, Wien. Im Auftrag der Tauernkraftwerke AG.

ZARN, B. (1999): Der Alpenrhein — ein Kieslieferant? Wasser - energie - luft 91, H 7/8, 157 - 164.

ZARN, B., OPLATKA, M., BELLANDINI, S., MIKOS, M., HUNZIKER, R., JÄGGI, M. (1995): Geschiebehauhalt Alpenrhein. Neue Erkenntnisse und Prognosen über die Sohlenveränderungen und den Geschiebetransport. Mitteilung Nr. 139 der Versuchsanstalt für Wasserbau der ETH Zürich.