



**SCHRIFTENREIHE
UMWELT NR. 219**

Fischerei

**Ökologische
Folgen von
Stauraum-
spülungen**



**Bundesamt für
Umwelt, Wald und
Landschaft
BUWAL**

**SCHRIFTENREIHE
UMWELT NR. 219**

Fischerei

**Ökologische
Folgen von
Stauration-
spülungen**

Empfehlungen für
die Planung und Durchführung
spülungsbegleitender Massnahmen

**Herausgegeben vom Bundesamt
für Umwelt, Wald und Landschaft
BUWAL
Bern, 1994**

Autoren

Stefan Gerster, Peter Rey

HYDRA, Büros für angewandte Hydrobiologie

Bern – Konstanz

Bezug PDF

<http://www.buwalshop.ch>

Code: SRU-219-D

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Abstracts	4
Vorwort	5
Zusammenfassung	6
1. Einleitung	7
2. Gesetzliche Grundlagen in der Schweiz	10
2.1 Allgemein	10
2.2 Kantonale Regelungen	11
2.3 Strafbestimmung und Haftungsregelung	12
3. Notwendigkeit von Spülungen und Alternativmöglichkeiten	13
3.1 Verlandungsproblematik	13
3.2 Massnahmen gegen die Verlandung	14
3.3 Technischer Ablauf von Spülungen	15
3.4 Alternative Methoden zur Ausräumung von Sedimenten	17
4. Auswirkungen von Stauraumspülungen auf das Ökosystem	20
4.1 Charakterisierung der betroffenen Gewässer	20
4.2 Bei einer Spülung wirkende Faktoren	22
4.3 Schädigungen der Biozönose durch Spülungen	24
4.4 Der bisherige Kenntnisstand als Basis für künftige Handlungsschwerpunkte	26
5. Spülbegleitende Fallstudien	27
5.1 Französische Studien	27
5.1.1 Ökotoxikologische Untersuchungen	27
5.1.2 Sedimentologische Untersuchungen	28
5.1.3 Kritische Würdigung	30
5.2 Spülbegleitungen "BUWAL-Projekt" 1990 - 1992	30
5.2.1 Abflussmengen und Strömungsregime	32
5.2.2 Feststoffe, Substratbeschaffenheit	32
5.2.3 Wasserchemie	34
5.2.4 Ökologische Auswirkungen (Makroinvertebraten, Fische)	35
5.2.5 Vergleich von Spülungen mit natürlichen Hochwassern	39
6. Konzipierung zukünftiger Spülungen	40
6.1 Bewilligungspflicht/Spülgesuche	40
6.2 Planung und Durchführung spülbegleitender Massnahmen	41
7. Literatur	45

Abstracts

Spülungen und Entleerungen von Stauräumen bedeuten in vielen Fällen eine grosse Belastung für die ohnehin schon stark veränderten Verhältnisse in den Fliessgewässern unterhalb von Stauhaltungen. Am stärksten davon betroffen sind die dort sukzessive entstandenen und meist labilen Lebensgemeinschaften (Makroinvertebraten, Fische). Anhand der Ergebnisse von einigen begleiteten Spülungen und Literaturstudien wird versucht, das Defizit bei den Kenntnissen ökologischer Folgen von Spülungen zu verringern. Daneben wurden Empfehlungen für die Planung und Durchführung von Spülungen erarbeitet, mit deren Hilfe bei zukünftigen Massnahmen die Schäden minimiert werden können.

Es hat sich gezeigt, dass kaum generelle Auflagen (Grenzwerte u.a.) und Massnahmen empfohlen werden können, da in jedem Fall die Gesamtsituation verschieden ist. Es müssen also objektspezifisch Lösungen gefunden und allenfalls prophylaktische Massnahmen getroffen werden, um die Schäden bei Spülungen gering zu halten.

Spurghi e svuotamenti di invasi rappresentano frequentemente un ulteriore carico per le già di per sé profondamente mutate condizioni presenti nei corsi d'acqua a valle delle dighe. Maggiormente colpite sono le spesso fragili comunità locali evolute successivamente (macroinvertebrati, pesci). In base ai risultati concernenti alcuni spurghi seguiti dagli autori ed a casi citati nella letteratura, si è cercato di limitare le lacune conoscitive riguardanti le conseguenze ecologiche degli spurghi. Parallelamente sono state elaborate delle raccomandazioni concernenti la pianificazione e la messa in atto di spurghi, grazie alle quali sarà possibile ridurre i danni durante futuri interventi.

Si è dimostrato, che non è quasi possibile suggerire imposizioni (per es. valori limite) o provvedimenti generali, dato che ogni singolo caso presenta una situazione generale diversa. Di conseguenza sarà necessario trovare soluzioni specifiche per ogni singolo caso e se mai si dovranno prendere misure preventive tali da limitare i danni durante le operazioni di spurgo.

La vidange et le curage des bassins de retenue entraînent souvent un impact important sur le tronçon de cours d'eau situé à l'aval du barrage ainsi que sur les communautés vivantes y résidant (macroinvertébrés, poissons). Ces tronçons sont déjà fortement dépréciés par leur régime hydraulique résiduel. Sur la base de quelques suivis de curages et d'une compilation bibliographique, nous avons tenté de pallier le déficit en connaissances relatif aux effets écologiques des curages. Par la même occasion, une série de recommandations destinées à la planification et à la réalisation des curages sont proposées afin de minimiser les dégâts.

Il s'est avéré qu'un catalogue général de mesures ne peut pas être constitué, chaque cas devant être évalué séparément. Des solutions individuelles doivent donc être trouvées prenant en compte les spécificités de chaque objet. Le cas échéant, des mesures prophylactiques permettant de minimiser les dégâts sont également à promouvoir.

The flushing and emptying of reservoirs usually have a great impact on the delicate biotic communities of macroinvertebrates and fish, which have evolved in the bodies of flowing water below dams. By consulting subject-specific literature as well as analysing new data obtained in studies of recent flushings, more knowledge is gained on the ecological consequences of such procedures. Furthermore, guidelines on the planning and realisation of flushings were established, which should restrict the damage caused by future flushings to a minimum.

Unfortunately, there are hardly any standard conditions or measures that apply to every situation, since each case has different parameters. Therefore, specific solutions have to be found and, if necessary, prophylactic measures have to be taken, to minimise the damage caused by flushings.

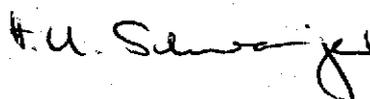
Vorwort

Wenn über die Umweltauswirkungen von Wasserkraftwerken gesprochen wird, steht meist die Restwasserfrage im Vordergrund. Diese Problematik ist zwar wichtig, lässt aber oft eine andere Umweltauswirkung vergessen, welche die Wasserorganismen im Unterlauf des Kraftwerks maßgeblich beeinflusst: die Spülung oder Leerung von Stauhaltungen. Die meist nicht vor großem Publikum ablaufenden Spülungen sind immer irgendwie mit dem Kraftwerkbetrieb verbunden; ihre schädlichen Auswirkungen sind besonders bezüglich Langfristeffekten (morphologische Veränderung des Gewässerbetts, Veränderung der Struktur und Zusammensetzung der gewässerbewohnenden Organismen, usw.) weitgehend unbekannt. Erstaunlicherweise beschäftigten sich auch die Gewässerfachleute bisher kaum mit dem Problem.

Der ungenügende Kenntnisstand hatte während langer Zeit eine rechtliche Grauzone zur Folge. Dieser Mangel wurde mit dem kürzlichen Inkrafttreten des neuen Bundesgesetz vom 24. Januar 1991 über den Gewässerschutz beseitigt. Darin ist erstmals auf der Ebene des Bundes ein spezieller Artikel über die Spülung und Leerung von Stauräumen enthalten. Dadurch ist aber das Problem noch nicht beseitigt. Trotz des neuen rechtlichen Instruments können die Umweltauswirkungen einer notwendigen Spülung nur soweit beseitigt werden, wie sich ein echter Wille zur Schadenminimierung breit macht. Dies verlangt eine enge Zusammenarbeit zwischen Kraftwerkbetreibern, kantonaler Verwaltung und Naturschutzkreisen. Die vorliegende Publikation soll dazu eine Hilfe sein.

Abteilung Gewässerschutz
und Fischerei

Der Chef:



Dr. H.U. Schweizer

Zusammenfassung

Das neue Gewässerschutzgesetz regelt in Artikel 40 das Vorgehen bei der Spülung und Entleerung von Stauräumen. Es verpflichtet den Inhaber einer Stauanlage, geeignete Massnahmen zum Schutz der betroffenen Tier- und Pflanzenwelt zu treffen. Bewilligungsbehörden sind kantonale Fachstellen (Umweltschutzamt, Fischereiverwaltung), welchen auch die Aufsichtsfunktion obliegt.

Es besteht ein grosser Handlungsbedarf für eine schonende Abwicklung von Spülungen und die Durchführung vorsorglicher Massnahmen. Die in diesem Bericht anhand von Fallbeispielen festgehaltenen Erfahrungen sollen dazu beitragen, das diesbezügliche Wissensdefizit und die Verunsicherung abzubauen.

Es hat sich gezeigt, dass aufgrund verschiedener Faktoren (technisch-bauliche Gegebenheiten, Topographie und Hydrologie des Einzugsgebietes etc.) Spülungen im alpinen Raum unter sehr verschiedenen Rahmenbedingungen ablaufen. Auflagen zur Durchführung einer Spülung können daher nur objektspezifisch gemacht werden. Von grundsätzlicher Bedeutung ist die Evaluation der Auswirkungen verschiedener Vorgehensweisen zur Entfernung beziehungsweise Vermeidung von Stauraumablagerungen. Dazu sind insbesondere die Ökosystemeigenschaften der betroffenen Lebensräume (Speicher, fliessende und stehende Gewässer im Unterlauf) zu beschreiben. Geeignete Voruntersuchungen sind dabei in den meisten Fällen unumgänglich.

Ein vom Kraftwerksbetreiber ausgearbeitetes Spülungsgesuch, mit entsprechend dem Umfang der Massnahme mehr oder weniger grosser Ausführlichkeit, soll es (der Bewilligungsbehörde) ermöglichen, die Spülungsmodalitäten und allfällige flankierende Massnahmen zur Verminderung der Schäden festzulegen. Generell kann davon ausgegangen werden, dass Spülungen während Jahreszeiten mit natürlicherweise hoher Wasserführung in den betroffenen Systemen geringere ökologisch negative Folgen verursachen als bei Niedrigwasser. Als wichtigste Punkte für einen "schonenden" Spülungsmodus sind zudem das kontrollierte, stufenweise Öffnen und Schliessen der Abschlussorgane sowie die Bereitstellung von Verdünnungs- und Nachspülwasser zu erwähnen. An bestimmten Stellen im Unterwasser müssen während der Massnahme Kontrollparameter (in der Regel Schwebstoffgehalt und O_2 -Konzentration) gemessen werden, um kurzfristig auf das Überschreiten der jeweils festgelegten Belastungsgrenzen reagieren zu können. Prophylaktische Massnahmen sind insbesondere für die Fischfauna im Unterwasser anzuordnen; Bestandsbergungen (Sicherung des genetischen Gutes) und die Koordination des Jungfischbesatzes mit dem Spülungsereignis sind dabei die wichtigsten Forderungen.

Während bei geeigneten prophylaktischen Massnahmen (s. oben) gewöhnlich von einer raschen Erholung ausgegangen werden kann, so können doch durch Feinstoffablagerungen im Unterwasser-Gerinne negative Bedingungen für die Lebensgemeinschaften entstehen und diese längerfristig beeinflussen.

Alternative Methoden zur Ausräumung von Stauraumablagerungen (verschiedene Baggermethoden) sollen dort primär in Betracht gezogen werden, wo grosse Feinstoffmengen anfallen und kaum ein geeigneter Spülmodus vorliegt, um die kurz- oder längerfristigen Folgen in den betroffenen Ökosystemen zu minimieren.

1. Einleitung

Wasserkraft ist in der Schweiz eine der wichtigsten historischen und gegenwärtigen Energiequellen. Schon zu Beginn des letzten Jahrhunderts entstanden kleinere künstlich gestaute Wasserspeicher, die zum Teil immer noch genutzt werden. Heute werden im Schweizer Alpen- und Voralpenraum über hundert Stauseen mit einer Wasserfläche von mehr als 100'000 m² bewirtschaftet, acht davon weisen einen Nutzinhalt von mindestens 100 Mio m³ auf. Das Gebiet, aus dem einem Speichersee Wasser zugeführt wird, ist dabei oft grösser als sein natürliches Einzugsgebiet.

Neben den hier interessierenden alpinen Stauhaltungen, welche der temporären Speicherung von Wasser dienen, existieren auch Laufstau, die ein Fließgewässer aufstauen und das Gefälle einer gewissen Flussstrecke zur Energiegewinnung nutzen. Spülungsprobleme bei Laufstauen sind aber nicht Thema dieses Berichts.

Erosionsmaterial aus dem Einzugsgebiet wird grösstenteils im Stauraum abgelagert. Der daraus resultierende Verlust von Stauraum hat für den Kraftwerkbetrieb negative Auswirkungen, indem er das Nutzvolumen reduziert und die Sedimente Sicherheitseinrichtungen wie den Grundablass der Staumauer verstopfen oder in die Triebwasserfassung gelangen. Je nach Sedimentationsrate (z.T. mehr als 1% Volumenverlust pro Jahr) muss der Speicher früher oder später vom Sediment befreit werden (in Einjahres- bis Zehnjahresabständen). Hierbei wird in der Regel die technisch einfachste und ökonomisch günstigste Massnahme durchgeführt: die Ausspülung der Sedimente durch den Grundablass.

Bei solchen Stauraumspülungen entstehen immer Veränderungen der Gewässermorphologie und des Mikroklimas im Unterwasser (Restwassersystem unterhalb einer Stauhaltung). Diese Einflüsse sind je nach Standort, Zweck und Grösse der Anlage unterschiedlich und können von vernachlässigbar klein bis zu erheblich variieren.

Der Kenntnisstand zu den ökologischen Folgen von Spülungen ist noch gering. Daher gibt es bisher keine allgemeingültigen Richtlinien zur umweltschonenden Durchführung von Stauraumspülungen. Der vorliegende Bericht enthält Empfehlungen für die Planung und Durchführung spülungsbegleitender Massnahmen und soll dazu beitragen, in jedem Einzelfall die bestmögliche Lösung zu finden.

Die Spülungsproblematik und ihre Folgen für die Lebensgemeinschaften in den betroffenen Gewässern wurden in der Schweiz lange Zeit kaum thematisiert. In einer 1981 in Zürich von der VAW durchgeführten Fachtagung zur "Verlandung von Stauhaltungen und Speicherseen im Alpenraum" (VISCHER 1981) wurden hauptsächlich technische Aspekte behandelt und Lösungsansätze zur optimalen Ausräumung von Stauseesedimenten aufgezeigt. Im alten Gewässerschutzgesetz von 1971 ist das Thema der "Spülungen und Entleerungen von Stauräumen" nicht explizit erwähnt; dies ist erst in dem am 01.11.1992 in Kraft getretenen neuen Gewässerschutzgesetz der Fall (s. Kap. 2.1). Einzig die in Gewässerschutzbelangen immer wieder stark präsente Interessengruppe der Berufs- und Sportfischer bewirkte in krassen Fällen eine Thematisierung des Problems, respektive eine Wiedergutmachung der verursachten Schäden. Das Bundesgesetz über die Fischerei zeugt denn auch von diesem Widerstand der Fischer gegenüber der Zerstörung der Lebensräume, indem vor Inkrafttreten

des neuen Gewässerschutzgesetzes einzig in der Bewilligungspflicht für technische Eingriffe gemäss Fischereigesetz (s. Kap. 2.1) Bezug zum heiklen Thema der Stauraumspülungen genommen wird. Die kantonalen Fachbehörden, insbesondere die Fischereifachstellen, sind aber bei der Bearbeitung von Spülungsgesuchen oftmals überfordert.

Die jedes Jahr regelmässig auftretenden mehr oder weniger grossen Fischsterben sind Zeugen der offensichtlich immer noch grossen Schwierigkeiten, welche die mit der Bewilligungs- und Aufsichtspflicht betrauten kantonalen Behörden bei der Durchführung von Spülungen haben. Das Bedürfnis, diesen Problemen mit konkreten Lösungsvorschlägen bzw. Spülungskonzepten zu begegnen, hat einige Kantone veranlasst (z.B. GR und TI; s. Kap. 2.2), in **Spülungsgruppen**, unter Einbeziehung von zuständigen Behörden und Kraftwerksbetreibern, geeignete Massnahmen (Wegleitungen) und Richtlinien auszuarbeiten. Auch das Bundesamt für Wasserwirtschaft setzte sich bei der Suche nach Lösungsmöglichkeiten ein (BWW 1983). Die Umsetzung der Vorschriften zur Verminderung nachteiliger Auswirkungen gelingt aber in vielen Fällen noch nicht. Dies wiederum veranlasste das BUWAL, mittels einer Literaturstudie zum Thema (WAHLI 1985) und anhand einiger wissenschaftlich begleiteter Spülungen (GERSTER und REY 1992a; REY und GERSTER 1991, 1992) neue Erkenntnisse in Form von "Empfehlungen für die Planung und Durchführung spülungsbegleitender Massnahmen" anzubieten.

Kenntnisstand und Handlungsbedarf

Der geringe Kenntnisstand in der Schweiz zum Thema "ökologische Folgen von Stauraumspülungen" zeigt sich in der Tatsache, dass kaum 20 Berichte dazu vorliegen, wobei der grösste Teil nur die Schwebstoffsituation und deren kurzfristige Effekte auf die Fische behandelt. Weniger als 10 Spülungsbegleitungen, fast alle seit Ende der 80er Jahre durchgeführt, beziehen noch weitere Parameter (chem. Milieuveränderungen, Algen, Makroinvertebraten, Gewässermorphologie) in die Untersuchungen mit ein.

Im Kanton Graubünden hat sich nach dem grossen Fischsterben im Zusammenhang mit der Entleerung des Stausees Zervreila im Jahr 1981 (Gartmann 1990) eine Spülungsgruppe konstituiert, deren intensives Arbeiten zu einer kantonalen Richtlinie betreffend der Abwicklung von Spülungen führte (GARTMANN 1990). Ähnliche Probleme und die Lösungsfindung in einer Spülungsgruppe führten auch im Kanton Tessin zu einer 1987 vom Regierungsrat erlassenen Richtlinie (CONCA 1990).

Trotz dieser insgesamt noch unbefriedigenden Sachlage steht die Schweiz - bezogen auf dieses Thema - im internationalen Vergleich nicht schlecht da. In anderen europäischen Ländern, in denen ebenfalls Wasserkraft genutzt wird und wo somit zwangsläufig dieselbe Spülungsproblematik auftritt, sind - mit Ausnahme von Frankreich - kaum konkrete Lösungsansätze vorhanden:

Mit sogenannten "Betriebsvorschriften", die jedoch nur bei Neukonzessionen oder bei der Revision bestehender Konzessionen zur Anwendung kommen, werden in Österreich Spülungen technisch geregelt (z.B. Koordinierung von Spülungen in Stauketten; TKW/SAFE 1990).

In Spanien, Italien und der Bundesrepublik Deutschland konnten keine spezifischen Gesetze oder Richtlinien ausgemacht werden.

Am weitesten fortgeschritten scheinen die Anstrengungen in Frankreich gediehen zu sein, wo die Electricité de France (EDF) seit den 80er Jahren mit einem gross angelegtem Unter-

suchungsprogramm versucht (insgesamt 18 Spülungen begleitet von 1983 bis 1986), Lösungen zur Minimierung ökologischer Schäden bei Stauraumspülungen zu finden (GOSSE 1991, RAMBAUD et al. 1988). Schwerpunktmässig wurden die bei Spülungen freigesetzten Sedimente charakterisiert, beziehungsweise die Interaktion mit den chemischen Milieufaktoren und den dadurch entstehenden ökotoxikologischen Risiken untersucht. Bei diesen französischen Arbeiten geht es um die Ausarbeitung eines Modells (vgl. Kap. 5.1), das die zu erwartenden chemisch-physikalischen Verhältnisse in den betreffenden Gewässerabschnitten voraussagt, respektive die Durchführung der Spülung so steuern lässt, dass die Risiken für die Fischfauna minimiert werden können (GARRIC et al. 1990, ROFES et al. 1991).

Selbst aus den USA liegen nur wenige Arbeiten zum Thema Spülungen vor (z.B. HESSE and NEWCOMB 1982, NEWCOMBE and MACDONALD 1991). Sie befassen sich hauptsächlich mit der Auswirkung unterschiedlicher Schwebstoffkonzentrationen auf die Fische; daneben wird aber auch der Einfluss der Gewässerverschlammung auf die Makroinvertebraten und den Bruterfolg von kieslaichenden Fischarten thematisiert. Neuestens wird auf die Synergie von Sedimentkonzentration und Expositionszeit (Einwirkungsdauer) hingewiesen und im sogenannten Stress-Index mathematisch verknüpft (NEWCOMBE and MACDONALD 1991).

2. Gesetzliche Grundlagen in der Schweiz

2.1 Allgemein

Spülungen von Staubecken sind rechtlich bis anhin nicht im Detail geregelt. Das **Bundesgesetz über die Wasserbaupolizei** (SR 721.10) verlangt, dass für die **Sicherheit der Bevölkerung** unterhalb von Stauanlagen bestmöglich gesorgt wird. In der dazugehörigen **Talsperrenverordnung** (SR 721.102) wird den Betreibern von Stauhaltungen unter anderem vorgeschrieben, die **Funktionstüchtigkeit von Grundablässen** (und anderen Einrichtungen) zu erhalten und in bestimmten Zeitabständen zu prüfen. Dies ist eine Sicherheitsvorschrift zur Gewährleistung der schnellen Absenkung des Wasserspiegels in Gefahrensituationen (Hochwasser, Krieg, Rissbildung in der Staumauer etc.). Auf der andern Seite nimmt das **Gewässerschutzgesetz** (SR 814.20) Bezug auf die **Verhinderung nachteiliger Einwirkungen auf die Gewässer**, und im **Fischereigesetz** (SR 923.0) wird im Abschnitt "Schutz der Lebensräume" auf die **Bewilligungspflicht bei technischen Eingriffen** verwiesen, wobei kantonale Fachstellen als Bewilligungsbehörden zuständig sind.

Das noch bis vor kurzem gültige alte Gewässerschutzgesetz vom 08.10.71 enthielt keinen Artikel zum Thema Spülungen. Daher stand den kantonalen Bewilligungsbehörden ein grosser Freiraum bei der Beurteilung von Spülungsgesuchen zur Verfügung, der wohl oft als "Leerraum" empfunden worden ist. Dies war wohl auch der Grund, weshalb verschiedentlich auf die **Verordnung über Abwassereinleitungen** (VAE, SR 814.225.21) und deren **Anforderungen an Einleitungen in ein Gewässer** verwiesen wurde (z.B. GARTMANN 1990).

Die VAE gibt einige Anhaltspunkte zu möglichen Vorschriften bei Spülungen. Streng genommen wären danach jedoch kaum mehr Ableitungen von schwebstoffbeladenen Wassermengen möglich, da die Grenzwerte der absetzbaren und der gesamten ungelösten Stoffe in dieser Verordnung im Bereich von Schwebstoffkonzentrationen liegen, die bei Spülungen in der Regel bei weitem und manchmal sogar natürlicherweise überschritten werden.

Es muss also davon ausgegangen werden, dass bei Spülungen ein anderer Tatbestand als bei Abwassereinleitungen besteht und deshalb die VAE nicht angewendet werden kann. Diesem Umstand trägt das neue Gewässerschutzgesetz Rechnung, indem in Artikel 40 das Vorgehen bei der Spülung und Entleerung von Stauräumen folgendermassen geregelt ist:

Gewässerschutzgesetz, GSchG

Art. 40 Spülung und Entleerung von Stauräumen

¹ Der Inhaber einer Stauanlage sorgt nach Möglichkeit dafür, dass bei der Spülung und Entleerung des Stauraumes oder bei der Prüfung von Vorrichtungen für das Ablassen von Wasser und die Hochwasserentlastung die Tier- und Pflanzenwelt im Unterlauf des Gewässers nicht beeinträchtigt wird.

² Er darf Spülungen und Entleerungen nur mit einer Bewilligung der kantonalen Behörde vornehmen. Die Bewilligungsbehörde hört die interessierten Fachstellen an. Sind periodische Spülungen und Entleerungen zur Erhaltung der Betriebssicherheit notwendig, so legt die Behörde lediglich Zeitpunkt und Art der Durchführung fest.

³ Muss der Inhaber aufgrund ausserordentlicher Ereignisse den Stausee aus Sicherheitsgründen sofort absenken, so orientiert er unverzüglich die Bewilligungsbehörde.

Bei diesen mit sehr viel Ermessensraum gefassten Vorschriften obliegt es den kantonalen Bewilligungsbehörden, die Art der Durchführung der Spülung bezüglich der davon tangierten Umweltfaktoren zu optimieren. Dabei muss neben dem aquatischen Bereich (entleertes Becken, Restwassersystem im Unterwasser etc.) auch den Bereichen Boden, Luft und Lärm Rechnung getragen werden, die bei allfälligen alternativen Methoden zur Ausräumung von Sedimentablagerungen (z.B. mit Saugbaggern, wie dies gemäss den Erläuterungen in der Botschaft zum neuen GSchG beschrieben wird) massiv betroffen sein können (vgl. Kap. 3.4).

2.2 Kantonale Regelungen

Wie oben erwähnt, dürfen Spülungen und Entleerungen von Stauhaltungen grundsätzlich nur mit einer Bewilligung der zuständigen kantonalen Behörden (fischereiliche Bewilligung, gewässerschutzrechtliche Bewilligung von Umweltamt, Gewässerschutzamt, Fischereiinspektorat u.a.) durchgeführt werden. Diese legen den Zeitpunkt fest und machen Auflagen bezüglich der Art der Durchführung, beziehungsweise der einzuhaltenden Grenzwerte bei gewissen Belastungsparametern (in der Regel nur für Schwebstoffkonzentration). Daneben werden aber auch vorsorgliche Massnahmen für den Schutz der Lebewesen angeordnet (Evakuieren von Fischen, Unterbruch des Fischbesatzes etc.), respektive für den Hochwasserschutz (wasserbaupolizeiliche Auflagen). Je nach Kanton kommen dabei unterschiedliche Gesetze und Vorschriften zur Anwendung (Fischereigesetz, Gewässerschutzgesetz, Wasserrechtsgesetz u.a.).

Konkrete, als Regierungsbeschlüsse festgehaltene Regelungen bestehen in den Kantonen Graubünden und Tessin. In Arbeitsgruppen wurden in diesen zwei Kantonen Weisungen ausgearbeitet und in der Praxis deren Tauglichkeit überprüft. Der Kanton Graubünden hat 1984 im Regierungsbeschluss Nr. 642, der Kanton Tessin 1987 in der Direktive Nr. 760 die Modalitäten zur Durchführung von Spülungen und Entleerungen von Stauhaltungen festgelegt. Beide Beschlüsse beinhalten die folgenden grundsätzlichen Punkte:

- a) Garantie der Sicherheit von Menschen, Tieren und Gütern;
- b) Schutz/Schonung der Umwelt, speziell des aquatischen und ufernahen Bereichs, in allen seinen Komponenten;
- c) Verhinderung von (die Hochwasserabflusskapazität beeinflussenden) Ablagerungen, respektive Ufer- oder Sohlenerosionen im Unterwasser.

Konkrete Angaben werden insbesondere über den Zeitpunkt der Durchführung von Spülungen gemacht (Schutz der Fischfauna), dann aber auch zum technischen Vorgehen (z.B. langsames Öffnen und Schliessen der Abschlussorgane) oder zur maximalen Konzentration der Schwebstoffe im Unterwasser (nur Kanton Tessin, s. CONCA 1990).

2.3 Strafbestimmung und Haftungsregelung

Gemäss den diesbezüglichen Artikeln im Gewässerschutz- und Fischereigesetz kann festgehalten werden, dass der Werkinhaber auch bei bewilligungskonformem Vorgehen für Schäden haftet, die durch Spülungen entstehen. Bei vorsätzlichen oder fahrlässigen Übertretungen, zum Beispiel bei der Durchführung einer Massnahme ohne entsprechende Bewilligung, hat der Werkinhaber mit einer Busse oder mit einer Gefängnisstrafe bis zu sechs Monaten zu rechnen.

Die Haftung, die gemäss den neuen Gewässerschutz- und Fischereigesetzen eine Wiedergutmachung bei allen betroffenen Elementen (Gerinnemorphologie, Fischnährtiere, Fischbestand u.a.) beinhalten würde, beschränkt sich gewöhnlich auf den Ersatz der durch das Schadenereignis beeinflussten Fischfauna. Bei der Schadenberechnung werden insbesondere berücksichtigt:

- a) die Verminderung des Ertragsvermögens der geschädigten Fischgewässer;
- b) die Aufwendungen für die Durchführung von Massnahmen, die getroffen werden müssen, um den ursprünglichen Zustand nach Möglichkeit wieder herzustellen;
- c) die durch das Schadenereignis verursachten Umtriebe.

3. Notwendigkeit von Spülungen und Alternativmöglichkeiten

Dieses Kapitel behandelt die wichtigsten Gegebenheiten der Stauraumverlandungs- und Ausräumungsproblematik. Auf viele hydraulische und technische Aspekte kann hier nicht im Detail eingegangen werden, sondern es muss auf die diesbezügliche Fachliteratur, z.B. VISCHER (1981), verwiesen werden.

3.1 Verlandungsproblematik

Ein Stausee unterbindet die natürliche Feststoffdynamik der gestauten Abflussrinne. Geschiebe und Schwebstoffe setzen sich kontinuierlich im Staubecken ab, wobei sich die größeren Bestandteile an der Stauwurzel ablagern und dort ein Delta bilden, die feineren Partikel jedoch erst beckenabwärts langsam absinken (Abb. 3.1). Eine Stauraumverlandung stellt ein ernsthaftes Problem dar, da je nach Stauvolumen und Ablagerungsrate die Sicherheit eines Speichers schwerwiegend beeinträchtigt und seine Nutzungsfunktion in Frage gestellt wird. Das Sicherheitsrisiko steigt insbesondere dort, wo die Grundablassbauwerke infolge Verstopfung mit Feinsedimenten nur noch bedingt ihre Funktion erfüllen können, und wenn als Folge der Verlandung zusätzlich zum Wasserdruck auch noch ein erheblicher Erd- druck auf die Talsperre wirkt. Die Nutzungsfunktion wird einerseits durch den Verlust an Nutzvolumen, andererseits aber auch infolge einer Verstopfung der Triebwasserfassung (Wasserfassung zu Druckstollen und Turbinen) behindert.

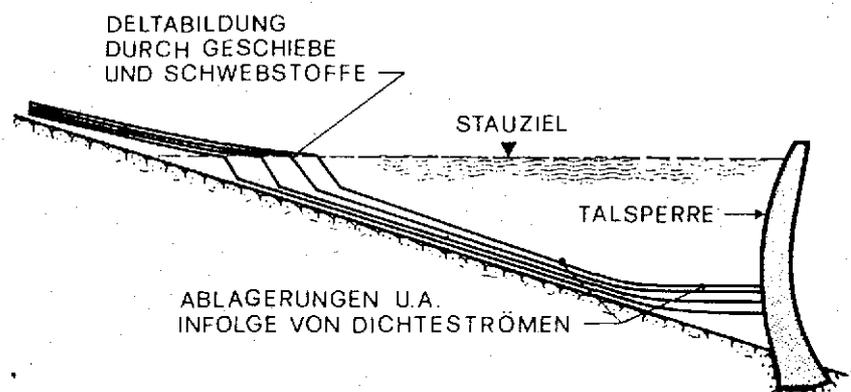


Abb. 3.1: Verlandungsmuster für einen Stausee im Längsschnitt. (Grafik aus: VISCHER 1981)

Der Verlandungsprozess in einem Stausee hängt im wesentlichen vom Gebietsabtrag im Einzugsgebiet und von den natürlichen und technischen Rückhaltungsmöglichkeiten für abgetragene und transportierte Feststoffe ab. Die Erosions- und Denudationsrate in einem Gebiet wird dabei bestimmt durch die geologisch-petrographischen Verhältnisse und die Vegetation (AMMANN 1987), das Klima (Verwitterungsverhältnisse), die hydrologischen Verhältnisse (Niederschläge, Gewässernetzlänge, Vergletscherung) und das Relief. Die Ablagerungsraten in Seen und Stauseen entsprechen jedoch nur einem Teil der Erosionsrate, beziehungsweise des theoretischen Gebietsabtrags, da immer ein Teil der feinen Schwebstoffe und der gelösten Stoffe durch die Becken hindurch fließt (VISCHER 1981) oder schon vorher abgelagert wird. Rückberechnete Werte (aus Deltavermessungen oder Feststoffmessungen) für

den Gebietsabtrag liegen in der Schweiz in der Grössenordnung von 0,02 bis maximal 5 mm/Jahr in den verschiedenen untersuchten Einzugsgebieten (AMMANN 1987, LAMBERT 1987, VISCHER 1981), wobei die Angaben der einzelnen Autoren recht stark variieren und LAMBERT (1987) einen Durchschnittswert für die Schweiz von 0,25 mm/Jahr angibt.

3.2 Massnahmen gegen die Verlandung

Verlandungen von Stauanlagen lassen sich einerseits durch vorsorgliche Massnahmen minimieren (Standort der Anlage, Vermindern oder Auffangen des Feststoffabtrags), andererseits kann abgelagertes Sediment permanent oder periodisch entfernt werden (VISCHER 1981).

Günstige Plazierung des Stausees

Mit der Plazierung eines Stausees in einem Nebental kann das Wasser im Haupttal geschlebefrei gefasst und in den Stausee übergeleitet werden. Dabei bestehen oftmals weitere zusätzliche Fassungen in anderen Nebentälern (Stauraumvernetzung, Nebenschlussituation). In diesem Fall unterliegt der Stausee einer geringeren Geschiebezufuhr, da er nur ein kleines direktes Einzugsgebiet aufweist. Kleinere Kornfraktionen können jedoch auch bei Wasserfassungen oft nur ungenügend zurückgehalten werden, so dass auch bei dieser Konstellation keine Verminderung der Schwebstoffzufuhr in den Speicher erreicht wird.

Verminderung des Abtrags und Abfangen des Geschiebes

Mit geeigneten Massnahmen kann die Erosion im Einzugsgebiet vermindert werden: Dazu gehören Bepflanzungen (Aufforstungen), Hangverbauungen, Wildbach- und Flusskorrekturen etc. Solche Massnahmen sind kostspielig und kommen erst nach Jahren oder Jahrzehnten zum Tragen.

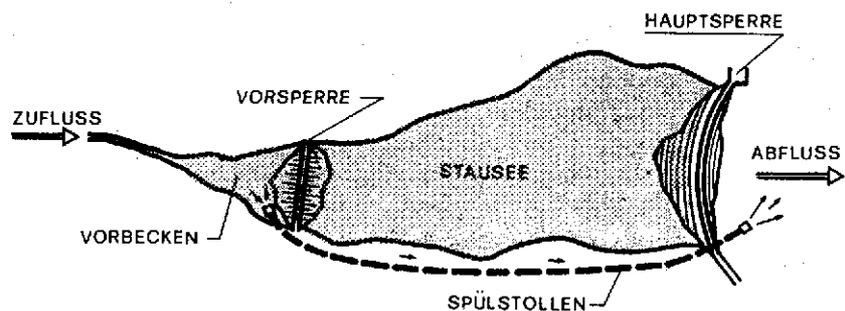


Abb. 3.2: Situation eines Stausees mit einem Vorbecken, das mit einem ins Unterwasser mündenden Stollen gespült werden kann. (Grafik aus: VISCHER 1981)

Gewisse Erfolge zur Verminderung der Geschiebezufuhr können auch durch die Einrichtung von Kiesfängen unmittelbar vor dem Eintritt ins Speicherbecken oder bereits im Einzugsgebiet erreicht werden, dies besonders an stark erodierenden Wildbächen. Eine weitere wirkungsvolle Möglichkeit ist die Installation eines Vorbeckens im Wurzelbereich des Speichers, das in Kombination mit einem Umleitungsstollen (Spülstollen) insbesondere bei Hochwasserereignissen einen effizienten Schutz vor grossen Feststoffeinträgen darstellt (Abb. 3.2).

Schaffung eines Auffangraumes im Stausee

Der Nutzraum eines Stausees wird von Anfang an um einen Auffangraum (Dimensionierung z.B. aufgrund der in der Konzessionsdauer zu erwartenden Ablagerungen) vergrössert. Es muss dabei aber sowohl die Deltabildung als auch die übrige Sedimentation berücksichtigt werden. Häufig wird nur der Stauraum unterhalb der Fassungskote (= Totraum) als Auffangraum vorgesehen; hier lagern sich in der Regel nur die feineren Partikel ab.

Räumen der Ablagerungen

Mit stationären oder schwimmenden Schaufel- oder Saugbaggern können Ablagerungen in Speicherbecken laufend oder periodisch geräumt und so Verlandungen gehemmt oder verhindert werden. Probleme bei der Verwertung bzw. Deponierung von Baggergut mit hohen Schwebstoff(Schlamm)-Anteilen, das im Gegensatz zu Geschiebe(Kies)-Fraktionen kaum weiterverwendet (z.B. als Baumaterial) werden kann, machen diese Massnahme oft kostspielig. Die Methode erscheint auch unter dem Aspekt weiterer Umweltfaktoren (Belastung von Boden, Luft und Bevölkerung (Lärm) beim Abtransport und bei der Deponie des gebaggerten Materials) oft ungünstiger als eine Spülung (s. Kap. 3.4).

Spülung des Stausees

Eine gewisse Beseitigung von Sedimenten lässt sich dadurch erreichen, dass man sie durch den Grundablass wegpült. Die verschiedenen Möglichkeiten der Durchführung werden im folgenden Kapitel 3.3 beschrieben.

3.3 Technischer Ablauf von Spülungen

Je nach Zweck der Spülung werden unterschiedliche technische Abläufe angewendet, welche wiederum bei den einzelnen Speichern von den verschiedenen baulichen Gegebenheiten, respektive den zur Verfügung stehenden Ablassorganen und anderen technischen Parametern (Umleitungsstollen, Zuschusswasser etc.) abhängen. Aufgrund der grossen Variabilität der Vorgaben bei den einzelnen Speichern kann im folgenden nur eine grobe Einteilung von Spülungsmodalitäten angegeben werden.

Grundsätzlich kann zwischen zwei Spülungszielen unterschieden werden, die eine Inbetriebnahme der Grundablassorgane voraussetzen und eine Ausschwemmung von Feinsedimenten zur Folge haben:

- a) **Freispülen des Nahbereichs von eingesandeten Ablassorganen** (bei vollem Stausee) zur Sicherstellung oder Aufrechterhaltung des Funktionierens der Ablassorgane (gemäss Tal-sperrverordnung).

Bemerkung: Einfache Funktionsprüfungen der Grundablassschieber oder Klappschütze, die in Form von **Nasskontrollen** durchgeführt werden können, führen in der Regel zu keiner Sedimentausschwemmung. Dabei wird zuerst das innere Schütz (vgl. Abb. 3.3, (1)) gezogen, worauf sich die Kammer zwischen innerem und äusserem Schütz (2) mit Wasser füllt. Danach wird das innere Schütz geschlossen und durch das Öffnen des äusseren Schützes das Wasser aus der Grundablasskammer entleert.

- b) **Stauraumabsenkungen oder -totalentleerungen** wegen Revisionsarbeiten oder zur Rückgewinnung von Nutzvolumen (eigentliche "Spülung").

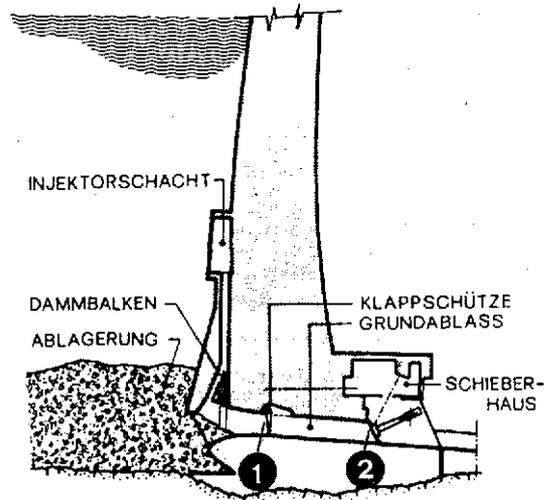


Abb. 3.3: Längsschnitt durch einen Grundablass mit Injektorschacht, der es erlaubt, genügend Wasser zuzuführen, wenn Ablagerungen den Grundablass zudecken und verstopfen.

(Grafik aus: VISCHER 1981)

Spülung "unter Druck" (Fall a)

In gewissen Fällen müssen Ablagerungen im Nahbereich des Grundablasseinlaufbauwerks entfernt werden. Dazu sind gewöhnlich kurze Grundablass-Spülungen nötig, bei denen bei vollem Stausee und geöffnetem Grundablass durch den Wasserdruck und den Strömungsog ein Erosionstrichter geschaffen wird (Abb. 3.4). Die das Unterwasser belastenden Sedimentmengen sind meist gering und können mit genügend Wasser aus dem Speicher verdünnt werden. Nach KRUMDIECK und CHAMOT 1981 ist ein Syphon oder Injektorschacht (Abb. 3.3) eine wichtige bauliche Ausstattung, um beim Einlauf zum Grundablass genügend Wasser zuzuführen, wenn dort die Ablagerungen den Eingang verstopfen (Mitreissen von Material durch die Sogwirkung). Da die Zuströmgeschwindigkeiten oberhalb des Einlaufes rasch abnehmen, ist die räumliche Wirkung der Spülung zumeist sehr beschränkt. Der freigespülte Raum füllt sich relativ schnell wieder mit Sedimenten an, und der Vorgang muss wiederholt werden.

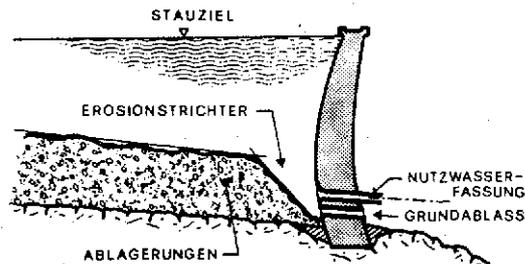


Abb. 3.4: Längsschnitt einer Sperre mit Grundablass und darüber liegender Fassung. Kurze Spülungen bei vollem Stausee schaffen bloss einen Erosionstrichter und vermögen die Ablagerungen nur in einem engen Bereich abzutragen. (Grafik aus: VISCHER 1981)

Spülung "bei freiem Wasserspiegel" (Fall b)

Eine Freiwasserspülung wird bei abgesenktem Wasserspiegel durchgeführt. Die Absenkung erfolgt so lange wie möglich über die Turbinenstollen. Bereits in der Absenkphase finden Bewegungen der Sedimentbänke statt. In einer späteren Phase wird der Grundablass (oder die Grundablässe) geöffnet, und es gelangen jetzt, je nach Lage des Sedimentationskegels (Abstand zur Sperre), mehr oder weniger grosse Mengen an Feinsedimenten in den Vorfluter. Die maximale Konzentration dieser weiterverfrachteten Schwebstoffe hängt nicht unwesentlich von der in der Schlussphase der vollständigen Absenkung des Speichers noch vorhandenen Wassermenge ab. Je nach Zweck der Spülung werden dann gewöhnlich über

mehrere Tage im Speicher abgelagerte Sedimente durch die Erosionswirkung der Zuflüsse oder - wo dies möglich ist (z.B. in kleineren betonierten Ausgleichbecken) - unter Mithilfe von schweren Baumaschinen (Bagger) in den Vorfluter ausgeschwemmt.

Die Konzentration der Feststoffe im Vorfluter ist bei solchen Spülungen recht variabel und hängt stark von der Durchführung der Spülung ab. Vorhandenes Zuschusswasser (Verdünnungswasser), das Ausnutzen von Hochwasser- oder Regenperioden und ein dosiertes Regulieren der Grundablassschieber bzw. der Bagger-Tätigkeit sind entscheidende Faktoren für den Belastungsgrad des betroffenen Vorfluters. In der Regel ist die Belastung für das Restwassersystem im Unterwasser gross bis sehr gross, weil beträchtliche Mengen von Schlamm ausgeschwemmt werden.

3.4 Alternative Methoden zur Ausräumung von Sedimenten

Wenn abzusehen ist, dass im Verlauf einer Spülung die gesetzlichen Vorgaben (GSchG Art. 40) nicht oder nur unvollständig eingehalten werden können, sollten, vor allem in Anbetracht der zum Teil verheerenden ökologischen Folgen (s. Kap. 4) von Stauraumspülungen bei freiem Wasserspiegel, in jedem Einzelfall alternative Methoden zur Entfernung von Stauraumsedimenten evaluiert werden. Dabei gilt es zu beachten, dass im Rahmen einer Gesamtbilanz alle betroffenen Systeme (Wasser, Boden, Luft u.a.) in die Bewertung einbezogen werden. In einem zweiten Schritt muss dann der Energie- und Kostenaufwand mitberücksichtigt werden.

Als alternative Methoden sind folgende Varianten von Sediment-Entsorgungen zu prüfen:

Trockenbaggerung

- Entfernung der Sedimente bei entleertem Becken mit Baggern und Transportfahrzeugen;
Bemerkungen:
 - oft zusätzliche Baumassnahmen erforderlich (Zufahrten etc.);
 - meist nur in kleineren Becken (Ausgleichbecken) mit festem, flachem Untergrund anwendbar.

Nassbaggerung

- Entfernung der Sedimente mit Schaufelbaggern bei gefülltem oder teilweise entleertem Becken;
Bemerkungen:
 - maximale Baggertiefe auf ca. 20 m beschränkt;
 - wird bisher hauptsächlich zur Sanierung von Wassergräben, Teichen, Flusstauen und zur Rückgewinnung der Wassertiefe in Wasserwegen und Häfen angewendet.

Saugbaggerung

- Entfernung der Sedimente mittels Absaugvorrichtungen, die stationär (z.B. im vorderen Beckenteil im Bereich von Grundablass und Nutzwasserfassung) oder von schwimmenden Plattformen aus arbeiten.
- Mit der Methode der CTM Barrages, Malvilliers (früher: Abteilung "Hydro Vision" der Forces Motrices Neuchâteloises S.A.) kann bis in Wassertiefen von 200 m entschlammt

werden (PRALONG 1987). Mit einer mittleren Saugleistung von $400 \text{ m}^3/\text{h}$, wobei ein Wasseranteil von rund 80% anfällt, können Entnahmemengen von durchschnittlich $60\text{--}80 \text{ m}^3/\text{h}$ Feststoffmaterial (Korndurchmesser bis 60 mm) erreicht werden.

- Bei der **Saugbaggerung mit Sedimentabgabe in den Vorfluter** können die geförderten Sedimente dosiert in den Vorfluter abgegeben werden (EWLE 1992a), was oft bei Spülungen via Grundablass nicht praktikabel ist. Das Material kann aber auch zwischengelagert und in hydrologisch günstigen Phasen (Hochwassersituationen) in den Vorfluter zudosiert und abgeleitet werden.

Bemerkungen:

- Der Seespiegel muss nicht abgesenkt werden, so dass keine Einbussen in der Energieproduktion entstehen;
- Im Stausee von Lessoc (Kanton FR) wurde die Methode der Sedimententfernung mittels eines auf einer Plattform schwimmenden Saugbaggers 1982 erstmals in der Schweiz erfolgreich angewendet;
- Die Entfernung der bei der 1991 durchgeführten Spülung des Ausgleichbeckens Palagnedra ausgeschwemmten Sedimentmenge von $170'000 \text{ m}^3$ (OFIMA 1991b) hätte mit dieser Methode sehr viel Zeit benötigt (ca. 100 Tage).

Bei all diesen drei Bagger-Methoden kann eine Belastung des Fließwassernetzes unterhalb einer Stauhaltung grösstenteils verhindert werden. Probleme bereitet dagegen die Beseitigung, respektive die Verwertung der geförderten Sedimente. Technologien zur Trennung und Entwässerung des anfallenden Materials sind heute zwar auf dem Markt und erreichen Kapazitäten in der Grössenordnung der oben beschriebenen Saugbaggerleistung ($500 \text{ m}^3/\text{h}$, Nassprofil). Der Einsatz in alpinen Regionen dürfte jedoch oft mit Transportproblemen und räumlicher Enge verbunden sein. Daneben muss die Eignung der anfallenden Sedimente als Baumaterial evaluiert (oft grosser Anteil an Feinmaterial mit unerwünschten organischen "Verunreinigungen") oder ein geeigneter Platz für die Deponierung des Materials gefunden werden. Die Nutzung der Sedimente als Obermaterial auf bestehendem Kulturland entfällt meist wegen den nachteiligen Effekten der Verschlammung und Bodenverdichtung.

Nebst den technischen Aspekten und den ökologischen Auswirkungen (s. Kap. 4) müssen weitere Rahmenbedingungen bei der jeweiligen Auswahl der am meisten vertretbaren Lösung zur Ausräumung von Stauraumsedimenten berücksichtigt werden:

- Abtransport des geförderten Materials;
 - Vorhandensein von Transportwegen ausreichender Kapazität;
 - Lärmbelastung der Bevölkerung in den betroffenen Ortschaften;
- Verwertung oder Lagerung des geförderten Materials;
- Energiebilanz (Energieverbrauch bei Förderung und Beseitigung).

Weiter liegt es im Interesse der Kraftwerksbetreiber:

- den Produktionsausfall so gering wie möglich zu halten;
- den vermehrten finanziellen Aufwand für alternative Entsorgungsmethoden rechtzeitig in sein Budget einplanen zu können.

In Tabelle 3.1 sind verschiedene Prozesse zur Entfernung und Vermeidung von Stauraumsedimenten aufgetragen und die Auswirkungen dieser Prozesse bezüglich Aufwand (betriebliche Aspekte) und Folgen für die Umwelt sowie die Kosten dieser Auswirkungen darge-

stellt. Es ist ersichtlich, dass in vielen Feldern die Spannbreite der möglichen Auswirkungen gross ist. Dies widerspiegelt die offensichtlich sehr grosse Variabilität der Rahmenbedingungen bei einzelnen Spülungsobjekten, was den Schluss zulässt, dass von Fall zu Fall ein optimaler Spülmodus evaluiert werden muss. Das Aufstellen einer Gesamtbilanz, wie dies exemplarisch beim Ausgleichbecken Rempen (Kraftwerke Wägital AG, Kanton SZ) durch das Ingenieurbüro Basler & Hofmann (Zürich) gemacht werden konnte (pers. Mitt. B. Trommer), gilt als wesentliche Grundlage zur Entscheidungsfindung.

Das in Tabelle 3.1 als "Spülverfahren mit Spülstollen" aufgeführte Vorgehen mit Spülungen während Hochwassersituationen (s. Kap. 3.2) hilft zumindest, die Verlandungstendenz und somit den Verlust von Nutzwasservolumen zu vermindern. Eine gewisse Nachahmung von natürlichen Abläufen wird dadurch erreicht, dass während Hochwasserereignissen der sonst unterbundene Feststofftransport (vorwiegend gröbere Fraktionen, die in Vorbecken abgelagert werden) wieder stattfindet. Die feineren Kornfraktionen sammeln sich aber immer noch in mehr oder weniger grossen Mengen in den Becken selber an.

Tab. 3.1: Evaluation der Auswirkungen verschiedener Prozesse zur Entfernung und Vermeidung von Stauraumablagerungen.

	Spülung/ Entleerung durch Grundablass	Trocken- Baggerung	Nass- Baggerung	Saugbagg. mit Sedi- ment in Vorfluter	Saugbagg. ohne Sedi- ment in Vorfluter	Spülver- fahren mit Spül- stollen	vorsorg- liche Mass- nahmen
Betriebliche Aspekte ^{a)} - baul. Anpassungen - Personalaufwand - Materialaufwand - Energieaufwand - ...	◇ - ◆◆	◆◆ - ◆◆◆	◆◆ - ◆◆◆	◆◆ - ◆◆◆	◆◆ - ◆◆◆	◆◆◆ ¹⁾	nicht à priori quantifizierbar → längerfristige Effekte (s. Kap. 3.2)
Transport ^{a)} - baul. Anpassungen - Rollmaterial - Brennstoffe - ...	◇	◆◆ - ◆◆◆	◆◆ - ◆◆◆	◆	◆◆ - ◆◆◆	◇	
Produktions- ausfall ^{a)}	◆ - ◆◆	◆ - ◆◆◆	◇ - ◆◆	◇	◇	◇ - ◆	
Auswirkungen auf die Umwelt ^{b)} - Vorfluter - Bevölkerung - Lärm, Luft, Verkehr - ideelle Werte ²⁾ - Energieaufwand	◆◆ - ◆◆◆ ◆◆ - ◆◆◆ ◆ - ◆◆	◇ - ◆ ◇ - ◆◆ ◆◆ - ◆◆◆	◇ - ◆ ◇ - ◆◆ ◆◆ - ◆◆◆	◆ - ◆◆◆ ◆ - ◆◆◆ ◆◆	◇ - ◆ ◇ - ◆◆ ◆◆ - ◆◆◆	◆ - ◆◆ ◇ - ◆◆ ◆◆	
Kosten ^{a)} der Auswirkungen ³⁾	◆ - ◆◆	◇ - ◆◆	◇ - ◆◆	◆ - ◆◆	◇ - ◆◆	◇ - ◆	

Aufwand ^{a)} / negative Folgen ^{b)}:

- ◇ kein(e)
- ◆ gering
- ◆◆ mittel
- ◆◆◆ gross

¹⁾ einmaliger Aufwand (+ Unterhalt)

²⁾ Fischerei, Badebetrieb etc.

³⁾ Prävention / Wiedergutmachung

4. Auswirkungen von Stauraumspülungen auf das Ökosystem

4.1 Charakterisierung der betroffenen Gewässer

Stauhaltungen unterbrechen das natürliche Fließverhalten von Fließgewässern und führen dort zu morphologischen und ökologischen Veränderungen. Mit dem Stausee entsteht ein künstliches limnisches System. Auf der Fließstrecke unterhalb einer Stauhaltung entwickelt sich ein **Restwassersystem** mit verändertem hydrologischen und morphologischen Charakter, weil hier, im Gegensatz zum ursprünglichen Zustand, kaum mehr Hochwasserereignisse auftreten. Der veränderte Wasserhaushalt wirkt sich auf die Besiedlung des Gewässers, das Mikroklima usw. im Gerinnetal aus.

Von Bedeutung für die Biozönose des **Staubeckens** sind vor allem die wechselnden Wasserstände und die im Vergleich zu natürlichen stehenden Gewässern meist starken Sedimentationsraten. Unter Umständen findet hier bereits eine Nährstoffanreicherung statt, und es herrschen anoxische Verhältnisse im Sediment und Tiefenwasser. Dabei ist allerdings zu betonen, dass - im Gegensatz zu vielen Stauhaltungen im Tiefland - die meisten Stauseen im Alpenraum eher oligotroph sind.

Natürliches Fließgewässer

Ein naturnah verbliebenes Fließgewässer im Alpenraum zeichnet sich durch starke periodische Schwankungen in der Wasserführung (Regenfälle, Schneeschmelze) und die daraus resultierenden Veränderungen der Strömung und der Schleppkräfte aus. Bachbettstrukturen werden hierdurch geformt und das Substrat wird entsprechend der vorherrschenden Strömungsmuster sortiert. An diese wechselhaften Umgebungsbedingungen sind die strömungstoleranten Bachorganismen angepasst. Innerhalb natürlicher Fließabschnitte können zudem viele stabile Strukturen existieren, die es Fischen und Kleinlebewesen ermöglichen, auch grössere Hochwasser unbeschadet zu überstehen. Die dabei trotz allem auftretenden Verluste werden zum Teil innerhalb einer Generationsperiode der Organismen wieder kompensiert.

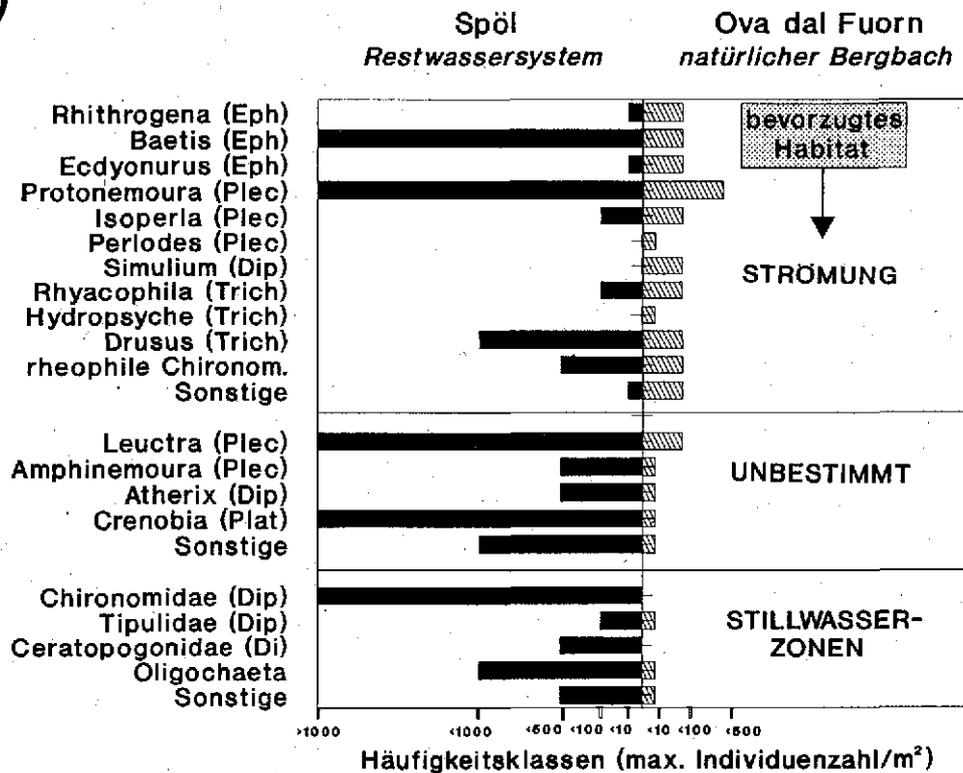
Restwassersystem im Unterwasser

In einem **Restwassersystem unterhalb eines Staubeckens** kann sich der natürliche Gewässerzustand - je nach verbliebener Wasserführung und Häufigkeit von allfälligem Überlauf aus dem Speicherbecken - in unterschiedlichem Masse ändern:

- **Bei ausreichender Speisung** durch seitliche Zuflüsse oder eine hohe Dotierwassermenge bleiben die Verhältnisse im Restwassersystem denen eines natürlichen Fließgewässers vergleichbar. Dennoch ändern sich auch in diesem Fall meist ökomorphologische und somit auch biologische Gegebenheiten (geringerer hydraulischer Stress, höhere Produktivität).
- **Bei stark reduziertem Wasserzufluss** unterliegt das betroffene Gewässersystem völlig veränderten hydrologischen Bedingungen. Es wirken nur noch geringe Schleppkräfte, so dass Sedimente nicht mehr vollständig abtransportiert werden und das Bachbett teilweise von seitlichen Feststoffeinträgen überlagert wird (Murgänge, Schwemmkegel von Zuflüssen).

Der Wasserfluss wird mit der Zeit immer mehr gebremst und es kann sogar zu einer Ver-
tümpelung des Gerinnes kommen (JÄGER 1991, REY und GERSTER 1991). In diesem Fall
werden Schwebstoffe (z.B. aus dem Stausee) nicht mehr ausreichend weitertransportiert,
Kolmation (Versiegelung) der Substratoberfläche und des Interstitials können in der Folge
auftreten.

a)



b)

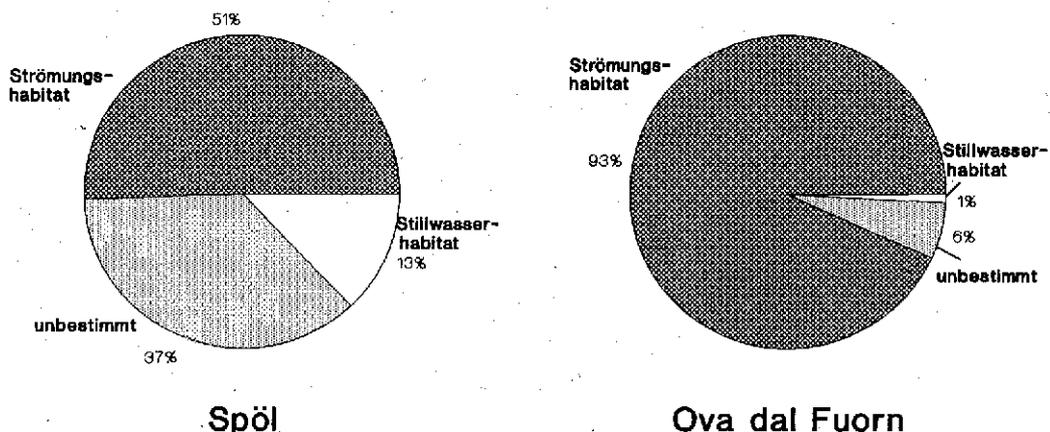


Abb. 4.1: Zusammensetzung der Benthosbiozönose zweier vergleichbarer Bergbäche derselben Höhenstufe im schweizerischen Nationalpark: 1. Der Spöl unterhalb der Stauhaltung Lago di Livigno, ca. 1600 m ü. M.; 2. Der Ova dal Fuorn ist ein weitgehend unbelasteter und unverbaubarer Bach im Bereich um 1750 m ü. M. Die Grafik verdeutlicht einerseits die Unterschiede in den Häufigkeiten (Maximalwerte) verschiedener Wirbelosengruppen (a), andererseits die prozentualen Anteile der Taxa, die in diesen Bächen unterschiedliche Strömungstoleranz zeigen (b).

Wo vor dem Bau der Stauhaltung rheophile (strömungsliebende) Fische und Invertebraten konkurrenzlos waren, fehlt nun im Restwasserbach der hydraulische Stress, so dass sich auch die Überlebens- und Reproduktionschancen anderer Organismengruppen (Stillwasserarten, amphibisch lebende Organismen) verbessern. Dadurch verschieben sich die Dominanzverhältnisse: strömungssensible Arten, die vorher in geringer Zahl auftraten, vermehren sich (Abb. 4.1), und es kann sogar zu einer Zunahme der Gesamt-Individuendichte und -Artenzahl kommen (BLOESCH 1991). In einem solchen Milieu kann die Akkumulation von Nährstoffen aus dem Stausee - insbesondere in Sedimentationsfallen - zu Eutrophierungsphänomenen führen, die sich beispielsweise in einem starkem Algenaufwuchs äussern (ELBER 1991, ECOTEC 1992).

Die Vielfalt einer solchen Sukzessions-Biozönose erweist sich allerdings als ausgesprochen labil. Durch zunehmende Kolmation, Eutrophierungsphänomene, Verschlammungen und Versandungen können Bedingungen entstehen, die nur noch von einer geringen Zahl spezialisierter, aber anspruchsloser Arten toleriert werden.

4.2 Bei einer Spülung wirkende Faktoren

Wie schon aus Kapitel 3 hervorgeht, bedeutet eine Spülung für das unterhalb der Stauhaltung liegende Gewässersystem, das im Rahmen einer Spülung auch als Vorfluter bezeichnet werden kann, zunächst eine **Erhöhung der Abflussmenge** und in der Regel zugleich eine **Erhöhung der Schwebstofffracht**. Neben diesen mechanisch-physikalischen Eigenschaften ist die **chemische Beschaffenheit** des Spülungswassers für das biologische System des Vorfluters von entscheidender Bedeutung.

Die **Erhöhung der Abflussmenge** (Veränderung der Hydraulik), ein schon in der Planung einer Spülung quantifizierbarer Faktor, hat eine Vergrößerung des benetzten Gerinnequerschnittes zur Folge; die Abflussgeschwindigkeit steigt und die auf die Bachsohle wirkende Schleppspannung nimmt zu. Zumindest im oberen Bereich des Vorfluters ist mit verstärkter Erosion zu rechnen.

Eine **Erhöhung der Schwebstofffracht** im Vorfluter tritt einerseits durch die Ausspülung der Stauraumsedimente (vgl. Kap. 3), andererseits aber auch durch die erosive Wirkung des künstlichen Hochwassers im Gerinnebett auf. Eine Ablagerung der ausgespülten Sedimente erfolgt je nach hydraulischer Situation im Längsverlauf des Vorfluters oder spätestens nach seiner Mündung in ein stehendes Gewässer (Staubecken, See, Sedimentationsfalle). Die physikalischen Eigenschaften des Wasserkörpers ändern sich durch die Zunahme der darin suspendierten Stoffe. So erhöht sich die Viskosität (Zähigkeit) des Wassers, aber auch dessen elektrische Leitfähigkeit (je nach dem Anteil freigewordener Ionen).

Die **chemische Beschaffenheit** des Spülungswassers wird zunächst von den Verhältnissen im Staubecken bestimmt. Aufgrund der Sauerstoffzehrung durch abgelagerte organische Sedimente sind in dessen Tiefenwasser oftmals nur geringe Sauerstoffkonzentrationen anzutreffen, während im Sediment sogar völlig anaerobe Bedingungen vorherrschen.

Die organischen Anteile der Sedimente werden unter Sauerstoffabschluss chemisch reduziert und können toxisch wirkende Verbindungen bilden (H_2S , Methan, NH_3 etc.). In einem

tiefen und hinreichend gefüllten Stausee steht der mit Sedimenten bedeckte Grund unter hohem hydrostatischem Druck. Allfällige, auf Organismen toxisch wirkende Substanzen werden hier nur in geringen Mengen in den bodennahen Wasserkörper freigesetzt. Wird dieser Druck bei einer Spülung verringert (Absenkung des Wasserspiegels), kommt es zu Ausgasungen und chemischen Umwandlungsprozessen, im Bereich des Grundablasses auch zu grösseren Verwirbelungen. Der Wasserkörper selbst reichert sich mit freigesetzten Substanzen an, die Freisetzung reduzierter Sedimente führt zusätzlich zu Sauerstoffzehrung.

Die so im Stausee gelösten Substanzen gelangen mit dem Spülungswasser ins Unterwasser (Vorfluter). Gleiches gilt für reduzierte Sedimente, die zu einer weiteren Sauerstoffzehrung führen können. Es ist zu beobachten, dass sich physikalisch-chemische Wasserparameter parallel zu den Schwankungen der Schwebstoffkonzentration verändern (Abb. 4.2). Von den relativ einfach nachweisbaren Grössen sind dies die **Wassertemperatur**, der **Sauerstoffgehalt**, die **elektrische Leitfähigkeit**, das **Redox-Potential**, der **pH-Wert** sowie allenfalls vorhandene **Stickstoff- und Phosphorkomponenten**.

Der Faktor Sauerstoff (Sauerstoffgehalt, Sauerstoffzehrung) kann dabei zweifellos als eine übergeordnete chemische Einflussgrösse angesehen werden. Im Vergleich zu natürlichen Hochwassern scheint die Sauerstoffsättigung im Spülungswasser immer vermindert zu sein, während die Sauerstoffzehrung erhöht ist.

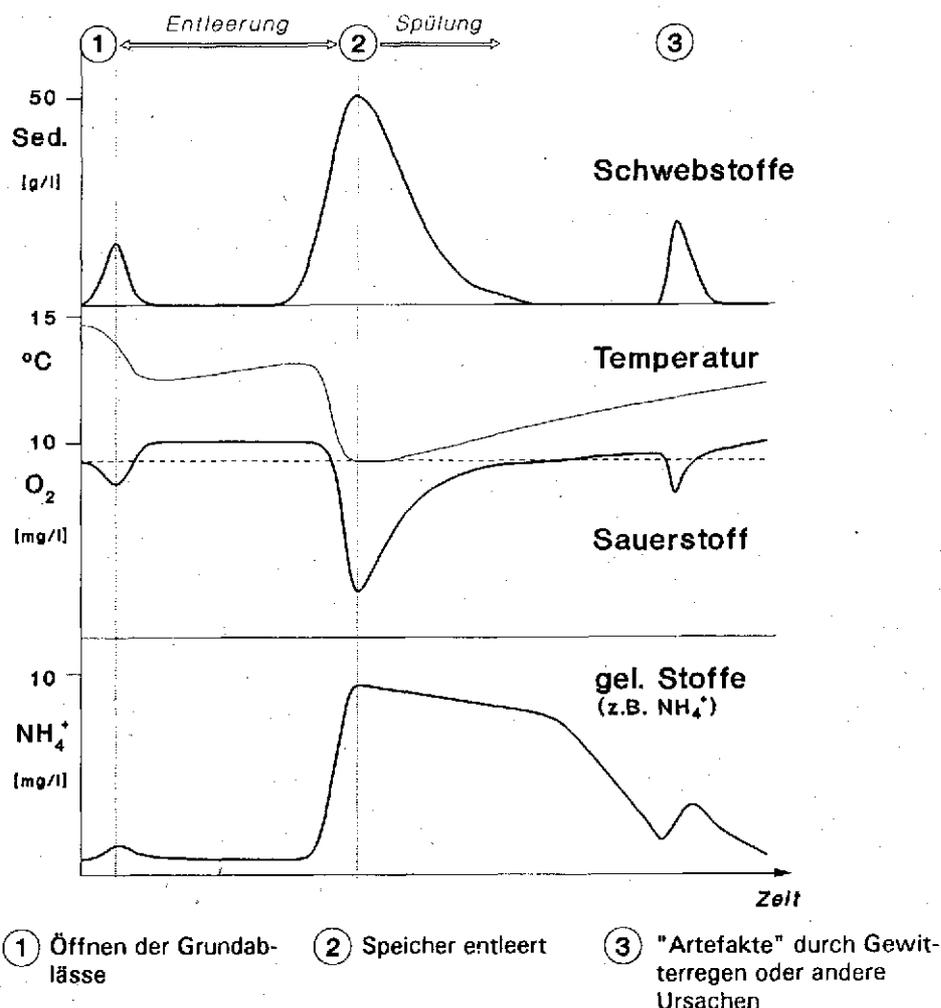


Abb. 4.2: Schematische Darstellung der zeitlichen Abläufe chemisch-physikalischer Belastung des Wasserkörpers im Unterwasser bei Stauraumspülungen.

(Grafik: aus RAMBAUD et al. 1988; modifiziert und ergänzt)

Elektrische Leitfähigkeit, pH-Wert und Redox-Potential sind Kenngrößen, die als Mass für eine Änderung der Verhältnisse im Wasserkörper dienen. Sie zeigen auf unterschiedliche Weise die Veränderungen der freien Ionenkonzentration an und ihre Messung stellt, da sie mit geringem Aufwand während der gesamten Spülung durchzuführen ist, eine Alternative zu zeitraubenderen chemischen Analysemethoden dar.

Nährstoffe wie Stickstoff- oder Phosphorverbindungen, spielen dann eine Rolle, wenn sie sich in den Stauseesedimenten aufgrund des Nährstoffeintrags aus dem Einzugsgebiet angesammelt haben. Die anaerobe Umwandlung von Stickstoffverbindungen führt zur Bildung von Nitriten und Ammonium, die beide ausserordentlich fischtoxisch sind und auch schon bei geringen Konzentrationen subletal wirken können (vgl. Kap. 5.1).

4.3 Schädigungen der Biozönose durch Spülungen

Grundsätzlich sind bei jeder Spülung - unabhängig vom morphologischen Zustand des betroffenen Vorfluters - Auswirkungen auf die Gewässerorganismen zu beobachten. Ob es tatsächlich zu ökologischen Schädigungen kommt, hängt vom Ausmass des hydraulischen Stresses, vom Umfang des Schwebstoffeintrags und von der Höhe der chemisch-physikalischen Belastung ab. Aufgrund ihrer jeweils unterschiedlichen strukturellen und ökologischen Stabilität (vgl. Kap. 4.1) können die betroffenen Gewässersysteme diese Belastungen unterschiedlich gut abpuffern.

In einem **Restwassersystem, das an grössere hydraulische Belastungen angepasst** ist (z.B. natürlicherweise noch regelmässig auftretende Hochwasser), ist die Gefahr von mechanischen Schädigungen der Biozönosen vergleichsweise gering. Hier sind vor allem die hohen Schwebstoffkonzentrationen (mechanische Schädigungen der Schleimschicht und der Kiemen bei Fischen, Zusedimentieren des Gerinnesubstrats und Habitatsverlust) und der dadurch bedingte Sauerstoffmangel für das Überleben der Bachorganismen limitierend (vgl. Kap. 5). Ansonsten bewegen sich die Verluste der Tier- und Pflanzenwelt in einem Bereich, der womöglich auch durch natürliche Hochwasser verursacht werden kann. Innerhalb solcher Fliessgewässer bleibt das Ausmass der - zumindest mechanischen - Schädigungen innerhalb stabiler (entspricht meist natürlicher) Abschnitte kleiner als innerhalb labiler oder strukturarmer Fliessstrecken, die den Organismen keine Rückzugsmöglichkeiten bieten (REY und GERSTER 1992).

In einem **gegenüber hydraulischen Belastungen empfindlichen Restwassersystem** können schon kleinere Spülungen (z.B. Grundablassspülung unter Druck) das anfällige ökologische Gefüge zerstören. Es zeigte sich (Kap. 5.2), dass die Schädigungen, die im Rahmen einer Spülung auftreten, in der Regel umso grösser sind, je stärker das betroffene Fliessgewässer morphologisch und biologisch (vgl. Abb. 4.3) vom ursprünglichen (natürlichen) Zustand abweicht. Durch die sich schlagartig ändernde Hydraulik des Gewässers bei Spülungen werden instabile Gerinnestrukturen zerstört und dadurch Tier- und Pflanzenbestände mechanisch geschädigt oder vernichtet; ursprüngliche, stresstolerante Organismen überleben solche Ereignisse am ehesten und stellen auch die Pionierarten bei der Wiederbesiedlung.

Hier können also durch hydraulischen Stress allein schon grössere Schäden verursacht werden; die Effekte von Schwebstoffeintrag und Sauerstoffmangel kommen hinzu. Bei den

Restwassersystem im Unterwasser

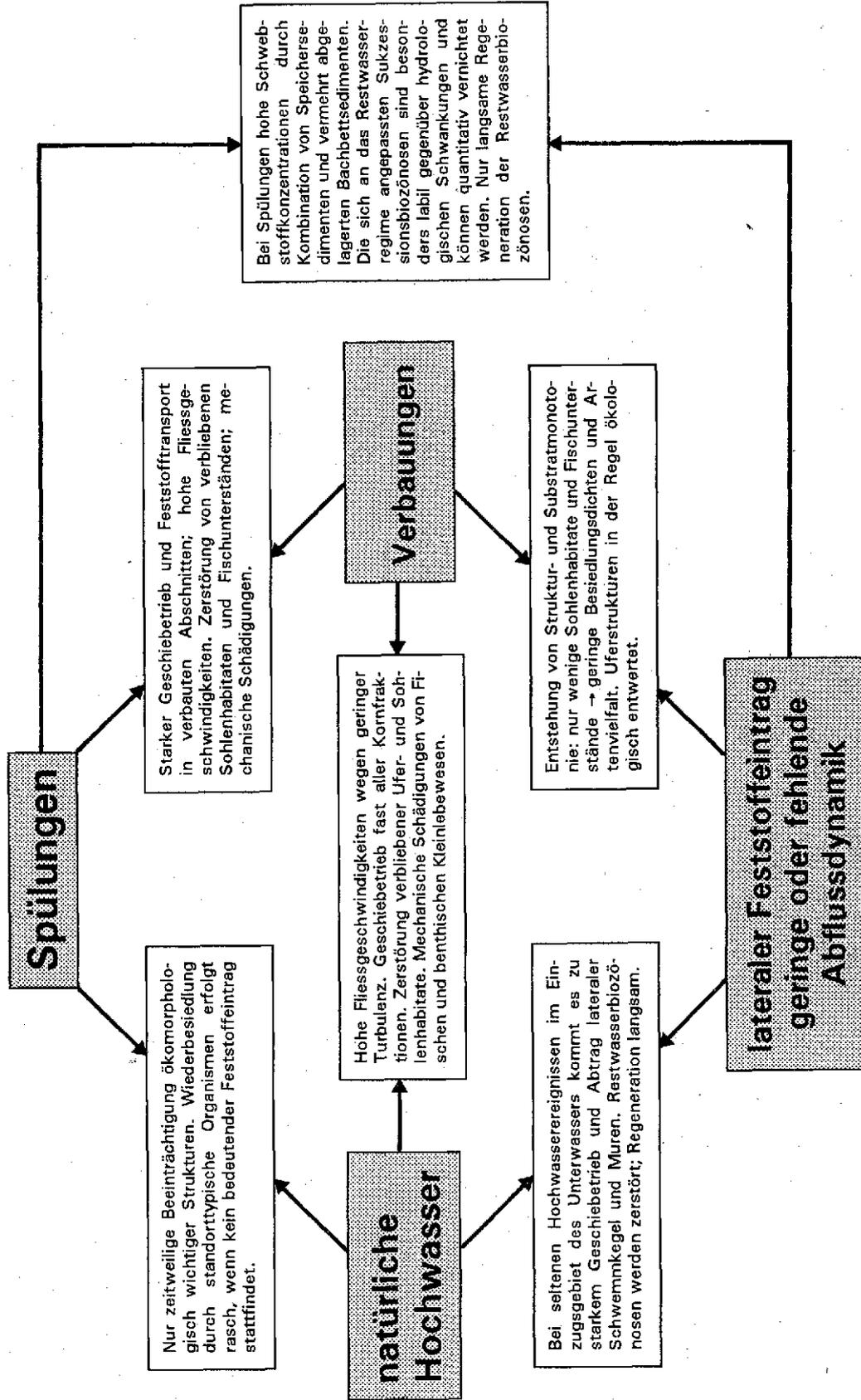


Abb. 4.3: Gegenseitige Beeinflussung natürlicher Prozesse und anthropogener Eingriffe in das Restwassersystem unterhalb einer Stauehaltung (vor Rückführung des Turbinenwassers)

Benthosorganismen gibt es besonders hohe Verluste innerhalb kolmatierter Bachabschnitte, da ihnen dort der Fluchtweg ins Interstitial verwehrt bleibt.

4.4 Der bisherige Kenntnisstand als Basis für künftige Handlungsschwerpunkte

Bisherige Untersuchungen zu Stauraumspülungen (vgl. Kap. 1 und 5) haben gezeigt, dass kaum generelle Aussagen und Prognosen zum Verlauf und den ökologischen Folgen solcher Massnahmen gemacht werden können. Es müssen direkte und indirekte Auswirkungen auf die Fließgewässerfauna und -flora unterschieden werden. Folgende Aussagen dürfen als Kernpunkte der bisher bei Spülbegleitungen gemachten Erfahrungen angesehen werden:

- a) **Hydrodynamik und Geschiebe- resp. Schwebstoffdynamik des Vorfluters:** Je ähnlicher eine Spülung den im betreffenden Gerinne natürlichen Hochwasserereignissen ist, desto kleiner ist die Wahrscheinlichkeit von nachhaltigen ökologischen Schädigungen.
- b) **Geomorphologie des betroffenen Gerinnes:** Natürliche und naturnahe Fließgewässer (-abschnitte) besitzen ein grösseres Puffervermögen und bieten bei entsprechender Strukturvielfalt den Lebewesen genügend Schutz, um auch erhöhte Schwebstoffkonzentrationen zu ertragen.
- c) **Erosive Hydraulik und Feststoffeintrag** ins Restwassergerinne sind im Rahmen einer Spülung technisch regulierbar, und ihr negativer Effekt auf die Ökomorphologie kann daher gegebenenfalls gesteuert werden.
- d) **Nachspülung mit schwebstofffreiem Wasser:** Im Anschluss an die eigentliche Spülung kann durch eine Nachspülung der Verbleib von Stauesedimenten im Restwassergerinne verhindert werden.
- e) **Natürlicherweise nicht auftretende chemische Bedingungen:** Ein im Extremfall sehr starker Sauerstoffschwund wird von den Fischen auch kurzfristig sehr schlecht vertragen.
- f) **Einzuhaltende Grenzwerte:** Für die maximalen Schadstoff- und Schwebstoffkonzentrationen können nur objektbezogene Grenzwerte festgesetzt werden, da jedes betroffene Fließwassersystem unterschiedliche Pufferkapazität besitzt (vgl. Punkte a und b).

5. Spülbegleitende Fallstudien

5.1 Französische Studien

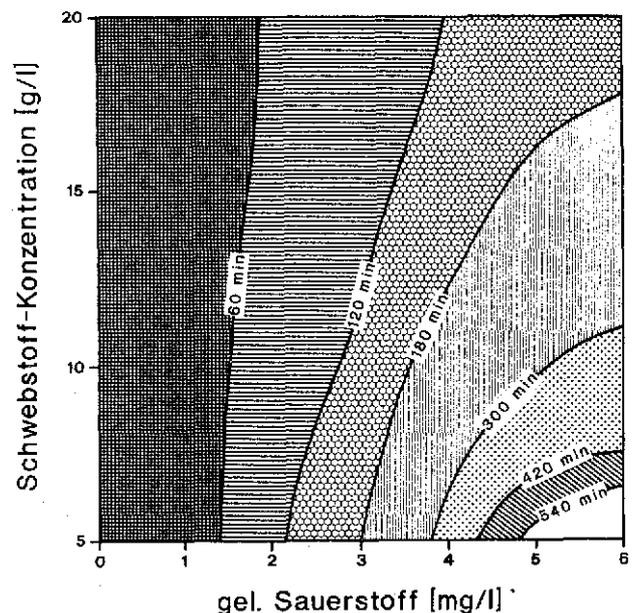
Ähnlich wie die Talsperrenverordnung in der Schweiz, schreibt ein französisches Gesetz (circulaire du 14 août 1970, N° 70/15) nötigenfalls Unterhaltsarbeiten der beweglichen Ablassorgane bei Speicherkraftwerken vor. Dies bedingt eine Totalabsenkung der Stauhaltung etwa alle zehn Jahre. Durchschnittlich 15 der ungefähr 450 Speicherbecken, die durch die französische Elektrizitätsgesellschaft EDF (Electricité de France) bewirtschaftet werden, müssen dadurch jährlich einer Totalentleerung unterzogen werden. Wegen der geringen Kenntnisse bezüglich des Einflusses von Spülungen auf die aquatischen Ökosysteme wurde 1982 von der Forschungsabteilung der EDF ein Untersuchungsprogramm lanciert, getragen vom Ministère de l'Industrie, vom Ministère de l'Environnement und vom EDF.

Die an insgesamt 18 Objekten gesammelten und publizierten Resultate (GARRIC et al. 1990, GOSSE 1991, RAMBAUD et al. 1988, ROFES et al. 1991) werden im folgenden zusammenfassend dargestellt. Die Erfahrungen bei Einzelobjekten werden dabei nur am Rande gestreift; es hat sich jedoch auch für diese französischen Autorengruppen gezeigt, dass jedes einzelne Spülungsobjekt sich anders verhält und die ausgearbeiteten Modelle (bzgl. Schwebstoff und Sauerstoff; s. weiter unten) entsprechend geeicht werden müssen.

5.1.1 Ökotoxikologische Untersuchungen

In einem ersten Schritt wurden die Parameter definiert, welche bei Spülungen hauptsächlich die Mortalität der betroffenen Fischfauna beeinflussen. Dazu wurden von GARRIC et al. (1990) Forellenbrütlinge (*Salmo trutta f. fario*) in einem Experimentierapparat den bei einer Spülung auftretenden chemisch-physikalischen Bedingungen ausgesetzt. Für die Faktoren Schwebstoffe, Ammonium (bzw. fischtoxisches Ammoniak NH_3) und Sauerstoff (resp. Sauerstoffzehrung), welche als hauptverantwortlich für die spülungsinduzierte Mortalität der Fische betrachtet werden, wurden experimentell Letalitätsraten für verschiedene Konzentrationen und Expositionszeiten bestimmt.

Abb. 5.1: Isochronenkurven der Mortalitätsschwelle 10% (Forellenbrut) für verschiedene Expositionszeiten. Die Isochronen verbinden die Paare Schwebstoff-/Sauerstoffkonzentration, welche bei der betreffenden Expositionszeit (60, 120, 180, 300, 420, 540 Minuten) eine Fischmortalität von 10% induzieren. (Grafik aus: GARRIC et al. 1990)



Der Vergleich mit im Felde - bei realen Spülungsbedingungen - gemessenen Werten der obigen Faktoren zeigte, dass bezüglich Letalität der Fische kaum jemals problematische NH_3 - Werte auftreten. Sowohl die Erhöhung der Schwebstoffkonzentration als auch die Erniedrigung der Sauerstoffkonzentration führten zu Letalitätsraten, die sich mit zunehmender Expositionszeit erhöhten.

Wurden nun verschiedene Kombinationen von Schwebstoff- und Sauerstoffkonzentration bei unterschiedlichen Expositionszeiten getestet, konnten eindeutig **synergetische Effekte** gezeigt werden. So wurde die Letalität bedeutend grösser, wenn bei einem bestimmten Schwebstoffgehalt das Wasser tiefe Sauerstoffwerte aufwies. Die grafische Umsetzung dieses Sachverhalts zeigt Abbildung 5.1, wo eine 10-prozentige Letalität (LT_{10}) der getesteten Forellenbrut in sogenannter Isochronen-Darstellung aufgeführt ist.

5.1.2 Sedimentologische Untersuchungen

Die Beschreibung des synergetischen Effektes von Sauerstoffschwund und Schwebstoffanreicherung auf die von Spülungen betroffenen Fische soll in Zukunft ein Instrument zur kontrollierten Durchführung von Spülungen geben (GARRIC et al. 1990). Dazu sind jedoch in jedem einzelnen Fall sedimentologische Studien notwendig, um Angaben zur Beschaffenheit des gespülten Sediments, insbesondere zum Verhalten bezüglich Sauerstoffzehrung zu erhalten.

Die von ROFES et al. (1991) exemplarisch an zwei Objekten durchgeführten sedimentologischen Untersuchungen verdeutlichten die grossen Unterschiede in der Charakterisierung von (potentiellem) Spülmateriale. Die mit Hilfe von Sediment-Sammelgeräten (ROFES et SAVARY 1981) an ausgewählten Stellen und in unterschiedlichen Tiefen gewonnenen Sedimentproben zeigten bei den zwei untersuchten Objekten deutliche Unterschiede bei den verschiedenen gemessenen Parametern (Wassergehalt, Anteil an organischem Material, Carbonatanteil, pH, Leitfähigkeit, verschiedene Nährstoffe und Metalle). Diese Unterschiede entstehen einerseits als Folge der unterschiedlichen Beschaffenheit des in die Speicher eingebrachten Materials und damit des Einzugsgebiets (Geologie, Vegetation, Klima), andererseits können sich die Sedimente im Speicher selbst noch verändern oder verschiedenartige Feststoffe (Granulometrie) können ungleich sedimentieren.

Für die Kinetik der Sauerstoffzehrung einzelner Sedimente sind die folgenden Faktoren massgeblich verantwortlich:

- Wassergehalt,
- Anteil an organischem Material,
- Anteil reduzierter Verbindungen (z.B. Mn^{2+} , Fe^{2+} , NH_4^+ , H_2S , CH_4).

Das Ausmass der Sauerstoffzehrung wurde unter Laborbedingungen anhand von aufgeschlämmtem Probenmaterial dokumentiert. Folgende Feststellungen konnten dabei gemacht werden:

- Die Sauerstoffzehrung (pro Zeiteinheit) eines Sediments ist direkt proportional zur eingesetzten Menge, das heisst zur Schwebstoffkonzentration;
- diese Sauerstoffzehrung wird erst ab einer Sauerstoffkonzentration von $< 3 \text{ mg/l}$ vom vorhandenen Sauerstoffmilieu abhängig. So verlangsamt sich in solch tiefen O_2 -Bereichen die Sauerstoffzehrung des betreffenden Sediments;
- eine Abhängigkeit zwischen Temperaturbedingung und Sauerstoffzehrung ergibt geringere Sauerstoffzehrungen pro Zeiteinheit bei tieferen Temperaturen.

Die Sauerstoffzehrungsraten verschiedener Sedimentproben können demnach stark variieren. Die Kenntnis der diesbezüglichen Verhältnisse vor einer Spülung dient dazu, mögliche Folgen auf die Biozönosen abzuschätzen. Unter Berücksichtigung von O_2 -Aufsättigung und den Mechanismen der Sediment-Ablagerung im Unterwasser wurde von ROFES et al. (1991) ein Modell entwickelt, das es erlaubt, die Entwicklung der Schwebstoff-/Sauerstoffverhältnisse im Unterwasser in verschiedenen Abständen zur Talsperre zu simulieren. Daraus wiederum lassen sich dann die jeweiligen ökotoxikologischen Bedingungen und somit der Belastungsgrad für die vorhandene Fischfauna ableiten.

In der Praxis muss dieses Modell für jedes einzelne Spülungsobjekt geeicht werden. Dazu werden Untersuchungen der Sedimente benötigt und verschiedene Koeffizienten (O_2 -Aufsättigungs- und Sedimentieraten im Unterwasser) müssen annäherungsweise bestimmt oder geschätzt werden.

Zweck dieser immer noch verbesserungsbedürftigen Voraussage-Modelle über die Entwicklung der Wasserqualität bei Spülungen ist die Optimierung der Spülungsmodalitäten und des -managements. Aufgrund weniger, schnell durchführbarer Messungen an wenigen Messpunkten (während der Spülung in der Regel 1 Messstelle wenig unterhalb des Grundablasses) sollen in reeller Zeit die Risiken für die Fische in verschiedener Entfernung zum Wehr abgeleitet werden können. Grafisch (Abb. 5.2) wurde dies von ROFES et al. (1991) dargestellt als Überlagerung von Sauerstoffzehrungskurven (für verschiedene Schwebstoffkonzentrationen und Transitzeiten) mit der Grafik für Isochronen (Schwebstoff-Sauerstoffkonzentration) der Letalität 10% (für verschiedene Expositionszeiten).

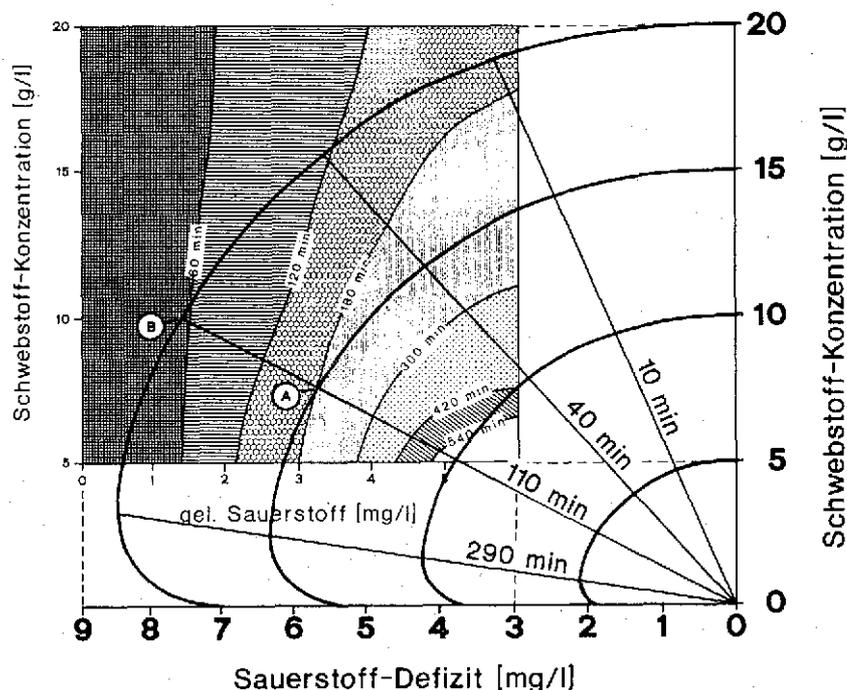


Abb. 5.2: Überlagerung der Kurven für die Entwicklung - beim Transport flussabwärts - des Sauerstoffdefizits aufgrund verschiedener Schwebstoffkonzentrationen und der Isochronenkurven der Mortalität 10% für Bachforellenbrut.

Interpretationsbeispiel: 10% einer Population von Bachforellenbrütlingen, die sich im Abstand von 110 Minuten Durchgangszeit (vom Wehr an gemessen) des Spülwassers befinden, sterben, wenn während 3 Stunden eine Schwebstoffkonzentration von 15 g/l ausgespült wird (A), bzw. während 1 Stunde 20 g/l (B); dies unter der Annahme, dass das Wasser im Speicherbecken einen Sauerstoffgehalt von 9 mg/l aufweist. (Grafik aus: ROFES et al. 1991)

5.1.3 Kritische Würdigung

Trotz der grossen Anstrengungen diverser französischer Autorengruppen bleiben immer noch grosse Unsicherheiten bei der Durchführung von Spülungen. Dank der aufgestellten Modelle entsteht wohl eine Ahnung über die möglichen Auswirkungen durch das Spülwasser, so dass entsprechende Massnahmen zur Minimierung der Schäden getroffen werden können. Insbesondere Totalentleerungen, mit in der Regel grossen bis sehr grossen Sedimentmengen, sind jedoch meistens nicht derart steuerbar, dass die Sedimente kontrolliert verdünnt ins Unterwasser gelangen. Treten aber - auch nur sehr kurzfristige - Extrembedingungen (Schwebstoffpeaks mit entsprechend katastrophalen chemisch-physikalischen Bedingungen) auf, sind die ganzen Anstrengungen, die zur Modellierung und Optimierung der Spülung unternommen wurden, nutzlos, und grosse Verluste der Biozönosen können trotzdem auftreten.

Wohl etwas zu wenig Bedeutung wird in diesen Modellen bisher den spezifischen Gegebenheiten der betroffenen Vorfluter-Ökosysteme beigemessen. Auch die Langzeitwirkung von im Unterwasser liegendebliebenen Sedimenten (s. Kap. 4.3) wurde bisher nicht in die Betrachtungen miteinbezogen. Diesbezüglich muss in Zukunft vermehrt auch das betroffene System genauer definiert werden. Je nach den im Normalzustand vorherrschenden Bedingungen (vgl. Abb. 4.3) und den entsprechend vorhandenen Biozönosen dürften grosse Unterschiede der in den französischen Modellen benötigten Koeffizienten auftreten. Eine Bestimmung dieser Koeffizienten wird dann jeweils eine grosse Schwierigkeit bedeuten und oft nur mit entsprechenden Probeläufen verifizierbar sein.

In der Schweiz sind die Probleme in der Regel etwas anders gelagert, da es sich zumeist um Speicherseen mit oligotrophen Bedingungen handelt, die im alpinen Raum von Spülungen betroffen sind (vgl. Kap. 4.1). Solche Systeme sind eher geringen organischen Belastungen ausgesetzt, sowohl vom dünnbesiedelten Einzugsgebiet her wie auch bezüglich der autochthonen Produktion. Gleichwohl können bei gewissen Rahmenbedingungen, insbesondere in den Speichern geringerer Höhenlage und in den südlichen Alpenregionen, Sedimente von ökotoxikologischer Relevanz auftreten. Im Zweifelsfalle ist es daher immer angezeigt, die zu spülenden Sedimente vorgängig zu analysieren.

5.2 Spülbegleitungen "BUWAL-Projekt" 1990 - 1992

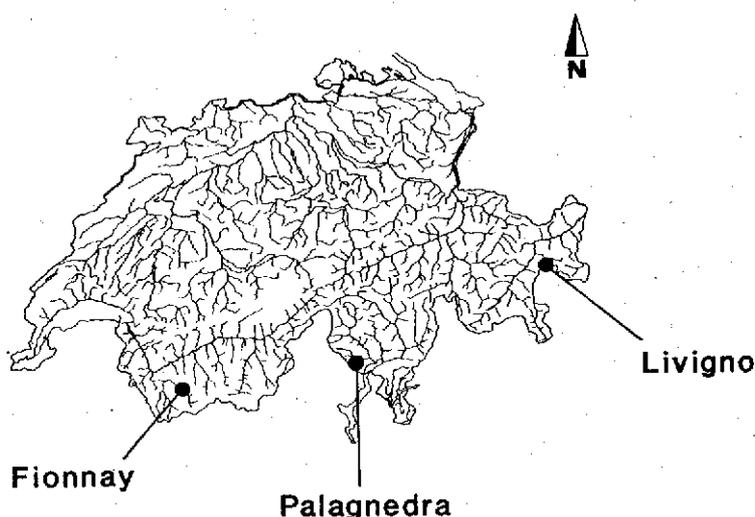


Abb. 5.3: Lage der drei Untersuchungsobjekte der Spülbegleitungen (BUWAL-Auftrag 1990-1992).

Anhand dreier exemplarisch ausgewählter und begleiteter Spülungen (GERSTER und REY 1992a; REY und GERSTER 1991, 1992) wurden Besonderheiten herausgearbeitet, wie sie für unterschiedliche Objekte und Zielsetzungen einer Spülung im Schweizer Alpenraum typisch sind. Tabelle 5.1 gibt eine Übersicht und einige Kenndaten dieser drei Untersuchungsobjekte; eine grobe Lokalisierung der Spülungsobjekte gibt Abbildung 5.3.

Tab. 5.1: Spülbegleitungen im Auftrag des BUWAL (GERSTER und REY 1992a; REY und GERSTER 1991, 1992); Untersuchungsobjekte mit wichtigsten Kenndaten.

	Livigno (GR)	Fionnay (VS)	Palagnedra (TI)
Speicherbecken	Livigno-Speicher	Ausgleichbecken Grande-Dixence und Mauvoisin	Ausgleichbecken Palagnedra
Nutzwasservolumen bei max. Staukote	164 Mio m ³	je 0,17 Mio m ³	4,1 Mio m ³
unterhalb liegendes Fließgewässer	Spöl	Dranse de Bagnes	Melezza
Q _{Mittel} natürlich	7-12 m ³ /s	11-12 m ³ /s	5-7 m ³ /s
Q _{Restwasserdotierung}	1 m ³ /s Tag: 2,4 m ³ /s Nacht: 1 m ³ /s } Sommer Winter: 0,5 m ³ /s	2,4 m ³ /s (Erhöhung durch Seitenbäche)	0,5 m ³ /s (Erhöhung durch Seitenbäche)
Q _{Hoch} heute (jährlich)	vermutl. < 5m ³ /s	20-40 m ³ /s	50-1000 m ³ /s
Fischfauna	Bachforelle	Bachforelle	Bachforelle, Groppe + Cypriniden (Strigione, Alet, Barbe)
Spülmassnahme	Grundablassspülung → Sedimente entfernen	Entleerung und Reinigung der Ausgleichbecken Grande Dixence und Mauvoisin	Totalentleerung → Revision des Reserve-Grundablasschiebers
Datum	7. Juni 1990	29. Juni 1991	3./10. Sept. 1991
Q _{Max} bei Spülung	30 m ³ /s	ca. 40 m ³ /s	40 m ³ /s
Totale Spülwassermenge (inkl. Nachsp.)	525'000 m ³	877'000 m ³	7-8 Mio m ³
ausgeschwemmte Sedimentmenge	ca. 60 m ³	?	ca. 175'000 m ³
max. Schwebstoffkonzentration	15 ml/l	150 ml/l	900 ml/l
Grenzwert der Schwebstoffkonz. bei Spülungen des betreffenden Kantons	variabel (10-20 ml/l)	10 ml/l	5 ml/l

5.2.1 Abflussmengen und Strömungsregime

Wie die Zahlen in Tabelle 5.1 zeigen, waren die maximalen Abflussmengen der drei untersuchten Spülungsereignisse in etwa gleich hoch. Verglichen mit auch heute noch jährlich wiederkehrenden natürlichen Hochwasserereignissen war nur die Abflussspitze bei der Spülung Livigno-Stausee relativ hoch. An der Melezza (Palagnedra-Stausee) traten in den letzten Jahren mehrfach Hochwasserspitzen auf, die ein Mehrfaches der 1991 verwendeten Spülwassermenge ausmachten.

Morphologische Gerinneveränderungen durch die strukturierenden Kräfte aussergewöhnlicher Strömungsverhältnisse konnten daher vor allem bei der Livigno-Spülung festgestellt werden. Dabei wurden über Jahre abgelagerte seitliche Schuttkegel weggeschwemmt (was zur Erhöhung der Schwebstoffkonzentration bachabwärts führte), lokale Sohlenvertiefungen und eine allgemeine "Säuberung" des zur Versandung und Vertümpelung neigenden Spölgewässers wurden festgestellt.

Bei der Dranse de Bagnes (Ausgleichsbecken Fionnay) waren namentlich diejenigen Abschnitte, die speziell zur Wegführung hoher Spülwassermengen im voraus korrigiert worden waren (Begradigung und Dammschüttung), grossen Strukturveränderungen durch Erosivkräfte des Wassers unterworfen.

5.2.2 Feststoffe, Substratbeschaffenheit

Die Feststoffkonzentrationen während der Spülung war der einzige Faktor, der von den kantonalen zuständigen Behörden mit einem Grenzwert belegt und dessen Einhaltung den Spülungsgesuchstellern als Auflage gemacht wurde. In der Regel gelten in der Schweiz Werte von 5 bis 10 ml Schwebstoffabsetzvolumen (entsprechend ca. 5-10 g/l Trockengewicht) pro Liter Probewasser (Sedimentierzeit im IMHOFF-Trichter: 30 min bis 1 h) als kantonale Grenzwerte. Diese Limiten beruhen hauptsächlich auf Literaturangaben, deren Autoren bei Laborbedingungen sogenannte Letalwerte bei Fischen ermittelt haben (vgl. Literaturzusammenstellung in WAHLI 1985). In verschiedenen Fließgewässern werden hingegen bei bestimmten Hochwassersituationen auch natürlicherweise ähnliche oder sogar höhere Schwebstoffkonzentrationen erreicht (z.B. Landquart, Abb. 5.4).

Wie die anhand der oben erwähnten Spülungen gewonnenen Resultate der Bestandsaufnahmen der Fischfauna zeigten, muss eine über solche Grenzwert erhöhte Schwebstoffkonzentration nicht a priori negative Folgen für die Fischfauna haben (s. Kap. 5.2.4).

Einen weitreichenderen Einfluss hatten spülungsbedingte **Feststoffablagerungen** in Bachgerinnen. Gerade in Restwassersystemen mit schon reduzierter oder weitgehend fehlender Geschiebedynamik kann die zusätzliche Einlagerung von Feinmaterial ins Substrat grosse Effekte auf die benthischen Lebensgemeinschaften (Benthosorganismen, Ei- und Larvalstadien gewisser Fischarten) haben. Diesbezügliche Langzeiteffekte sind schwer quantifizierbar und bisher kaum erforscht.

Welche strukturverändernden Folgen grosse Mengen von Feststoffablagerungen haben können, zeigt wiederum die Entleerung des Ausgleichbeckens Palagnedra (Abb 5.5), wo bei Golino (ca. 7 km unterhalb der Staumauer Palagnedra) Feinsedimentschichten von zum Teil über 1 m Mächtigkeit im Gerinne verblieben sind.

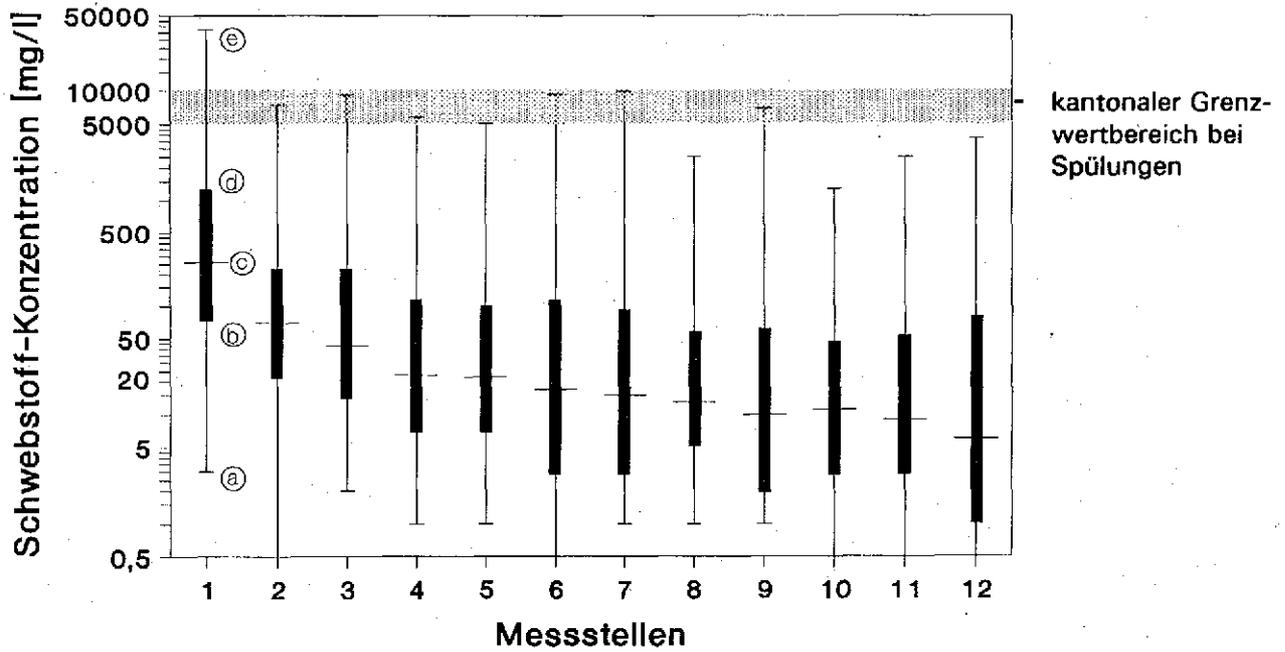


Abb. 5.4: Schwebstoffkonzentrationen (logarithmisch aufgetragen) während der Messperiode 1980-84 an 12 Probenahmestellen der Landeshydrologie; die Messungen umfassen das Trockengewicht der absetzbaren + nicht absetzbaren Schwebstoffe (Werte aus WAHLI 1985).

a) Periodenminima
 b) mittleres Monatsminima
 c) geom. Mittel 1980-84
 d) mittleres Monatsmaxima
 e) Periodenmaxima

1 Landquart (Felsenbach)	7 Ticino (Bellinzona)
2 Rhône (Porte du Scex)	8 Reuss (Seedorf)
3 Rhein (Diepoldsau)	9 Emme (Wiler)
4 Linth (Mollis)	10 Aare (Untersiggenthal)
5 Lütchine (Gsteig)	11 Reuss (Mühlau)
6 Lonza (Blatten)	12 Thur (Halden)

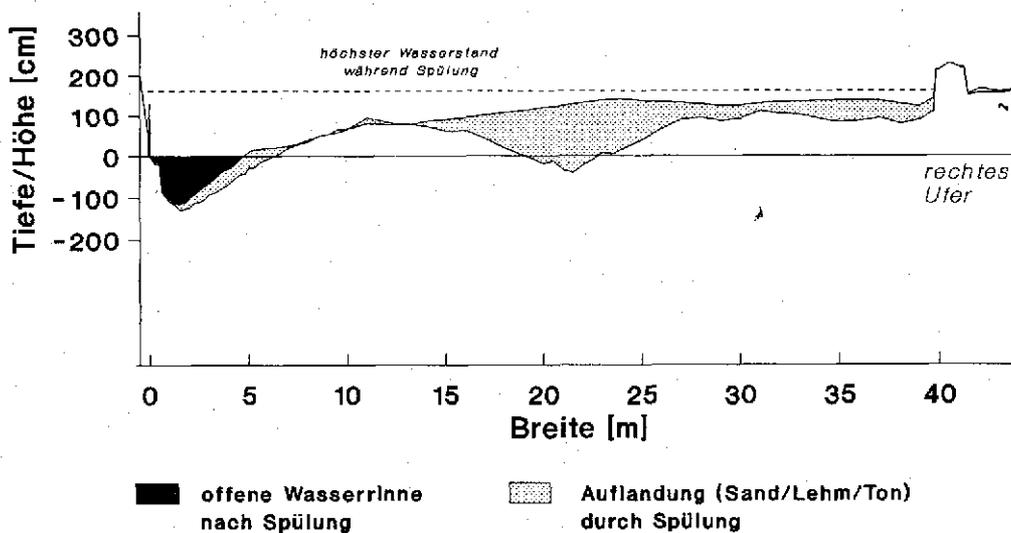


Abb. 5.5: Querprofil bei Ponte Golino (Spülung von Palagnedra). Die dicke Auflandungsschicht wurde ½ Monat nach der Spülung durch ein aussergewöhnliches Hochwasser ($Q_{\text{Max}} = 290 \text{ m}^3/\text{s}$) grösstenteils wieder abgetragen.

Ein solcher Verbleib der Stauseesedimente im Restwassergerinne kann - wie die beiden anderen Spülungen gezeigt haben - durch eine Nachspülung mit schwebstofffreiem Wasser weitgehend verhindert werden. Prinzipiell ist eine solche "Nachsorgebehandlung" überall dort möglich, wo der betreffende Stausee mit oberhalb liegenden Wasserspeichern vernetzt ist oder wo nur eine Grundablassspülung vorgenommen wird, so, dass noch genügend Stauwasser zur Verfügung steht. Es hat sich ebenfalls gezeigt, dass eine solche nachträgliche Gerinnesäuberung eine rasche Wiederbesiedlung begünstigt, da sie neben den neu eingebrachten auch die zuvor kontinuierlich abgelagerten Sedimente beseitigt.

5.2.3 Wasserchemie

Ein negativer Effekt physikalisch-chemischer Einflussgrößen auf die Fließgewässerbiozö-nosen wurde hauptsächlich durch reduzierende Verhältnisse infolge anoxischer Sedimente aus den gespülten Becken erwartet (vgl. Kap. 5.1). Da nur bei der Spülung Palagnedra dies-bezüglich krasse Verhältnisse herrschten, wird hier wiederum dieses Beispiel etwas genauer illustriert (Abb. 5.6).

Das Absinken der Wassertemperatur ging einher mit dem Ablassen von kälterem Tiefen-wasser aus dem Grundablass. Der Sauerstoffgehalt und die O₂-Sättigung des Wassers sank erst am 10. September bei der Hauptspülung auf einen Tiefstwert, der auf alle Fischarten letal wirkte. Ursache dafür war der zu diesem Zeitpunkt (Stausee fast leer; Wassermenge immer geringer) massive Abtrag reduzierter Seesedimente. Eine sofortige Nachspülung mit schwebstofffreiem Wasser konnte nicht durchgeführt werden.

Bei den andern zwei Untersuchungsobjekten waren kaum Veränderungen der physikalisch-chemischen Standardparameter feststellbar.

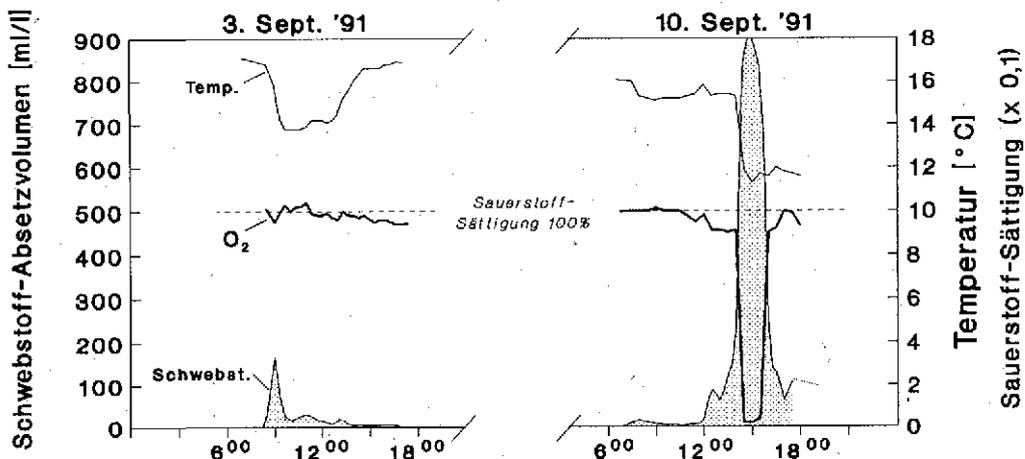


Abb. 5.6: Entleerung und Spülung des Ausgleichbeckens Palagnedra im September 1991. Schwebstoff-Absetzvolumen (ml/l·½h), Wassertemperatur und Sauerstoffsättigung an der Messstelle "Cor-capolo" während den Hauptspülungsphasen am 3. und 10. September.

5.2.4 Ökologische Auswirkungen

Makroinvertebraten

Die Zusammensetzung der Makroinvertebratenfauna kann ein Mass für die chemisch-physikalischen, vor allem aber für die ökomorphologischen Bedingungen (Strömungsmuster, Struktur, Substrat) in einem Fließgewässer sein (vgl. Kap. 4.1). So zeigten sich auch bei den drei betrachteten Untersuchungsobjekten unterschiedliche Ausprägungen einer "Restwasserfauna", nachdem die einzelnen Makroinvertebraten-Taxa zu vergleichbaren funktionellen Gruppen zusammengefasst wurden. Typische Bergbacharten überwogen in der Dranse de Bagnes und der Melezza, da in diesen zwei Gewässersystemen trotz Kraftwerk-nutzung auch heute noch regelmässig Hochwasserabflüsse auftreten. Im Spöl (vgl. Abb. 4.1) hingegen war eine für die Höhenstufe ungewöhnlich hohe Besiedlungsdichte und ein hoher Anteil eher strömungslabiler Arten festzustellen.

Die Spülungsereignisse hatten bei allen drei Untersuchungsobjekten eine starke Ausdünnung der Benthos-Biozöosen zur Folge. Driftmessungen während der Spülung mit Driftnetzen oder -röhren gaben darüber Aufschluss. Abbildung 5.7 zeigt den Verlauf der Katastrophendrift an einer stauseenahen Probestelle am Spöl. Infolge dieser Katastrophendrift, von der alle Organismengruppen in unterschiedlichem Masse betroffen waren, ergaben sich Ausdünnungsraten von 70 bis 95% der ehemaligen Populationen.

Ein solcher Effekt tritt unterschiedlich stark auch bei natürlichen Hochwasserereignissen auf; wichtig in diesem Zusammenhang ist die Änderungsgeschwindigkeit der Abflussmengen, sowohl bei Beginn wie auch am Ende einer Spülung. Bei langsam ansteigender Abflussmenge wird den Benthosorganismen Zeit zur Flucht ins Lückensystem der Gerinnesohle

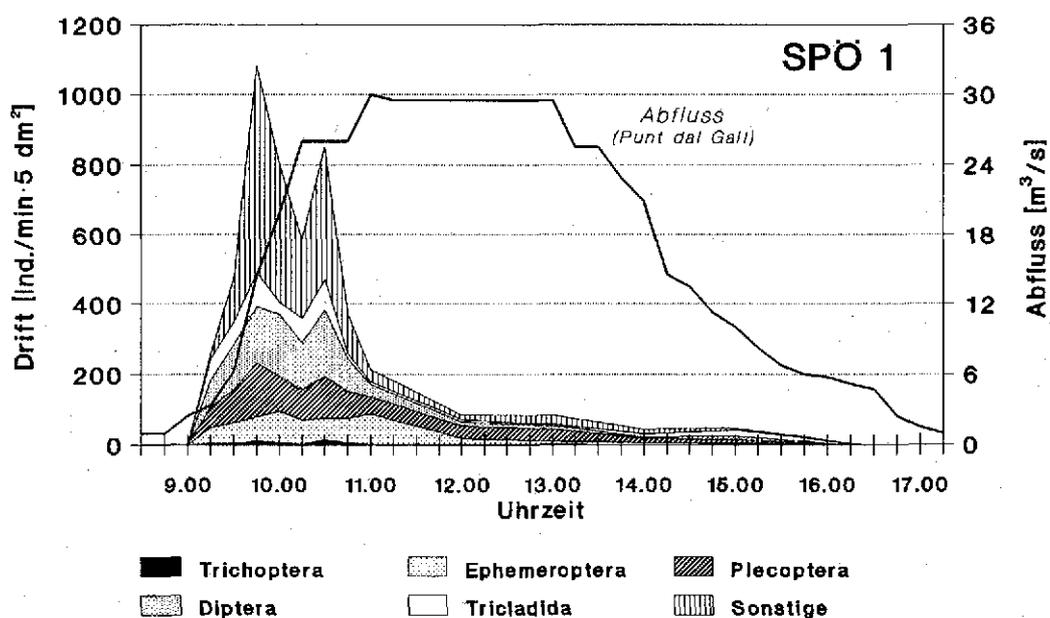


Abb. 5.7: Gesamtdrift (ohne Zooplankton aus Stausee) an der Probestelle SPÖ 1 während der Spülung Livigno am 7. Juni 1990 (Abflussmessstelle Punt dal Gall in unmittelbarer Nähe der Probestelle).

gegeben, Fische können sich an sichere Standorte zurückziehen. Beim Wasserrückgang können zusätzliche Verluste vermieden werden, indem durch langsames Schliessen der Schieber für die seitlich ausgewichenen Organismen (auch Fische!) der Rückweg ins Hauptgerinne gewährleistet bleibt.

Flächenbezogene Benthosproben vor und nach einer Spülung liessen Rückschlüsse auf die quantitative Ausdünnung und die Wiederbesiedlung mit Makroinvertebraten zu. Hierzu sei wiederum das Beispiel Palagnedra-Spülung angeführt. Gemäss Abbildung 5.8 konnten dort zwei Tage nach der ersten (abgebrochenen) Spülung nur geringe Ausdünnungsraten festgestellt werden. Nach der Hauptspülung vom 10. September und 15 Tage danach (im Anschluss an diverse "Reinigungsspülungen") wurden dagegen nur noch einzelne Individuen gefunden. Ein halbes Jahr später waren jedoch wieder starke Populationen vorhanden, nachdem natürliche Hochwasser das Gerinne wieder von Sedimenten freigespült hatten. Ähnliche Beobachtungen, das heisst eine schnelle Wiederbesiedlung nach den Spülungsereignissen, konnten auch am Spöl und an der Dranse gemacht werden.

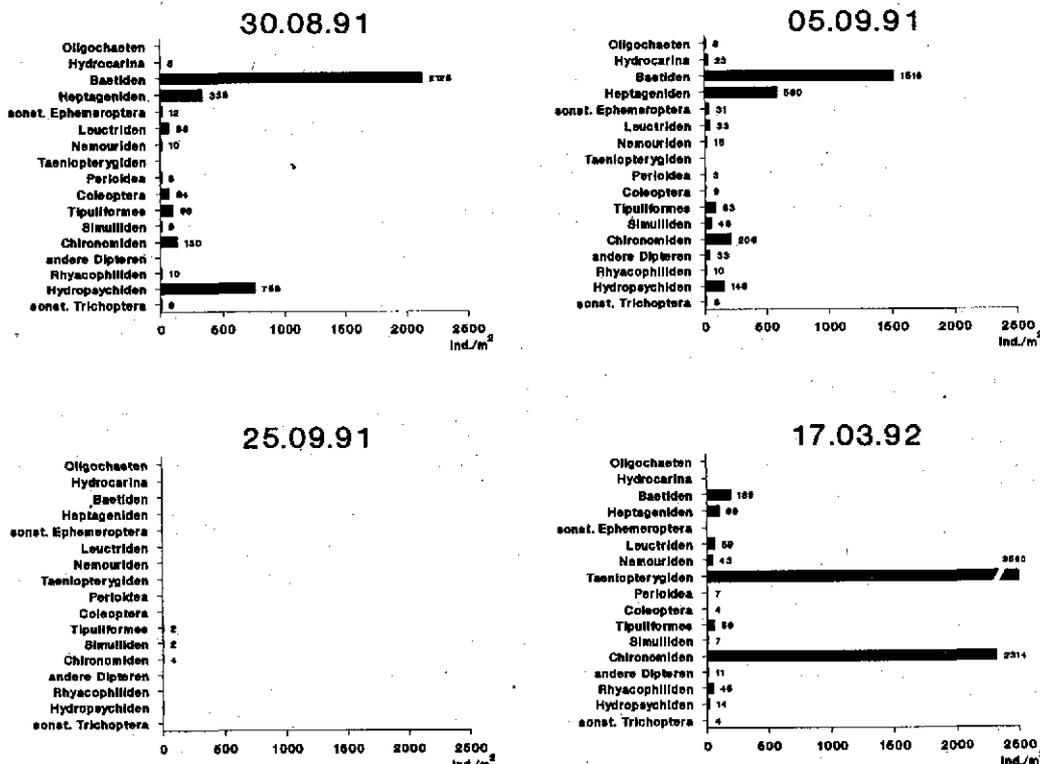


Abb. 5.8: Benthosbesiedlung an der Probestelle "Ponte Salmina", 3 Tage vor der ersten Palagnedra-Spülung (30.08.91), 2 Tage nach Spülungsabbruch (05.09.91), im Anschluss an die Hauptspülung (10.09.91) und den anschliessenden Reinigungs-Spülungen (25.09.91) sowie ½ Jahr nach der Spülung (17.03.92).

Eine solche Wiederbesiedlung erfolgt in der Regel durch die ins Interstitial geflohenen Individuen (BECKER et al. 1992, BRETSCSKO et al. 1986), durch Zudrift aus nicht betroffenen, oberhalb liegenden Bachabschnitten und Seitenbächen oder durch Anflug und Eiablage von Individuen benachbarter Gewässersysteme. Die kurzen Generationszeiten der meisten Arten erklären diese schnelle Erholung der Makroinvertebratenfauna.

Nicht alle diese Wiederbesiedlungsprozesse konnten bei den hier beobachteten Objekten tatsächlich ablaufen. So wurden im Falle des Spöl die ökomorphologischen Umgebungsbedingungen nach der Spülung soweit verändert, dass zunächst nur rheophile Organismen begünstigt wurden. Bei der Spülung an der Melezza wurde aufgrund der anschliessenden Sedimentbedeckung des Gerinnes eine Wiederbesiedlung aus dem Interstitial verhindert.

Fische

Durch Bestandserhebungen mittels Elektroabfischungen vor und nach den Spülungsereignissen sowie Beobachtungen und Bachbegehungen während und unmittelbar nach Staurationsspülungen wurden die Effekte solcher Massnahmen auf die Fischfauna untersucht. Zudem wurden die bei den Voruntersuchungen gefangenen Fische markiert, um eine allfällige Verdriftung feststellen zu können.

Bei den Nachuntersuchungen am Spöl (Livigno-Spülung) und an der Dranse de Bagnes (Fionnay), wie auch bei der Zwischenuntersuchung nach der unterbrochenen Spülung an der Melezza (Palagnedra) konnte ein grosser Anteil der in den Voruntersuchungen erfassten und markierten Fische wieder registriert werden (Abb. 5.9). Die Standorttreue der Bachforellenbestände konnte dabei eindrücklich dokumentiert und ein spülungsbedingtes Abdriften - zumindest der älteren Tiere ($>0^+$) - eher ausgeschlossen werden.

Bei der Livigno-Spülung konnten keine direkten Einwirkungen der erhöhten Schwebstoffkonzentrationen auf die Fischfauna festgestellt werden.

Bei der während rund 3 Stunden mindestens 30 ml/l Absetzvolumen (Spitze 150 ml/l) gemessenen Spülung an der Dranse de Bagnes traten schwebstoffbedingte Verluste auf. Durch die aggressive **Sanddrift** wurde die Schleimschicht von Forellen mechanisch geschädigt; **Feinstoffe** führten bei denselben Fischen zu einer Verstopfung der Kiemenblätter und zur Bedeckung des Kiemenepithels. Die Schädigungen wurden jedoch nur an Individuen festgestellt, die sich innerhalb eines morphologisch instabilen und teilweise verbauten Bachabschnittes aufhielten. Eine vergleichbar hohe Schwebstofffracht schädigte dagegen diejenigen Fische nicht, die innerhalb eines natürlichen Bachabschnitts ausreichend Unterschlupfmöglichkeiten vorfanden.

Trotz recht hohen Schwebstoffkonzentrationen (bis 150 ml/l Absetzvolumen) und vor allem in strömungsberuhigten Zonen schon beträchtlichen Feinstoffablagerungen wurden in der Melezza am ersten Tag der später abgebrochenen Palagnedra-Spülung keine verletzten oder toten Fische registriert. Auch bodenorientierte Groppen konnten bei der Kontrollabfischung zwei Tage danach noch in gleicher Häufigkeit wie vor der Spülung gefunden werden. Erst bei der folgenden Hauptspülung nützte auch die grosse Habitatsheterogenität in der Melezza den dortigen Fischen nichts mehr. Bei Schwebstoffkonzentrationen von bis zu 900 ml/l und

O₂-Sättigungsgraden von weniger als 5% gab es im betroffenen Gerinne für die Fische kaum noch eine Überlebenschance.

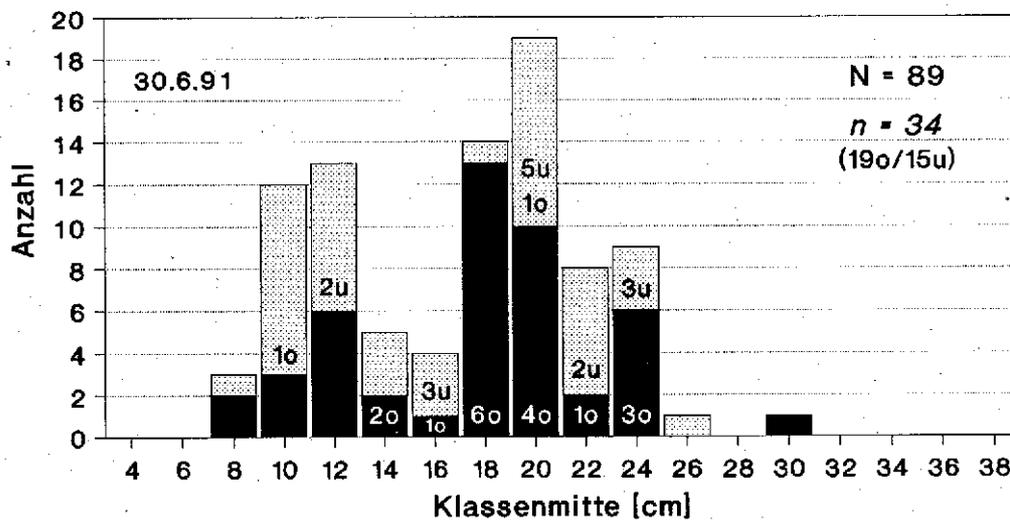
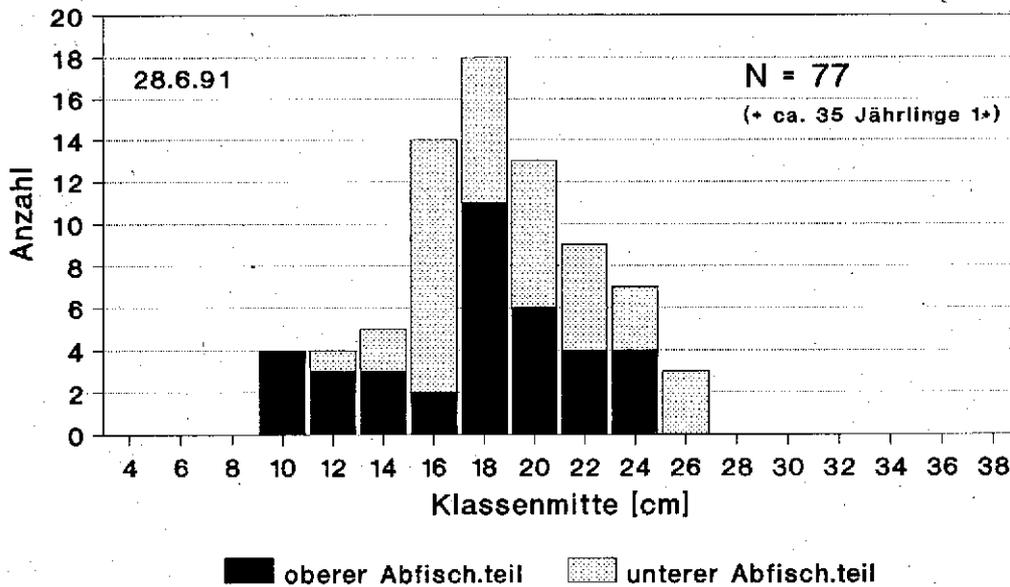


Abb. 5.9: Längenverteilung der Bachforellen, die an der Stelle Lourtier (natürliche Gerinnemorphologie) auf einer Bachstrecke von 300 m am Tag vor der Spülung (obere Grafik) und am Tag nach der Spülung (untere Grafik) gefangen wurden. Unterteilung in oberen und unteren Teil der Abfischstrecke.

Untere Grafik: Angaben zur Anzahl der in den einzelnen Längenklassen wiedergefangenen markierten Fische (n = Wiederfänge markierter Fische); u = als "im unteren Bachabschnitt erstmals gefangene" markierte Fische, o = als "im oberen Bachschnitt erstmals gefangene" markierte Fische.

5.2.5 Vergleich von Spülungen mit natürlichen Hochwassern

Bei einer Untersuchung der Wiederbesiedlungsprozesse in Folge der Spülung an der Melezza (GERSTER UND REY 1992b) konnten auch die ökologischen Folgen eines HQ_{10} - und eines HQ_{100} -Hochwassers beobachtet und somit ein gewisser Vergleich zwischen spülungsbedingten und natürlich verursachten ökologischen "Katastrophen" gezogen werden. Im letzteren Fall lag die Abflussmenge rund zehnfach über derjenigen, die während der Spülung erreicht wurde. Schwebstoffkonzentrationen wurden leider nicht gemessen, sie lagen jedoch sicherlich weit unter denjenigen der Spülung. Verluste traten fast ausschliesslich bei O^+ -Fischen und limnophilen Benthosorganismen auf.

Dieser Fall legt nahe, dass zumindest bei Schwebstoffkonzentrationen einer Höhe, die nur im Verlauf von Spülungen erreicht wird, das aquatische Milieu selbst biologische Verluste verursacht, von denen auch stresstolerante Organismen betroffen sind. Bleibt dagegen auch bei hohen Schwebstoffkonzentrationen (bis zu 100 ml/l) die Sauerstoffsättigung in einem physiologisch unbedenklichen Bereich (um 80%), sind die Verluste in der Regel auf die mechanisch geschädigten Organismen beschränkt (REY und GERSTER 1992).

6. Konzipierung zukünftiger Spülungen

Das folgende Kapitel beschreibt in konzentrierter Form das Vorgehen bei zukünftigen Spülungen. Dabei werden Kompetenzzuweisungen vorgeschlagen, und es wird insbesondere auf die Inhalte von spülungsbegleitenden Massnahmen eingegangen. Im Sinne einer **Empfehlung** - dem heutigen Kenntnisstand entsprechend - kann diese Auflistung den involvierten Behörden, aber auch den Kraftwerksbetreibern ein Instrument zur Planung und Durchführung von Spülungen sein.

Es muss dabei immer wieder betont werden, dass generalisierte Aussagen wegen der Unterschiedlichkeit der einzelnen Spülungsobjekte in der Regel nicht möglich sind.

6.1 Bewilligungspflicht/Spülungsgesuche

Spülungen unterstehen gemäss Gewässerschutz- und Fischereigesetz einer **Bewilligungspflicht**. Die zuständigen kantonalen Behörden sollten dafür sorgen, dass die Gesuche zu den geplanten Massnahmen frühzeitig eingereicht werden. Eine **minimale Meldefrist von einem Jahr** sollte dabei grundsätzlich nicht unterschritten werden, grössere Massnahmen (z.B. Totalentleerungen von Saisonspeichern) sollten jedoch von den Kraftwerksbetreibern **3-5 Jahre im voraus geplant** und bereits dann den zuständigen Behörden mitgeteilt werden.

Tab. 6.1: Inhalt eines Spülungsgesuchs

<ul style="list-style-type: none"> - Gesuchsteller, Objekt - Art der Massnahme (Grundablassspülung, Totalentleerung) - Zweck/Ziel der Massnahme - Zeitpunkt - Betrieblich-technische Beschreibung des Spülungsobjekts (so detailliert wie möglich) <ul style="list-style-type: none"> • insbesondere spezielle Einrichtungen zur Durchführung von Spülungen (Spülstollen etc.) - Hydrologische und hydraulische Angaben zu den betroffenen Gewässersystemen - Sedimente im Speicher <ul style="list-style-type: none"> • Art (chemisch-physikalische Charakterisierung) und Menge • voraussichtlich mobilisierte Menge - Evaluation von Möglichkeiten, mit denen sich das Ziel der Massnahme allenfalls erreichen liesse (Spülung oder alternative Massnahmen; vgl. Kap. 3.4) <p>.....</p> <ul style="list-style-type: none"> - Im Falle einer geplanten Spülung: - Angaben zum Spülungsverlauf <ul style="list-style-type: none"> • Geplante Dauer der Spülung (mit Nachspülungszeiten) • Wassermengen (Menge und Verlauf des Abflusses im Unterwasser) • Temperaturverhältnisse und Wasserchemie • Steuerungsmöglichkeiten bzgl. Schwebstoffkonzentrierung während der Spülung z.B. Möglichkeiten zur kurz- oder mittelfristigen Zufuhr von sauberem Verdünnungswasser - Biologie der betroffenen Gewässersysteme (v.a. Fischarten, Bewirtschaftung und ökol. Zustandsbewert.) - Voraussichtliche Auswirkungen auf die Umwelt und Nachhaltigkeit dieser Auswirkungen <ul style="list-style-type: none"> • wo und für wie lange wird gespültes Material in den betroffenen Gerinnen abgelagert (inkl. Einfluss auf unterhalb liegende, stehende Gewässer) • direkte Schädigungen von Tieren und Pflanzen (im Gerinne selbst und im Auenbereich) • Degradierung von Lebensräumen (kurz- bis langfristig) • Einschränkungen ideeller und freizeittlicher Aspekte des Menschen (Fischerei, Badebetrieb) • andere (z.T. auch positive Auswirkungen denkbar, z.B. Reinigungswirkung bei kolmatierten Substraten) - Mögliche und geplante prophylaktische Massnahmen zur Minimierung negativer Auswirkungen <ul style="list-style-type: none"> • z.B. Fischevakuiierungen im Speicher oder in betroffenen Unterwasserabschnitten
--

Spülungsgesuche müssen wahrheitsgetreue und detaillierte Angaben zur geplanten Massnahme sowie den möglichen Auswirkungen haben (s. Tab. 6.1). Insbesondere zum Schutz der betroffenen Lebensgemeinschaften sind spezifische Vorabklärungen (Sedimentuntersuchungen, Evaluation prophylaktischer Massnahmen u.a.) seitens der Kraftwerksbetreiber zu veranlassen und sollen ein Teil des Spülungsgesuchs sein.

Bis heute beinhaltet ein Spülungsgesuch zwar ebenfalls alle Angaben zum technischen Ablauf der geplanten Massnahme, bereits die Angaben zur Menge und Art der Sedimente sind aber oft ungenau. Prognosen zu möglichen ökologischen Folgen wurden bisher nicht gefordert, obwohl im Nachhinein Schädigungen - vor allem Fischsterben - festgestellt und auch von der Öffentlichkeit meist zur Kenntnis genommen wurden. Eine **Einbeziehung ökologischer Inhalte in das Bewilligungsverfahren** drängt sich demnach auf; nur so können über die Festlegung von Verantwortlichkeiten absehbare Schäden überhaupt beeinflusst werden. Voraussetzung für ein solches Konzept ist die engere Zusammenarbeit zwischen Kraftwerksbetreiber und Bewilligungsbehörde mit den gemeinsamen Zielen, die Kraftwerksanlagen funktionsfähig zu halten und mögliche ökologische Schäden bei der Beseitigung von Sedimenten zu minimieren.

Nach dem Verursacherprinzip ist der Kraftwerksbetreiber für die Zusammenstellung der im Spülungsgesuch enthaltenen Informationen verantwortlich. Seine diesbezüglichen Pflichten ergeben sich aus den bestehenden gesetzlichen Grundlagen (z.B. Fischereigesetz). Die **Bewilligungsbehörde** setzt die entsprechenden Auflagen zur Durchführung der Massnahme fest. In jedem Falle kann sie eine **Kontrolle** der im Gesuch enthaltenen Angaben und der Einhaltung der Auflagen im Rahmen der Massnahme verlangen. Hierzu dienen beispielsweise zusätzliche Vorabklärungen, die Zusammenstellung der Erfahrungswerte früherer Spülbegleitungen am selben Objekt oder neue Untersuchungsinhalte (z.B. ergänzende wissenschaftliche Untersuchungen).

6.2 Planung und Durchführung spülbegleitender Massnahmen

► Systemdefinition

Bevor Massnahmen zur Vermeidung oder zur Erfassung ökologischer Schäden erfolgen können, muss eine klare Systemdefinition vorliegen, die die **Besonderheiten des betroffenen Gewässersystems** aufzeigt (vgl. Kap. 4.1). Berücksichtigt werden muss dabei der morphologische und hydrologische Charakter der betroffenen Gerinne (+ allenfalls stehende Gewässer im Nahbereich) und die Spezifik der daran adaptierten Lebensgemeinschaften.

► Voruntersuchungen

Die Beurteilung der zu erwartenden Belastungen während der Spülung erfordert in jedem einzelnen Fall zusätzliche Vorabklärungen, um entscheiden zu können, ob ein erhöhtes Schadensrisiko prophylaktische Massnahmen notwendig macht. Hierzu gehören:

- a) eine Abschätzung der **Menge** und Zusammensetzung der im Verlauf der Spülung voraussichtlich mobilisierten **Speichersedimente**;

- b) die Erhebung von Daten zur potentiellen **ökotoxikologischen Wirkung der Speichersedimente** (vgl. Kap. 5.1.1 und 5.1.2), bei der unter anderem Messungen der Wassertemperatur und eine Abschätzung der Menge reduzierten organischen Materials stattfinden; gleichzeitig lassen sich anhand solcher Speichersediment-Proben Eichkurven zum Absetzverhalten des Materials (im IMHOFF-Trichter) bei unterschiedlichen Absetzzeiten (in der Regel genügt bei mineralischem Material eine Absetzzeit von 10 Minuten zur Erfassung der Hauptbelastung) und eine Beziehung zur Umrechnung in den Schwebstoffgehalt (in Gramm Trockengewicht) bei vorgegebenem Absetzvolumen erstellen.
- c) Abklärungen zur **Verfügbarkeit von Verdünnungswasser** respektive sauberem Wasser zur Nachspülung.

► Zeitpunkt der Spülung

Für die Auswahl eines richtigen Zeitpunktes für eine Spülung sind folgende Punkte zu berücksichtigen:

- a) Spülungen sollten wenn möglich auf eine **Jahreszeit mit natürlicherweise hoher Wasserführung** verlegt werden, um eine Verdünnung des zu spülenden Materials im Unterwasser zu unterstützen und ökologisch negative Folgen gering zu halten:
 - Die Bachorganismen zeigen bei einer Hochwassersituation eine Vorwegnahme des bei einer Spülung benötigten Schutz- und Fluchtverhaltens (antizipatorische Adaptation);
 - die Verluste, die notwendigerweise - auch bei natürlichen Hochwasserereignissen - auftreten, bleiben insgesamt gesehen geringer, da es sich nur um eine, zusammenhängende hydraulische Stresssituation handelt.
- b) Die **Laichzeiten und frühen Entwicklungsstadien** der für das Gewässersystem typischen Fischarten, sowie die **Reproduktionszeiten der übrigen Bachorganismen** sollen durch Spülungen so wenig wie möglich gestört werden.
- c) Verluste, die aufgrund hoher Abflussmengen zustande kommen (labile Restwasserbiozönose, vgl. Kap. 4.3 und Kap. 5.2.1), müssen vermehrt in Kauf genommen werden, je seltener gespült wird und je ungünstiger der Spülungszeitpunkt gewählt wird.

► Festlegung von Belastungsgrenzen

Wie bereits in Kapitel 4.2 angeführt, müssen vor allem eine hohe Schwebstoffkonzentration und eine geringe Sauerstoffversorgung des Wassers als Haupt-Belastungsparameter während einer Spülung angesehen werden. Es handelt sich hierbei ausserdem um Faktoren, die analog gemessen als Regelgrössen für die Steuerung des Spülungsablaufes dienen können. Die Werte sollen sich dabei in einem Bereich bewegen, innerhalb dem keine Schädigungen der Biozönosen erwartet oder beobachtet werden.

Grenzwerte, z.B. für die maximale Schwebstoffkonzentration, können nach den bisherigen Erfahrungen zwar nicht generell angegeben werden, da jedes Gewässer und dessen spezifische Ökologie eigene Toleranzgrenzen besitzt (vgl. Kap. 4.3). Die bisher festgesetzten Werte (in der Regel < 10g/l) sollten jedoch weiterhin als Anhaltspunkt gelten. Liegen dagegen Erfahrungswerte aus früheren Spülungen am selben Gewässer vor, so lassen sich zumindest Belastungsbereiche angeben, innerhalb denen Schädigungen bereits aufge-

treten oder sicher nicht zu erwarten sind. Der Umfang des zu erwartenden Schadens lässt sich aufgrund der Komplexität der beteiligten Einflussgrößen dagegen nie prognostizieren.

► Prophylaktische Massnahmen

Zur Geringhaltung der Schäden und insbesondere zur Sicherung des genetischen Gutes von gefährdeten oder isolierten Fischbeständen (eingeschränkte Wiederbesiedlungsmöglichkeiten) drängen sich in vielen Fällen sogenannte **Bestandsbergungen** auf. Da infolge der Ausdehnung und der Zugänglichkeit des Unterwassers kaum jemals die Bestände quantitativ evakuiert werden können, muss an ausgewählten Abschnitten eine genügend grosse Anzahl von Fischen behändigt und in geeigneter Form bis zur Beendigung der Spülung gehältert werden. Bestandsaufnahmen vor und nach der Spülung sind zudem wichtig zur Beurteilung des entstandenen Schadens und somit zur Formulierung der entsprechenden Schadenersatzforderungen.

Ein besonderes Augenmerk sollte in Zukunft der Bestandsbergung in den abzusenkenden oder zu entleerenden Speichern geschenkt werden. Mit Netzfischerei - allenfalls bei abgesenktem Wasserstand und folglich verminderter Wasserfläche - im Speicher selbst und/oder geeigneten Einrichtungen im Unterwasser im Nahbereich des Grundablasses (GOSSE 1991) sollte ein beträchtlicher Teil der Fischbiomasse zumindest nutzbar gemacht werden können. Kaum gesichert sein wird wohl in vielen Fällen die Unversehrtheit der so erfassten Fische (vgl. Kap. 4.2).

Die **Planung des allfälligen Jungfischbesatzes** muss mit der Spülung unbedingt koordiniert werden. Ein Unterbruch des Besatzes von 1-2 Jahren vor grossen Spülungsmassnahmen scheint dabei angezeigt. Vor der Wiederaufnahme des Besatzes sollte festgestellt werden, dass sowohl die chemisch-physikalischen Bedingungen (erhöhte Sanddrift u.a.) als auch die Nahrungsverhältnisse wieder den Ansprüchen der eingesetzten Jungfische genügen. Eine solche Beurteilung muss auch vor der Rückversetzung von evakuierten und gehälterten Fischen erfolgen, wobei die Qualitätsansprüche dieser zumeist grösseren und bereits ans Gewässer adaptierten Individuen eher etwas geringer eingeschätzt werden dürfen. In jedem Falle soll angestrebt werden, dass ein Wiederbesatz durch residente Jungfische erfolgt, was einen entsprechenden Laichfischfang vor der Spülung voraussetzt.

► Technische Massnahmen

Nebst den topographischen und baulichen Gegebenheiten (s. Kap. 3) hat der betriebliche und zeitliche Ablauf einer Spülung einen wichtigen Einfluss auf die Art und das Ausmass der entstehenden ökologischen Folgen, beziehungsweise des fischereilichen Schadens.

Generell ist darauf zu achten, dass **Abschlussorgane langsam geöffnet und wieder geschlossen werden**. Nur so kann gewährleistet werden, dass den Fischen und Makroinvertebraten genügend Zeit zum Reagieren bleibt, sei dies als Flucht/Schutz-Reaktion beim Anschwellen der Wassermassen oder bei der Rückwanderung ins Haupt(Restwasser)-Gerinne beim Rückgang der Abflussmengen. So kann es - je nach Morphologie des betreffenden Gerinnes - nötig sein, die Abflussmengen über mehrere Stunden kontinuierlich zu drosseln, um denjenigen Individuen, die in Randbereichen Refugien gefunden haben, den Rückweg nicht abrupt abzuschneiden.

In vielen Fällen kann und sollte der langsame Rückgang der Wassermengen mit einer Nachspülzeit entsprechend benötigter Länge kombiniert werden. Diese **Reinigungsspülungen** mit schwebstoffarmem Wasser bewirken eine Säuberung des Gerinnes und somit optimalere Bedingungen zur Rückbesiedlung.

► **Aufgabenkatalog einer Spülungsbegleitung**

Spülungsbegleitende Untersuchungen dienen dazu, objektspezifische **Kenntnisse zu gewinnen** und Erkenntnisse allgemeiner, die Spülungen betreffender Art zu sammeln. Damit können Verbesserungen bei künftigen Spülungen erreicht werden. Weiter dienen solche Untersuchungen zur **Beweissicherung**, indem eine Bestandsaufnahme relevanter Parameter vor und nach der Spülung erfolgt.

Die folgende Tabelle gibt eine Übersicht wichtiger zu erfassender Parameter und der jeweiligen Beprobungszeitpunkte.

Tab. 6.2: Untersuchungsprogramm bei Spülungsbegleitungen; die Untersuchungsobjekte (Gerinne im Unterwasser des gespülten Speichers + allenfalls betroffene Auen und unterhalb liegende Seen) sind vorgängig zu bestimmen (s. Systemdefinition).

Parameter	vor	während	sofort nach Spülung	nach 1-4 Wochen	nach 1 Jahr
<i>abiotische:</i>					
HYDROLOGIE					
Abflussmengen	*	*	*		
Strömungsregime	*	*	*		
GERINNESTRUKTUR					
Substratverteilung	*		*	*	
Granulometrie	*		*	*	
FESTSTOFFE					
Konzentration susp.	*	*	*	*	
Ablagerungen	*		*	*	*
Eindringtiefe	*			*	*
WASSERCHEMIE					
O ₂ , pH, Leitfähigkeit	*	*	*	*	*

<i>biotische:</i>					
AUFWUCHS					
Flächendeckungsgrad	*		*	*	*
HÖHERE PFLANZEN					
Flächendeckungsgrad	*		*	*	*
MAKROINVERTEBRATEN					
Drift	*	*	*		
Besiedlungsverhältnisse	*		*	*	*
FISCHE					
Bestandsaufnahmen	*		*	*	*
Verdriftung			*		
Schädigungen	*		*		

7. Literatur

Die folgende Liste enthält nebst den im Text zitierten Literaturangaben (fett) weitere Quellen, die im Rahmen des vorliegenden Berichtes entscheidende Informationen oder wichtiges Hintergrundwissen enthielten.

- Akeret, W. (Red.), 1982: Schlussbericht der interdepartementalen Arbeitsgruppe Restwasser. *BR, Bern, 401 p.*
- Ammann, M.A., 1987: Herkunft und Zusammensetzung von Silt in fließenden Gewässern und Stauseen. - Geotechnische Abtragsanalyse im Alpenraum. *ETH Zürich, Dissertation Nr. 8234, 181 p.*
- Anonymus, 1993: Stauraumspülungen 1993 im Kanton Glarus. *Kant. Amt f. Umweltschutz Glarus, interner Bericht, 8 p.*
- Aquarius, 1990: Gewässerverschmutzung der Saane im Raum Gsteig - Saanen. *Schadenberechnung im Auftrag des Kts. Bern, 18 p.*
- Aquarius, 1991: Gewässerverschmutzung der Saane im Raum Gsteig - Saanen; Untersuchung der Makroinvertebratenfauna 12 Monate nach dem Vorfall zur Beurteilung der längerfristigen Schäden am Ökosystem der Saane. *Gutachten zHv Kanton Bern, 7 p.*
- Banning, M., 1990: Der Rheoindex - Eine Möglichkeit zur Berechnung der Auswirkungen des Flusstaus auf die benthische Lebensgemeinschaft. *Mitteilungen der Deutschen Gesellschaft für Limnologie, Essen: 186-190.*
- Bauer, H.J., 1990: Bewertungsverfahren für ökologische Auswirkungen der Wasserwirtschaft. *Wasserwirtschaft 80: 129-134.*
- Becker, M. et al., 1992: Restwasserproblematik Obere Isar - Analytische Behandlung und Ergebnisse. *12. Seminar Landschaftswasserbau an der Techn. Univ. Wien, Landschaftswasserbau Band 13: 273-309.*
- Blösch, J., 1991: Die Auswirkungen technischer Eingriffe auf die Invertebratenfauna alpiner Fließgewässer. *Mitt. der EAWAG 32, Dübendorf: 14-17.*
- Bretschko, G. und W.E. Klemens, 1986: Quantitative methods and aspects in the study of the interstitial fauna of running waters. *Stygologia 2/4: 297-316.*
- Büttiker, B. und H.R. Lehnerr, 1981: Fischsterben in der Schweiz und ihre Hauptursachen in den Jahren 1952-1980. *BUS, interner Bericht, 24 p.*
- BUWAL, 1989: Fischsterben in den Jahren 1985 - 1988 und ihre Hauptursachen. *Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern, 4 p.*
- BWW, 1983: Sicherheit der Talsperren. Richtlinien zum Ablassen von Wasser aus Stauhaltungen (Entwurf). *Bundesamt für Wasserwirtschaft, Bern, 7 p.*
- Conca, A., 1990: Gli spurghi dei bacini di accumulazione e delle prese. *Wasser, Energie, Luft 82, 5/6: 111-114.*
- EAWAG, 1963: Bericht über die Kontrollen und Untersuchungen an der Reuss bei der Spülung des Staubeckens Pfaffensprung (Kraftwerk Amsteg) vom 1./2. Juli und 22./23. September 1962. *Zürich, 8 p.*
- EAWAG, 1971: Bericht über Betriebsversuche und Empfehlungen zur Ausräumung der Ablagerungen aus dem Staubecken Palagnedra durch das Flussbett der Melezza. *EAWAG Dübendorf, Auftrag No. 4164, 40 p.*
- EAWAG, 1987: Bericht über die fischereilichen Schäden in den Flüssen Ticino und Brenno verursacht durch die Hochwasser im Sommer 1987. *EAWAG Dübendorf, Kleinauftrag No. 26-1122, 30 p.*
- EAWAG, 1992: Verlandungsräumung Eugenisee 1990. Bericht über die Untersuchungen im Zusammenhang mit der Spülung des Eugenisees OW. *EAWAG Dübendorf, Auftrag No. 4725, 113 p.*
- ECOTEC, 1990: Données relatives à l'hydrobiologie de la Dranse de Bagnes. Expertise concernant les modalités de la dotation en aval de la prise d'eau des FMM, Annexes. *Ecotec Environnement S.A., Genève.*
- ECOTEC, 1992: Vidange de l'Aubonne en 1991; Suivi des impacts. *Expertise à l'att. de la Société Electrique des Forces de l'Aubonne (SEFA), 41 p.*
- Elber, F., 1991: Wissenschaftliche Begleitung "Spülung Grundablass Livigno-Stausee vom 7. Juni 1990"; Teil 2: Physikalische und chemische Verhältnisse im Spül während der Spülung und Aufwuchsuntersuchungen im Spül und Ova dal Fuorn. *WNPK Arbeitsberichte zur Nationalparkforschung.*
- EVE, 1982: Hochwasserschutz an Fließgewässern; Wegleitung 1982. *Eidgenössisches Verkehrs- und Energiewirtschaftsdepartement, Bundesamt für Wasserwirtschaft, Bern, 77 p.*
- EWLE, 1992a: Verlandungsräumung Eugenisee 1990; Bericht über die Auswirkungen auf das Kraftwerk Obermatt der EWLE AG. *Bericht der Elektrizitätswerk Luzern-Engelberg AG, 13 p.*

- EWLE, 1992b: Verlandungsräumung Eugenisee 1990; Auswirkungen auf das Kraftwerk Obermatt. *Wasser, Energie, Luft* 84/9: 214-215.
- Fehr, R., 1987a: Einfache Bestimmung der Korngrößenverteilung von Geschiebematerial mit Hilfe der Linienzahlanalyse. *Schweizer Ingenieur und Architekt* 38: 1104-1109.
- Fehr, R., 1987b: Geschiebeanalyse in Gebirgsbächen; Umrechnung und Vergleich von verschiedenen Analyseverfahren. *Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie* Nr. 92, 139 p.
- FMM, 1976-1990: Entretien du lit de la Dranse - Berichte über den technischen Ablauf im Rahmen von Spülmassnahmen an der Dranse de Bagnes. *Forces Motrices de Mauvoisin S.A., Sion*.
- Garric, J. et al., 1990: Lethal effects of draining on Brown trout. A predictive model based on field and laboratory studies. *Wat. Res.* 24/1: 59-65.
- Gartmann, R., 1990: Spülungen und Entleerungen von Stauseen und Ausgleichsbecken; Umweltbezogene Anforderungen. *Wasser, Energie, Luft* 82, 1/2: 33-36.
- Gerster, St., 1991: Schätzung des fischereilichen Schadens infolge der Entleerung/Spülung des Ausgleichbeckens Palagnedra. *Schadenexpertise zHv Ufficio Caccia & Pesca del Ticino*, 11 p.
- Gerster, St. und P. Rey, 1992a: Charakterisierung und Quantifizierung ökologischer Folgen von Stauseespülungen in den Schweizer Alpen: Entleerung und Spülung des Ausgleichbeckens Palagnedra im Centovalli, Kanton Tessin. *Institut f. angew. Hydrobiologie, Gutachten zHv BUWAL (Sektion Fischerei)*, 45 p.
- Gerster, St. und P. Rey, 1992b: Fischökologische Untersuchungen an der Melezza: Rekolonisierung und Entwicklung der Fischfauna im spülungsbedingt gestörten Abschnitt von Palagnedra bis zur Isorno-Mündung. *Institut f. angew. Hydrobiologie, Gutachten zHv Dipartimento del Territorio del Cantone TI, 1. Zwischenbericht*, 47 p.
- GHO, 1987: Die mengenmässige Erfassung von Schwebstoffen und Geschiebefrachten. *Arbeitsgruppe für operationelle Hydrologie, Mitteilung Nr. 2*, 91 p.
- Gosse, Ph., 1991: Prévission et reconstitution par modélisation numérique des concentrations de matières en suspension et d'oxygène dissous dans le Blavet à la fin de la vidange décennale du lac de Guerlédan (septembre 1985). *Hydroécol. Appl., Tome 3 Vol. 2: 257-300*.
- Heggenes, J., 1988: Effects of Short-Term Flow Fluctuations on Displacement of, and Habitat Use by, Brown Trout in a Small Stream. *Trans. Am. Fish. Soc.* 117: 336-344.
- Hesse, L.W. and B.A. Newcomb, 1982: Effects of Flushing Spencer Hydro on Water Quality, Fish, and Insect Fauna in the Niobrara River, Nebraska. *North. Am. J. Fish. Mgmt.* 2: 45-52.
- Jäger, P., 1991: Wissenschaftliche Begleitung "Spülung Grundablass Livigno-Stausee vom 7. Juni 1990"; Teil 3: Morphodynamik und Uferstabilität. *WNPK Arbeitsberichte zur Nationalparkforschung*, 16 p.
- Jungwirth, M. und H. Winkler, 1983: Die Bedeutung der Flussbettstruktur für Fischgemeinschaften. *Österreichische Wasserrwirtschaft* 35: 229-234.
- Kölla, E., 1986: Zur Abschätzung von Hochwassern in Fließgewässern an Stellen ohne Direktmessung. *Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie* Nr. 87, 163 p.
- Kondolf, G.M. et al., 1987: Assessing flushing-flow requirements for Brown trout spawning gravels in steep streams. *Water Resources Bulletin*, 23/5: 927-935.
- Krumdieck, A. und Ph. Chamot, 1981: Spülung von Sedimenten in kleinen und mittleren Speicherbecken. *Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie* Nr. 53: 257-270.
- Kühne, A., 1977: Die rasche Absenkung von Stauseen - optimale Programme für Stauseesysteme. *Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie* Nr. 23, 158 S.
- Lambert, A., 1987: Sanduhren der Erdgeschichte. *Geowissenschaften in unserer Zeit* 5/1: 10-18.
- Liepolt, R., 1961: Biologische Auswirkung der Entschlammung eines Hochgebirgstaus in einem alpinen Fließgewässer. *Wasser und Abwasser* Bd. 1961: 110-133.
- LSA, 1990a: Studio sulle conseguenze dello spurgo del bacino di Carassina (maggio 1989) sull'ecosistema fluviale del Brenno. *Laboratorio Studi Ambientali, Dipartimento Ambiente, Bellinzona*, 52 p.
- LSA, 1990b: Valutazione del danno alla fauna ittica in seguito allo spurgo del bacino di Carassina (maggio 1989). *Laboratorio Studi Ambientali, Dipartimento Ambiente, Bellinzona*, 6 p.
- Mage, R. et H. Maier, 1991: Érosion du sol en Suisse; étude bibliographique et enquête. *OFEFP, cahier de l'environnement* No. 152, 84 p.
- Müller, H.J. et al., 1984: Ökologie. *UTB* 1318, 415 p.
- Nelson, R.W. et al., 1987: Regulated Flushing in a Gravel-Bed River for Channel Habitat Maintenance: A Trinity River Fisheries Case Study. *Environmental Management* 11/4: 479-493.

- Newcombe, C.P. and D.D. MacDonald, 1991: Effects of suspended sediments on aquatic ecosystems. *North. Am. J. Fish. Mgmt.* 11: 72-82.
- Nisbet, M., 1961: Un exemple de pollution de rivière par vidange d'une retenue hydroélectrique. *Verh. Internat. Ver. Limnol.* 14: 678-680.
- OFIMA, 1991a: Inerente alla vuotatura del bacino di Palagnedra e a quella parziale del sistema sotto carico di Verbano - settembre 1991. *Programma di lavoro n. 3/5/91, Officine Idroelettriche d. Maggia S.A., 10 p.*
- OFIMA, 1991b: Impianto Verbano - Vuotatura e spurgo del bacino di Palagnedra (settembre). *Rapporto n. 4/26/91, Officine Idroelettriche della Maggia S.A., 27 p.*
- Petran, M., 1977: Ökologische Untersuchungen an Fließgewässern über die Beziehung zwischen Makrozoobenthos, Substrat und Geschiebetrieb. *Dissertation Universität Bonn.*
- Petts, G.E., 1984: Impounded Rivers; Perspectives for Ecological Management. *John Wiley & Sons, Chichester, 326 p.*
- Polli, B., 1990: Effets écologiques de la purge de la retenue du Carassina (Val Blenio, Canton du Tessin, Suisse). *Ingénieurs et architectes suisses* 18: 416-419.
- Pralong, R., 1987: Entschlammung von Staueisen bis 200 m Tiefe. *Wasserwirtschaft* 77/6.
- Rambaud, J. et al., 1988: Expérience acquise dans les vidanges de retenues par Électricité de France et la Compagnie Nationale du Rhône. *Commission Internationale des Grands Barrages. Seizième Congrès des Grands Barrages. San Francisco: 483-514.*
- Reiser, D.W. et al., 1989: Flushing flow recommendations for maintenance of Salmonid spawning gravels in a steep, regulated stream. *Regulated Rivers: Research & Management* 3: 267-275.
- Rey, P. und St. Gerster, 1991: Wissenschaftliche Begleitung "Spülung Grundablass Livigno-Stausee vom 7. Juni 1990"; Teil 4: Makroinvertebraten und Fische. *WNPK Arbeitsberichte zur Nationalparkforschung, 35 p.*
- Rey, P. und St. Gerster, 1992: Charakterisierung und Quantifizierung ökologischer Folgen von Stauespülungen in den Schweizer Alpen: Spülung des Bachbettes der Dranse de Bagnes sowie der Ausgleichbecken Grande Dixence und Mauvoisin in Fionnay, Kanton Wallis. *Institut f. angew. Hydrobiologie, Gutachten zHv BUWAL (Sektion Fischerei), 63 p.*
- Rofes, G. et M. Savary, 1981: Description d'un nouveau modèle de carottier pour sédiments fins. *Bull. Fr. Pisc.* 283: 102-113.
- Rofes, G. et al., 1991: Caractérisation des sédiments des retenues pour la prévision des risques écotoxicologiques liés aux vidanges. *Rev. Sci. Eau.* 4/1: 65-82.
- Rose, U., 1990: Beurteilung von Fließgewässerstrukturen aus ökologischer Sicht - Ergebnisse und Erfahrungen mit einer einfachen Methode. *Wasserwirtschaft* 80: 236-242.
- Schröder, W. und Ch. Theune, 1984: Feststoffabtrag und Stauraumverlandung in Mitteleuropa. *Wasserwirtschaft* 74, 7/8: 374-379.
- Seitz-Handl, K. und Th. Gerber, 1992: Bericht über den Makroinvertebratenbestand des Brenno 1992. *Auftrag der Holinger AG (Baden) zHv Dipartimento del Territorio del Cantone TI, 9 p.*
- Staub, E., 1986: Fischsterben in den Jahren 1974-1984 und ihre Hauptursachen. *Gas-Wasser-Abwasser* 66/3: 141-145.
- Symader, W. et al., 1991: Die zeitliche Dynamik des Schwebstofftransportes und seine Bedeutung für die Gewässerbeschaffenheit. *Vom Wasser* 77: 159-169.
- TKW/SAFE, 1990: Mittlere Salzach; Betriebsvorschrift für koordinierte Stauraumspülungen vom Rückstauraum Högmoos bis einschliesslich Bischofshofen. *Betriebsvorschrift der Tauernkraftwerke AG.*
- Vischer, D., 1981: Verlandung von Stauhaltungen und Speicherseen im Alpenraum. *Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie Nr. 53: 9-26.*
- Wahli, Th., 1985: Fischereiliche Schäden bei hohen Feststoffkonzentrationen in Fließgewässern. *Berichtsentwurf vom 30.11.1985 zHv Bundesamt für Umweltschutz, Sektion Fischerei, 41 p. (unveröffentl.).*
- Werth, W., 1988: Ökomorphologische Gewässerbewertungen in Oberösterreich. *Umwelt lernen* 39/40: 40-41.
- Wiegler, G., 1989: Theoretische und praktische Überlegungen zur ökologischen Bewertung von Landschaftsteilen, diskutiert am Beispiel der Fließgewässer. *Landschaft und Stadt* 21: 15-20.
- Wiesbauer, H. et al., 1991: Fischökologische Studie - Mittlere Salzach. *Gutachten im Auftrag der Tauernkraftwerke AG, 170 p.*