

Künstliche Hochwasser

Massnahme zur Beseitigung ökologischer Beeinträchtigungen
in Restwasserstrecken unterhalb von Speicherseen

Auslegeordnung Grundlagen & Handlungsbedarf



Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU)

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	6
1.1 Ausgangslage	6
1.2 Mandat und Ziele	6
1.3 Vorgehen.....	7
1.3.1 Grundlagen	7
1.3.2 Workshop.....	8
1.4 Systemabgrenzung	8
1.5 Rechtliche Grundlagen.....	9
2 Aktueller Wissensstand	11
2.1 Defizite unterhalb Speicherseen	11
2.2 Künstliche Hochwasser: Funktionen & Wirkung	12
2.3 Künstliche Hochwasser: Typen & Synergien	14
2.4 Erfahrungen mit künstlichen Hochwassern	17
2.4.1 Spöl.....	17
2.4.2 Übrige kHW in der Schweiz	17
2.4.3 KHW Ausland.....	18
2.5 Stand der Forschung.....	20
3 Planung & Umsetzung kHW.....	25
3.1 Erhebung Ist-Zustand.....	26
3.2 Festlegung Zielzustand	28
3.3 Erhebung der Defizite	28
3.4 Zielsetzung der Massnahme	29
3.5 Dimensionierung	30
3.5.1 Abflussspitze	32
3.5.2 Dauer	34
3.5.3 Zeitperiode	35
3.5.4 Häufigkeit	36
3.5.5 Abflussanstieg und -rückgang.....	36
3.5.6 Weitere Hinweise zur Dimensionierung	37
3.6 Rahmenbedingung	39
3.6.1 Technik.....	40
3.6.2 Sicherheit.....	41
3.6.3 Kosten.....	42
3.6.4 Unterlieger/Diverse	43
3.7 Durchführung	44
3.7.1 Vorkontrolle zur Überprüfung der Notwendigkeit.....	44
3.7.2 Vorbereitungsarbeiten.....	44
3.7.3 Durchführung des kHW.....	45
3.7.4 Wirkungskontrolle	45
3.8 Optimierungsprozess	48

4 Weiterführende Hinweise	49
4.1 Offene Fragen	49
4.2 Handlungsbedarf.....	49
4.3 Empfehlungen	50

5 Anhänge	51
------------------------	-----------

Anhang A	Referenzen
Anhang B	Rechtliche Grundlagen
Anhang C	Umleitstollen
Anhang D	kHW Spöl
Anhang E	kHW in der Schweiz

Impressum

Auftraggeber: Bundesamt für Umwelt (BAFU), Abt. [Wasser], CH-3003 Bern

Das BAFU ist ein Amt des Eidg. Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK).

Auftragnehmer: PRONAT Umweltingenieure AG und BG Ingenieure und Berater.

Autoren: Dr. Andreas Zurwerra (PRONAT), Dr. Tobias Meile (BG), Silvia Käser (PRONAT).

Begleitung BAFU: Martin Pfändler und Manuel Nitsche

Hinweis: Dieser Bericht wurde im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) verfasst. Für den Inhalt ist allein der Auftragnehmer verantwortlich.

Titelbild:

Künstliches Hochwasser, Kleine Saane FR (15.10 2016).

Zitiervorschlag:

Zurwerra A, Meile T. & Käser S.: Künstliche Hochwasser. Massnahme zur Beseitigung ökologischer Beeinträchtigungen in Restwasserstrecken unterhalb von Speicherseen. Auslegeordnung Grundlagen & Handlungsbedarf (PRONAT & BG, 2016).

Besten Dank an die Workshop-Teilnehmer: Bretz Nicola-V., Duarte Raphael, Dunand Isabelle, Elber Fredy, Gazeau Franz, Heusser Daniel, Hunzinger Lukas, Kevic Maja, Kirchhofer Arthur, Mendez Ricardo, Ortlepp Johannes, Perraudin Maurice, Raemy Jean-Claude, Robinson Christopher, Semadeni Nadia, Tonolla Diego, Weber Christine, Zuber Frédéric sowie die beiden Vertreter vom BAFU Nitsche Manuel und Pfändler Martin.

Inputs und die schriftlichen Rückmeldungen sind im vorliegenden Dokument eingearbeitet.

Sachbearbeitung	Koordination & Projektaufsicht
Dr. Andreas Zurwerra (PRONAT)	Dr. Andreas Zurwerra (PRONAT)
Dr. Tobias Meile (BG)	
Silvia Käser (PRONAT)	

Abkürzungen und Glossar

BAFU	Bundesamt für Umwelt
Deckschicht	Der Sortierprozess im Gewässer führt zu einer Vergröberung der Gewässersohle und einer Gleichrichtung der einzelnen Steine. Die Deckschichtbildung ist ein natürlicher Prozess, welcher sich in kanalisierten Abschnitten, bei Geschiebedefizit und bei fehlender HW-Dynamik verstärkt.
E-flow	Environmental flow Künstliche Hochwasser zur Wiederherstellung respektive zur Erhaltung des Zustands und der Funktionen von Fliessgewässer-Ökosystemen
EAWAG	Eidgenössische Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz
EPFL	Ecole polytechnique fédérale de Lausanne
Erfolgskontrolle	Wirkungskontrolle und Umsetzungskontrolle (BAFU, 2012)
ETHZ	Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
FEs	Flow experiments
GschG	Gewässerschutzgesetz
GschV	Gewässerschutzverordnung
Ist-Zustand	Der heute messbare Zustand im Gewässer (entspricht für die Planung dem Ausgangszustand)
kHW	Künstliches Hochwasser
KW	Kraftwerk
Laufgeschiebe	Geschiebe, welches über die stabile und allenfalls kolmatierte gröbere Sohle eines Gewässer transportiert, ab- und umgelagert wird
LCH	Laboratoire de Construction Hydrauliques
Lotisch	Schnell fliessende Gewässerbereiche
Morphogen	Auch bettbildend genannt. Ein morphogenes Hochwasser kann im Gewässer zu grossräumigen Änderungen des Längs- und Querprofils durch Umlagerung führen.
MSK	Modul-Stufen-Konzept (Modul Hydrologie)
MZB	Makrozoobenthos
nHW	Natürliches Hochwasser
Referenzzustand	Zustand vor anthropogenen Eingriffen (natürlicher Zustand vor den grossen Gewässerkorrekturen und der hydroelektrischen Wassernutzung)
RFID	Radio Frequency Identification
Sed-flow	Sedimental flow Künstliche Hochwasser mit Zugabe von Substraten bei fehlendem Sedimentkontinuum
Q	Abfluss
UNIL	Universität Lausanne
Uni ZH	Universität Zürich
VAW	Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie
Wirkungskontrolle	Teil der Erfolgskontrolle (BAFU, 2012) Umfasst die Prüfung der gewünschten Wirkung nach der Massnahme
WS	Workshop
ZHAW	Zürcher Hochschule für angewandte Wissenschaften
Zielzustand	Entspricht dem erreichbaren absehbaren Zustand

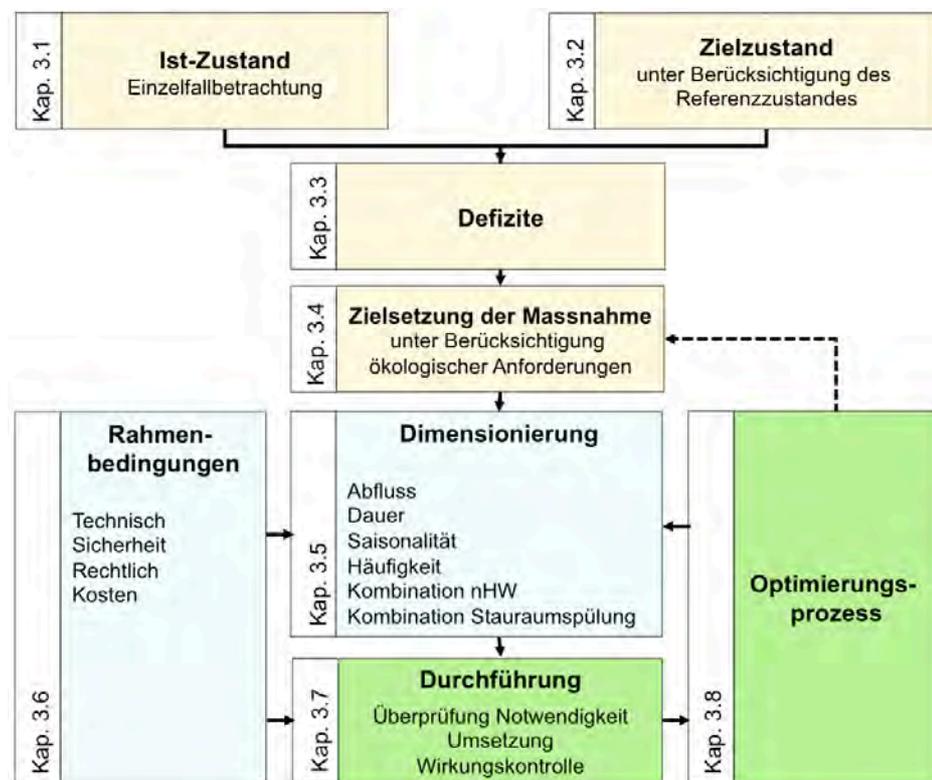
Zusammenfassung

kHW zur Sanierung
Geschiebehauhalt
und Restwasser

Künstliche Hochwasser sind mögliche Massnahmen zur Behebung ökologischer Defizite in Restwasserstrecken unterhalb grösserer Speichersseen mit stark verändertem Hochwasserregime (fehlende Hochwasser oder stark reduziert in Häufigkeit und Spitzenabfluss sowie Rückhalt von Feststoffen). Künstliche Hochwasser können zur Sanierung des Geschiebehauhalts (Art. 43a/83a GSchG) oder des Restwassers (Art. 31 ff/Art. 80 ff GSchG) angeordnet werden. Dabei sind Synergien mit Spülungen von Stauräumen (Art. 40 GSchG) zu prüfen.

Empfohlenes
Vorgehen

Der Wissensstand aus Praxis und Forschung zu künstlichen Hochwassern ist im vorliegenden Bericht zusammengetragen. Daraus wurde ein Ablaufschema für Planung und Umsetzung von künstlichen Hochwassern entwickelt. Die einzelnen Schritte sind in folgender Abbildung dargestellt und in den entsprechenden Kapiteln beschrieben.



Empfohlenes Vorgehen für Planung und Umsetzung von künstlichen Hochwassern.

Die Recherchen zeigen, dass für Planung und Durchführung von künstlichen Hochwassern die Einzelfallbetrachtung, die Festlegung der Zielsetzung unter Berücksichtigung der ökologischen Anforderungen, das vorsichtige Dimensionieren „von unten nach oben“ mit Einbezug der Rahmenbedingungen sowie die abiotische und biotische Wirkungskontrolle vor und nach der Durchführung des künstlichen Hochwassers, wichtig sind.

Definition Zielzustand

Die Definition des Zielzustandes entspricht meist nicht dem natürlichen Zustand, da dieser in der Regel nicht mehr hergestellt werden kann ist. Herausforderungen und Wissenslücken bestehen in der erstmaligen Dimensionierung sowie in der Beurteilung der langfristigen biotischen Wir-

kung, um wesentliche Beeinträchtigungen in der Restwasserstrecke gemäss dem GSchG zu beseitigen.

Erfahrungen mit KHW Weitere Erfahrungen, Hinweise und offene Fragen zur Planung und Durchführung von künstlichen Hochwassern am Spöl im Kanton Graubünden und spezifische Erfahrungen in der Schweiz sowie im Ausland, sind im vorliegenden Bericht ohne Anspruch auf Vollständigkeit zusammengetragen.

Mit der Auslegeordnung sollen Planung und Durchführung von künstlichen Hochwassern für Kantone und Kraftwerke erleichtert und Grundlagen für die Projektbeurteilung für den Bund geschaffen werden. Zudem soll die „Auslegeordnung künstliche Hochwasser“ die Vollzugshilfe „Sanierung Geschiebehalt – Massnahmen“ ergänzen.

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage

Weltweit ca.
850'000 Staudämme

Weltweit speichern Wasserkraftwerke 6'200 km³ Wasser hinter ca. 850'000 Staudämmen (Cook, 2015). Bau und Nutzung von Speicherkraftwerken beeinflussen das Abflussregime, wodurch der Geschiebetransport durch die Beeinträchtigung des Sedimentkontinuums stark eingeschränkt ist.

Ausbleibende
natürliche Hochwasser

Durch den Einfluss von Wasserkraftwerken werden natürliche Abflussspitzen gedämpft und Feststoffe zurückgehalten, was nachteilige Auswirkungen auf die Ökologie mit sich bringt (BAFU, 2011). Natürliche, geschiebeführende Hochwasser (nHW) sind jedoch nötig, um durch den Geschiebetransport langfristig die Habitatvielfalt zu gewährleisten. Zudem kann besonders bei Auen eine fehlende Wasserstandsdynamik infolge ausbleibender Hochwasserabflüsse problematisch sein.

kHW zur Geschiebe-
& Restwasser-
sanierung

Durch künstliche Hochwasser (kHW) kann in Restwasserstrecken Geschiebe wieder umgelagert und die Sohle dekolmatiert und aufgelockert werden. Geschiebedefizite können behoben werden. Detaillierte zusammenfassende Grundlagen zur Durchführung von kHW sind zum aktuellen Zeitpunkt kaum vorhanden.

Wirkungen durch kHW

Durch kHW mögliche Wirkungen sind:

- Erhöhung von Abfluss und Dynamik,
- Dekolmation der Gewässersohle,
- Strukturierung des Gewässerbettes,
- Umlagerung des Sohlensubstrates und der Sedimente,
- Seitenerosion der Ufer,
- Erneuerung von Pionierhabitaten,
- Überflutung der Ufervegetation (Förderung überflutungsresistenter Arten).

1.2 Mandat und Ziele

Mandat

Am 1. März 2016 wurden die Büros PRONAT und BG vom BAFU, Abteilung Wasser, Sektion Sanierung Wasserkraft beauftragt, eine Auslegeordnung zu kHW und Geschiebe zu erstellen. Die Auslegeordnung erfasst vorhandene Grundlagen, Stand der Forschung und Beispiele aus der Praxis, um Wissenslücken und Handlungsbedarf aufzuzeigen. Die folgenden Empfehlungen und Vorschläge stellen eine zusammenfassende Sichtweise der Autoren unter Berücksichtigung der Befragungen, des Workshops und der gemachten Erfahrungen im In- und Ausland dar.

Ziel

Die Empfehlungen und Erfahrungen sollen die Planung und Durchführung von kHW erleichtern, die Verfassung von Sanierungsverfügungen für Massnahmen der Kantone unterstützen und Grundlagen zur Projektbeurteilung für den Bund schaffen.

Die Ergebnisse können als Unterstützung für die Umsetzung der Sanierung des Geschiebehaushalts bzw. der Restwassersanierung für Kan-

tone, Kraftwerke und den Bund sowie als Input für die Vollzugshilfe „Sanierung Geschiebehaushalt – Massnahmen“ verwendet werden.

1.3 Vorgehen

Vorgehen

Mittels Befragungen wurden Daten zu den durchgeführten, geplanten und abgeschlossenen Projekten aus der Praxis sowie zur Forschung im In- und Ausland erhoben.

Am 6. Juni 2016 wurde in Bern ein Workshop zur Vertiefung und Ergänzung der erhobenen Grundlagen der Befragung durchgeführt.

Im vorliegenden Bericht sind die erhobenen Grundlagen und die heutigen Erkenntnisse zusammengefasst.

1.3.1 Grundlagen

Erhebung

Die Erhebung der Grundlagen aus Praxis und Forschung erfolgte mittels Fragebogen oder Interviews im Frühjahr 2016.

Langfristige Erfahrungen

Langjährige Erfahrungen mit kHW am Spöl wurden zusammenfassend aufgearbeitet.

Fragebogen kantonale Projekte

Um eine Übersicht der kHW der Kantone zu erhalten, wurden im März 2016 Fragebogen an 14 kantonale Fachstellen verschickt. Die gemeinsame Auswahl der Kantone mit dem BAFU basiert auf den Anlagen mit Sanierungsbedarf gemäss der Strategischen Planungen (BAFU, 2015a). Erhoben wurden die bisherigen Erfahrungen und der Handlungsbedarf zur erfolgreichen Durchführung von kHW.

Tab. 1.1: Auswahl befragte Kantone (Fragebogen) zu kHW.

Bern	Neuenburg	Uri
Freiburg	Obwalden	Waadt
Glarus	Schwyz	Wallis
Graubünden	St. Gallen	Zürich
Luzern	Tessin	

Befragung Kantone & Kraftwerke

Detaillierte Befragungen wurden mit dem Wallis (Vertreter des Kantons, Ingenieurbüros und Kraftwerke) und dem Kraftwerksbetreiber Axpo geführt, um den Wissenstand aus den Fragebögen zu vertiefen, sowie Schwierigkeiten und Bedürfnisse zu erfassen.

Forschung Inland

Dazu wurden Wasserbau-, Geomorphologie- und Ökologieexperten der Schweizer Forschungsinstitute EAWAG (Prof. Dr. Christopher Robinson), VAW ETHZ (Dr. David Vetsch), UNIL (Prof. Dr. Stuart Lane), und von der LCH (Prof. Dr. Anton Schleiss) befragt. Diskutiert wurden aktuelle Forschungsfragen, Schnittstellen zu kHW, Wissenslücken und Forschungsfragen im Zusammenhang mit kHW. Inputs zum Vorgehen für Planung und Umsetzung von kHW ergänzten die Befragung.

Forschung Ausland	<p>Informationen zur Forschung im Ausland wurden durch schriftliche Befragungen, direkte Kontakte und durch die Auswertung der Literatur, ohne Anspruch auf Vollständigkeit, eingeholt. Der Fokus lag im nahen Ausland (Frankreich, Deutschland, Österreich).</p>
	<p>1.3.2 Workshop</p>
Workshop	<p>Am 6. Juni 2016 wurde in Bern in Zusammenarbeit mit dem BAFU ein halbtägiger Workshop organisiert. Am Workshop nahmen insgesamt 20 Vertreter von Bund, Kantone, Forschung, Kraftwerken, Privatbüros und NGO's teil.</p> <p>Der Workshop diente der Vertiefung von zwei Schwerpunkten:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Dimensionierung eines ersten kHW für Geschiebemaßnahmen: Planung/Projektierung und Sicherheit/Verantwortlichkeiten. • Optimierungsprozess: Umsetzung/Durchführung und Wirkungskontrolle. <p>Stellungnahmen der Teilnehmer aus dem Workshop und zum Entwurf der Auslegeordnung wurden in diesem Bericht integriert.</p>
	<p>1.4 Systemabgrenzung</p>
Zielobjekt	<p>Zielobjekte sind Restwasserstrecken kleinerer und mittlerer Fließgewässer unterhalb grösserer Speicherseen. In diesen Strecken treten je nach Grösse des Speichersees keine oder stark reduzierte (Häufigkeit oder Grösse) natürliche Hochwasserabflüsse mit geringer Dynamik des Geschiebehalt auf.</p>
Begriffserläuterung kleinere und mittlere Fließgewässer	<p>Im vorliegenden Bericht werden die Begriffe „kleinere“ und „mittlere“ Fließgewässer für Gewässer im Gebiet der Alpen- und Voralpen verwendet, wie bspw. der Spöl (GR), die Kleine Saane (FR) oder Seitengewässer der grossen Talflüsse wie Rhone, Alpenrhein oder Ticino.</p>
Speicherseen & Ausgleichsbecken	<p>Speicherseen umfassen Anlagen, welche die Möglichkeit haben, kHW durchzuführen. Sie weisen als Wochen- und Jahresspeicher ein ausreichendes Speichervolumen auf, um die Wassermenge für ein kHW bereitzustellen. Bei ausreichendem Volumen oder Zufluss sind kHW ab Ausgleichsbecken ebenfalls möglich.</p>
Abgrenzung	<p>Im Rahmen der vorliegenden Studie nicht behandelt werden:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Kleine Stauanlagen, bei welchen auf Grund des Volumens die Hochwasserentlastung regelmässig und mit ausreichendem Abfluss anspricht (Überlauf) und bei welchen durch die Geschiebemobilisierung und -dynamik die Abiotik und Biotik im Unterwasser kaum beeinträchtigt sind, • Regelmässige Stauraumpülungen um Verlandungen zu verhindern, das Speichervolumen zu erhalten und die Betriebsfähigkeit der Regulierorgane zu gewährleisten.

1.5 Rechtliche Grundlagen

Schnittstellen

Künstliche Hochwasser stellen einen Massnahmentyp dar, der sowohl zur Erfüllung der Restwassergesetzgebung als auch zur Erfüllung der gesetzlichen Bestimmungen zum Geschiebehaushalt geeignet sein kann (s. Abb. 1.1). Dabei ist die Kombination mit Spülungen und Entleerungen des Stauraums zu prüfen.

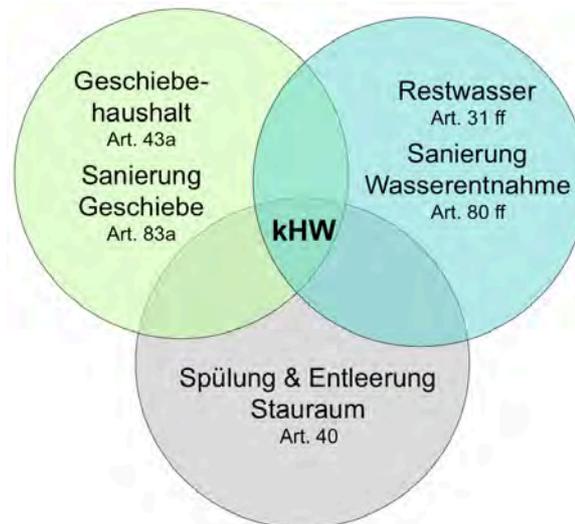


Abb. 1.1: Schnittstellen und rechtliche Grundlage für Anordnung/Verfügung von künstlichen Hochwassern.

Zweck eines kHW

Ob es sich bei einem kHW um eine Massnahme zur Sanierung Restwasser oder zur Sanierung des Geschiebehaushalts handelt, bestimmt sich nach dem Ziel der Massnahme:

- a. Wird das kHW angeordnet, um Geschiebe zu mobilisieren und eine wesentliche Beeinträchtigung des Geschiebehaushalts in der Restwasserstrecke zu beseitigen, handelt es sich um eine Geschiebemasnahme im Sinne von Art. 83a i.V.m. Art. 43a GSchG,
- b. Wird ein kHW angeordnet, um ein Restwasserdefizit zu beheben (z.B. fehlende Wasserstandsdynamik in einer Aue in der Restwasserstrecke), handelt es sich um eine Restwassermassnahme im Sinne von Art. 80 GSchG (Sanierung Restwasser) oder um Art. 31 ff GSchG (Festlegung Restwasser Neukonzessionierung oder Konzessionserneuerungen).

Da Restwassersanierungen nicht über Swissgrid entschädigt werden, ist nur im Fall a) die Voraussetzung für eine Entschädigung gegeben. In Fällen, bei denen ein kHW beiden Zielen dient, ist festzulegen, in welchem Umfang das kHW für die eine und die andere Zielsetzung notwendig ist. Falls der erforderliche Umfang für Zweck a) grösser ist als für Zweck b), kann der «Mehrumfang» entschädigt werden.

kHW Sanierung Geschiebehaushalt	Dient ein kHW ausschliesslich dazu, die Beeinträchtigung des Geschiebehaushalts zu beseitigen (Fall a) kann sie grundsätzlich unabhängig von der Festlegung der Restwassermenge angeordnet werden. Bei einer Konzessionserneuerung ist jedoch zu überprüfen, ob die Höhe der Finanzierung aufgrund der erhöhten abzugebenden Restwassermenge angepasst werden muss (Reduktion der Erlöseinbussen aufgrund Geschiebemasnahme).
kHW & Kies- schüttungen	Weiter können als Zusatzmassnahme zum kHW ergänzend Kies-schüttungen nötig sein, damit ausreichend geeignetes Geschiebe vorhanden ist, das durch das kHW in der Gewässerstrecke transportiert und umgelagert werden kann.
kHW & Stauraum- spülungen	Überdies ist bei kHW zu beachten, ob der Kraftwerksinhaber auch Stauraumspülungen durchführen muss, die mit kHW kombiniert werden können. In solchen Fällen sind nur die Kosten für Massnahmen anrechenbar, die über diese zwingenden Spülungen hinausgehen, um das Sanierungsziel gemäss Art. 43a GSchG zu erreichen.

Im Anhang B sind die massgebenden gesetzlichen Bestimmungen auf Bundesstufe gemäss folgender Gliederung aufgeführt:

- a) Rechtliche Grundlagen aus dem Restwasserbereich,
- b) Rechtliche Grundlagen aus dem Bereich Geschiebehaushalt,
- c) Rechtliche Grundlagen zu Stauraumspülungen,
- d) Weitere kHW-relevante rechtliche Grundlagen.

2 Aktueller Wissensstand

2.1 Defizite unterhalb Speicherseen

Die Rückhaltungswirkung der Speicherseen führt zur Reduktion oder zum Fehlen folgender dynamischer Prozesse in Restwasserstrecken:

- Fehlende Hochwasserdynamik,
- Fehlende Umlagerungsdynamik,
- Eingeschränkter Geschiebetransport,
- Vereinheitlichte und reduzierte Strömung/Schubspannung,
- Fehlende Mobilisierung der Schwemmkegel aus Einträgen von Seitengerinnen.

Diese fehlenden Prozesse können in Restwasserstrecken folgende Defizite verursachen:

Abiotische Defizite

Gewässersohle

- Eintiefung des Gerinnes (Kondolf, 1997),
- Abpflasterung und Vergrößerung des Sohlsubstrats (Poff et. al., 1997),
- Vereinheitlichung des Sohlsubstrats durch fehlende Erosions-, Umlagerungs- und Ablagerungsprozesse,
- Kolmation des Flussbettes durch fehlende Umlagerung (Robinson et. al., 2003),
- Das Gewässerbett entspricht nicht mehr dem ursprünglichen naturnahen Zustand.
- Versinterung und Kalkablagerungen auf der Sohloberfläche.

Ufer und Uferterrassen

- Fehlende laterale und longitudinale Vernetzung,
- Ausbleiben von Übersarungen mit Erneuerung der Habitatstrukturen (z.B. Holzdepots, Mulden),
- Verringerung oder Banalisierung der Erosions- und Steilufer.

Biotische Defizite

Verminderung oder Verlust von Habitaten (Lebensräumen)

- Verschiebung des Habitatangebotes von Sohl- zu Uferhabitaten (grössere Fließgewässer),
- Beeinträchtigungen der Interstitial-Habitate (durch Kolmation),
- Verlust lotischer Habitate (eher kleinere und mittlere Fließgewässer),
- Beeinträchtigungen oder Verluste von amphibischen und terrestrischen Pionierhabitaten,
- Reduktion der Habitatvielfalt durch:
 - fehlende Variabilität der Fließgeschwindigkeiten und Wassertiefen,
 - Vereinheitlichung der biogenen Substrate (Kies, Holz, etc.),
 - Kolmation, übermässiger Algenbewuchs.

Veränderung der Lebensgemeinschaften von Tieren & Pflanzen

Fische

- Abnahme der Artenzahl (NWS, 2010),
- Ungeeignetes Laichsubstrat und Abnahme geeigneter Laichplätze. Kolmation verhindert Durchlüftung des Substrats (Mürle et al., 2003),
- Veränderung der Konkurrenzsituation.

Makrozoobenthos

- Veränderung der benthischen Fauna durch Abnahme von weniger strömungsresistenter Taxa (z.B. *Gammarus*) und Zunahme von strömungsresistenter Taxa (z.B. *Baetis*; Robinson, 2012),
- Veränderungen der qualitativen und quantitativen Benthoszusammensetzung (Cook, 2015),
- Aquatische Wirbellose mit Vorlieben für langsam fliessende und wärmere Gewässer (*Gammarus* oder Chironomidae) nehmen im Vergleich zu strömungsliebenden und an kältere Temperatur angepasste Lebewesen zu (z.B. Eintagesfliegen; Uehrlinger et. al., 2002; Robinson, 2012),
- Veränderung der Konkurrenzsituation: Massenentwicklung von störungsanfälligen Arten und gleichzeitiger Rückgang von störungsangepassten Arten zu Gunsten von ubiquitären Arten.

Vegetation/Bewuchs

- Starke Ausbreitung von Algen und Moosen (Robinson, 2012),
- Zunahme der Vegetation auf Inseln und Kiesbänken (erschwert bzw. verunmöglicht die Umlagerung von Kiesbänken),
- Reduktion der aulentypischen Vegetation (Weichholzarten) und Zunahme der Hartholzauen,
- Veränderung der Konkurrenzsituation.

2.2 Künstliche Hochwasser: Funktionen & Wirkung

KHW zur Defizit -
Behebung

Die Behebung der Defizite kann durch unterschiedliche Sanierungsmassnahmen erfolgen (s. Tab. 2.1). Es ist im Einzelfall zu prüfen, ob kHW eine geeignete Sanierungsmassnahme zur Behebung des Defizits sind und ob Geschiebezugaben mit kHW kombiniert werden sollten, um z.B. einer Erosionstendenz entgegenzuwirken (s. Kapitel 2.3, Typ 2).

Tab. 2.1: Geeignete Massnahmen zur Behebung der Defizite gemäss Kap. 2.1.

	Restwasser- management	kHW	Wasserbau- liche Massnahme n	Geschiebe zugabe
Anpassung Restwassermenge	x			
Anpassung Restwasserdynamik	x			
Zulassen/Erzeugen von Störungen	x	x		
Anpassung Gewässermorphologie	x	x	x	
Geschiebe- management		x	x	x

Funktionen kHW

Die Abflussspitze des kHW steuert die maximale Geschiebetransportkapazität und damit die mögliche Grössenordnung morphologischer Veränderungen (Abb. 2.1). KHW können dabei folgende Funktionen haben:

Während bei kleinen Abflüssen kaum Feststofftransport stattfindet, werden bei zunehmendem Abfluss Feinpartikel und Feingeschiebe transportiert (Putzen¹), lokale Geschiebeablagerungen und Kiesbänke mobilisiert (Umlagern²) und die Deckschicht lokal oder flächig bewegt und die innere Kolmation verringert (Aufreissen³). Nach Aufbrechen der Deckschicht können bei weiter zunehmendem Abfluss auch grossräumigere, morphogene Prozesse einsetzen.



Abb. 2.1: Wirkung künstliche Hochwasser.



Abb. 2.2: Wirkung der künstlichen Hochwasser am Spöl (Fotos: Mürle, 2003).

Wirkung kHW

- 1 Putzen: Feinsedimentablagerungen werden mobilisiert.
- 2 Umlagern: Geschiebeumlagerung durch Erosions-, Transport- und Ablagerungsprozesse.
- 3 Aufreissen: Größere Komponenten der Deckschicht werden mobilisiert. Bei starker Abpflasterung oder Kolmation wird die Deckschicht aufgebrochen.

Welche Wirkung ab welcher Abflusshöhe einsetzt, ist gewässer-spezifisch und abhängig von der lokalen Hydraulik. Die Reihenfolge zwischen Umlagern und Aufreissen kann sich in einzelnen Fällen ändern. Bei verhältnismässig kleinen Abflüssen wird in der Regel Laufgeschiebe bewegt und umgelagert. Erst bei grösseren Abflüssen wird Geschiebe aus der Gerinnesohle und durch Ufererosion mobilisiert. Die Wirkung von kHW ist, je nach Morphologie des Streckenabschnittes unterschiedlich.

In höher gelegenen Umlagerungsstrecken (in den Seitentälern unterhalb der Speicher mit Längsgefällen bis ca. 2 %) und in Talstrecken mit Längsgefällen bis ca. 0.5 % verlaufen die Prozesse mit zunehmendem Abfluss i.d.R. gemäss Abb. 2.1 von „Putzen“ bis „Morphogen“. Inwiefern das „Aufreissen“ und grossräumige morphogene Prozesse zulässig sind, hängt von Sicherheitsaspekten (Sohlenabtiefung, Seitenerosion) und der Raumnutzung (angrenzende und querende Infrastruktur) ab.

In kaskadenartigen, grobblockigen Gewässerabschnitten mit Längsgefällen ab 3 % bis 5 % umfasst die Wirkung bei steigendem Abfluss das „Putzen“ und das „Umlagern“ von kleinen bis mittleren Geschiebeablagerungen (Laufgeschiebe). Mit dem "Aufreissen" der Kaskade setzen morphogene Prozesse ein, die aus Stabilitätsgründen die erwünschte Wirkung des kHW übersteigen.

2.3 Künstliche Hochwasser: Typen & Synergien

In Tab. 2.2 sind mögliche Typen zur Durchführung von kHW mit Geschiebereaktivierung aufgezeigt. Die Nummerierung bezieht sich auf Abb. 2.3.

Tab. 2.2: Typen künstlicher Hochwasser gemäss Erfahrungen der Schweiz.

Nr.	Typen	Beschreibung	Eignung
1	Reine kHW	nur Wasserabgabe aus Stauraum	Ausreichend mobilisierbares Geschiebe in der Restwasserstrecke vorhanden
2	kHW mit Geschiebezugabe	Geschiebezugabe (extern zugeführt oder lokal gewonnen)	Ausreichend mobilisierbares Geschiebe in der Restwasserstrecke fehlt (z.B. Kleine Saane), abgeplästerte Sohle ohne Laufgeschiebe oder Sohlenerosion vorhanden
3	kHW mit Initiierung	Mechanisches Aufreissen/Auflockerung von Geschiebeterrassen, Initialmassnahmen Ufer, Entfernen von Stauden und Sträuchern auf Kiesbänken	Kiesbankstrecken und Auenflächen (Achtung: Verträglichkeit mit Schutzgebieten und Waldgesetzgebung)

Im Anhang C sind Umleitstollen an Speicherkraftwerken bzw. Speicheranlagen der Schweiz aufgeführt (Stand April 2016). Im Jahr 2017 wird zu diesem Thema ein Merkblatt aus dem Forschungsprogramm Wasserbau & Ökologie veröffentlicht (BAFU, 2017; in Vorbereitung).

An den im Anhang aufgeführten Umleitstollen wurden bisher noch keine KHW zur Mobilisierung allfälliger Ablagerungen der Einleitstelle des Umleitstollens in das Unterwasser durchgeführt. Die beschriebene Synergie ist als Idee zur fallspezifischen Mobilisierung im Unterwasser je nach Auslegung des Umleitstollens zu verstehen.

- **KHW mit Geschiebezugaben aus der Stauwurzel des Sees:** Durch die Verzögerung der Verlandung erhöht sich die Lebensdauer des Speichers leicht. Weiter kann dadurch das Erosionsrisiko von Bauwerken unterhalb des Stausees infolge Geschiebedefizit minimiert werden.

2.4 Erfahrungen mit künstlichen Hochwassern

2.4.1 Spöl

Langjährige Erfahrung

Am Spöl werden seit 2000 kHW durchgeführt. Die Erfahrungen mit kHW mit Geschiebeaktivierung aus den Seitengerinnen als Massnahmen zur Erfüllung der Restwassergesetzgebung sind im Anhang D zusammenfassend beschrieben.

Die Übertragung der Ergebnisse und Erkenntnisse auf weitere Projekte der Schweiz mit ähnlichen Bedingungen ist prinzipiell möglich. Aufgrund der vergleichsweise naturnahen Bedingungen im Unterwasser (unbewohnt, nicht verbaut) ist zu beachten, dass die Rahmenbedingungen die Durchführung des kHW am Spöl im Nationalpark weniger stark einschränken als in anderen Gebieten der Schweiz.

2.4.2 Übrige kHW in der Schweiz

Aktuell in 4 Kantonen
an 6 Gewässern

Die folgenden Resultate basieren auf den Erhebungen der Fragebögen und Befragungen der Kantone und Kraftwerke. Lücken sind möglich.

kHW werden hauptsächlich in Gebirgskantonen und im voralpinen Raum durchgeführt. Zum Zeitpunkt der Erhebung (April 2016) führen gemäss Rückmeldungen vier Kantone (FR, GR, SG, VS) an insgesamt sechs Fliessgewässern kHW durch, welche fortgeführt und teilweise optimiert werden (s. Anhang E).

An weiteren 11 Fliessgewässern (zusätzlich VD, SG, TI) sind kHW in Planung.

Im Kanton Graubünden und Tessin ist aufgrund von besonderen Verhältnissen die Planung der weiteren Anlagen gemäss Anhang 4a Ziffer 3 Bst. c GSchV noch nicht abgeschlossen. Möglicherweise werden auch in diesen Kantonen kHW als Geschiebemaassnahme ausgeschrieben.

Erfahrungen Schweiz

Mit Ausnahme vom Spöl gibt es an Schweizer Gewässern der Voralpen und Alpen kaum vergleichbare Projekte mit langjähriger Erfahrung (Koechlin, 2014). Im Anhang E sind die kHW der Schweiz aufgelistet.

- An der Tamina im Kanton St. Gallen werden seit 1997 kHW durchgeführt. Diese dienen hauptsächlich der Hochwassersicherheit, indem unerwünschte Ablagerungen mobilisiert werden, um den gewünschten Abflussquerschnitt beizubehalten.
- Im Kanton Wallis wurden zur Erfüllung der Restwassergesetzgebung kHW im Grossen Wasser, an der Gougera und an der Lienne durchgeführt.
- Ein kHW mit Geschiebezugabe zur Erfüllung der gesetzlichen Bestimmungen zum Geschiebehaushalt wurde am Jaunbach (Jogne) im Kanton Freiburg durchgeführt.

Das jüngste kHW wurde am 14./15. September 2016 an der Kleinen Saane im Kanton Freiburg unterhalb Rossens im Rahmen des Projektes Hydro-Ecology and Floodplain Sustainability in Application (HyApp) in Zusammenarbeit mit der ZHAW, EPFL, Uni ZH und EAWAG durchgeführt.

In der Restwasserstrecke sowie in der unterliegenden Schwallstrecke wurden folgende Aspekte untersucht:

- Veränderung der Fläche, Lage und Volumen von Kiesbänken und Kiesdepots (mittels Drohnenflüge vor und nach dem kHW und geoinformatischen Auswertungen),
- Messung des Transportwegs von Substraten verschiedener Korngrößen mittels RFID,
- Hydraulische Modelle zur Überprüfung der Ausbreitung des kHW (Abfluss) und des Geschiebetransports,
- Verschiedene ökologische Untersuchungen (Makroinvertebraten, Mikroben und Prozesse, Vegetation mit Remote Sensing).

Die Dimensionierung des kHW im September 2016 erfolgte auf Basis des nHW vom Juli 2014. Damals musste die Hochwasserentlastung in Rossens aufgrund des hohen Wasserstandes geöffnet werden. Durch die positiven Erfahrungen (Entfernung der Algen und Kolmation im Unterlauf) wurde für das kHW 2016 mit max. 255 m³/s die 100-fache Restwasserabflussmenge festgesetzt.

Die Auswertung des kHW im Rahmen des Projektes Hydro-Ecology and Floodplain Sustainability in Application ist in Erarbeitung.

Unterschiedliche Typen von kHW in der Schweiz

KHW können gemäss den unterschiedlichen Typen gemäss Tabelle 2.2 in Kap. 2.3 durchgeführt werden.

Rückmeldungen der Kantone zur Durchführung von unterschiedlichen Typen von kHW erfolgten nur vereinzelt:

- Typ 2 kHW mit Geschiebedepot: Kleine Saane
- Typ 3 kHW mit Initiierung: Kleine Saane
- Typ 5 kHW Kombination Spülung: Jaunbach und Gougera

Abstimmung mit nHW

Am Jaunbach wird ein Hochwasser pro Jahr als ausreichend erachtet. Erfolgt ein nHW, wird in diesem Jahr nicht noch zusätzlich ein kHW durchgeführt. Dieselben Diskussionen werden auch beim Grossen Wasser geführt und kHW erst bei festgestellten ökologischen Defiziten infolge fehlender nHW im Gewässer durchgeführt. Die Notwendigkeit der Durchführung erfolgt auf Wasserbilanzen der Überläufe sowie auf einer Ortsschau kritischer Stellen durch externe Fachpersonen.

2.4.3 KHW Ausland

Erfahrungen weltweit

Grossräumige Abflussexperimente (*large-scale flow experiments; FEs*) wurden weltweit an 100 Staudämmen in 20 Ländern durchgeführt, um ökologische Funktionen aufrecht zu erhalten (Olden, 2014). FEs werden hauptsächlich in den USA und Teilen Australiens durchgeführt. Vergleichsweise wenig Erfahrung scheint im Alpenraum vorhanden zu sein (s. Abb. 2.4).

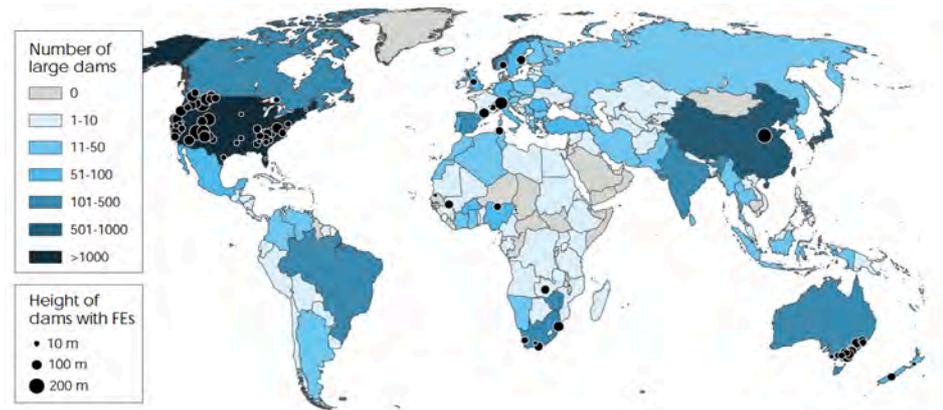


Abb. 2.4: Durchgeführte *large-scale flow experiments*. FEs = Flow Experiments (Quelle: Olden 2014).

Beispielhaft sind folgende FEs aufgeführt:

- Entlang dem mittleren Rio Grande in New Mexico wurden kHW 1993, 1994 und 1995 jeweils am 31. Mai zur kontrollierten Flutung von Auenwald Ökosystemen durchgeführt (Molles et al, 1998).
- Am Glen Canyon Dam am Colorado River (USA) wurde 1996 eines der ersten kHW realisiert, um der Entwicklung von gebietsfremder Flora, fehlenden Sandbänken sowie der Abpflasterung und Vergrößerung des Sohlssubstrats entgegen zu wirken (Collier et. al., 1998). Während neun Tagen wurde der Abfluss auf $1'270 \text{ m}^3/\text{s}$ erhöht (kleinerer Abfluss als natürliches HW; Patten et al., 2001). Bis 2012 wurden drei weitere FEs zur Sedimentmobilisierung und Wiederherstellung der Habitate durchgeführt (Cook, 2015).
Der Kontext ist zwar mit den Zielgewässern dieser Studie nicht vergleichbar, die Untersuchungen haben gezeigt, dass das Hydrogramm des kHW auf Sedimentmenge und Korngrösse abzustimmen ist. Nur so können Sandbänke optimal geschaffen werden (Topping et al., 2010).
- Am Snowy River (Australien) werden seit 2002 sogenannte ökologische Flutungen zur Geschiebereaktivierung und Verhinderung von Habitatsverlust heimischer Pflanzen und Tieren durchgeführt (NSW, 2010).
- Am Opuah River (Neuseeland) reduzieren kHW die Periphyton-Bedeckung (NIWA, 2007).
- In Japan, mit über 3000 Staudämmen, wurden in den letzten Jahren an ca. 40 Staudämmen Massnahmen zur Wiederherstellung des Sedimentkontinuums mittels mechanischer Zugabe aus den Speichern in mittelgrossen Fließgewässern ergriffen (Kantoush und Sumi, 2010). Geschiebedepots werden durch nHW oder kHW im Gerinne transportiert und umgelagert. Hauptziele der Massnahmen sind: Funktionstüchtigkeit der Stauanlagen und Verbesserung der Bedingungen der Gewässer im Unterlauf vor dem Hintergrund der Nachhaltigkeit der Stauanlage und des Gewässer-Ökosystems. Das Resultat der durchgeführten Massnahmen reicht von Misserfolgen bis zu sehr erfolgreichen Fällen. Massnahmen, welche zu Misserfolgen geführt haben, werden wieder aufgenommen und optimiert. In Japan gemachte Erfahrungen zeigen, dass auch Sedimentüberschuss (nicht nur Sedimentdefizit) unterhalb des Speichers zu negativen Auswirkungen im Gewässer führen kann.

Erfahrungen
Nachbarländer

- In Frankreich werden seit 2007 an der Durance kHW mit dem Ziel der Beseitigung der inneren und äusseren Kolmation durchgeführt. Der Gewässer führt viel Feinsedimente, doch haben die geschiebeführenden Hochwasser infolge der Staudämme stark abgenommen. Die kHW werden biologisch und morphologisch begleitet und von Jahr zu Jahr auf Basis eines Protokolls angepasst (s. auch Forschung Ausland).
- In Deutschland wird am Sylvensteinspeicher versucht, durch eine Modifizierung der Hochwasserabgabe, ähnlich einem kHW, das Geschiebe zu mobilisieren und durch Staulegung am nächstfolgenden Wehr (Bad Tölz) weiter flussabwärts zu transportieren (s. auch Forschung Ausland).

2.5 Stand der Forschung

Bestrebungen an
beeinflussten
Gewässern

Drei Forschungsrichtungen sind relevant für Sanierungen von beeinflussten Gewässern durch Massnahmen wie beispielsweise kHW:

- 1) Forschungen Entwicklung der Morphologie unterhalb von Dämmen,
- 2) Forschungen Einfluss eines modifizierten Abflussregimes auf die Vegetationsentwicklung,
- 3) Forschungen zur ökologischen Antwort im Gerinne auf morphologische Veränderungen.

Es zeigt sich, dass dabei Langzeiteffekte massgebend sind (Petts and Gurnell, 2005).

Grossräumigen
Abfluss-Feldversuche
(z.B. kHW)

Im Zusammenhang mit grossräumigen Abfluss-Feldversuchen, wie beispielsweise kHW, nennt Konrad et al. (2011) fünf Herausforderungen:

- 1) kHW sind Steuerungsmassnahmen, welche nicht vom sozialen und wirtschaftlichen Umfeld getrennt werden können.
- 2) kHW und die Wirkung derselben umfassen verschiedene Zeitskalen.
- 3) kHW fügen sich in Gewässersysteme mit starken longitudinalen und lateralen Zusammenhängen ein.
- 4) Zerstückelung/Isolation und weitere limitierende Faktoren können den Erfolg kHW erschweren.
- 5) Gewöhnungseffekte der Biotik an kHW sind möglich.

Schnittstellen kHW
und Forschung

Aktuelle Forschungen weisen diverse Schnittstellen zu kHW auf, wenn auch die einzelnen Forschungsfragen nicht direkt kHW betreffen:

- Thema Hydrologie: Abflussregime; Abflussspitze, Häufigkeit, Dauer, Saisonalität und Änderungsraten von Hochwassern; Nachahmung natürliches Hochwasserregime durch kHW (in der Forschung auch e-flows genannt).
- Thema Geschiebe: Verlandungsproblematik von Stauseen; Geschiebedurchgängigkeit von Stauseen und Stauhaltungen; Erosions-, Transport- und Ablagerungsprozesse in Gerinnen, Morphodynamik von Fliessgewässern; Geomorphologie in Einzugsgebieten. Nachahmung natürliches Geschieberegime durch kHW (in der Forschung auch sed-flows genannt).
- Thema Gewässerökologie: Wechselwirkung Hydraulik – Morphologie – Habitate – Ökologie.
- Thema numerische Modelle: Die Forschungs- und Entwicklungsprojekte von numerischen Modellen dienen indirekt der Dimensionierung

von kHW und dem Verständnis der Wechselwirkung Hydraulik – Morphologie – Habitate.

Aktuelle Forschung
in der Schweiz

Die aktuell relevanten Forschungsprojekte mit Bezug zu kHW sind:

Tab. 2.3: Forschungsprojekte Inland.

Forschungsprojekt	Relevanz kHW
LCH, EPFL, Elena Battisacco: Replenishment of sediment downstream of dams – Erosion and transportation process of artificial deposits.	Wie sind Geschiebedepots anzulegen? Geschiebe wird als Cluster transportiert. Tests an der Saane. Depotbänke müssen ca. gleich hoch sein wie Hochwasserstand, was zur grössten Effizienz für die Verteilung führt. Zielgewässer: 0.5 % bis 1 % (max. 2 %) Gefälle, d_m ca. 2.4 cm.
LCH, EPFL, Severin Stähly: Hydro-Ecology and Floodplain Sustainability in Application	Morphologischer Index. Numerische Simulationen. Vergleichsgewässer Sense: Wie verhält sich der Index bei natürlichem Geschieberegime? Untersuchungen Saane: was tun, um Sohlenhöhe zu halten und Strukturvielfalt zu fördern?
LCH, EPFL, Sebastian Schwindt: New bed load trap design in order to allow sediment transfer during morphological floods.	Sedimentkonnektivität: Geschiebe- sammler sind so zu konzipieren, dass sie lediglich im Fall von Hochwassern wirksam werden, die für flussabwärts gelegene Siedlungsgebiete gefährlich sind. Kleinere, bettbildende Hochwasser sollen Geschiebesammler passieren, da diese für die Geschiebedynamik und für intakte Auengebiete im Unterlauf eines Flusses wichtig sind.
Teilprojekt von SNF NFP 70: "Design Flows" im alpinen Kontext, Rolle der Sedimente.	Die Schnittstelle zu den kHW betrifft die morphologische Antwort von Gewässern auf Situationen mit hoher Sedimentverfügbarkeit und verhältnismässig wenig Wasser, wie beispielsweise unterhalb von grösseren Speichern.
Fonds National Suisse SEDFATE Projekt (CRSII2_ 147689): Wie beeinflussen in einer Langzeitbetrachtung men- schliche Aktivitäten den Sedimenttransport im und durch ein Einzugsgebiet?	Die Schnittstelle zu den kHW besteht in der Erforschung der Auswirkungen des Eingriffes in das System unterhalb von Speichern, welches durch Wasser- ableitung und Sedimentrückhalt geprägt ist.
Studie finanziert durch die Fondation Herbette der UNIL und die Kantone VD und VS. Wie verändert die Klimaveränderung die Geomorphologie im alpinen Kontext und die Sedimentverfügbarkeit resp. das Sedimentkontinuum?	Die Schnittstelle zu den kHW betrifft die Fragestellung der geomorphologischen Bedingungen im Zwischeneinzugsgebiet unterhalb des Speichers. Sind zur Sanierung "reine" kHW ausreichend, da in den Zwischeneinzugsgebieten genügend Sedimente ins System eingetragen werden oder braucht es zwischenzeitlich oder dauerhaft zusätzliche Sedimentzufuhr?

Tab. 2.3: Fortsetzung Forschungen Inland.

Forschung	Relevanz kHW
VAW, ETHZ: Auswirkungen Umleitstollen auf Morphologie (angewandte Forschung)	Einfluss von impulsartigen Sedimenteinstössen und Beschickungen wie bspw. beim Umleitstollen Solis auf die Morphologie flussabwärts (vergleichbar mit einer Sedimentzugabe bei einem kHW).
VAW, ETHZ: Verteilung Geschiebeschüttungen Mittellandflüsse (angewandte Forschung)	Resultate sind physikalische (Friedl) und numerische (Van Willen) Untersuchungen zur Verteilung von Geschiebeschüttungen. Diese sind nur bedingt auf kHW im alpinen Kontext übertragbar.
VAW, ETHZ: Einfluss der Geschiebezufuhr (angewandte Forschung)	Modellversuche und numerische Berechnungen zum Einfluss von Geschiebezufuhr (Mengen und Korngrößen) auf die Morphologie von alpinen Talflüssen. Die Resultate sind möglicherweise auf kHW im alpinen Kontext übertragbar.
EAWAG: Langzeitwirkung kHW am Spöl (GR)	Weiterführung der Forschungen am Spöl
EAWAG: Mittel- und langfristiger Austausch zwischen der Wasserkraft und hydro-ökologischer Dynamik in alpinen Einzugsgebieten.	Projekt zur Optimierung der Durchführung von kHW (HydroEnv) an der Borgne (VS) und Maggia (TI) in Zusammenarbeit mit der ETHZ, UNIL und EPFL (Teil NRP 70 Programm).

Das gemeinsame Nachfolgeprojekt der EAWAG, WSL, EPFL, ETHZ und BAFU mit dem vorläufigen Namen "Lebensraum Gewässer: Geschiebedynamik und Vernetzung" vertieft die Themen:

- Feststofftransport (sowie Wasserführung): Bedeutung hinsichtlich Sicherheit und Ökologie, in mittelgrossen Gewässern,
- Gewässerraum als Lebensraum: Optimale Gestaltung, Nutzung und Unterhalt des Gewässerraums hinsichtlich Sicherheit und Ökologie.

Aus der Thematik Feststofftransport und Wasserführung sind Resultate mit direkter Relevanz für kHW zu erwarten.

Wissenslücken und Forschungsfragen

Wissenslücken und Forschungsfragen mit unmittelbarem Bezug zu kHW aus den Expertenbefragungen sind wie folgt zusammengefasst:

Tab. 2.4: Wissenslücken und Forschungsfragen Inland.

Forschungsfrage	Relevanz kHW
Zusammenhänge zwischen physikalischen Prozessen und den hydrobiologischen Reaktionen	Zielsetzung kHW
Weiterentwicklung Messmethoden (z.B. Respiration als Kolmationsindikator des Substrats)	Wirkungskontrolle kHW
Mesohabitatmodellierungen	Planung kHW
Bedingungen bezüglich Sedimentzugabe. Wann brauchen kHW wie viel Sedimente und wann nicht? Korngrößen?	Planung kHW
Wann ist der gute Zeitraum für kHW unter Berücksichtigung von hydrologischen und biologischen Einschränkungen?	Planung kHW
Geschiebe und Hydrogramme, komplexe Morphologie: wie schnell wird sich zugegebenes Geschiebe flussabwärts ausbreiten (Langzeiteffekte)?	Planung & Wirkungskontrolle kHW

Japan

In Japan konzentriert sich die aktuelle Forschung seit 2009⁵ auf die optimale Abstimmung von Geschiebemengen und Korngrößen mit Bezug zur Wassermenge der nHW oder kHW unterhalb von Speichern.

Deutschland

In Deutschland, insbesondere im alpennahen Raum Bayerns, sind die Auswirkungen des Geschieberückhalts und die anthropogen veränderten Abflussverhältnisse an Wehren und Speichern Teil von angewandten Forschungen:

- 1) Am Sylventsteinspeicher wird versucht, durch eine Modifizierung der HW-Abgabe das Geschiebe zu mobilisieren und durch Staulegung am nächstfolgenden Wehr (Bad Tölz) flussabwärts zu transportieren.
- 2) Im Unterlauf des Wehrs Krün hat die Kombination von guter Wasserverfügbarkeit und hohem Feinmaterialaustrag (bei seltenen, kurzen Spülungen) die Etablierung von Weiden nachhaltig gefördert. Forschungen und Untersuchungen am Wehr Krün zu Spülungen und Redynamisierungsmassnahmen sollen bis 2030 Grundlagen für die Neukonzessionierung liefern.
- 3) Das bayerische Landesamt für Umwelt stellt Überlegungen an, in Zukunft bei der Beurteilung des Mindestwasserabflusses verstärkt darauf zu achten, dass regelmäßig ein "bettbildender Abfluss" (ggf. in Verbindung mit Geschiebeumsetzung) erfolgt. Diese Massnahme ist vergleichbar mit einem kHW, und wird in den Leitfaden Mindestwasser einfließen.

⁵ Persönliche Mitteilung Prof. Dr. Sameh Kantoush, Kyoto University Goka-sho.

Frankreich

Aus Frankreich⁶ sind folgende (angewandte) Forschungen mit Bezug zu kHW bekannt:

- 1) Die kHW an der Durance werden jährlich wissenschaftlich begleitet und 2018 einem Gesamtreview unterzogen. Auf der Basis des Review wird über den weiteren Verlauf der kHW entschieden. Massnahmen zu zwei Handlungsschwerpunkten werden untersucht: Einerseits die Wiederherstellung von Hochwassern im Zusammenhang mit der Geschiebedurchlässigkeit von Speichern und dem Geschiebetrieb ("Umlagern", "Aufreissen"). Andererseits Überlaufperioden mit dem Ziel der Dekolmation ("Putzen").
- 2) In Lyon (Laboratoire d'Ecologie des Hydrosystèmes Naturels et Anthropisés) werden Versuche in einer Laborrinne durchgeführt, mit dem Ziel der Abflussoptimierung für die Dekolmation.
- 3) Die "Agence de l'Eau Rhône Méditerranée et Corse" betreibt zur Zeit ein physikalisches und numerisches Modell zur Optimierung von Geschiebeumlagerungen und zur Beseitigung von Vegetation unter Berücksichtigung von verschiedenen Abflussganglinien.
- 4) An der "Univ. Grenoble Alpes" werden aktuell im Rahmen einer Doktorarbeit die Zusammenhänge zwischen Abfluss, Geschiebeumlagerung und der Auswirkung der Vegetation genauer untersucht (Jourdain et al. 2016).

⁶ Persönliche Mitteilung Benoît Terrier & Laure Moreau.

3 Planung & Umsetzung kHW

Aus dem Workshop und den Expertengesprächen, die im Rahmen der vorliegenden Auslegeordnung durchgeführt wurden, resultiert das nachfolgende Konzept, wie man bei Planung & Umsetzung von kHW vorgehen sollte.

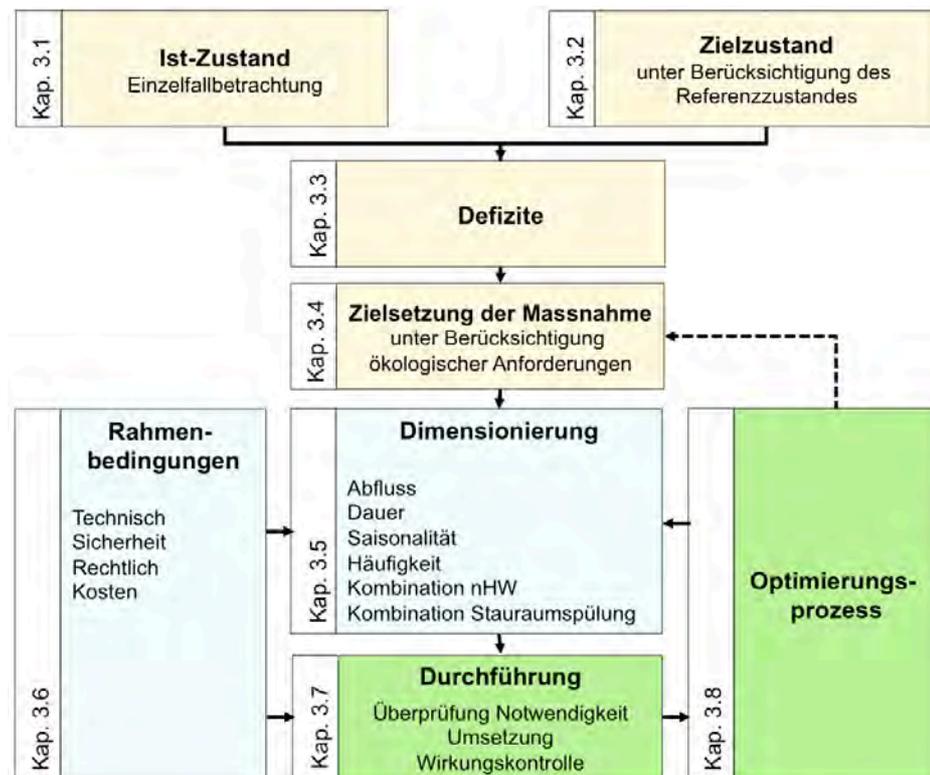


Abb. 3.1: Vorgehen für Planung und Umsetzung von kHW. Durchgezogene Pfeile stellen die Planung eines ersten kHW und den Optimierungsprozess weiterer kHW dar. Die gestrichelte Linie stellt eine im Einzelfall mögliche Anpassung der Zielsetzung durch den Optimierungsprozess dar.

Der Ablauf ist farblich in drei Teilprozesse unterteilt:

- Festlegung gewünschte Wirkung des kHW
- Dimensionierung kHW mit Einbezug der Rahmenbedingungen
- Durchführung kHW mit Wirkungskontrolle und Optimierungsprozess

Der Ablauf kann grundsätzlich für jeglichen kHW-Typ angewendet werden. Eine Einzelfallbetrachtung wird ermöglicht, indem die jeweiligen Schritte fallspezifisch ausgearbeitet werden. Es ist wichtig, soweit möglich, alle relevanten Partner (Behörden, Kraftwerkinhaber, Fischer, Umweltverbände etc.) in die Planung miteinzubeziehen.

Im Folgenden werden die einzelnen Schritte anhand von aktuellen Erfahrungen und bestehenden Herausforderungen diskutiert (s. Verweise auf Kapitel in Abb. 3.1).

3.1 Erhebung Ist-Zustand

Aktualisierung
notwendig?

Wird ein kHW als Sanierungsmassnahme empfohlen, ist zu prüfen, ob der beschriebene Ist-Zustand der Strategischen Planung dem Ausgangszustand entspricht oder ob er gegebenenfalls aktualisiert und detaillierter aufgenommen werden muss. Die Erhebung des Ist-Zustandes erstreckt sich mindestens über den Perimeter der Restwasser (ggf. auch darüber hinaus, falls durch das kHW wesentlich beeinflusst).

Bei der Erhebung des aktualisierten Ist-Zustandes des betroffenen Gewässers sind verschiedene Parameter wichtig (s. Tab. 3.1). Im Einzelfall sind gerinnespezifische Parameter wie Ausleitungen, Hochwasserschutz, Trinkwasserversorgung, Kiesabbau, Fischerei, Freizeitnutzung etc. zu ergänzen.

Tab. 3.1: Wichtige Parameter zur Erhebung/Aktualisierung des Ist-Zustandes.

Parameter		Beschreibung
geographisch	Höhenlage und biogeographische Region	Gewässerabschnitt und Einzugsgebiet
	Flussgebiet	Beschreibung
	Stauanlage des Kraftwerkes	Speichervolumen, Position im Gewässernetz, Geschiebeumleitstollen, Möglichkeiten der Wasserabgabe, Temperaturverhältnisse im Stausee etc.
hydro-morphologisch	Gerinnegeometrie	Querschnitt und Gefälle in Relation zum Abfluss. Genügt das Gerinne noch für die natürlichen Abflüsse? Brücken und andere Bauwerke; kritische Abflussquerschnitte.
	Abfluss	Abflussmengen an relevanten Punkten sowie Lage und Verlauf der Zuflüsse und Versickerungen; Beitrag der Seitengewässer
	Gewässersohle	Substratzusammensetzung, Zustand (Kolmation, Bewuchs, Laub, Holz, Ablagerungen), kritische Schubspannungen.
	Geschiebemenge und -qualität	Geschiebeeinträge (Quelle Ufer-, Hang-erosion, Zuflüsse), Geschiebequalität (Grösse, Form, Kolmation), Quantität und Zeitpunkt der zu erwartenden Geschiebeeinträge, Geschiebetransportkapazität des genutzten Gewässers.
	Ufer Ufervegetation	Ufertyp, -zustand in Relation zum Abfluss, Überschwemmungshäufigkeit, Ufervegetation (Typ, Arten, Zustand).
	Wasserqualität	Chemische Belastungen, Trübung, Temperatur

Tab. 3.1: Fortsetzung wichtige Parameter zur Erhebung/Aktualisierung des Ist-Zustandes.

Parameter		Beschreibung
biologisch	Fisch	Fischbestand und Laichplätze in der Restwasserstrecke sowie im Speicher zur Wasserabgabe. Können Fische während dem Hochwasser in die Fließwasserstrecke ausgeschwemmt werden?
	Benthosfauna	Artenbestand und Abundanz, Indikatorgruppen oder -arten. Arten der Roten Liste, geschützte Arten
	Makrophyten	Arten, Verbreitung
	Algen/Moose	Arten, Verbreitung mit Deckungsgrad

Des Weiteren umfasst die Beschreibung des Ist-Zustandes Nutzungen des Gewässers, Abwasserreinigungsanlagen, Verbauungen, welche den Zustand beeinflussen können.

Charakterisierung Restwasserstrecke

Die Charakterisierung der Restwasserstrecke innerhalb des Untersuchungsperimeters erfolgt mit der Festlegung von:

- sensiblen Streckenabschnitten (bspw. Stranden von Fischen),
- zu überflutende Gewässerbereiche (Uferterrassen, Umland),
- Untersuchungsstellen (vor- und nach dem kHW),
- Beobachtungs- und Messstellen (während dem kHW).

Festlegung Untersuchungsprogramm

Die zu untersuchenden Indikatoren zur Erhebung des Ist-Zustandes sind mittels Standardmethoden qualitativ und/oder quantitativ an den Untersuchungsstellen vor und nach dem kHW zu dokumentieren und zu erfassen.

Gemäss Workshop und Rückmeldungen ist die Auswahl geeigneter Indikatoren wichtig, um kurzfristige und langfristige Aussagen machen zu können. Zu unterscheiden sind direkte Wirkungen unmittelbar nach einem kHW sowie verzögerte Wirkungen nach mehreren kHW.

Geplante Eingriffe Geschiebezufuhr

Je nach Typ des kHW sind vor dem kHW Eingriffe zur Geschiebezufuhr notwendig:

- Mechanische Initiierung der Seitenerosion (falls zulässig) oder Baggerung/Transport aus Uferbereich,
- Externe Kieszufuhr mit Lastwagen.

Diesbezüglich können im Rahmen der Erhebung des Ist-Zustandes Vorabklärungen vorgenommen werden.

Notwendige Bewilligungen und Abklärungen

Je nach Eingriff sind frühzeitig Bewilligungen einzuholen und Abklärungen zu treffen:

- Rodung/Unterhalt,
- Eingriffe im Gewässer,
- Konflikten mit genutzten Badestellen, Altlasten, etc.),
- Zufahrtswege für Lastwagen.

Auch diesbezüglich sind im Rahmen der Erhebung des Ist-Zustandes Vorabklärungen sinnvoll.

3.2 Festlegung Zielzustand

Die sorgfältige Festlegung des Zielzustandes ist aufgrund der Diskussionen im Workshop wichtig, um Defizite im Vergleich zum Ist-Zustand zu formulieren.

Referenzzustand In den meisten Fällen ist der ursprüngliche, natürliche Zustand durch periodische KHW nicht wiederherstellbar. Als Zielzustand wird nicht der ursprüngliche Zustand verwendet, sondern ein längerfristig absehbarer Zustand, welcher sich naturnahen Bedingungen möglichst annähert und durch das/die KHW erreicht werden kann. Gewässer mit ähnlichen Bedingungen (Abfluss, biographische Region, Höhenlage etc.) können die Festlegung des Zielzustandes als Referenz vergleichend unterstützen.

Definition Zielzustand Folgende Aspekte sind für die Festlegung des Zielzustandes zu beachten:

- Durch die Speicherung und Ableitung des Wassers im Speichersee ist der Abfluss im Unterwasser stark reduziert. Das Fließgewässer verläuft im Bett eines ehemals wesentlich grösseren Gewässers (Zeitpunkt vor dem Bau des Speicherkraftwerkes).
- Die Höhenlage und die biogeografische Region sind massgebende Indikatoren zur Festlegung eines ökologisch sinnvollen Zielzustandes, da sie das ökologische Potenzial beeinflussen.

Die Definition des Zielzustandes erfolgt unabhängig der allenfalls bereits bekannten Rahmenbedingungen (s. Kapitel 3.6). Sinnvoll ist die Angabe der gewünschten Wirkung mit einer Spannweite (s. Kapitel 3.4). Die Festlegung des Zielzustandes ist gewässerspezifisch und variiert je nach Gegebenheiten und Fließstrecke.

3.3 Erhebung der Defizite

Herleitung Defizit Das Defizit entspricht dem Unterschied zwischen Ist- und Zielzustand. Somit ist die Erhebung der abiotischen und biotischen Defizite wesentlich durch die Festlegung des Zielzustandes beeinflusst.

Bestimmung der wesentlichen Beeinträchtigungen **Biotisch** (Tiere, Pflanzen, Lebensräume)
Die Defizite sind qualitativ, quantitativ und lokalisiert für Gewässersohle und Ufer zu beziffern.

Abiotisch (morphologische Strukturen, Dynamik)

Dasselbe gilt für die abiotischen Indikatoren mit Bezug zu den biologischen Beeinträchtigungen.

3.4 Zielsetzung der Massnahme

Übergeordnete Ziele	<p>Übergeordnetes Ziel für das Gewässer ist die Beseitigung der wesentlichen Beeinträchtigungen in der Restwasserstrecke. Das ist die Basis für die Dimensionierung des kHW. Es ist zu beachten, dass die Erreichung der Zielsetzung oftmals erst durch die Durchführung von mehreren kHW zu erwarten ist.</p>
Konkrete Ziele	<p>Die konkrete Zielsetzung definiert anhand der Defizite die gewünschten Wirkungen des/der kHW (s. Kap. 2.2), um im Gerinne primär die ökologisch erforderlichen Verbesserungen in den aquatischen, amphibischen und terrestrischen Biotopen zu erreichen.</p> <p>Zudem präzisiert die Zielsetzung, ob das kHW mit weiterführenden Massnahmen wie beispielsweise Geschiebedepots ergänzt werden muss (s. Kap. 2.3).</p> <p>Mit der Massnahme kHW werden gewässerspezifisch unterschiedliche Teilziele angestrebt:</p> <p>Gewässersohle</p> <ul style="list-style-type: none"> • Entfernen Feinsedimentablagerung (Reduktion äussere Kolmation), • Aufreissen der Deckschicht (Reduktion innere Kolmation), • Mobilisierung von biogenem Geschiebe. <p>Ufer und Uferterrassen</p> <ul style="list-style-type: none"> • Freihaltung der Uferzonen von Bewuchs (Kiesuferfauna), • Periodische Übersarung und Flutung von Weich- und Hartholzauen, • Verbesserung der lateralen und longitudinalen Vernetzung. <p>Tiere, Pflanzen, Lebensräume</p> <ul style="list-style-type: none"> • Reduktion von Algen- und Moosbewuchs, • Verbesserung der Durchströmung der Zwischenräume im Kies (Interstitial) • Erneuerung Habitats/Laichplätze, • Temporäre Schaffung der longitudinalen Durchgängigkeit (z.B. Überwindbarkeit von Barrieren für Fische), • Förderung aquatische, amphibische und terrestrische Habitatvielfalt (Schaipp & Zehm, 2009), • Förderung störungsresistenter Arten, • Reduktion von Massenvorkommen von ubiquitären Arten.
Ziele Ökologie	<p>In die Zielsetzung der Sanierung mittels kHW fliessen als ökologische Rahmenbedingung bereits der Ist-Zustand mit dem Grad der Beeinträchtigung, das Potenzial des Gewässers, der Zielzustand ("längerfristig realistischerweise erreichbarer Zustand") und in Ausnahmefällen auch der Referenzzustand ein.</p>
Ökologische Rahmenbedingungen	<p>Die ökologischen Rahmenbedingungen für die Planung des kHW sind explizit aufzuführen. Zu klären sind insbesondere:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Sensible, geschützte Arten im Unterlauf, • Sensible Lebensräume im Unterlauf,

- Einfluss des kHW auf aquatische amphibische und terrestrische Organismen bzgl. der Dynamik und Saisonalitäten (Laichzeiten, Entwicklungsstadien der Fische etc.),
- Wasserqualität im Stauraum (Feinsedimente, Trübung, Temperaturschichtung),
- Einheimischer oder fremder Fischbestand im Stauraum; es können Fische aus dem Stauraum in die Restwasserstrecke ausgeschwemmt werden, die kaum überleben wie z.B. die Laube oder gebietsfremde Fischarten in Stauräumen dürfen nicht ausgeschwemmt werden,
- Einfluss der Absenkung auf das Ökosystem im Stauraum.

3.5 Dimensionierung

Erzeugen von hydraulischen Störungen

KHW zielen darauf ab, die reduzierten gebirgsbachtypischen, hydraulischen Störungen so weit möglich zu kompensieren. Die Abflussverhältnisse vor dem Bau der Speicher werden in der Restwasserstrecke während kurzen Perioden annähernd wieder hergestellt mit einem Hydrogramm ähnlich eines natürlichen Hochwassers (Stichwort „funktionales Hochwasserregime“).

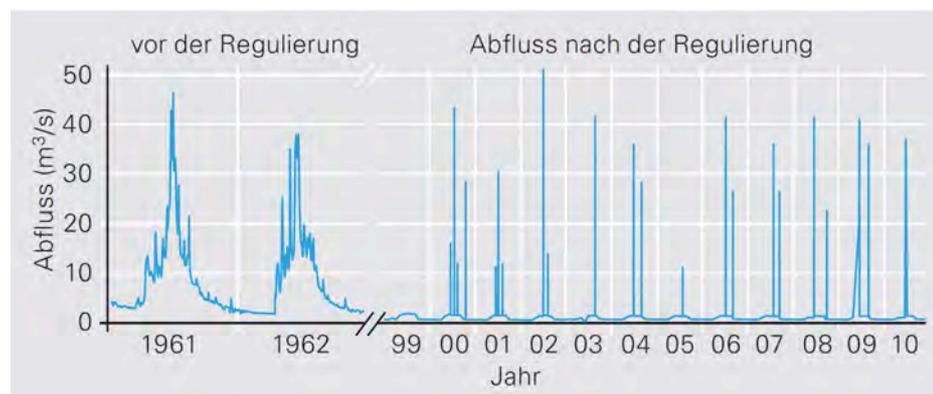


Abb. 3.2: Nachahmung des ursprünglichen Abflussregimes (pre-regulation) am Beispiel Spöl seit 2000 (post-regulation). Quelle: Döring (2012).

Ansätze zur Festlegung eines kHW

Mögliche Ansätze zur Festlegung des Hydrogramms eines kHW sind:

- Rechnerischen Ansatz/Modellierungen (Konrad et al, 2011 "manipulative flow experiments"). Die Fragestellung lautet: *"Bei welcher Wassermenge wird welche Wirkung erwartet?"* Dabei berücksichtigen die hydraulischen Berechnungen in erster Linie Korngrößen und Schleppkräfte.
- Historischer Ansatz. Es stellt sich die Frage: *"Bei welchen bekannten Ereignissen der Vergangenheit (nHW, Stauraumspülungen, Funktionskontrolle Notfallorgane, Stauraumentleerungen) haben welche morphologischen Prozesse stattgefunden?"*
- Empirischer/experimenteller Ansatz (Konrad et al, 2011 "mensurative flow experiments") untersucht: *"Wie wirkt eine bestimmte Wassermenge auf das Gewässer?"* Es handelt sich dabei um ein stufenweises Herantasten der Wassermenge im Rahmen der Durchführung von mehreren HW unter Beobachtung der Wirkung, bis die gewünschte Wirkung erzielt werden.

Genannte Ansätze können kombiniert werden. Zum Beispiel kann das Hydrogramm rechnerisch, jedoch unter vorsichtigen Annahmen, festgelegt und dann mit dem empirischen Ansatz optimiert werden.

Ökologische Hydrogramm versus Hydrogramm kHW

Beim rechnerischen Ansatz geht es in einer ersten Phase der Dimensionierung darum, die Parameter des Hydrogramms so festzulegen, dass die Zielsetzung unter Berücksichtigung der Ökologie erreicht wird: $Q(t) = \text{Funktion}(\text{ökologisches Ziel})$. In einer zweiten Phase der Dimensionierung ist das Hydrogramm hinsichtlich der Rahmenbedingungen (Kapitel 3.6) zu überprüfen: $Q(t) = \text{Funktion}(\text{ökol. Ziel, Rahmenbedingungen})$. Auch beim historischen und empirischen Ansatz ist das Hydrogramm hinsichtlich der Rahmenbedingungen entlang des Gewässers zu überprüfen, insbesondere betreffend Sicherheit.

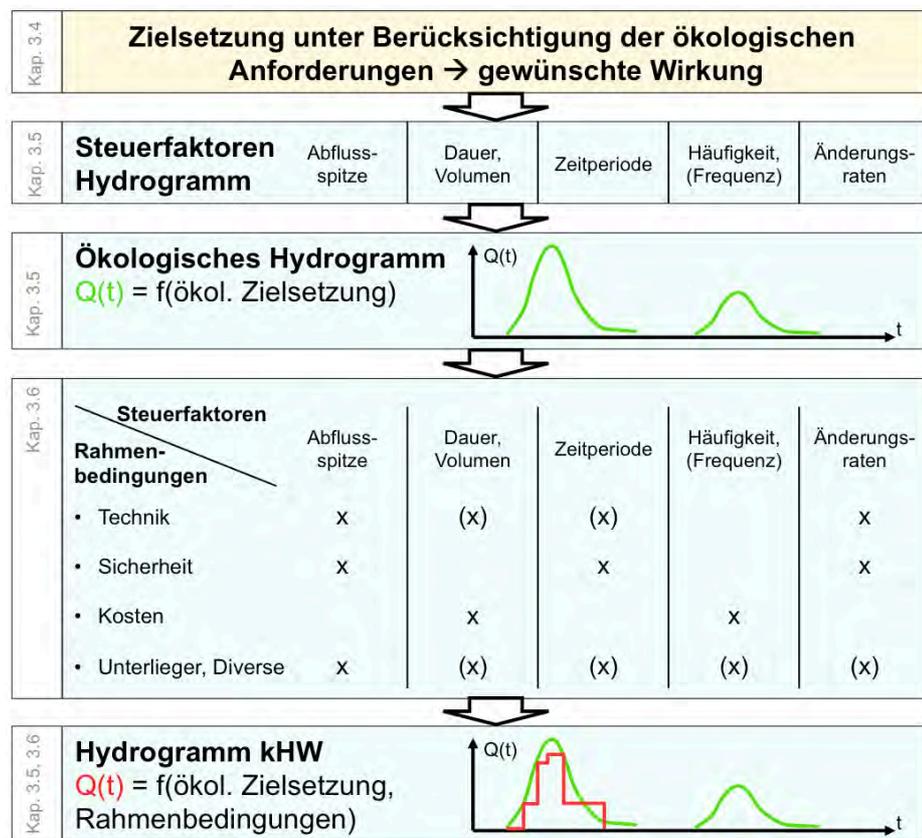


Abb. 3.3: Etappenweises Vorgehen zur Bestimmung des Hydrogramms des kHW. x: Einfluss auf Steuerfaktor; (x): bedingter Einfluss auf Steuerfaktor.

Steuerfaktoren des Hydrogramms

In den folgenden Kapiteln werden die Parameter resp. Steuerfaktoren des Hydrogramms eines kHW – Abflussspitze, Dauer, Abflussänderungs-raten, Häufigkeit, und Zeitperiode – hinsichtlich ihrer Bedeutung diskutiert und mögliche Dimensionierungsansätze vorgeschlagen. Deren Anwendung und Gültigkeit ist immer im Einzelfall des jeweiligen Gewässers zu prüfen. Gemäss Berchtold (2015) sind Häufigkeit und Dauer des Abflusses, für welchen der Geschiebetransport stattfindet, wichtiger als die Abflussspitze. Kurze kHW mit hohem Spitzenabfluss wirken sich nur bedingt positiv auf Umlagerungsprozesse aus. Auch dies ist im Einzelfall festzulegen.

Die genannten Steuerfaktoren charakterisieren das Abflussregime und sind wesentlich für die Wasserqualität, die Gewässerhabitate, die hydrobiologischen Interaktionen und letztlich für die ökologische Funktionsfähigkeit des Gewässers verantwortlich (Poff et al. 1997). Nebst der Erhaltung und Erneuerung der aquatischen Lebensräume fördert ein naturnahes Abflussregime den naturnahen Geschiebehalt (Pfaundler et al., 2011).

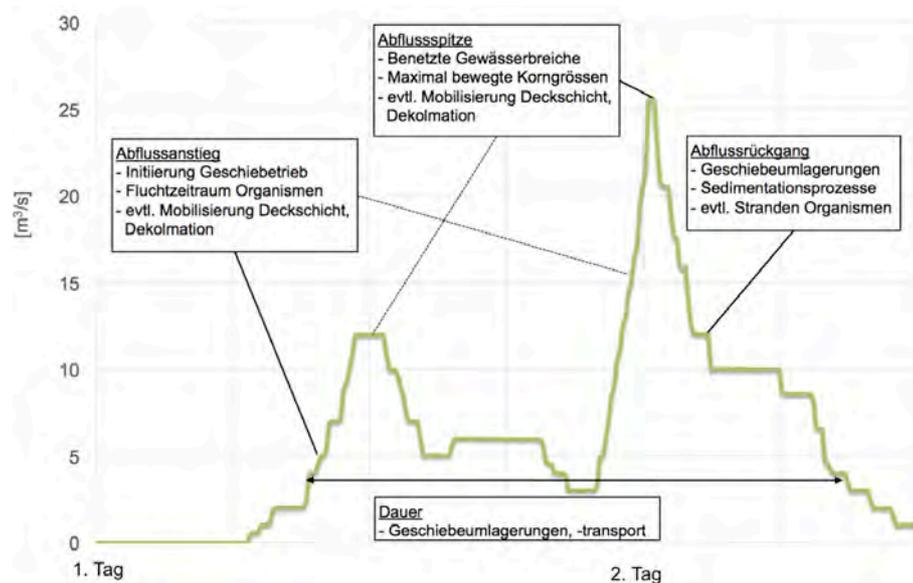


Abb. 3.4: Fiktives Hydrogramm mit möglichen Steuerphasen.

3.5.1 Abflussspitze

Relevanz
Abflussspitze

Die Höhe der Abflussspitze ist zur Initiierung des Geschiebetransports von Bedeutung. Relevant sind folgende Aspekte:

- Gewässerbereiche/benetzte Fläche: Sie definiert die Gewässerbereiche, welche durch das KHW benetzt werden (Beispiel: Abflussspitze zur Flutung einer ans Gewässer grenzender Aue).
- Bewegte Korngrößen/Ausdehnung der erodierbaren Substrate: Sie definiert die maximale Korngröße des vorhandenen, lockeren Substrats (Laufgeschiebe), welches grundsätzlich umgelagert werden kann (Beispiel: Abflussspitze, die ein eingebrachtes Geschiebedepot zu mobilisieren vermag).
- Deckschicht/Erosionsvermögen: Sie definiert, ob eine vorhandene Deckschicht aufgebrochen wird (Beispiel: Abflussspitze, die eine vergrößerte und kolmatierte Sohle aufzubrechen vermag).

Dimensionierung und
gewünschte Wirkung

Die Dimensionierung der Abflussspitze ist von der gewünschten Wirkung abhängig. Vorgängig zur Dimensionierung der Abflussspitze muss Folgendes definiert werden:

- 1) relevante Gewässerabschnitte,
- 2) zur erreichende Gewässerbereiche,
- 3) zu bewegendes Substrate (Laufgeschiebe oder Deckschicht),
- 4) entsprechende Korngrößen.

Die Abflussspitze selbst gibt noch keinen Aufschluss über die Menge des umgelagerten Geschiebes, sondern lediglich darüber, welche Korngrößen in welchen Bereichen des Gewässers grundsätzlich bewegt werden können.

- Berechnungsansätze
- Zur Festlegung der Abflussspitze eignen sich je nach Komplexität der Fragestellung folgende Berechnungsansätze (ohne Anspruch auf Vollständigkeit):
- Normalabflussberechnungen: in typischen Gewässerquerschnitten (z.B. nach Manning-Stricker) zur Bestimmung der Wasserspiegellage, der Fliesstiefen und der Schleppkräfte in Abhängigkeit des Abflusses. Der Ansatz ist möglich für relativ prismatische Gewässerabschnitte mit gleichmässigem Gefälle und Substrat. Welche Korngrößen in Abhängigkeit des Abflusses bewegt werden, kann über die dimensionslose Sohlenschubspannung gemäss Shields (1936) abgeschätzt werden.
 - Hydraulisches 1D-Modell (Staukurvenberechnungen): zur Bestimmung der Wasserspiegellage, von Fliesstiefen und Schleppkräften in Abhängigkeit des Abflusses. Der Ansatz kann Gewässerabschnitten mit wechselnden Querschnitts- und Gefällsverhältnissen angewendet werden. Die massgebenden Parameter für die Stabilitätsberechnungen der Substrate liefert das 1D-Modell.
 - Hydraulisches 2D-Modell: Die Gerinnegeometrie (relevante Abschnitte) wird im 2D-Berechnungsnetz abgebildet. Es kann auch Angaben zu den Korngrößen beinhaltet werden. Das Modell liefert pro Rechenzelle Wasserspiegel- und Gewässersohlenlage (bei mobiler Sohle zeitabhängig) sowie eine tiefengemittelte Abflussgeschwindigkeit. Das 2D-Modell liefert über die Bestimmung der Schleppkräfte und unter Berücksichtigung der Korngrößen, detaillierte Angaben zu den Bereichen der Gewässersohle, die beim jeweiligen Abfluss bewegt wird.

Aufreissen der Deckschicht/
Dekolmation

Soll durch das kHW die Deckschicht der Gewässersohle aufgerissen werden, kann in Gewässern mit moderatem Längsgefälle der entsprechende Grenzabfluss beispielsweise mit einer Normalabflussberechnung unter Berücksichtigung der mittleren Korndurchmessers der Deckschicht nach Shields (1936) oder gemäss der Formel von Günter (1971) bestimmt werden. In steileren Gewässern eignen sich spezifischere Ansätze (Lamb et al. 2008, Recking 2009).

Die Wahl des geeigneten Berechnungsansatzes und der Einsatz von Formeln zur Bestimmung von Bewegungsbeginn von Laufgeschiebe und Deckschicht erfolgt durch den Fachspezialisten in Abhängigkeit der Zielsetzung und des Gewässers.

Bei empirischer Festlegung des kHW kann auf eine detaillierte Berechnung verzichtet werden. Um trotzdem Angaben zum Transport von Geschiebe zu erhalten sind Markierungen und Geschiebeeinfärbungen zu empfehlen.

3.5.2 Dauer

Dauer massgebend für Transport und Umlagerung

Die Dauer des kHW, insbesondere die Zeitspanne, für welche der Abfluss über dem geschiebeführenden Grenzabfluss liegt, ist massgeblich für die Menge des transportierten und umgelagerten Geschiebes (s. Abb. 3.4).

Überlegungen zur Dauer

Folgende Grundsätze und Überlegungen können die Festlegung der Dauer eines kHW steuern:

- Geschiebe und Schwebstoffe können getrennt betrachtet werden.
 - Schwebstoffe (bewegen sich mit der Geschwindigkeit der Wasserwelle): besteht das Ziel des kHW im "Putzen" der Gewässersohle von Feinsedimentablagerungen oder werden durch das kHW Feinsedimente aus den Randbereichen eingetragen, so soll die Dauer ausreichend sein, um die Schwebstoffe vollständig ins nächstgrössere Gewässer einzutragen. (Bsp. Spöl, kHW in Kombination von Spülung). Wie Messungen der gelösten Stoffe mittels Imhoff-Trichter beim kHW mit Geschiebeinitiation an der Kleinen Saane zeigen, sind die sedimentierbaren Frachten mit max. 1.3 ml/Liter unbedeutend. Ähnliche Erfahrungen wurden beim kHW mit 6 m³/s am Grossen Wasser in Sera gemäss Art. 80 ff gemacht, bei dem die gemessenen Schwebstofffrachten unbedeutet blieben.
 - Geschiebe (bewegt sich deutlich langsamer als die Wasserwelle): die Festlegung der Zielgrösse eines umzulagernden Geschiebevolumens pro Abschnitt vergleichend zur transportierten Geschiebemenge in einem repräsentativen Querschnitt kann einen Richtwert für die Dauer liefern. Erfolgt das kHW kombiniert mit einer lockeren Geschiebeschüttung, so kann wiederum das Geschiebevolumen, vergleichend zur transportierten Geschiebemenge im repräsentativen Querschnitt, einen Richtwert für die Dauer liefern.
- Der intensivste Geschiebetransport erfolgt erfahrungsgemäss während des absteigenden Asts. Während die Spitze den Geschiebetransport (z.B. durch das Aufbrechen) initiiert, findet anschliessend die eigentlich Umlagerung statt.
- Um zu starke Ablagerungen von Feingeschiebe und Schwebstoffen durch Aussedimentieren am Ende des kHW zu verhindern, ist eine ausreichende Dauer des absteigenden Asts nötig.

Hilfen für die Bestimmung der Dauer

Als weitere Hilfen zur Bestimmung der notwendigen Dauer eines kHW sind zu erwähnen:

- Analyse der geschiebetransportrelevanten Dauer der Ganglinien von natürlichen Hochwassern der Vergangenheit.
- Hydrodynamische 1D-Modelle oder 2D-Modelle mit Geschiebetransport:
 - 1D-Modelle: quantifizieren pro Abschnitt Geschiebeeintrag, Geschiebeaustrag, Deposition resp. Erosion und somit indirekt über die zu erwartende Intensität der Umlagerungen.
 - 2D-Modelle: geben direkte Hinweise über die Intensität der Umlagerungen (Depositions- und Erosionszonen), weisen jedoch hinsichtlich der getreuen Abbildung dieser Prozesse aktuell (Stand 2016) noch Anwendungsgrenzen auf.

- Versuchshochwasser: Beobachter resp. Überwachungskameras, PitTag, Farbmarkierungen vor Ort oder Einbringen von verschieden markierten Steinen an wichtigen Standorten zur Beurteilung des Ausmasses der Umlagerungen. Sind diese ausreichend, ist die Dauer als Richtwert für künftige kHW festgelegt.

3.5.3 Zeitperiode

Natürliche
Verhältnisse &
Ökologie wichtig

Die Zeitperiode im Sinne eines Steuerfaktors zur Dimensionierung des kHW gibt das ungefähre Zeitfenster (Periode) vor. Dieses hängt in der Praxis von unterschiedlichen Faktoren ab. Bezüglich des Hydrogramms als Funktion des ökologischen Zielsetzung steuern aber letztlich folgende zwei Aspekte die Zeitperiode des oder der kHW:

- Natürliche Verhältnisse: Der Vergleich legt fest, wann im Jahresverlauf unter natürlichen Bedingungen im Zielgewässer geschlebe-führende Hochwasser stattgefunden haben und in welcher Grössenordnung diese liegen, um die gewünschte Wirkung (Putzen, Aufreissen) zu erzielen.
Zur Festlegung der Zeitperiode eignen sich die Analyse von historischen Abflussdaten, benachbarte Referenzgewässer oder die Ansätze zur Hochwassersaisonalität nach Hydmod (Pfaundler et al., 2011).
- Ökologie: Es gilt festzuhalten, welche biologischen Aspekte es zu berücksichtigen gilt: Fischwanderung, Jungfischhabitate, Entwicklungszeit der Gelege der Kieslaicher, Fischbesatz, amphibische und terrestrische Fauna, Entwicklungsstadien der Ufervegetation.
Zwar ist im Grundsatz der Bezug zur Saisonalität der natürlicherweise auftretenden Hochwasser ausreichend (s. vorhergehender Punkt), durch den Einfluss der Speicher können aber in Restwasserstrecken neue ökologischen Bedingungen vorherrschen, welche es in der Zielsetzung und der Dimensionierung zu berücksichtigen gilt.

Hochwasser in
voralpinen und alpinen
Gewässern

In den Zielgewässern der Auslegeordnung, welche sich im voralpinen und alpinen Raum befinden, treten natürliche Hochwasser in Abhängigkeit der Höhenlage bevorzugt zu Zeiten der stärksten Schnee- und Gletscherschmelze auf, oder werden durch Starkniederschlagsereignisse im Herbst verursacht. Allfällige Synergien mit Spülungen sprechen tendenziell für kHW im Frühjahr und Frühsommer. Aspekte der Schonzeit von Fischen und der Jungfischentwicklung für kHW im Herbst.

Weitere Faktoren

In der Praxis können folgende zusätzlichen Faktoren die Zeitperiode des kHW einschränken:

- Nutzung von Synergien mit nHW:
 - kHW im Herbst, nur falls im Jahresverlauf nHW nicht die notwendige Wirkung im Gewässer erzielt haben.
 - Durchleiten von Trübeströmen.
- Algenentwicklung, Feinsedimentablagerung im Gewässer im Jahresverlauf. Reinigung der Gewässersohle vor der Laichperiode.
- Sicherheit, touristische Nutzung des Gewässers z.B. Badestellen. Unnötige Risiken vermeiden.
- Technische Rahmenbedingungen des KW: Füllungsgrad, Unterhaltsperioden, etc.

3.5.4 Häufigkeit

Häufigkeit im Einzelfall festlegen

Die Häufigkeit ist im Einzelfall auf Grund der festgestellten Defizite und der Zielsetzung festzulegen. Dabei können folgende Überlegungen die Festlegung der Häufigkeit beeinflussen:

- Wird im alpinen Raum eine Ähnlichkeit zum nHW angestrebt, ist ein Schneeschmelz-HW und einmal ein Sommer-/Herbstregen-HW geeignet.
- Im Zusammenhang mit der Sanierung Geschiebehalt scheint ein jährliches geschiefbeführendes HW mit damit verbundenen Umlagerungsprozessen ausreichend. Dies ist im Einzelfall abzuklären.
- Hinweise zur Bestimmung und zur Natürlichkeit der Hochwasserhäufigkeit liefert Kap. 5.3 des Moduls Hydrologie des Modul-Stufen-Konzepts (Pfaundler et al. 2011).
- Im Normalfall geht es um die ökologische Funktionsfähigkeit des Gewässers und die dazu erforderliche Wirkung von kHW: „Putzen-Umlagern-Aufreissen“. Sind aufgrund des Defizites grössere HW mit morphogener Wirkung zur Erreichung der Zielsetzung notwendig, sind diese ausführlich zu begründen. Dies kann auch die Folge des Optimierungsprozesses mit Anpassung der Zielsetzung sein.
- Der Abstand einzelner kHW steuert Erholungs- und Sukzessionsprozesse. Er verhindert bspw. ein Überwuchern der Gewässersohle mit Algen. Die „Störungen“ sind für die notwendigen Erneuerungen der abiotischen Strukturen und der biotischen Lebensgemeinschaften wichtig. Dies ist in die Entscheidung der Notwendigkeit eines Hochwassers bei den Vorkontrollen zu berücksichtigen und zu begründen, selbst wenn einzelne Indikatoren keine wesentliche Beeinträchtigung zeigen.

Häufigkeit als Richtwert

Die Häufigkeit soll in der ersten Dimensionierung eines kHW gestützt auf den Zielzustand (erwünschte Wirkung) festgelegt werden. Ziel der Festlegung ist aber nicht, die Flexibilität betreffend Durchführung einzuschränken. Eine Beurteilung von Jahr zu Jahr des effektiven Gewässerzustandes und die Berücksichtigung von nHW ist mitentscheidend für die Notwendigkeit der Durchführung des kHW.

3.5.5 Abflussanstieg und -rückgang

Abflussanstieg nicht massgebend für Effektivität

Der Abflussanstieg wird nicht als kritische Steuergrösse für die Effektivität eines kHW als Massnahme zur Beseitigung der Beeinträchtigten erachtet. Zu beachten sind jedoch:

- Während dem Anstieg kommt es zu Wirbelbildungen, Turbulenzen und der Mobilisierung von Schwebstoffen. Ein nicht allzu rascher Anstieg ermöglicht aquatischen und terrestrischen Organismen einen Fluchtzeitraum.
- Ein rascher Anstieg führt zu erhöhten Schubspannungen an der Gewässersohle und kann die Initiierung des Geschiebetriebs oder das Aufreissen der Deckschicht (sofern erwünscht) erleichtern.

Abflussrückgang als wichtige Einflussgrösse	<p>Der Abflussrückgang ist eine wichtige Einflussgrösse:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ein langsam absteigender Ast des Hydrogramms fördert die Geschiebeumlagerungen (s. auch Kapitel 3.5.2 Dauer und Abb. 3.4). • Ein langsam absteigender Ast minimiert das Risiko des Strandens von MZB und Fischen. • Bei einem zu rasch absteigenden Ast kann es infolge instationärer Effekte zu einer ausgeprägten Reduktion der Fliessgeschwindigkeit im Gewässer kommen. Damit verbunden ist ein Sedimentationsprozess (Feinsedimentablagerungen über den gröberen Substraten, insbesondere im Randbereich des Gewässers).
Vergleichswerte Drift und Stranden	<p>Zur Bestimmung der Abflussanstieg und –rückgangsraten können Vergleichswerte von natürlichen historischen Hochwassern des betroffenen Gewässers oder eines Referenzgewässers herbeigezogen werden. Falls die geplanten Anstiegs- und Rückgangsraten deutlich höher ausfallen, als jene von natürlichen Hochwassern, sind die Aspekte der übermässigen Drift beim Anstieg und des Strandens beim Rückgang zu beachten (Pfaundler et al., 2011; Tonolla et al., 2016).</p>
	<p>3.5.6 Weitere Hinweise zur Dimensionierung</p>
Anzahl, Vielfalt und Abstand von kHW	<p>Nebst der mittleren Anzahl der kHW (1-mal jährlich, mehrmals jährlich, 1-mal alle 2-5 Jahre) sind auch die Aspekte des Abstands und der Vielfalt (Variabilität der HW-Ganglinien) der Hochwasserereignisse von Bedeutung. Zu beachten sind dabei insbesondere die Anpassung an natürliche Vorfälle (Rutschungen, Überlaufereignisse, Trocken- bzw. Niederschlagsperioden).</p>
Erfahrungen Geschiebezufuhr & Initiierung	<p>Erfahrungen mit dem kHW Typ 2 „Geschiebeeinbringung in die Gewässersohle“ und Typ 3 „Initiierung in den Uferbereichen“ gibt es wenige. An der Kleinen Saane wurden an 3 Gewässerabschnitten beide Typen im Herbst 2016 durchgeführt. Detaillierte Auswertungen sind noch ausstehend. Am Spöl wurden Kegelablagerungen aus Seitengerinnen mobilisiert, diese wurden jedoch nicht aktiv initiiert. Kriterien der Geschiebezufuhr werden einzig am Spöl angegeben. Diese sind aufgrund der Kegelablagerung aus Seitengerinne sehr spezifisch (s. Anhang D).</p>
Aktive Geschiebe- zufuhr: Korngrössen & Mengen	<p>Als aktiv bezeichnet wird die Sicherstellung der Geschiebezufuhr durch einen technischen Eingriff.</p> <p>Eine aktive Geschiebezufuhr kann in folgenden Fällen notwendig sein:</p> <ol style="list-style-type: none"> a) Sedimentkontinuum in der Restwasserstrecke nicht vorhanden (z.B. wegen vollständigem Geschieberückhalt in Sammlern), b) visuell festgestellte abgeplästerte Sohle, c) Erosionstendenz im Gewässer. <p>Die Geschiebezufuhr kann erfolgen durch:</p> <ol style="list-style-type: none"> a) Seitenerosion mit Initiierung (Raubäume, Anrissstellen schaffen), b) Aushub in ufernahen Flächen (Bildung neuer tümpelartigen Lebensräume) mit anschliessendem Transport des Aushubs ins Gewässer, c) externe Kieszufuhr per Lastwagen.

Wichtig bei einer aktiven Geschiebezufuhr ist:

- Die Korngrösse und Kornverteilung müssen sich an den natürlichen Gegebenheiten orientieren oder am notwendigen Laichsubstrat. Es eignet sich z.B. Material aus der Stauwurzel des Speichers.
- Die Menge muss auf die Transportkapazität abgestimmt sein. Diese Abstimmung zur Auslösung der morphologischen Prozesse ist Teil der aktuellen Forschung. Erste Resultate zeigen, dass für die effiziente Verteilung Depotbänke ca. gleich hoch sein sollen wie der zu erwartende Hochwasserstand.

Bei Kieszugaben sind Bewilligungen zu beantragen. Zudem ist die Gestaltung der Kiesdepots in der Sohle, die Aushubtiefe im Gewässerumland und das mögliche Stranden von Fischen bei den Aushubstellen zu beachten. Ebenfalls ist sicherzustellen, dass die zukünftigen Ablagerungen flussabwärts nicht zu Lasten der Hochwassersicherheit sind. Ablagerungen an Gefällsknicken, Brücken etc. sind zu vermeiden.

Passive Geschiebezufuhr

Als passive Geschiebezufuhr werden Prozesse definiert, durch welche Geschiebe mittels Erosionsprozesse (Seitenerosion, Erosion Ablagerungen Zubringer, Eintiefung) ohne Eingriffe ins Gerinne gelangen. Die passive Geschiebezufuhr ist kostengünstig realisierbar, erfordert jedoch grosse Abflussmengen. Zu beachten ist zudem die Zulässigkeit der Erosion (Prinzip und Ausmass).

Die passive Geschiebezufuhr aus der Sohle durch Eintiefung ist im Einzelfall kritisch zu beurteilen, da sie langfristig zu einem unerwünschten Ungleichgewicht in der Restwasserstrecke führen kann.

Weitere Einflussfaktoren

Folgende Faktoren, welche die Dimensionierung eines kHW ebenfalls beeinflussen können, wurden am Workshop zusätzlich genannt:

- Temperatur des Wasser im Speicher und im Zielgewässer (z.B. Kleine Saane),
- Wetter als kurzfristiger Steuerfaktor: Schlechtwetterperioden sind bevorzugt,
- Berücksichtigung besondere Ereignisse oder Verhältnisse im Einzugsgebiet (z.B. Altlast Pila bei der Kleinen Saane).

3.6 Rahmenbedingung

Einbezug Rahmenbedingungen entscheidend für Akzeptanz

Die Akzeptanz von kHW als Massnahme zur Sanierung des Geschiebehaushalts von Wasserkraftwerken hängt entscheidend von der Berücksichtigung der örtlichen Rahmenbedingungen respektive Einschränkungen ab.

Dies hat sowohl die Befragung in den Kantonen als auch jene der Experten ergeben. Das Thema Rahmenbedingungen wurde folglich am Workshop als Schwerpunkt vertieft, indem Rahmenbedingungen gesammelt und im Anschluss ausgewertet wurden. Es ergibt sich folgende Kategorisierung mit der entsprechenden Anzahl Nennungen.

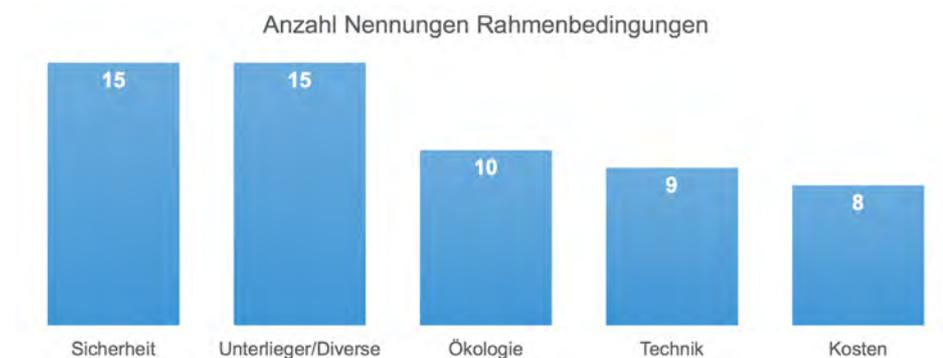


Abb. 3.5: Kategorisierung der zu berücksichtigenden Rahmenbedingungen.

Hauptanliegen

Hauptanliegen der jeweiligen Kategorien, d.h. die am häufigsten genannten Rahmenbedingungen und zu berücksichtigenden Einschränkungen sind:

- Sicherheit: Berücksichtigung von Personen- und Sachrisiken im Zusammenhang mit der Abflussspitze,
- Unterlieger/Diverse: Einbezug der Gemeinden (deren Interessen, Anliegen, Einschränkungen bis hin zu einer allfälliger Opposition) und der Nutzungen (Fischerei, Landwirtschaft, Tourismus, Wasserwirtschaft, Kiesentnahmen),
- Ökologie⁷: Erhebung und Abstimmung auf sensible Arten und Lebensräume,
- Technik: Abklärung technische Machbarkeit kHW über die Auslassorgane (Belastung, Steuerungsmöglichkeit),
- Kosten: Haftung und Kostenübernahme im Schadenfall.

Die Ökologie wurde am Workshop zusammen mit der Wichtigkeit der Zielsetzung als Rahmenbedingung verschiedentlich genannt und diskutiert. Diese Aspekte werden in den Kap. 3.2 und Kap. 3.4 abgehandelt.

⁷ Mehrere Nennungen betreffen die Wichtigkeit der Zielsetzung, welche via Kap. 3.4 in die Dimensionierung einfließt.

Rahmenbedingungen
für Planung und
Dimensionierung

Die Diskussionen am Workshop, die Auswertung der Nennungen und die Rückmeldungen zum Workshop lassen folgende Schlüsse bezüglich Rahmenbedingungen für die Planung und Dimensionierung zu:

- Die Hochwassersicherheit ist an den kritischen Stellen hinsichtlich Wassermenge, Geschiebe und Schwemmholt nachzuweisen.
- Gemeinden und Unterlieger (evtl. andere Kantone/Ausland) sind früh über die Planung zu informieren und einzubeziehen.
- Schutz- und Nutzungsinteressen sind entlang dem Gewässer systematisch zu erheben und in die Planung einzubeziehen.
- Die technischen Eigenschaften der Anlage sind massgebend für die Durchführung: verfügbares Volumen im Speicher, Auslassorgane des Speichers (Maximalabfluss, Steuerbarkeit hinsichtlich Raten, Belastbarkeit, Verfügbarkeit, Abnutzung).
- Als limitierend für die Durchführung eines kHW können sich die Haftungsfrage (keine Kostenübernahme durch Swissgrid im Schadenfall) und generell die Nutzungsinteressen der Unterlieger erweisen.

3.6.1 Technik

Beschränkung
Abflussspitze

Die technischen Möglichkeiten und Einschränkungen am Kraftwerk sind eine Rahmenbedingung für Bestimmung der Art des kHW. Am Colorado River (Grand Canyon) beispielsweise beschränken die technischen Komponenten des Kraftwerkes den Maximalabfluss des kHW, welcher deutlich unter der Abflussspitze eines natürlichen Hochwassers liegt (Collier et al., 1997).

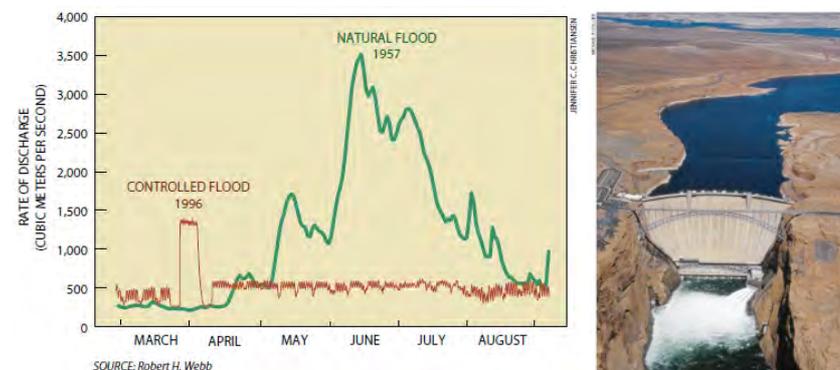


Abb. 3.6: Beispiel Abflussbegrenzung durch Auslassorgane (Collier et al., 1997).

Technische und
betriebliche
Einschränkungen

Folgende Rahmenbedingen im Zusammenhang mit der Kraftwerksanlage (Speicher) sind zu berücksichtigen:

- Technische Einschränkungen
 - Verfügbarkeit Volumen (Füllungsgrad) mit und ohne Turbinierung während eines kHW,
 - Maximale Abflussmengen Auslassorgane,
 - Steuerungsmöglichkeiten Auslassorgane,
 - Belastung Auslassorgane,
 - Höhe der Wasserfassungen (Einfluss auf Temperatur, z.B. Stauwehr Rossens, Kleine Saane).
- Betriebliche Einschränkungen
 - Unterhaltsperioden,
 - Einschränkung der Flexibilität des KW-Betriebs,
 - Ertragsausfall bei Speicherkraftwerken im alpinen Raum mit grossen Fallhöhen.

Verwendung Grundablass

Insbesondere ist abzuklären, unter welchen Voraussetzungen der Grundablass einer Staumauer für Sanierungsmassnahmen verwendet werden kann, da dieser ein Not- und nicht ein Regulierorgan ist. Aspekte wie Verschleiss, Unterhaltsfrequenz und Talsperrensicherheit sind zu klären. Gegebenenfalls sind vorgängig durch technische Massnahmen die Voraussetzungen für die Durchführung von kHW an der Anlage zu schaffen.

Abflussspitze und Änderungsraten eingeschränkt

Durch die technischen Rahmenbedingungen der Kraftwerksanlage werden hauptsächlich die Abflussspitze und Änderungsraten des Abflusses eingeschränkt. Auch die Zeitperiode (z.B. Unterhalt, Verfügbarkeit) und die Dauer (Volumen, Verfügbarkeit) können betroffen sein.

kHW ab Staumauer oder Ausgleichsbecken

Erfolgt ein kHW bei der Staumauer, betreffen die Verbesserungen die gesamte Restwasserstrecke. Die Steuerung des Abfluss ab Staumauer ist i.d.R. anspruchsvoll. Erfolgt ein kHW ab Zwischenbecken, lässt sich dieses i.d.R. besser zu steuern, die eigentliche Beeinträchtigung wird aber nur teilweise saniert. Zudem kann das verfügbare Volumen ab Zwischenbecken einschränkend sein.

3.6.2 Sicherheit

Personen- und Sachrisiken

Die Sicherheit ist ein zentrales Thema. Sie erfordert eine regionale Sichtweise, die technische und administrative Koordination und eine transparente Kommunikation. Unter den Aspekt der Sicherheit fallen:

- Das Personenrisiko durch Nutzungen entlang und im Gewässer:
 - Touristische Nutzung (Wassersport, Erholung, Erlebbarkeit Gewässer, offizielles und wildes Campieren),
 - Fischereiliche Nutzung.
- Personen- und Sachrisiken verbunden mit der Hochwassersicherheit:
 - Überschwemmung,
 - Verklausung, Schwemmholz,
 - Auflandungs- und Erosionsprozesse Geschiebe.

Personenrisiko durch Nutzungen

Das Personenrisiko durch Nutzungen ist im Rahmen der Durchführung von kHW zu minimieren. Die notwendigen Massnahmen (Informations- und Sicherheitsdispositiv) sind prinzipiell vergleichbar mit Stauraumspülungen und können angepasst übernommen werden.

Personen- und Sachrisiken Hochwassersicherheit

I.d.R. sind die Personen- und Sachrisiken von kHW (Jährlichkeiten 2 bis 5 Jahre oder kleiner) geringer als von grossen, nHW (HQ₃₀ und grösser). Trotzdem ist mit Blick auf die Akzeptanz von kHW die Hochwassersicherheit im Einzelfall abzuklären. D.h. die Hochwassersicherheit ist mittels systematischer Erhebung der kritischen Querschnitte und dem Nachweis des schadlosen Abführens der Abflussspitze des kHW nachzuweisen. Als Hilfsmittel dienen Normalabflussberechnungen, Staukurvenberechnungen im 1D-Modell oder im Ausnahmefall 2D-Überflutungsmodellierungen (s. Kapitel 3.5.1 Abflussspitze). Ist das Personen- und Sachrisiko nicht akzeptabel, ist die Abflussspitze des kHW zu reduzieren. Dies dürfte aber höchstens in Ausnahmefällen von Bedeutung sein.

Einfluss des Geschiebes	<p>Die mögliche Zugabe von Geschiebe bei kHW ist im Gesamtkontext unter Berücksichtigung des Längenprofils, des Geschiebetransports und der Hochwassersicherheit zu planen. Auflandungen an hochwassergefährdeten Abschnitten und Schlüsselstellen wie Gefällsknicken, bei Brücken oder in Ausweitungen sind zu verhindern. Für kHW ohne Geschiebezugabe sind, bei fehlendem Geschiebe im Gewässer, Erosionsprozesse abschnittsweise zu quantifizieren und die Risiken auf Bauwerke abzuschätzen. Allenfalls sind bezüglich Auflandungs- und Erosionsprozessen Nachweise mittels 1D-Modellen mit Geschiebetransport notwendig.</p>
Risiken durch Schwemmholz	<p>Die Verklausungsproblematik durch Schwemmholz an querenden Bauwerken oder bei Gerinneengpässen ist in der Planung abzuhandeln. Schwemmholzquellen sind in der Planung zu erfassen und bei den Vorbereitungsarbeiten zur Durchführung zu entfernen oder zu verkleinern.</p>
Schrittweise Herantasten	<p>Durch das schrittweise Herantasten können die Risiken minimiert werden. Aus Sicherheitsüberlegungen und im Hinblick darauf, dass allfällige Schäden im Zusammenhang mit kHW nicht entschädigt werden, lässt sich eine Umsetzungsstrategie begründen, die sich "von unten" an das optimale kHW-Ausmass herantastet. Dieses Vorgehen bedingt und umfasst:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Die kantonalen Sanierungsverfügungen und der Swissgrid Entscheidung sind als Rahmenverfügung so zu verfassen, dass der administrative Aufwand während des Optimierungsprozesses (eng gekoppelt an Wirkungskontrolle) von kHW minimiert wird. • Sanierungsverfügung und der Entschädigungsentscheid sind nicht auf x Jahre beschränkt, sondern bleiben als Rahmenverfügung während des ganzen Optimierungsprozesses gültig. Dadurch entsteht nach x Jahren nicht eine Umsetzungslücke infolge überarbeiteter Gesuche und Verfahren.
Kosten-Nutzen Verhältnis	<p>3.6.3 Kosten</p> <p>Das Kosten-Nutzen Verhältnis ist in der Planung zu berücksichtigen. Folgende Faktoren beeinflussen das Kosten-Nutzen Verhältnis massgebend:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Auf Seite Nutzen: Faktoren wie die Grösse und Höhenstufe des Einzugsgebietes, der Verbauungsgrad des Gewässers, die profitierende Gewässerlänge und letztlich demzufolge das ökologische Potenzial. • Auf Seite Kosten: <ul style="list-style-type: none"> ○ der Produktionsausfall, d.h. das notwendige Volumen (Dauer), Zeitpunkt des kHW, die Fallhöhe, die Anzahl der kHW, ○ die Kosten für Planung, Durchführung, Erfolgskontrolle und Entschädigungsgesuch. <p>Zur Berechnung der Kosten der Massnahme wird empfohlen, in Folge der Unsicherheit in der Dimensionierung und des Optimierungsprozesses bezüglich Wirkung verschiedene „Szenarien zu beziffern (min.-mittleres-max. kHW). Die Information zu voraussichtlichen Kosten braucht es einerseits, um die Verhältnismässigkeit der Massnahme beurteilen zu können, und andererseits für das Entschädigungsgesuch an Swissgrid.</p>

Haftung und
Kostenübernahme im
Schadenfall

Es ist keine Haftung und Kostenübernahme durch Swissgrid im Schadenfall vorgesehen. Dies kann sich einerseits limitierend auf die Durchführung eines kHW auswirken und andererseits spricht dies für das Herantasten "von unten". Muss die Beeinträchtigung beseitigt werden, ist eine Interessensabwägung durchzuführen.

3.6.4 Unterlieger/Diverse

Einschränkungen und
Interessen Unterlieger
systematisch erfassen

Folgende Unterliegerinteressen und Einschränkungen gilt des in der Planung zu koordinieren und berücksichtigen:

- Touristische Nutzungen des Gewässers,
- Nutzung durch Fischereiverbände,
- Landwirtschaftliche Nutzung entlang dem Gewässer,
- Koordination mit weiteren Gewässersanierungsmassnahmen (Restwassersanierung, Revitalisierung, Fischauf- und -abstieg, Schwall-Sunk),
- Materialbewirtschaftung: Kiesentnahmen, Materialaufbereitung, Bewirtschaftung Geschiebesammler,
- Wasserentnahmen: Wasserfassungen für Bewässerung, Kühlung, Stromproduktion etc.,
- Weitere Infrastruktur und Bauten in und am Gewässer,
- Einbezug von Gemeinden, Landeigentümern, Umweltverbänden,
- Interkantonale oder internationale Koordination.

3.7 Durchführung

Obwohl ein kHW je nach Zielsetzung und Rahmenbedingung unterschiedlich dimensioniert und durchgeführt wird, sind vor der Durchführung Vorkontrollen und Vorarbeiten sowie nach der Ausführung abiotische und biotische Wirkungskontrollen durchzuführen.

3.7.1 Vorkontrolle zur Überprüfung der Notwendigkeit

Strategische Planung
als Grundlage

Die Notwendigkeit zur Durchführung von kHW wurde im Rahmen der Strategischen Planung von den Kantonen erstmals erfasst und die sanierungsbedürftigen Anlagen wurden ausgeschieden (BAFU, 2015a) oder sind im Sanierungsentscheid zur Restwasserregelung festgelegt. Auf dieser Basis folgt die Detailplanung.

Vorkontrollen an
Schlüsselstellen
(Ortsbesichtigung)

Wenige Wochen vor der Durchführung des kHW ist an Schlüsselstellen der Ist-Zustand durch einen Experten zu beurteilen, um festzustellen ob ein kHW zur Beseitigung der Defizite notwendig ist. Bei genügend grossen Überläufen oder natürlichen Hochwassern kann auf die Durchführung eines kHW verzichtet werden.

Gewässerspezifischer
Handlungsbedarf

Der Handlungsbedarf ist im Rahmen von gewässerspezifischen Abklärungen vor der Durchführung des kHW festzulegen. Grundsätzlich sind kHW erforderlich, wenn die festgestellten Defizite wie Kolmation, starker Algen- und Bryophystenbewuchs, übermässige seitliche Ablagerungen von Feinsedimenten und übermässige Laubanhäufungen im Gewässer durch kHW zu mindern und nicht anders zu beseitigen sind. Es ist anzumerken, dass für Restwasserstrecken in kleinen und mittleren Gewässern typische hydraulische Störungen der Benthosfauna ohne kHW kaum zu bewerkstelligen sind.

3.7.2 Vorbereitungsarbeiten

Kommunikation

Informieren

- Information an Unterlieger, Behörden und Nutzer des Gewässers (Schreiben, Mail/Fax, Zeitung, Radio/TV),
- Anbringung von Informationsplakaten an Zugängen (Wanderwege, Strassen) mindestens 1 Tag vor der Durchführung zum Gewässer. Je nach Region sind 2-sprachige Informationen notwendig.

Vorbereitungsarbeiten am Gewässer

Vorarbeiten im
Gewässer

- Initiierung/Zugabe Geschiebe,
- Rodung oder Unterhaltsarbeiten zur Förderung der Mobilisierung von Kiesbänken etc.

Diese Arbeiten erfolgen eine bis mehrere Wochen vor Durchführung.

Notwendige Feldarbeiten

Feldarbeiten

- Anbringung von Markierungen,
- Anbringung von langfristig sichtbaren Kontrollpunkten zur Einschätzung des Abflusses (z.B. Messlatten, -marken an Brücken, Felsblöcken etc.),
- Evtl. Farbmarkierungen mit Sprays oder Einbringung von gefärbten Kiesfraktionen,

- Erhebung der abiotischen und biotischen Indikatoren (Einzelheiten s. Kap. 3.7.5 Wirkungskontrolle).

Diese Arbeiten erfolgen wenige Tage vor Durchführung.

3.7.3 Durchführung des kHW

Kontrollmessungen
und Beobachtungen
während kHW

Während dem kHW sind Temperatur und die Trübung (z.B. mit Imhoff-Trichter), falls notwendig, zu messen. Fotos und Videos sind bei der Interpretation hilfreich. Gemäss bisherigen Erkenntnissen sind diese beiden Parameter i.d.R. nicht kritisch. Ein eindeutiger evtl. einmaliger Nachweis ist jedoch zu erbringen.

3.7.4 Wirkungskontrolle

Durch die Erhebung des Zustandes vor und nach der Durchführung des kHW werden mit der Wirkungskontrolle die Veränderung durch das kHW erfasst. Es empfiehlt sich für die Wirkungskontrolle vor und nach dem kHW die identischen Parameter und Standorte festzulegen.

Sofort nach HW-Ende

Beim ersten kHW sollte die ganze Restwasserstrecke nach gestrandeten Fischen und Makrozoobenthos abgesucht werden. Der Einbezug der Fischereiaufsicht wird empfohlen, da aufgrund von Tageszeit und allfälligen Raubtieren die Beobachtungszeit limitiert ist. Aufgrund der Ersterhebung kann der Aufwand bei späteren Wiederholungen eingeschränkt werden.

Methoden

Folgende Methoden werden häufig angewendet:

- Kartierung: Mesohabitate, Korngrößen, Kolmation, Algen- und Bryophytenbedeckung,
- Farbmarkierungen von Geschiebe,
- Aufnahme von Quer- und Längsprofilen an Kontrollpunkten,
- Drohnenflüge mit hochauflösender Kamera kombiniert mit GPS Datenbearbeitung (erlaubt mit wenig Aufwand Erosions- Depositionszonen zu quantifizieren und Korngrößen zu analysieren),
- Messung von Geschiebetransport und Abfluss,
- Vermessung von Kiesbänken, Ausdehnung überflutete Flächen.

Die Anzahl der notwendigen Untersuchungsstandorte ist je nach Gewässer und Zielsetzung festzulegen. Die Anzahl steigt mit der Heterogenität (Morphologie und Ökologie) des Fließgewässers.

Indikatoren

Die Wahl der abiotischen und biotischen Indikatoren hängt von der Zielsetzung ab. Häufig in Schweizer Gewässern angewendete Indikatoren sind in Tab. 3.2 aufgeführt.

Tab. 3.2: Abiotische und biotische Indikatoren zur Wirkungskontrolle von kHW.

Abiotisch	Biotisch
Ausdehnung von Kiesbänken	Qualität des Intersitials Algen-, Moosbewuchs <i>Bedeckungsgrad, Art</i>
Kornverteilung des Substrats	Besiedelbarkeit der Gewässersohle
Innere Kolmation Gewässersohle	Anzahl Laichlaichgruben in Forellengewässern <i>geeignete Korngrösse Kieslaicher</i>
Äussere Kolmation Gewässersohle	Habitatvielfalt
Veränderung der mittleren Sohlenlage	MZB/Vegetation <i>Biogene Substrate, Abundanz, Artenzusammensetzung anhand funktionellen Gruppen, Indikatorarten, Rote Liste-Arten</i>
Veränderung der Lage des Talwegs	Ufer- & Auenvegetation <i>Sukzessionen Pflanzengesellschaften, Vegetationstypen</i>

Um die Wirkung von kHW aufzuzeigen, ist die Untersuchung von abiotischen und biotischen Indikatoren vor und nach dem kHW zwingend. Die Rückmeldungen aus dem Workshop zeigen, dass mittels Bio-monitoring vor und nach dem kHW gezeigt werden muss, ob mit den entsprechenden Sanierungsmassnahmen die wesentlichen Beeinträchtigungen von Pflanzen und Tieren sowie deren Lebensräume beseitigt werden können.

Abiotisch

Abiotische Indikatoren zeigen strukturelle Änderungen rasch an und geben einen ersten Rückschluss über die erzielte Wirkung des kHW. Um die Nachhaltigkeit von kHW zu überprüfen sind zusätzlich längerfristige Kontrollen der biotischen Parameter notwendig.

Biotisch

Die Erhebung der biotischen Indikatoren ist im Vergleich zu den abiotischen meist mit einem grösseren Aufwand im Feld verbunden. Kurzfristige Wirkungen von biotischen Faktoren sind durch die Bedeckung des Algen- und Moosbewuchs sowie der Zählung von Laichgruben möglich (Bspw. Spöl und Kleine Saane).

Die Wirkung der restlichen biotischen Indikatoren ist nicht sofort zu erwarten, sondern zeitverzögert und unter Umständen erst nach Optimierung der weiteren kHW. Veränderungen von Fischpopulationen und Makrozoobenthos sind beispielsweise erst nach 5-6 Jahren zu erwarten.

Wirkungskontrolle am Spöl

Das Beispiel der Wirkungskontrolle am Spöl zeigt, dass abiotische Parameter vorwiegend für eine kurzfristige und biotische Parameter für eine langfristige Wirkungskontrolle geeignet sind (Anhang D). Dies be-

stätigen auch die Untersuchungen beim Stauwehr Montsalvens der kHW mit Geschiebeeinbringung.⁸

Weitere Beispiele mit Erfahrungen über längerfristige Wirkungen von kHW existieren in der Schweiz nicht, da bis heute nur wenige kHW durchgeführt wurden und die Verbesserungen (vor allem biotisch) erst längerfristig, bzw. nach der Durchführung von mehreren kHW erkennbar sind.

Für weitere Informationen zur Anwendung der Indikatoren verweisen wir auf die Vollzugshilfe „Sanierung Geschiebehaushalt – Massnahmen“.

Äussere Einflüsse

Bei Wirkungskontrollen und deren Interpretation sind weitere Einflüsse zu berücksichtigen:

- natürliche Hochwasser,
- Verschmutzungen,
- Spülungen und Stauraumentleerungen für Unterhaltsarbeiten,
- Fischbesatz,
- etc.

Pragmatische Wirkungskontrolle

Die genauen Zusammenhänge zwischen kHW und der Biologie sind immer noch Teil der Forschung. Deshalb wird für kleinere Gewässer eine pragmatische Wirkungskontrolle empfohlen. Zu beantwortende Fragen sind:

- Wurde die Zielsetzung erreicht?
- Sind die strukturellen Defizite in der Gewässersohle und am Ufer behoben?
- Sind die wesentlichen Beeinträchtigungen beseitigt?

Konzept Wirkungskontrolle

Mit der Einreichung des Finanzierungsgesuchs der Massnahme ist auch ein Konzept zur Wirkungskontrolle einzureichen. Dieses beschreibt wie die Zielsetzungen qualitativ und quantitativ über einen definierten Zeitraum zu erreichen sind. Notwendige Optimierungsmassnahmen (s. Kap. 3.8) bei Nichterreichung der Zielsetzung werden ebenfalls aufgeführt.

⁸ Rey B. & Zbinden S.: Barrage de Montsalvens. Projet pilote - Déversement de gravier (Präsentation am 2. ERFA Geschiebe in Bern am 4.6.2016).

3.8 Optimierungsprozess

Möglichkeiten zur Optimierung

Die Wirkungskontrolle dient unter anderem dem Optimierungsprozess für zukünftige kHW. Je nach Veränderung gemäss den abiotischen und biotischen Indikatoren ist die Dimensionierung anzupassen. Für die Optimierung ist zu beachten, dass sich vor allem die biotische die Wirkung des kHW noch längere Zeit nach dem kHW verändern kann.

Tab. 3.3: Möglichkeiten der Optimierung der Dimensionierung je nach Feststellung nach dem kHW.

Feststellung	Anpassung Dimensionierung
Keine ausreichende Mobilisierung Geschiebe Fehlende Kiesfraktionen für Kieslaicher Keine Reduktion Kolmation/Algenbedeckung	Erhöhung Dauer Erhöhung Abflussspitze Einbringen Geschiebe
Gestrandete Fische	Reduktion Abflussrückgang Evtl. Anpassung der kritischen Stellen
Hohe Temperaturunterschiede	Anpassung Zeitperiode Anpassung der Wasserabgabe beim Stausee
Hohe Trübung	Reduktion Öffnung Grundablass
Keine Verbesserungen beim MZB und bei Fischen	Anpassung der Häufigkeit und Abflussspitze der kHW
Ausbleiben von Übersarungen, Umlagerungen/Aufreissen in bewachsenen Kiesbänken	Erhöhung Abflussspitze Evtl. Anpassungen der Eingriffstellen und der Art der Kiesaktivierung
Evtl. Schäden Unterlieger/Bauwerke	Anpassung Hydrogramm

Iterativer Prozess

Dieser iterative Prozess wird nach jedem kHW durchgeführt. Um die Übertragbarkeit der Resultate der Wirkungskontrolle auf vorhergehende und zukünftige Ereignisse zu gewährleisten, sind identische Kontrollstandorte und Parameter notwendig. Wichtig ist die fundierte Erfassung des Ausgangszustandes vor dem ersten kHW.
Um die erwünschte Wirkung zu erzielen, ist weiterhin ein „Herantasten von unten“ mit eher klein dimensionierten kHW angebracht.
Wiederum wird empfohlen, vor jedem weiteren kHW den aktuellen Ist-Zustand (mit Einbezug der Veränderung durch das erfolgte kHW) zu erheben.

4 Weiterführende Hinweise

Zusätzliche Hinweise	Dieses Kapitel listet offene Fragen Handlungsbedarf und Empfehlungen auf, welche während der Erarbeitung der Auslegeordnung gesammelt wurden.
4.1 Offene Fragen	
Langzeitforschung	Die längerfristige biologische Wirkung ist mit Ausnahme vom kHW am Spöl kaum untersucht, da viele kHW erst 1-2 mal durchgeführt wurden. Es besteht Bedarf an Forschung und Praxis langfristige Erkenntnisse zu gewinnen.
Synergie mit Spülungen	<p>kHW in Synergie mit Spülungen wurden in der Schweiz noch keine durchgeführt. Konkrete Erfahrungen zur Festlegung eines sinnvollen Zeitpunkts fehlen:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Stauraumspülung: Mai/Juni (wie nHW durch Schneeschmelze und Starkniederschlag) • kHW: Aug/Sept (Anpassung Laichzeiten, Habitate für Jungfische).
Ablauf kHW und Spülungen	<p>Zudem ist die mögliche Form der Synergie zwischen kHW und Spülungen zu untersuchen. Eine Ablaufmöglichkeit wäre:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) Stauraumspülung von Feinsedimenten mit Kieszugabe/Initiierung im Unterwasser und zeitgleichem kHW (d.h. erhöhter Spülabfluss), 2) Stauraumspülung (mit gängigem Spülabfluss) und mit verzögertem nachgeschaltetem kHW zur Förderung des Geschiebetransports.
4.2 Handlungsbedarf	
Weiterführung praxisorientierte Forschung	Weiterführung der praxisorientierten Forschungsprojekte mit kHW, um Fragen der Dimensionierung und der Wirkung besser zu beantworten.
Haftung im Schadenfall	Festlegung von Anwendungsregeln für die Haftung im Schadenfall infolge kHW.
Entschädigungsgesuch Swissgrid	Flexible Formulierungen der Verfügungen und Bewilligungen der Massnahme, um bei notwendigen Anpassungen der Zielsetzungen den administrativen Aufwand für das Entschädigungsgesuch an Swissgrid zu minimieren.
Checkliste	Erarbeiten einer Praxisanleitung im Sinne einer Checkliste zur Durchführung von kHW im Rahmen der Vollzugshilfe „Sanierung Geschiebehauhalt – Massnahmen“.

4.3 Empfehlungen

Praxistaugliche Verfügung	Da oftmals Optimierungen für weitere kHW notwendig sind, ist die Verfügung praxistauglich zu verfassen. Dies bedeutet, dass einerseits eine möglichst detaillierte Dimensionierung wichtig ist und andererseits Spielraum für Optimierungen vorhanden sein sollte.
Regelmässiger nationaler Austausch	Plattform für Austausch zukünftiger Erfahrungen: in den nächsten Jahren sind ca. 10 weitere kHW geplant (s. Anhang E). Um von zukünftigen Erfahrungen zu profitieren, ist es wichtig, eine nationale Austauschplattform zu schaffen. Diese kann sich an den Themen Zielsetzung Planung, Durchführung und Optimierung von kHW orientieren. Hierbei ist es zentral, Erfahrungen aller beteiligten Akteure zusammenzutragen (Kantone, Kraftwerke, Forschung, Umweltverbände etc.). Der Erfahrungsaustausch kann beispielsweise wie bis anhin im Rahmen von Veranstaltungen der WasserAgenda-21 erfolgen.
Internationaler Austausch	Internationaler Austausch: Bereichernd sind auch Sichtweisen aus benachbarten Ländern mit Gewässern im voralpinen und alpinen Raum (Frankreich, Italien, Deutschland, Österreich). Es ist zu überlegen, ob ein internationaler Austausch im Rahmen einer Tagung oder eines Workshops den Optimierungsprozess von kHW unterstützen kann.

5 Anhänge

Anhang A: Referenzen

- BAFU (2011). Methoden zur Untersuchung und Beurteilung der Fließgewässer. Hydrologie – Abflussregime Stufe F (flächendeckend). Umwelt-Vollzug, Bern.
- BAFU (2012). Einzugsgebietsmanagement. Anleitung für die Praxis zur integralen Bewirtschaftung des Wassers in der Schweiz. Umwelt-Wissen, Bern.
- BAFU (2015a). Renaturierung der Schweizer Gewässer. Sanierungspläne der Kantone 2015.
- BAFU (2016). Ökologische Sanierung bestehender Wasserkraftanlagen. Finanzierung der Massnahmen. Ein Modul der Vollzugshilfe „Renaturierung der Gewässer. Bern.
- Baumann, P., Kirchhofer A., Schälchli U. (2012). Sanierung Schwall/Sunk – Strategische Planung. Ein Modul der Vollzugshilfe Renaturierung der Gewässer. Bundesamt für Umwelt. Bern.
- Berchtold, T. (2015). Numerische Modellierung von Flussaufweitungen. *VAW-Mitteilungen* 231, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), (R. M. Boes, ed.), ETH Zürich, Schweiz.
- BUWAL (1994). Ökologische Folgen von Stauraumpülungen: Empfehlungen für die Planung und Durchführung spülungsbegleitender Massnahmen. Schriftenreihe Umwelt Nr. 219.
- Cook, R. (2015). Can dam releases restore river ecosystems? *Earthmagazine*.
- Collier, M., Webb, M., Andrews, E. (1998). Experimental Flooding in Grand Canyon. *Scientific American*.
- De Cesare, G., Altenkirch, N., Schleiss, A., Roth, M., Molinari, P. und Michel M. (2015). Störfall am 30. März 2013 bei der Staumauer Punt dal Gall. Wasser Energie Luft (WEL).
- Döring, M. & Robinson, C.T. (2012). Wassermanagement: Schutz und Nutzen verbinden. *Eawag News*, 72, 18-21.
- Günter, A. (1971). Die kritische mittlere Sohlenschubspannung bei Geschiebemischungen unter Berücksichtigung der Deckschichtbildung und der turbulenzbedingten Sohlenschubspannungsschwankungen, Mitteilung Nr. 3 der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH Zürich, 1971.
- Kantoush, S. A., Sumi, T. (2010). Geomorphic response of rivers below dams by sediment replenishment technique. *River Flow 2010 - Dittrich, Koll, Aberle & Geisenhainer (eds) - © 2010 Bundesanstalt für Wasserbau ISBN 978-3-939230-00-7*.
- Koechlin, S. (2014). Vorzeigeprojekt ohne Nachahmer. *Eawag news* Nr. 2.
- Kondolf, M. (1997). Hungry Water: Effects of Dams and Gravel Mining on River channels. *Environmental Management*, 21, 533-551.
- Konrad, C., Olden, J., Lytle, D., Melis, T., Schmidt, J., Bray, E., Freeman, M., Gido, K., Hemphill, N., Kennard, M., McMullen, L., Mims, M., Pyron, M., Robinson, C. und Williams, J. (2011). Large-scale Flow Experiments for Managing River Systems. *BioScience*. Vol. 61 No12.
- Lamb, M.P., Dietrich, W.E., Venditti, J.G. (2008). Is the critical Shields stress for incipient sediment motion dependent on channel-bed slope? *Journal of Geophysical Research – Earth Surface*, 113, F0(2008), doi:10.1029/(2007)JF000831.
- Molles, C., Crawford, D., Ellis, L., Valett, H. und Dahm, C. (1998) Managed Flood for Riparian Ecosystem Restoration. Managed flooding reorganizes riparian forest ecosystem along the middle Rio Grande in New Mexico. <http://bioscience.oxfordjournals.org/>.
- Molnar, P., Favre, V., Perona, P., Burlando, P., Randin, C. und Ruf, W. (2008). Floodplain forest dynamics in a hydrologically altered mountain river. *Peckiana*, Vol. 5 S. 17-24.
- Mürle, U., Ortlepp und J. Zahner M. (2003). Effects of experimental flooding on riverine morphology, structure and riparian vegetation: The River Spöl, Swiss National Park. *Aquatic Sciences* 65, 191.
- NIWA (2007). Flushing flows for the control of nuisance periphyton growth in the Opuha-Opihi River System (2004-2006). Taihoro Nukurangi.
- NSW Office of Water (2010). Returning environmental flows to the Snowy River, an overview of water recovery, management and delivery of increased flows.
- Olden, J., Konrad, C., Melis, T., Kennard, M., Freeman, M., Mims, M., Bray, E., Gido, K., Hemphill, N., Lytle, D., Mc Mullen, L., Pyron, M., Robinson, C., Schmidt, J. und Williams, J. (2014).

- Are large-scale flow experiments informing the science and management of freshwater ecosystems? The Ecological Society of America.
- Patten, D. (2001). A Managed Flood on the Colorado River: Background, Objectives, Design, and Implementation. The Ecological Society of America.
- Perona, P., Molnar, P., Savina, M und Burlando, P. (2009). An observation-based stochastic model for sediment and vegetation dynamics in the floodplain of an Alpine braided river. *Water resources research*. Vol. 45. W09418, doi:10.1029/2008WR007550.
- Perona, P., Camporeale, C., Perucca, E., Savina, M., Molnar, P., Burlando, P. und Ridolfi, L. (2008). Modelling river and riparian vegetation interactions and related importance for sustainable ecosystem management. *Aquatic Sciences*. 71 S. 266-278. 1015-1621/09/030266-13 DOI 10.1007/s00027-009-9215-1.
- Petts, G., und Gurnell, A. (2005). Dams and geomorphology: Research progress and future directions. *Science direct. Geomorphology* 71, 27-47. doi:10.1016/j.geomorph.2004.02.015.
- Pfaundler, M. et al. (2011). Methoden zur Untersuchung und Beurteilung der Fließgewässer. *Hydrologie – Abflussregime Stufe F (flächendeckend)*. Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Vollzug Nr. 1107: 113 S.
- Poff, N., Allan, D., Bain, M., Karr, J., Prestegard, K., Richter, B., Spark, R. und Stromberg, J. (1997). The Natural Flow Regime. A paradigm for river conservation and restoration.
- Recking, A. (2009). Theoretical development on the effects of changing flow hydraulics on incipient bed load motion. *Water Resources Research*, 45, W04401, doi:10.1029/(2008)WR006826.
- Rickenbacher, U. (2015). Kraftwerke Sarganserland AG. Tamina Bad Ragaz. Spülung 2014, Auswertung. Apxo.
- Robinson, C., Uehrlinger, U. und Monaghan, R. (2003). Effects of a multi-year experimental flood regime on macro-invertebrates downstream of a reservoir. *Aquatic Sciences*.
- Robinson, C. (2012). Long-term changes in community assembly, resistance, and resilience following experimental floods. *Ecological Applications*.
- Schaipp, B. und Zehm, A. (2009). Abschlussbericht des LfU zur Oberen Isar zum Gutachten von Prof. Dr. Reich und eigenen Untersuchungen zum Geschiebemanagement. Bayerisches Landesamt für Umwelt.
- Schälchli U., Kirchofer A. (2012). Sanierung Geschiebehaushalt. Strategische Planung. Ein Modul der Vollzugshilfe Renaturierung der Gewässer. Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Vollzug Nr. 1226: 74 S.
- Scheurer, T. (2013). How to set up a dynamic residual flow regime: the example of the River Spöl (Swiss National Park). *Management & Policy Issues*.
- Shields, A. (1936). Anwendung der Ähnlichkeitsmechanik und der Turbulenzforschung auf die Geschiebebewegung. Mitteilung der Preussischen Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffsbau, Heft 26, Berlin.
- Schleiss, A., Boes, R., Brodersen, J., Doering, M., Franca, M., Nadyeina, O., Pfister, M., Robinson, C., Scheidegger, C., Vetsch, D., Weber, C., Weitbrecht, V. und Werth S. (2014). Forschungsprogramm „Wasserbau und Ökologie“. *Wasser Energie Luft (WEL)*.
- Schlüchter, C. (2014). Dynamik dank Hochwasser im regulierten Spöl. 100 Jahre Schweizerischer Nationalpark. Präsentation.
- Uehrlinger, U. und Robinson, C. (2002). Der Spöl - Lebensraum und Energielieferant.
- Task-Force (2013). Task-Force Spöl, Schlussbericht Umweltunfall Spöl 2013.
- Tonolla, D., Chaix, O., Meile, T., Zurwerra, A., Büsser, P., Oppliger, S., Essyad, K. (2016). Schwall-Sunk – Massnahmen. Ein Modul der Vollzugshilfe Renaturierung der Gewässer. Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Vollzug Nr. X: X S. (Version für die Anhörung Februar 2016).
- Topping, D., Rubin, D., Grams, P., Griffiths, R., Sabol, T., Voichick, N. tusoo, R., Vanaman, K. und McDonald, R. (2010). Sediment transport during three controlled-flood experiments on the Colorado River downstream from Glen Canyon Dam, with implications for eddy-sandbar deposition in Grand Canyon National Park: U.S. Geological Survey Open-File Report 2010-1128, 111 p.

Wagner, T. und Zeh, H. (2005). Restwassersanierung Grenzkraftwerke. KW Ova Spin, Engadiner Kraftwerke AG (EKW). Ökologische Grobbeurteilung und Sanierungsvorschläge für die Wasserentnahme am Spöl bei Punt dal Gall. Sigmaphan.

Anhang B: Rechtliche Grundlagen

Auszüge relevanter Artikel für kHW (GschG & GschV) sind untenstehend für den Restwasserbereich, den Geschiebehaushalt, Spülungen und weiteren kHW-relevanten Aspekten aufgeführt.

a) Rechtliche Grundlagen betreffend kHW aus dem Restwasserbereich

Bei Konzessionserneuerung: Im Rahmen der Sicherung angemessener Restwassermengen (Art. 31 ff. GSchG) können neben der Mindestrestwassermenge auch kHW angeordnet werden.

Gemäss GSchG Art. 35

- Abs. 1 bestimmt die Behörde im Einzelfalle die Dotierwassermenge und die anderen für den Gewässerschutz unterhalb der Wasserentnahme nötigen Massnahmen.
- Abs. 2 kann die Dotierwassermenge zeitlich unterschiedlich festgelegt werden.

Gemäss Art. 32 Abs. c GSchG können im Rahmen einer SNP geeignete Massnahmen - das können auch kHW - zum Ausgleich einer tiefer angesetzten Mindestwassermenge an einem anderen Ort im Einzugsgebiet festgelegt werden. Art. 34 Abs. 3 GSchV präzisiert dazu: Ausgleichsmassnahmen im Rahmen einer SNP gelten als geeignet, wenn sie dem Schutz der Gewässer oder der von ihnen abhängigen Lebensräume dienen. Es muss sich dabei aber um eine zusätzliche Massnahme handeln. Das bedeutet, das kHW darf nicht bereits aufgrund von Art. 31 ff oder 43a GSchG erforderlich sein.

Sanierung laufende Konzessionen: wird durch die Wasserentnahme ein Gewässer wesentlich beeinflusst, können im Rahmen der Restwassersanierung gemäss Art. 80 GSchG soweit geeignete Massnahmen angeordnet werden (das kann auch kHW beinhalten), als dass diese wirtschaftlich tragbar sind. Falls dabei inventarisierte Landschaften und Lebensräume betroffen sind, kann die Sanierung auch über das wirtschaftlich Tragbare hinausgehen, allerdings mit Entschädigungspflicht (Art. 80 Abs. 2 GSchG).

b) Rechtliche Grundlagen betreffend kHW aus dem Bereich Geschiebehaushalt

GSchG

Art. 43a³² Geschiebehaushalt

¹ Der Geschiebehaushalt im Gewässer darf durch Anlagen nicht so verändert werden, dass die einheimischen Tiere und Pflanzen, deren Lebensräume, der Grundwasserhaushalt und der Hochwasserschutz wesentlich beeinträchtigt werden. Die Inhaber der Anlagen treffen dazu geeignete Massnahmen.

² Die Massnahmen richten sich nach:

- a. dem Grad der Beeinträchtigungen des Gewässers;
- b. dem ökologischen Potenzial des Gewässers;
- c. der Verhältnismässigkeit des Aufwandes;
- d. den Interessen des Hochwasserschutzes;
- e. den energiepolitischen Zielen zur Förderung erneuerbarer Energien.

³ Im Einzugsgebiet des betroffenen Gewässers sind die Massnahmen nach Anhörung der Inhaber der betroffenen Anlagen aufeinander abzustimmen.

Art. 83a Sanierungsmassnahmen

Die Inhaber bestehender Wasserkraftwerke und anderer Anlagen an Gewässern sind verpflichtet, innert 20 Jahren nach Inkrafttreten dieser Bestimmung die geeigneten Sanierungsmassnahmen nach den Vorgaben der Artikel 39a und 43a zu treffen.

GSchV

Art. 42a⁵⁴ Wesentliche Beeinträchtigung durch veränderten Geschiebehaushalt

Eine wesentliche Beeinträchtigung der einheimischen Tiere und Pflanzen sowie von deren Lebensräumen durch einen veränderten Geschiebehaushalt liegt vor, wenn Anlagen wie Wasserkraftwerke, Kiesentnahmen, Geschiebesammler oder Gewässerverbauungen die morphologischen Strukturen oder die morphologische Dynamik des Gewässers nachteilig verändern.

Art. 42c⁵⁶ Massnahmen zur Sanierung des Geschiebehaushalts

¹ Die Kantone erstellen für Anlagen, für die gemäss der Planung Massnahmen zur Sanierung des Geschiebehaushalts zu treffen sind, eine Studie über die Art und den Umfang der notwendigen Massnahmen.

² Die kantonale Behörde ordnet gestützt auf die Studie nach Absatz 1 die Sanierungen an. Bei Wasserkraftwerken muss das Geschiebe soweit möglich durch die Anlage durchgeleitet werden.

³ Bevor sie bei Wasserkraftwerken über das Sanierungsprojekt entscheidet, hört sie das BAFU an. Das BAFU prüft im Hinblick auf das Gesuch nach Artikel 17d Absatz 1 EnV⁵⁷, ob die Anforderungen nach Anhang 1.7 Ziffer 2 EnV erfüllt sind.

⁴ Die Inhaber von Wasserkraftwerken prüfen nach Anordnung der kantonalen Behörde die Wirksamkeit der getroffenen Massnahmen.

c) Rechtliche Grundlagen zu Spülungen

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.

GSchV

Art. 42⁵²

¹ Bevor eine Behörde eine Spülung oder Entleerung eines Stauraumes bewilligt, stellt sie sicher, dass die Sedimente anders als durch Ausschwemmung entfernt werden, wenn dies umweltverträglich und wirtschaftlich tragbar ist.

² Bei der Ausschwemmung von Sedimenten stellt die Behörde sicher, dass Lebensgemeinschaften von Pflanzen, Tieren und Mikroorganismen möglichst wenig beeinträchtigt werden, insbesondere indem sie festlegt:

a. Zeitpunkt und Art der Spülung oder Entleerung;

b. die maximale Schwebstoffkonzentration, die im Gewässer während der Spülung oder Entleerung eingehalten werden muss;

c. in welchem Umfang nachgespült werden muss, damit während der Spülung oder Entleerung im Fliessgewässer abgelagertes Feinmaterial entfernt wird.

³ Die Absätze 1 und 2 gelten nicht für sofortige Absenkungen aufgrund ausserordentlicher Ereignisse (Art. 40 Abs. 3 GSchG).

d) Weitere kHW-relevante rechtliche Grundlagen

GSchV

Art. 46 Koordination⁶¹

¹ Die Kantone stimmen die Massnahmen nach dieser Verordnung soweit erforderlich aufeinander und mit Massnahmen aus anderen Bereichen ab. Sie sorgen ausserdem für eine Koordination der Massnahmen mit den Nachbarkantonen.⁶²

^{1bis} Sie berücksichtigen bei der Erstellung der Richt- und Nutzungsplanung die Planungen nach dieser Verordnung.⁶³

Ökologische Ziele für Gewässer

1 Oberirdische Gewässer

¹ Die Lebensgemeinschaften von Pflanzen, Tieren und Mikroorganismen oberirdischer Gewässer und der von ihnen beeinflussten Umgebung sollen:

- a. naturnah und standortgerecht sein sowie sich selbst reproduzieren und regulieren;
- b. eine Vielfalt und eine Häufigkeit der Arten aufweisen, die typisch sind für nicht oder nur schwach belastete Gewässer des jeweiligen Gewässertyps.

² Die Hydrodynamik (Geschiebetrieb, Wasserstands- und Abflussregime) und die Morphologie sollen naturnahen Verhältnissen entsprechen. Insbesondere sollen sie die Selbstreinigungsprozesse, den natürlichen Stoffaustausch zwischen Wasser und Gewässer-sole sowie die Wechselwirkung mit der Umgebung uneingeschränkt gewährleisten.

Anhang C: Umleitstollen

Tabelle 1: Übersicht der 9 Umleitstollen an Speicherkraftwerken/Ausgleichsbecken der Schweiz (M. Müller-Hagmann, VAW, 2016).

Kanton	Betreiber	Anlage	Fliessgewässer
Glarus	KLL Axpo	Ausgleichsbecken - Hintersand	Sandbach
Graubünden	KVR Axpo	Ausgleichsbecken -Runcahez	Rein da Sumvitg
Graubünden	KW Rothenbrunnen/Sils	Solis	Albula
Graubünden	KW Bargaus	Ual da Mulin	Ual Draus
Graubünden	KWZ	Ausgleichsbecken - Egschi	Rabiusa
Schwyz	KW Siebnen	Ausgleichsbecken - Rempen	Wägitaler Aa
Tessin	KW Maggia	Palagnedra	Melazza
Uri	KW Amsteg	Pfaffensprung	Reuss
Wallis	KW Gondo	Sera	Grosses Wasser

Nebst diesen aufgeführten Umleitstollen ist an der Turtmänna, Speicher Turtmanensee, im Rahmen eines Variantenstudiums ein Umleitstollen zur Verminderung der Verlandung untersucht worden. Dieser wird aktuell nicht weiterverfolgt.

Die Umleitstollen in Tabelle 1 sind bis zum heutigen Zeitpunkt noch nicht als Synergien mit kWh genutzt worden.

Anhang D kHW Spöl

Langjährige Erfahrung

Viele Ergebnisse und Erfahrungen der seit 2000 jährlich durchgeführten kHW am Spöl sind publiziert (Scheurer, 2013; Wagner & Zeh, 2005; Muerle et al., 2003; Robinson et al., 2003; Uehlinger, 2002 etc.).

Auslöser für die durchgeführten kHW am Spöl waren die positiven Effekte auf die Morphologie, die im Rahmen der Spülung von 1995 festgestellt wurden (Hydra, 1995). Eine wichtige Grundlage für die Akzeptanz der kHW seitens der Betreiber war unter anderem die Flexibilisierung und Anpassung des Restwassers (Koechlin, 2014).

Die langjährigen Erfahrungen am Spöl werden im Folgenden zusammenfassend anhand von 5 Prozessen (Verfügung/Bewilligung, Planung/ Projektierung, Sicherheit/Verantwortlichkeiten, Umsetzung/Durchführung und der Wirkungskontrolle) beschrieben, welche für die Durchführung von kHW erforderlich sind.

1 Ausgangslage

Defizite im Unterwasser

Die Abflussbedingungen der 5.5 km langen Restwasserstrecke unterhalb der Speicher Punt dal Gall und Ova Spin (s. Abb. 1) führten im Unterwasser zu gewässerökologischen Defiziten wie Kolmation, fehlende Geschiebemobilisierung, untypische Benthoszusammensetzung etc. Durch kHW konnten ökologische Funktionen wiederhergestellt werden sowie natürliche Prozesse wie Hangerosion & Gewässerdynamik zugelassen werden (Scheurer & Ortlepp, 2016).



Abb. 1: Karte des Spöls, vom Livigno Speichersee (Italien) bis zur Mündung in den Inn bei Zernez. (Quelle: Scheurer, 2003).

2 Durchführung

2.1 Verfügung/Bewilligung

Rechtliche Grundlage

Durch den Dammbau 1970, existierte bis 1999 eine Dotierwasserregelung mit einer Abgabe von 550 l/s im Winter und zwischen 1000-2470 l/s im Sommer (Wagner & Zeh, 2005; s. Abb. 2).

Seit 2000 werden jährlich kHW durchgeführt (provisorische Regelung bzgl. Restwassermengen mit den künstlichen Hochwassern).

Im September 2011 erlässt das heute zuständige Bundesamt für Energie im Einvernehmen mit Italien, dem Kanton Graubünden, der Kraftwerkbetreiberin, dem Nationalpark sowie verschiedenen Bundesstellen die Verfügung über eine entsprechende Restwassersanierung zwischen Punt dal Gall und dem Speicherwerk Livigno-Ova Spin.

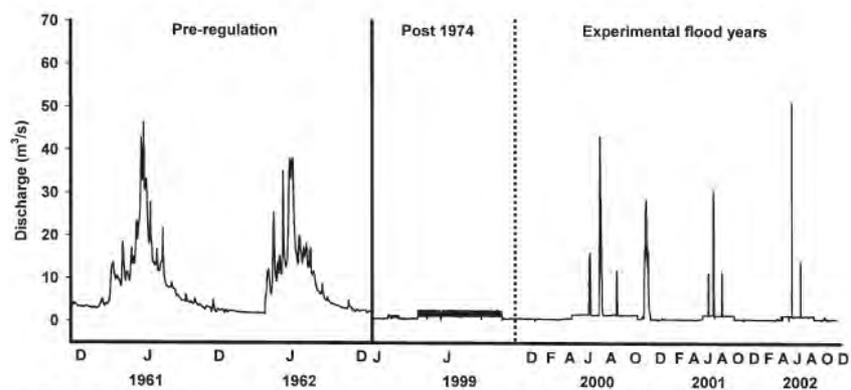


Abb. 2: Abflussverhalten Spöl (Robinson et al., 2013).

2.2 Planung/Projektierung

Abfluss

2000 - 2010 wurden versuchsweise zwei bis drei kHW pro Jahr durchgeführt. Zwei kHW mit ca. 10 m³/s Wasser im Mittel über ca. 7 Stunden und ein kHW mit ca. 30 m³/s Wasser im Mittel über 8 Stunden wurden jährlich durchgeführt. Seit 2011 werden die kHW gemäss der Sanierungsverfügung umgesetzt (Wagner & Zeh, 2005).

Der Abfluss, bzw. das Hydrogramm der kHW wird in Abhängigkeit der ökologischen Situation im Unterwasser variabel festgelegt (Scheurer und Ortlepp, 2016). 2 - 3x jährlich werden in Abhängigkeit der ökologischen Situation kHW durchgeführt. In der Planung berücksichtigt werden Seeabsenkungen bzw. Spülungen sowie sicherheitsrelevante Massnahmen wie die Erosion von Stauriegeln (Ablagerungen) im Stauwurzelbereich.

Dynamischer Restwasserabfluss

Durch die Reduktion des permanenten Dotierabflusses ist die zur Verfügung stehende Wassermenge ausreichend. Der reduzierte Dotierabfluss wird festgelegt, indem

- keine (zusätzlichen) negativen Auswirkungen auf eine naturnahe Besiedlung des Gewässers zu erwarten sind und
- genügend dimensionierte künstliche Hochwasserabflüsse möglich sind.

Durch die dynamische Restwasserabgabe müssen keine Produktionseinbußen in Kauf genommen werden (Scheurer und Ortlepp, 2016).

2.3 Sicherheit/Verantwortlichkeiten

Sicherheit

Im unbesiedelten Raum oberhalb Zernez sind die Rahmenbedingungen hinsichtlich Hochwassersicherheit im Vergleich zu anderen Gebieten der Schweiz weniger stark einschränkend. Grundsätzlich liegen die Verantwortlichkeiten bei den Engadiner Kraftwerken.

2.4 Umsetzung/Durchführung

Keine Geschiebezufuhr

Eine externe Geschiebezufuhr ist aufgrund der lateralen Geschiebeeinträge durch Schwemmkegel- und Geröllkegel sowie Uferanrisse nicht notwendig. Durch den Restwasserabfluss ist eine Mobilisierung und Verteilung der Ablagerungen aus den Seitengerinnen nicht möglich. Dies erfolgt durch KHW. Hierzu sind höhere KHW-Abflüsse notwendig, um die beträchtlichen Kiesablagerungen aus seitlichen Zuflüssen erodieren zu können.

Die Mobilisierung der Ablagerungen wird durch die Abflusshöhe gesteuert (Scheurer & Ortlepp, 2016). Im Gegensatz zu den longitudinalen Geschiebeeinträgen, wird aus den lateralen Geschiebequellen Geschiebeeinträgen (durch Schneeschmelze, Starkniederschläge) vorwiegend kantiges Material zugeführt.

Schadensfall 2013

Am 30. März 2013 kam die Restwasserdotierung im Spöl am KW Punt dal Gall zum Erliegen. Die aquatische Lebensgemeinschaft (Benthosbesiedelung, Fischbestand etc.) wurde durch das trockengelegte Unterwasser aufgrund von betrieblichen Problemen der Restwasserdotierung sowie der nachfolgenden Öffnung des Grundablasses mit hohem Feinsedimenteintrag massiv beeinträchtigt. Ein Totalausfall des Fischbestandes wurde aufgrund Rückzugsmöglichkeiten glücklicherweise nicht festgestellt.

Regenerations-
Spülung nach
Schadensfall

Durch die Folgen des Erliegens der Restwasserdotierung war zur Regeneration des Spöls ein weiteres Hochwasser zur Mobilisierung und Ausspülung der Feinsedimente im Flussbett notwendig (Task-Force, 2013). Das geplante Hochwasser sollte weder ein übliches KHW noch eine Grundablassspülung sein, sondern eine („Reinwasser“-)Spülung des Bachbettes zur Regeneration.

Am 9. Juli 2013 wurde der Grundablass in kleinen Schritten geöffnet, um einen Gesamtabfluss von 20 m³/s zu erreichen. Zwei weitere Abflussspitzen von 30 und 40 m³/s waren nötig, um den gewünschten Spüleffekt zu erreichen.

Durch die Regenerations-Spülung konnten Schluff/Feinsand-Ablagerungen grösstenteils abgetragen werden, mit Ausnahme von Zonen, in welchen auch bei normalen Bedingungen Ablagerungen entstehen (Task-Force, 2013).

Folgeuntersuchungen der Jahre 2013 und 2014 bestätigten eine Erholung des Fischbestandes auf rund 50% des Ausgangszustandes sowie eine Besiedelung des gesamten oberen Spöls. Die rasche Regeneration kann als Zeichen eines gut etablierten Forschungsprojektes mit einem gesunden Fischbestand verstanden werden. Die eigene Regenerationskraft der aquatischen Lebensgemeinschaft ist gemäss Fachleuten erstaunlich (De Cesare et al., 2015) und könnte auf einen insgesamt guten ökologischen und hydrologischen Zustand dank der KHW zurückzuführen sein.

2.5 Wirkungskontrolle

Erhebungen	<p>Um die Veränderung aufzuzeigen, werden die Ausgangslage vor der Durchführung von kHW und der Zustand vor dem Bau des Dammes erfasst.</p> <p>Eine Grobbeurteilung wurde vom Zustand der Ausgangslage (vor Dammbau) der Phase mit Restwasserabfluss (Restwasserabfluss 1970 - 1999) und der Versuchsphase (2000 - 2010) durchgeführt (Wagner & Zeh, 2005).</p> <p>Es werden vier Faktoren gemäss Ausgangszustand, Defizite sowie Festlegung und Prüfung der Entwicklungsziele erhoben:</p> <ol style="list-style-type: none">1) Abflussverhältnisse,2) Gewässerökologie (Zustandsbeschreibung und Erhebung Defizite, Morphologie und Sohlsubstrat, Strömung, Wasserqualität, Fische),3) Vegetation,4) Landschaft.
Kurzfristige Wirkung	<p><u>Abiotisch:</u></p> <p>Bereits nach dem 1. Jahr kHW sind Veränderungen der abiotischen Faktoren erkennbar.</p> <ul style="list-style-type: none">• Die Kolmation konnte innerhalb von 1 Jahr von ca. 75 % auf 15 % reduziert werden.• Aufnahmen von Querprofilen zeigen eine deutliche Zunahme der Ablagerungshöhen von bis zu 80 cm. Somit wird das Geschiebedefizit reduziert (Muerle et al., 2003). <p><u>Biotisch:</u></p> <p>Direkte kurzfristige Wirkungen der biotischen Faktoren sind bezüglich des Algenwachstums und der Laichgrubenanzahl ersichtlich. Die restlichen biologischen Parameter wirken sich erst längerfristig aus.</p> <ul style="list-style-type: none">• Untersuchungen von Robinson (2012) zeigen bezüglich der Dichte und Artenvielfalt von Makroinvertebraten eine kurzfristige Zunahme direkt nach dem kHW. Der längerfristige Trend über 10 Jahre weist jedoch auf eine leichte Abnahme der Dichte und Artenvielfalt hin.• Veränderungen der Verbreitung von Algen während den Sommermonaten zwischen 1999 - 2002 (Chlorophyll Messungen) zeigen, dass unmittelbar nach dem kHW die Verbreitung des Chlorophylls für wenige Monate abnimmt. Dieser kurze Abnahme folgt eine schnelle Rekolonisierung (Robison et al., 2013). Dies führt teilweise sogar zu höheren Anteilen als vor dem kHW (Scheurer & Ortlepp, 2016).• Die Laichgrubenkartierung unterhalb Punt dal Gall zeigt bereits nach einem Jahr eine deutliche Zunahme von 58 auf 93 gezählte Laichgruben.• Die Resultate des Laichfischfangs von 1999 - 2002 zeigen aufgrund einer starken Aufschotterung des Gewässerbettes im Sommer 2000 keine kurzfristige Zuahme der Laichfische im unteren Spöl (Muerle et al., 2003). Daten über längerfristige Veränderungen des Laichfischfangs sind den Verfassern der Auslegeordnung nicht bekannt.• Eine Veränderung der Makrozoobenthos Zusammensetzung wurde festgestellt, indem die Verbreitung der Flohkrebse stark reduziert wurde und jene der Eintages- und Steinfliegen zunahm (Schluechter, 2014).

Langfristige Wirkung

Abiotisch:

Die längerfristige abiotische Wirkung unterscheidet sich nur gering von der kurzfristigen.

Biotisch:

Bei der Interpretation der biotischen Resultate muss beachtet werden, dass die Erhebungen von weiteren Umwelteinflüssen wie saisonalen Schwankungen und Einträgen ins Gewässer etc. abhängig sind.

Die langfristige Wirkung der Veränderung der Artzusammensetzung lässt sich gemäss Untersuchungen von Schluechter (2014) in unterschiedliche Phasen aufteilen.

Phase 1, 0 – 2 Jahre: während ca. 2 Jahren ist keine Reaktion der untersuchten Arten auf die kHW festzustellen.

Phase 2, 2 – 3 Jahre: nach der Reaktionszeit nimmt in einer ersten Phase die Verbreitung der Steinfliegenlarve stark zu und jene der Strudelwürmer ab.

Phase 3, 4 – 9 Jahre: im Vergleich zur Phase 2 nimmt die Zunahme um ca. 50 % ab. Die Benthosbesiedlung nähert sich wieder jener eines natürlichen Gebirgsbaches an (Scheurer & Ortlepp, 2016).

Die Veränderung der Laichgrubenkartierung (Schluechter, 2014) zeigt zwischen 1999 - 2013 im Mittel eine deutliche Zunahme der Anzahl Laichgruben. Dennoch treten Schwankungen zwischen den einzelnen Jahren auf. Nach dem Schadensereignis im Jahr 2013 wurden erstmals weniger Laichgruben gezählt, als vor der Durchführung der kHW im Jahr 1999.

Übersicht

Tabelle 1: Übersicht Anwendung und Beurteilung Parameter der Wirkungskontrolle.

Parameter		Wirkung bei regelmässigen kHW	
		kurzfristig	langfristig
abiotisch	Mobilisierung Geschiebe	++	+
	Reduktion Kolmation	++	+
biotisch	Reduktion Algenbewuchs	++	0 / -
	Zunahme Verbreitung Steinfliege	0	+
	Abnahme Verbreitung Flohkrebse	+	+
	Laichgruben	+	+
	Fischlaichfang	0	?

++ starke Zunahme, + Zunahme, 0 unverändert, - Abnahme, -- starke Abnahme. ? Veränderung unsicher.

Anhang E: kHW in der Schweiz

Tabelle 1: Übersicht kHW in der Schweiz (nicht abschliessend): Grün: durchgeführt, blau: in Planung, grau: abgeschlossen. Hervorgehoben: mehrmals durchgeführt. Stand April 2016 (Quelle: Rücklauf Fragebogen; PRONAT, 2016).

Kanton	Gewässer	Kraftwerk	Typ kHW	Art. GschG
FR	Jogne	Montsalvens-Broc	5	Art. 80 ff
GR	Spöl	Punt dal Gal, Ova Spin	1	Art. 80 ff
GR	Clemgia	Wasserfassung Minger	1	Art. 80 ff
SG	Tamina	Mapragg	1	Wasserrechtskonzession
VS	Grosses Wasser	Energie Electrique du Simplon	1	Art. 80 ff
VS	Lienne	YFM de la Lienne SA	1	Art. 80 ff
VS	Gougra	FM de la Gougra	5	Art. 83 ff
FR	Saane	Rossens-Hauterive-Maigrauge	2 & 3	Art. 83
FR/VD	L'Hongrin	L'Hongrin		
SG	Vadura	Kraftwerke Sanganserland AG		
TI	Verzasca	Diga della Verzasca		
VD	Grande Eau	Farettes		
VS	Gougra	Turtmannsee		Art. 83
VS	Mauvoisin	FM Mauvoisin		Art. 83
VS	Dixence	Première Dixence		Art. 80 ff
VS	Dixence	Grande Dixence		Art. 80 ff
VS	Grosses Wasser	Energie Electrique du Simplon		Art. 80 ff (Verpflichtung Spülungen nach Art. 40 durchzuführen)
VS		FM du Grand St. Bernard		Art. 80
SZ	Sihl	Etzelwerk		

Tabelle 2: Frequenz und Abflusshöhe der durchgeführten kHW (nicht abschliessend). Stand April 2016. (Quelle: Rücklauf Fragebogen, Pronat, 2016).

Gewässer	Kraftwerk	Frequenz	Abfluss	Hydrogramm	Typ kHW
Kleine Saane	Rossens-Hautrive	Einmalig	11.6 m ³ , Qmax 255 m ³ /s, Dauer 32 h	Numerisch 1D	2 & 3
Jogne	Montsalvens-Broc	jährlich geplant	Qmax 20 m ³ /s, Dauer 20 h	empirisch	5
Spöl	Punt dal Gal, Ova Spin	2-3 / Jahr seit 2000	2x 10 m ³ /s, 1x 30m ³ /s	empirisch	1
Tamina	Mapragg	jährlich im Juni	1'000'000 m ³ , Dauer: 6.00 – 17.30	empirisch	1
Sihl	Etzelwerk	-	-	empirisch	1
Grosses Wasser	Sera	jährlich im September	Max. 16 m ³ /s	empirisch	1
Lienne	YFM de la Lienne SA	Alle 3 Jahre	Max. 12 m ³ /s, Dauer: 5.00 – 16.00	empirisch	1
Gougra	FM de la Gougra	jährlich	Qmax 34m ³ /s, Dauer: 8.00 – 16.00 Uhr	empirisch	5