

Geschiebehaushalt – Massnahmen

Ein Modul der Vollzugshilfe Renaturierung der Gewässer



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Bundesamt für Umwelt BAFU

Geschiebehaushalt – Massnahmen

Ein Modul der Vollzugshilfe Renaturierung der Gewässer

Impressum

Rechtliche Bedeutung

Diese Publikation ist eine Vollzugshilfe des BAFU als Aufsichtsbehörde und richtet sich primär an die Vollzugsbehörden. Sie konkretisiert die bundesumweltrechtlichen Vorgaben (bzgl. unbestimmten Rechtsbegriffen und Umfang/Ausübung des Ermessens) und soll eine einheitliche Vollzugspraxis fördern. Berücksichtigen die Vollzugsbehörden diese Vollzugshilfe, so können sie davon ausgehen, dass sie das Bundesrecht rechtskonform vollziehen; andere Lösungen sind aber auch zulässig, sofern sie rechtskonform sind.

Herausgeber

Bundesamt für Umwelt (BAFU)

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

Autoren

Manuel Nitsche, Martin Pfaundler; mit Unterstützung von Lukas Hunzinger, Ueli Schälchli, Arthur Kirchhofer, Tobias Rüesch, Christian Roulier

Begleitgruppe

Daniel Devanthery, Kanton Wallis; Michael Döring, ZHAW Wädenswil; Rémy Estoppey, BAFU; Alessandro Grasso, BAFU; Philipp Gyr, Kanton St. Gallen; Daniel Hefti, BAFU; Oliver Hitz, Kanton Bern; Bernhard Hohl, Bundesamt für Energie; Antoine Magnollay, BAFU; Christian Marti, Kanton Zürich; Ricardo Mendez, Axpo Power AG; Sabin Nater, Kanton Aargau; Roger Pfammatter, SWV (bis Aug. 2020); Anton Schleiss, ETH Lausanne; David Schmid, Kanton Graubünden; Steffen Schweizer, Kraftwerke Oberhasli AG; Luca Vetterli, ProNatura; Christine Weber, EAWAG; Simona Weber, BAFU; Urs Zehnder, Kanton Luzern; Frédéric Zuber, Kanton Wallis

Layout

Funke Lettershop AG

Titelbild

Geschiebeschüttung in der Limmat flussabwärts des Wasserkraftwerks Wettingen (Aargau).

© Manuel Nitsche

PDF-Download

www.bafu.admin.ch/uv-2325-d

Eine gedruckte Fassung kann nicht bestellt werden.

Diese Publikation ist auch in französischer und italienischer Sprache verfügbar. Die Originalsprache ist Deutsch.

© BAFU 2024

Inhaltsverzeichnis

Abstracts	5	4	Wirkungskontrolle	62
Vorwort	6	4.1	Einführung	62
Vollzugshilfe «Renaturierung» der Gewässer	7	4.2	Indikatoren	63
Änderung des Gewässerschutzrechts	7	4.3	Umfang der Wirkungskontrolle	65
Vollzugshilfe «Renaturierung der Gewässer»	7	4.4	Zielerreichung überprüfen	67
		4.5	Nachbesserung der Massnahme	67
1	Einleitung	8	Anhänge	69
1.1	Überblick zum Modul	8	A	Rechtliche Grundlagen
1.2	Bedeutung des Geschiebes bei der Renaturierung	9	B	Literaturverzeichnis
1.3	Sanierungsziele und Interessensabwägung	11	C	Inhalt einer Sanierungsverfügung
1.4	Rechtliche Grundlagen	12	D	Ansätze zur Bestimmung der Geschiebefracht im Ist- und Naturnahen Zustand
			E	Methodik zum Bestimmen der erforderlichen Geschiebefracht
2	Ablauf der Sanierung	14	F	Hinweise zur Planung, Projektierung und Umsetzung von einzelnen Massnahmenarten
2.1	Ablauf der Sanierung bei Wasserkraftanlagen	14	G	Checkliste: Studie über Art und Umfang der Massnahmen
2.2	Ablauf der Sanierung bei Nicht-Wasserkraftanlagen	16	H	Indikatoren für die Wirkungskontrolle
2.3	Grundsätze beim Bau von neuen Anlagen und Erweiterung bestehender Anlagen	17		
3	Studie über Art und Umfang der Massnahmen	19		
3.1	Überblick	19		
3.2	Arbeitsschritt 1: Ist- und naturnahen Zustand des Gewässers vertieft untersuchen	22		
3.3	Arbeitsschritt 2: Morphologische Ziele für das Gewässer und die erforderliche Geschiebefracht festlegen	35		
3.4	Arbeitsschritt 3: Das Sanierungsziel für Anlagen festlegen	49		
3.5	Arbeitsschritt 4: Einen Massnahmenkatalog erarbeiten	49		
3.6	Arbeitsschritt 5: Massnahmenvarianten erarbeiten und bewerten	53		
3.7	Arbeitsschritt 6: Die Bestvariante festlegen	57		
3.8	Arbeitsschritt 7: Mit anderen Massnahmen am Gewässer koordinieren	58		
3.9	Arbeitsschritt 8: Das Konzept der Wirkungskontrolle festlegen	59		
3.10	Vereinfachtes Vorgehen	60		

Abstracts

The current module of the implementation guide on river restoration describes the procedure for planning measures to eliminate or prevent bedload deficits in rivers possibly caused by hydropower plants, gravel extractions, flood protection and revitalization projects and other installations in rivers. Planning includes steps for analyzing the situation, defining objectives and measures. The module also suggests a pragmatic method for determining the ecologically required bedload transport as well as a concept and indicators for monitoring the effectiveness of bedload measures.

Das vorliegende Modul der Vollzugshilfe «Renaturierung der Gewässer» beschreibt das Vorgehen zur Planung von Massnahmen zur Beseitigung oder Verhinderung von Geschiebedefiziten im Gewässer bei Wasserkraftanlagen, Kiesentnahmen, Geschiebesammlern, Hochwasserschutz- und Revitalisierungsprojekten und anderen Anlagen. Zur Planung gehören Arbeitsschritte zur Situationsanalyse, zur Zieldefinition und zur Massnahmendefinition. Im Modul wird auch eine pragmatische Methodik zur Bestimmung einer erforderlichen Geschiebefracht vorgeschlagen sowie ein Konzept und Indikatoren für die Wirkungskontrolle von Geschiebemaassnahmen.

Le présent module de l'aide à l'exécution Renaturation des eaux présente la procédure de planification des mesures visant à éliminer ou à empêcher les déficits de charriage dans les eaux affectées notamment par des centrales hydroélectriques, des gravières, des dépotoirs à alluvions, des aménagements de protection contre les crues et de revitalisation des eaux. La planification comprend l'analyse de la situation de même que la définition des objectifs et des mesures. Le module propose également une méthode pratique pour déterminer le débit de charriage nécessaire ainsi qu'une stratégie et des indicateurs pour le suivi de l'efficacité des mesures mises en œuvre.

Questo modulo dell'aiuto all'esecuzione «Rinaturazione delle acque» descrive la procedura di pianificazione delle misure volte a eliminare o prevenire i deficit di apporto solido nei corsi d'acqua in presenza di impianti idroelettrici, prelievi di ghiaia, camere di ritenuta, progetti di rivitalizzazione e protezione contro le piene e altri impianti. La pianificazione comprende le seguenti fasi di lavoro: analisi della situazione, definizione degli obiettivi e definizione delle misure. Il modulo propone anche un metodo prammatico per determinare il carico di fondo necessario, come pure un piano completo di indicatori per il controllo dell'efficacia di misure concernenti il materiale solido di fondo.

Keywords:

Bedload balance, bedload remediation, Waters Protection Act, restoration measures, hydropower utilization, rivers

Stichwörter:

Geschiebehaushalt, Geschiebesanierung, Gewässerschutzgesetz, Sanierungsmassnahmen, Wasserkraftnutzung, Fliessgewässer

Mots-clés:

régime de charriage, assainissement du régime de charriage, loi fédérale sur la protection des eaux, mesures d'assainissement, exploitation de la force hydraulique, cours d'eau

Parole chiave:

bilancio in materiale solido di fondo, risanamento del bilancio in materiale solido di fondo, legge sulla protezione delle acque, misure di risanamento, sfruttamento idrico, corsi d'acqua

Vorwort

Der umfassende Schutz der Gewässer und ihrer vielfältigen Funktionen sowie die nachhaltige Nutzung der Gewässer durch den Menschen sind zentrale Ziele des Gewässerschutzrechts des Bundes. Bei der Änderung des Gewässerschutzgesetzes 2011 ging es genau darum: unter Berücksichtigung von Schutz- und Nutzungsinteressen ausgewogene Lösungen im Gewässerschutz zu finden.

Diese Änderung stellt einen wichtigen Meilenstein im Schweizer Gewässerschutz dar. Sie hat zum Ziel, die Gewässer als Lebensraum aufzuwerten, damit sie naturnäher werden und einen Beitrag zur Erhaltung und Förderung der Biodiversität leisten.

Die Vollzugshilfe «Renaturierung der Gewässer» soll die Kantone bei der Umsetzung dieser gesetzlichen Bestimmungen unterstützen und einen koordinierten und einheitlichen Vollzug des Bundesrechts ermöglichen. Die modular aufgebaute Vollzugshilfe umfasst alle relevanten Aspekte der Renaturierung der Gewässer in den Bereichen Revitalisierung von Fliess- und stehenden Gewässern, Auen, Wiederherstellung der freien Fischwanderung und des Geschiebehaushalts, Sanierung von Schwall-Sunk sowie die Koordination wasserwirtschaftlicher Vorhaben. Der Vollzug des Umweltrechts ist Aufgabe der Kantone. Deshalb wurde die Erarbeitung dieser Vollzugshilfe von Arbeitsgruppen mit kantonalen Vertretern begleitet.

Das vorliegende Modul ist der Erarbeitung und Bewertung von Massnahmen gewidmet, die darauf abzielen, Defizite im Geschiebehaushalt der Gewässer zu verhindern oder zu beseitigen, welche durch Wasserkraftwerke, Wasserbauprojekte oder andere Anlagen im Gewässer verursacht werden können. Zu den Massnahmen gehören die Erhöhung der Geschiebefracht und in manchen Fällen die Mobilisierung von Geschiebe durch Verbesserung der Abflussdynamik. Es zeigt auf, welches die wichtigsten Vorgaben für die Wahl von Massnahmen sind, wie diese bewertet werden können, und es definiert die Methodik für die Wirkungskontrolle nach Umsetzung der Massnahmen. Anforderungen an die Gerinnesohlenbreite und den Gewässerraum sind nicht Bestandteil des Moduls.

Das BAFU dankt allen, die zum Gelingen der Publikation beigetragen haben, insbesondere den Mitgliedern des Projektteams, der Begleitgruppe und den externen Experten, die sich für praxistaugliche Lösungen eingesetzt haben.

Stephan Müller, Abteilung Wasser
Bundesamt für Umwelt (BAFU)

Vollzugshilfe «Renaturierung» der Gewässer

Änderung des Gewässerschutzrechts

Die eidgenössischen Räte haben 2009 mehrere Gesetzesänderungen beschlossen, mit dem Ziel, die Renaturierung der Gewässer in der Schweiz voran zu treiben. Die Gesetzesänderungen geben mehrere Stossrichtungen vor:

- Die Förderung von Revitalisierungen (Wiederherstellung der natürlichen Funktionen eines verbauten, korrigierten, überdeckten oder eingedolten oberirdischen Gewässers mit baulichen Massnahmen),
- die Sicherung und extensive Bewirtschaftung des Gewässerraums,
- die Wiederherstellung der freien Fischwanderung,
- die Reduktion der negativen Auswirkungen von Schwall-Sunk unterhalb von Wasserkraftanlagen und
- die Verbesserung des Geschiebehaushalts.

Vollzugshilfe «Renaturierung der Gewässer»

Das vorliegende Dokument ist ein Modul der Vollzugshilfe «Renaturierung der Gewässer». Die Vollzugshilfe umfasst alle relevanten Aspekte in den Bereichen Revitalisierung Fließgewässer, Revitalisierung stehende Gewässer, Auen, Wiederherstellung der freien Fischwanderung, Schwall-Sunk-Sanierung, sowie Sanierung des Geschiebehaushalts. Sie ist modular aufgebaut und beinhaltet für die verschiedenen Bereiche Module zur strategischen Planung, zur Planung konkreter Massnahmen, zur Finanzierung, zum Datenmodell und den Anforderungen an die Daten gemäss Geoinformationsgesetz vom 5. Oktober 2007 (GeolG, SR 510.62) sowie ein über den Themenbereich der Renaturierung hinausgehendes Modul zur Koordination wasserwirtschaftlicher Vorhaben. Die vorhandenen Module stehen auf der Website www.bafu.admin.ch/umsetzungshilfe-renaturierung zur Verfügung.

1 Einleitung

1.1 Überblick zum Modul

Thematik: Veränderungen im Geschiebehaushalt

Das Gewässerschutzgesetz schreibt vor, dass Anlagen den Geschiebehaushalt nicht so verändern dürfen, dass Tiere und Pflanzen, deren Lebensräume, der Grundwasserhaushalt und der Hochwasserschutz wesentlich beeinträchtigt werden. Als ein veränderter Geschiebehaushalt im Sinne des Artikels 43a des Gewässerschutzgesetzes (GSchG) wird betrachtet:

- eine verminderte Geschiebefracht im Unterwasser einer Anlage, z. B. wegen des Rückhaltes von Geschiebe in Geschiebesammlern und Stauhaltungen oder wegen der Entnahme von Geschiebe,
- ein verminderter Geschiebeeintrag, zum Beispiel wegen der Verbauung der Sohle oder Ufern bei nicht eingegengten Gewässern
- eine verminderte Geschiebetransportkapazität wegen eines veränderten Hochwasserregimes durch Wasserentnahmen.

Es geht also um die Beseitigung oder Verhinderung von Defiziten der Geschiebefracht. Sohlenauflandungen infolge von Geschiebeablagerungen in den Stauräumen von Wasserkraftanlagen können auch zu einer wesentlichen Beeinträchtigung des Hochwasserschutzes führen. Diese Fälle werden in der vorliegenden Vollzugshilfe nicht behandelt, weil es Einzelfälle sind.

Nicht Gegenstand von Artikel 43a GSchG und dem vorliegenden Modul sind:

- Eintiefung oder morphologische Defizite aufgrund von Einengung oder Kanalisierung (reduzierte Breite) eines Gewässers. Entsprechende Massnahmen, bei denen auch die Breite wiederhergestellt wird, erfolgen im Rahmen von Hochwasserschutz- und Revitalisierungsprojekten gestützt auf Artikel 4 Wasserbaugesetz (WBG) und Artikel 37 GSchG.
- Kolmation und Versandung der Sohle infolge Wasserentnahmen. Entsprechende Massnahmen erfolgen primär aufgrund von Restwasserbestimmungen und Vorgaben zu Spülungen.
- Hochwasserschutzdefizite wegen natürlicher Auflandungen oder Erosionen. Für entsprechende Massnahmen sind die Kantone auf Grundlage des WBG verpflichtet.

Adressaten

Zur Verbesserung des Geschiebehaushalts haben die Kantone in einer ersten Phase die strategische Planung erarbeitet und per 31. Dezember 2014 abgeschlossen. Dabei haben sie die Gewässerabschnitte identifiziert, welche durch einen veränderten Geschiebehaushalt wesentlich beeinträchtigt sind und die Anlagen bezeichnet, welche die Verursacher der Defizite sind. Die Kantone und die Inhaber dieser Anlagen stehen nun vor der Aufgabe, Massnahmen zur Sanierung des Geschiebehaushaltes zu planen und umzusetzen.

Auch Wasserbauvorhaben zum Hochwasserschutz und zur Revitalisierung müssen so geplant werden, dass sie den Bestimmungen zum Geschiebehaushalt im Gewässerschutzgesetz genügen.

Der Bund beabsichtigt mit dieser Publikation, alle an der Sanierung des Geschiebehaushaltes beteiligten Akteure (Inhaber von Anlagen, Kantone und private Büros) bei der Planung und Auswahl von Massnahmen zu unterstützen.

Relevante Anlagen

Für Massnahmen relevante Anlagen sind Wasserkraftanlagen (Fassungen, Wehre, Speicherseen, etc.) aber auch Anlagen ohne Bezug zur Wasserkraft wie beispielsweise Kiesentnahmen, Geschiebesammler, Gewässerverbauungen sowie Wasserbauvorhaben zum Hochwasserschutz und zur Revitalisierung, sofern sie den Geschiebehaushalt nachteilig verändern. Dabei kann es sich um bestehende Anlagen, aber auch um neue oder erweiterte Anlagen handeln.

Inhalte

Im vorliegenden Modul wird der Ablauf zur Planung von Massnahmen zur Beseitigung oder Verhinderung von Geschiebedefiziten dargelegt (Kap. 2). Vor allem wird ein Vorgehen empfohlen, wie die gesetzlich geforderte Studie über Art und Umfang der Massnahmen erarbeitet wird, welche für alle sanierungspflichtigen Anlagen in einem Einzugsgebiet durchgeführt wird (Kap. 3) und wie die Wirkungskontrolle geplant werden soll (Kap. 4).

Methodik «erforderliche Geschiebefracht»

Das vorliegende Modul schlägt Methoden zur Bestimmung der «erforderlichen Geschiebefracht» vor, d. h. jener Geschiebefracht, die notwendig ist, um die nachteiligen Veränderungen des Geschiebehaushaltes und damit die wesentliche Beeinträchtigung zu beseitigen.

Aktualisierung des Moduls

Die im Modul vorgeschlagene Methodik wird anhand der Erfahrungen aus Sanierungen und Forschungsprojekten überprüft. Entsprechend dem Stand des Wissens und den Erkenntnissen der Praxis ist eine Aktualisierung des Moduls vorgesehen.

1.2 Bedeutung des Geschiebes bei der Renaturierung

Zusammenhang Geschiebe, Breite und Morphologie

In der Gewässerschutzverordnung wird in Artikel 42a der kausale Zusammenhang zwischen Geschiebehaushalt und morphologischen Strukturen im Gewässer angesprochen. Der Einfluss des Geschiebetransports auf die Breite des Gerinnes und die morphologischen Strukturen wurde in zahlreichen wissenschaftlichen Arbeiten beschrieben (z. B. Parker 1979, Church 2006). Die Morphologie eines nicht eingegengten Gewässers hängt neben dem Geschiebetransport auch von anderen Faktoren wie Abfluss, Vegetation und geologischen Gegebenheiten ab.

Wenn das Gewässer in der Breite nicht eingeschränkt ist, stellen sich Gerinnebreite und Morphologie auf das gegebene Abflussregime und die Geschiebelieferung ein. So entstehen Gerinneformen von mäandrierend bis hin zu verzweigten Gerinnen. Ein wesentliches Unterscheidungsmerkmal dieser Gerinneformen ist die relative Breite des Gerinnes (Ahmari & da Silva 2011, Métivier & Barrier 2012): verzweigte Gerinne sind im Verhältnis zu ihrer Abflusstiefe deutlich breiter als mäandrierende oder gewundene Gerinne. Veränderungen der Gerinnebreite und Morphologie aufgrund einer veränderten Geschiebelieferung wurden in Modellversuchen (z. B. Marti 2006) und in einer Untersuchung an Schweizer Gewässern (Schälchli & Hunzinger, 2021) gezeigt.

In verbauten Gewässern ist die Breite oft eingeschränkt, so dass die Gerinneform dort vor allem auch von dieser Einschränkung bestimmt wird. Artikel 43a des Gewässerschutzgesetzes (GSchG, SR 814.20) und das vorliegende Modul regeln lediglich den Faktor Geschiebefracht. Die Gerinnebreite wird primär in Hochwasserschutz- und Revitalisierungsprojekten gestützt auf Artikel 4 WBG und Artikel 37 GSchG verändert oder wiederhergestellt.

Lebensraum Kiessohle

Die meisten Schweizer Fliessgewässer führen Geschiebe, also Steine, Kies und Grobsand, die bei erhöhtem Abfluss über die Gewässersohle transportiert werden. Geschiebe ist das Baumaterial unserer Flüsse, aus dem das Wasser immer wieder neue Strukturen und damit vielfältige Lebensräume modelliert. Auf der Gewässersohle abgelagerter Kies dient etwa kieslaichenden Fischen zur Laichablage und die Randzonen von Kiesbänken mit geringen Abflusstiefen bieten Lebensräume für Jungfische. Die Oberfläche und der Porenraum der Kiessohle ist der Lebensraum für Insektenlarven, welche Fischen als Nahrung dienen. Kiesbänke, die bei Niedrig- und Mittelwasser trockenfallen, bilden Standorte für Pioniervegetation und Kleinlebewesen (Grashüpfer, Spinnen, Vögel, etc.). Eine ausgeprägte Geschiebedynamik, also die Erosion, Umlagerung und Ablagerung von Sand, Kies und Steinen ist typisch für die Auen kiesführender Flüsse und ist Grundlage für deren aussergewöhnliche Vielfalt heimischer Tier- und Pflanzenarten. Nicht zuletzt stärkt ein natürliches, gut durchströmtes Substrat auch die Selbstreinigungskraft des Gewässers und verbessert die Wasserqualität und den Austausch von Grund- und Oberflächenwasser.

Defizite bei zu wenig Geschiebe

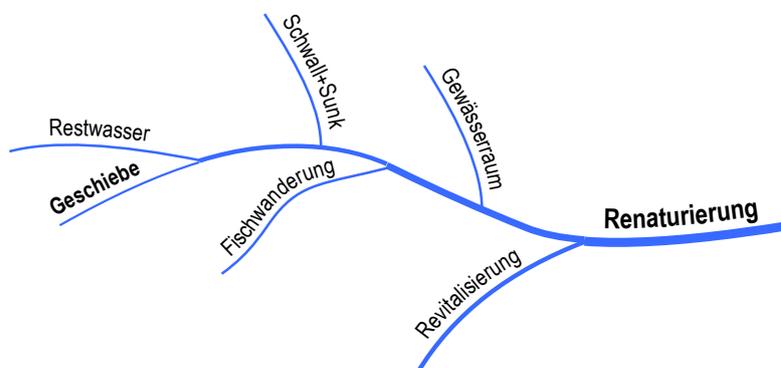
In Flüssen mit ungenügender Geschiebezufuhr können der Talweg¹ und Kiesbänke erodieren. Das Hauptgerinne tieft sich ein und die seitlich angrenzenden Gerinne und Bänke werden weniger häufig überflutet und verbuschen. Dadurch nimmt die dynamische Breite ab und die Gerinneform verändert sich hin zu einem Einzelgerinne. Infolge des Geschiebedefizits wird das Substrat gröber, die Sohle pflästert sich ab und kolmatiert zunehmend. All diese Veränderungen sind mit einer Abnahme der morphologischen Dynamik verbunden. Dies hat zur Folge, dass sich der Gewässerlebensraum grundlegend verändert. Der Bestand der Insektenlarven nimmt ab, kieslaichende Fische finden kein geeignetes Substrat für die Reproduktion, für Jungfische stehen weniger Flachwasserzonen mit lockerem Substrat zur Verfügung, die trockenfallenden groben Kiesbänke sind oft durch vertrocknete Algen und Feinsedimente kolmatiert. Bei möglichen Grundwasserspiegelabsenkungen verändert sich die Zusammensetzung der Auenvegetation hin zu Arten, welche trockene Standorte bevorzugen. Das Geschiebedefizit führt insgesamt zu einer Verarmung der Morphologie und damit einhergehend zu einem Verlust der natürlichen Artenzusammensetzung und -vielfalt.

¹ Verbindungslinie der tiefsten Punkte von Querprofilen in der Längsrichtung eines Flusses.

Sanierung des Geschiebehaushalts als Teilmassnahme der Renaturierung

Zur Renaturierung der Gewässer und zur Wiederherstellung der natürlichen Funktionen der Gewässer sieht das Gewässerschutzgesetz verschiedene Massnahmen vor (Abb. 1). Die Sanierung des Geschiebehaushalts ist ein Teilaspekt dieser Renaturierungsmassnahmen. Für die Gewässermorphologie sind neben dem Geschiebehaushalt immer auch die Breite und die Wasserführung des Gewässers entscheidend. Für erfolgreiche Renaturierungen müssen daher auch die anderen Teilaspekte wie Revitalisierungen, Restwassersanierungen und Sanierung von Schwall und Sunk umgesetzt werden. Das heisst wiederum, dass die Wirkung von Geschiebemaassnahmen dort am grössten ist, wo Gewässerabschnitte mit naturnaher Breite und naturnaher Wasserführung und Dynamik vorhanden sind oder wiederhergestellt werden.

Abb. 1: Die verschiedenen Massnahmen zur Renaturierung der Gewässer



1.3 Sanierungsziele und Interessensabwägung

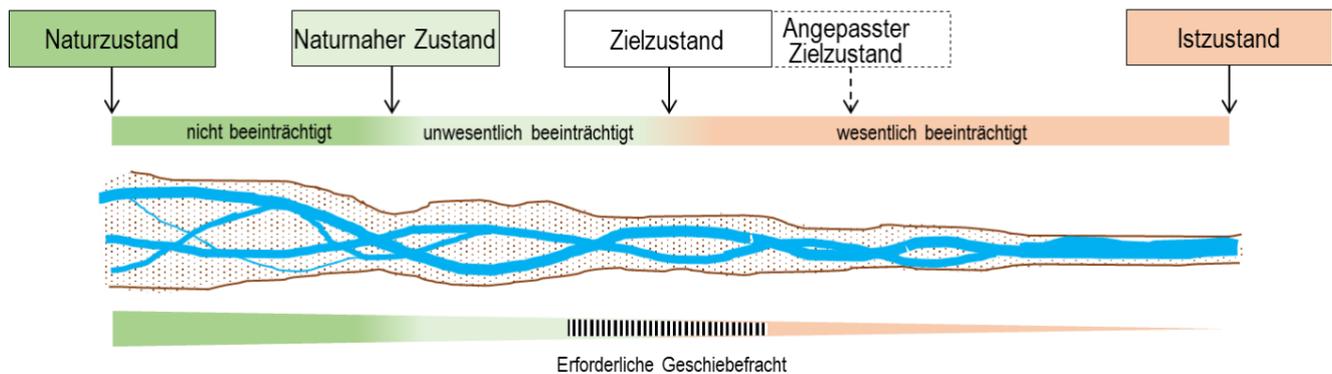
Keine wesentlichen Beeinträchtigungen gegenüber dem naturnahen Zustand

Das Ziel der Sanierung des Geschiebehaushalts ist es, die von Anlagen verursachten wesentlichen Beeinträchtigungen zu beseitigen und die naturnahen morphologischen Strukturen und Dynamik wiederherzustellen. Mit Massnahmen wird in erster Linie die Geschiebefracht auf ein Niveau erhöht, mit welchem in Gewässerabschnitten mit naturnaher Gewässerbreite und naturnahen Abflussbedingungen wieder ähnliche morphologische Strukturen und Dynamik wie im naturnahen Zustand (Definition siehe Kap. 3.2.2) möglich sind. Unwesentliche Beeinträchtigungen sind erlaubt (vgl. Zielzustand in Abb. 2).

Reduzierte morphologische Ziele bei Rahmenbedingungen

Es gibt Sanierungsfälle, bei denen ausreichend breite Gewässerabschnitte fehlen oder die Abflussdynamik stark reduziert ist und sich ein naturnaher Geschiebehaushalt und eine naturnahe Morphologie nicht einstellen können, auch wenn bei der sanierungspflichtigen Anlage die Geschiebefracht erhöht würde. In solchen Fällen werden die Sanierungsziele reduziert (vgl. angepasster Zielzustand in Abb. 2 sowie Kap. 3.3.2–3.3.7).

Abb. 2: Morphologische Zustände in Abhängigkeit der Geschiebefracht am Beispiel eines im Naturzustand verzweigten Gewässers



Die Sanierungsmassnahmen zielen darauf ab, durch Erhöhung der Geschiebefracht den Zielzustand oder den angepassten Zielzustand zu erreichen. Eine Interessenabwägung ist bei der Festlegung der Massnahme vorgesehen. Dabei wird der Umfang der Sanierungsmassnahme unter anderem massgeblich nach den Interessen des Hochwasserschutzes ausgerichtet (Kap. 3.5.4). Denn Massnahmen zur Sanierung des Geschiebehaushalts dürfen nicht zu Hochwasserschutzproblemen führen. Dies muss wo notwendig mit begleitenden Hochwasserschutzmassnahmen oder der Reduktion der Geschiebefracht sichergestellt werden. Wenn dadurch die Sanierungsziele nicht mehr vollständig erreicht werden, spricht man von einer Teilsanierung (Kap. 3.7).

1.4 Rechtliche Grundlagen

Pflicht zur Beseitigung einer wesentlichen Beeinträchtigung

Gemäss Artikel 43a Abs. 1 Gewässerschutzgesetz (GSchG, SR 814.20) sind Inhaber von Anlagen verpflichtet, durch Massnahmen eine wesentliche Beeinträchtigung des Gewässers durch einen veränderten Geschiebehaushalt zu verhindern. Eine wesentliche Beeinträchtigung der einheimischen Tiere und Pflanzen sowie deren Lebensräume 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 (Artikel 42a Gewässerschutzverordnung, GSchV, SR 814.201). Für kommerzielle Kiesentnahmen gilt die bereits bestehende Spezialregelung von Artikel 44 GSchG. Von der Pflicht betroffen sind sowohl Inhaber von Neuanlagen als auch Inhaber bestehender Anlagen.

Dort, wo Fliessgewässer bereits durch einen unausgeglichene Geschiebehaushalt wesentlich beeinträchtigt sind, müssen diese Anlagen bis 31. Dezember 2030 saniert werden (Artikel 83a GSchG). Bei der Festlegung der Massnahmen sind die in Artikel 43a Abs. 2 Bst. a bis e GSchG genannten Interessen zu berücksichtigen. Ausserdem sind die Massnahmen im Einzugsgebiet des betroffenen Gewässers nach Anhörung der Inhaber der betroffenen Anlagen aufeinander abzustimmen (Abs. 3).

Im Weiteren gilt ein generelles Koordinationsgebot mit anderen wasserwirtschaftlichen Vorhaben (Artikel 46 Abs. 1 GSchV). Einzelheiten dazu sind im Modul «Koordination wasserwirtschaftlicher Vorhaben» der Vollzugshilfe Renaturierung der Gewässer festgehalten.

Studie über Art und Umfang

Der Kanton erstellt für Anlagen, die Massnahmen treffen müssen, eine Studie über die Art und den Umfang der notwendigen Massnahmen (Artikel 42c Abs. 1 GSchV). Dabei muss bei Wasserkraftwerken das Geschiebe soweit möglich durch die Anlage durchgeleitet werden (Artikel 42c Abs. 2 GSchV).

Wirkungskontrolle

Nach Umsetzung der Sanierungsmassnahmen prüft der Inhaber der Wasserkraftanlage nach Anordnung der zuständigen Behörde mit einer Wirkungskontrolle, ob die Sanierungsziele erreicht wurden (Artikel 42c Abs. 4 GSchV). Der Inhaber teilt der zuständigen Behörde die Ergebnisse mit, damit sie gemäss Artikel 50 GSchG und Artikel 49 Abs. 2 GSchV die Wirksamkeit der erfolgten Gewässerschutzmassnahmen beurteilen, darüber informieren und gegebenenfalls Nachbesserungen anordnen kann. Bei Neuanlagen und Nicht-Wasserkraftanlagen ist die Durchführung einer Wirkungskontrolle ebenfalls notwendig, da die Kantone dazu verpflichtet sind, über die getroffenen Massnahmen und deren Wirksamkeit für den Gewässerschutz zu informieren (Artikel 49 Abs. 2 GSchV).

Berichterstattung der Kantone

Die Kantone müssen sodann dem Bund alle vier Jahre Bericht über die durchgeführten Massnahmen erstatten (Artikel 83b Abs. 3 GSchG).

Ungeschmälerte Erhaltung bei Auen von nationaler Bedeutung

Bei der Sanierung des Geschiebehaushalts ist auch das Naturschutzrecht zu berücksichtigen insbesondere, wenn Auen von nationaler Bedeutung betroffen sind. Die Auenverordnung formuliert als Schutzziel die «ungeschmälerte» Erhaltung und, soweit es sinnvoll und machbar ist, die Wiederherstellung der natürlichen Dynamik des Gewässer- und Geschiebehaushalts, sowie die Erhaltung der geomorphologischen Eigenart (Artikel 4 Abs. 1 Bst. b und c).

Die Kantone sind gemäss Artikel 5 Abs. 1 Auenverordnung verpflichtet, die zur Erhaltung der Objekte geeigneten Schutz- und Unterhaltsmassnahmen zu treffen. Sie sorgen unter anderem dafür, dass Auenbereiche mit einem vollständig oder weitgehend intakten Gewässer und Geschiebehaushalt vollumfänglich geschützt werden, bestehende und neue Nutzungen mit dem Schutzziel in Einklang stehen, sowie seltene und gefährdete Pflanzen und Tiere sowie ihre Lebensgemeinschaften gezielt gefördert werden (Artikel 5 Abs. 2 Auenverordnung). Schliesslich gilt gemäss Artikel 8 Auenverordnung, dass die Kantone dafür sorgen, dass bestehenden Beeinträchtigungen, insbesondere der natürlichen Dynamik des Gewässer- und Geschiebehaushaltes, bei jeder sich bietenden Gelegenheit soweit als möglich beseitigt werden.

Ausnahmsweise ist ein Abweichen vom Schutzziel der ungeschmälerten Erhaltung zulässig, wenn es sich um unmittelbar standortgebundene Vorhaben handelt, die dem Schutz des Menschen vor schädlichen Auswirkungen des Wassers oder einem anderen überwiegenden öffentlichen Interesse von ebenfalls nationaler Bedeutung dienen (Artikel 4 Abs. 2 Auenverordnung). Für Wasserkraftanlagen ist das nationale Interesse in Artikel 8 Energieverordnung (EnV, SR 730.01) anhand von Schwellenwerten der Produktion definiert.

Die für die Planung von Massnahmen zur Sanierung des Geschiebehaushaltes massgeblichen Gesetzesartikel sind im Anhang A aufgeführt.

2 Ablauf der Sanierung

2.1 Ablauf der Sanierung bei Wasserkraftanlagen

Die Sanierung des Geschiebehaushaltes ist in fünf Phasen geteilt: 1) kantonale strategische Planung, 2) Studie über Art und Umfang von Massnahmen und Projektierung, 3) Entschädigungsgesuch und Umsetzung, 4) Abrechnung und Auszahlung sowie 5) Erfolgskontrolle.

Abb. 3 gibt einen Überblick über den Ablauf der Sanierung bei Wasserkraftanlagen und zeigt die Rolle und Aufgaben der verschiedenen Akteure: Anlageninhaber, Kantone und Bundesamt für Umwelt (BAFU).

Bei Wasserkraftanlagen an Grenzgewässern tritt im Ablauf das Bundesamt für Energie (BFE) als Vollzugsbehörde an die Stelle der Kantone. Dieses stimmt die Massnahmen mit den Behörden des betroffenen Nachbarstaates ab.

Phase 1 Kantonale strategische Planung

Die Kantone haben bis Ende 2014 die wesentlich beeinträchtigten Gewässerabschnitte und die sanierungspflichtigen Anlagen identifiziert. Diese Ergebnisse wurden vom Kanton beschlossen und als kantonale Planung veröffentlicht. Das BAFU hat 2015 zu allen kantonalen Planungen Stellung genommen.

Phase 2 Studie über Art und Umfang von Massnahmen sowie Projektierung

An die strategische Planung schliesst die Massnahmenplanung an. In der Gewässerschutzgesetzgebung wird für diese Arbeiten der Begriff «Studie über Art und Umfang von Massnahmen» verwendet. Im Rahmen der Studie werden konkrete Ziele für die Gewässer bestimmt und festgelegt, mit welchen Massnahmen diese Ziele erreicht werden. Die Studie entspricht einer Planung auf Stufe Vorstudie (Phase 2 des Leistungsmodells nach sia 112). Sie wird von den Kantonen aus der Perspektive des Einzugsgebiets erarbeitet. Es wird empfohlen, die Inhaber der Anlagen in die Erarbeitung der Studie mit einzubeziehen. Wenn die Studie über Art und Umfang aufzeigt, dass an einer Anlage

- a) keine wesentliche Beeinträchtigung vorliegt oder
- b) keine Massnahme möglich ist aufgrund der Verhältnismässigkeit, des Hochwasserschutzes oder energiepolitischer Ziele,

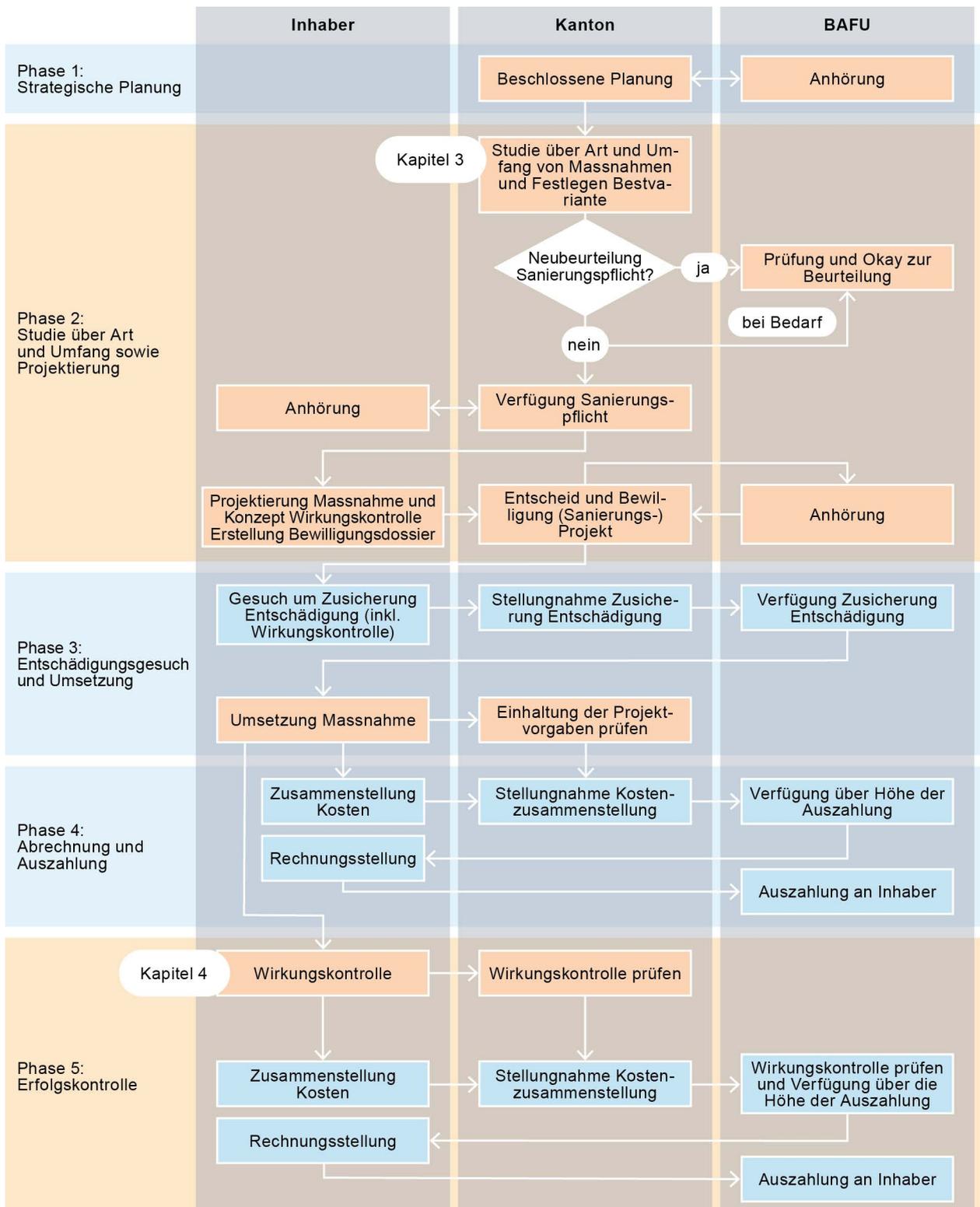
kann die Anlage nach Prüfung durch das BAFU aus der Sanierungspflicht entlassen werden und es muss keine Sanierungspflicht verfügt werden. Das Verfahren für a) im Absatz «Neubeurteilung» am Ende dieses Kapitels beschrieben, für b) in der BAFU FAQ² (vgl. auch Kap. 3.7 Absatz «Teilsanierung»).

Nachdem der Kanton die Inhaber der Anlagen angehört hat, ordnet er, gestützt auf diese Studie, die Sanierungspflicht sowie die Art und den Umfang der Massnahmen mittels einer Verfügung an. Der Anlageninhaber projektiert die verfügte Massnahme und erstellt das entsprechende Bewilligungsdossier. Der Kanton entscheidet schliesslich nach Anhörung des BAFU über das Sanierungsprojekt.

2 www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/wasser/fachinfo-daten/oekologische-sanierung-wasserkraft-fragestellungen-zur-teilsanierung.pdf.download.pdf/Ökologische_Sanierung_Wasserkraft_-_Fragestellungen_zur_Teilsanierung_-_Webversion.pdf

Abb. 3: Gesamtablauf der Geschiebesanierung von Wasserkraftanlagen

Orange Kästchen bezeichnen inhaltliche Bearbeitungsschritte der Sanierung, blaue Kästchen solche zur Finanzierung der Massnahmen.



Phase 3 Entschädigungsgesuch und Umsetzung

Hat der Kanton über die Sanierungsmassnahme entschieden und liegen alle notwendigen Bewilligungen vor, stellt der Inhaber einer Wasserkraftanlage ein Gesuch für die Entschädigung der Kosten. Nach der Stellungnahme durch den Kanton prüft das BAFU seinerseits das Gesuch. Das BAFU sichert dem Inhaber die Entschädigung der voraussichtlichen Kosten mit einer Verfügung zu. Sobald das BAFU die Finanzierung zugesichert hat, kann die Massnahme durch den Anlageninhaber umgesetzt werden (BAFU 2016: Kap. 7).

Phase 4 Abrechnung und Auszahlung

Wenn Sanierungsmassnahmen oder Teile davon umgesetzt sind, können die Inhaber von Wasserkraftanlagen dem Kanton die Kostenzusammenstellung einreichen. Der Kanton prüft die Einhaltung der Vorgaben aus dem Projekt und leitet die Kostenzusammenstellung mit seiner Stellungnahme an das BAFU weiter. Das BAFU prüft ebenfalls, stimmt seine Beurteilung mit dem Kanton ab und verfügt die Höhe der tatsächlichen Entschädigung. Gestützt auf diese Verfügung kann der Inhaber Rechnung stellen (BAFU 2016: Kap. 7).

Phase 5 Erfolgskontrolle

Die Erfolgskontrolle besteht aus einer Umsetzungs- und einer Wirkungskontrolle.

Mit der Umsetzungskontrolle soll der Nachweis erbracht werden, dass die verfügten Massnahmen gemäss Vorgaben und Auflagen umgesetzt wurden. Der Kanton kontrolliert, ob die verfügten Massnahmen sachlich korrekt und fristgerecht umgesetzt werden. Die Umsetzung wird im einfachen Fall (z. B. Aufhebung eines Geschiebesammlers) ein einziges Mal kontrolliert und beinhaltet die Prüfung der angeordneten Sanierungsmassnahme. Im Fall wiederkehrender Massnahmen (z. B. periodische Kiesschüttungen) wird die Ausführung nach jeder Realisierung überprüft. Die Kantone erstatten dem BAFU alle vier Jahre (erstmalig per 2018) Bericht über die Umsetzung der Sanierungsmassnahmen an allen Anlagen (Artikel 83b Abs. 3 GSchG).

Mit der Wirkungskontrolle prüfen die Anlageninhaber die Wirkung der von ihnen umgesetzten Massnahmen und legen dem Kanton einen entsprechenden Bericht vor. Dieser beurteilt die Wirkung anhand der Zielvorgaben aus der Studie über Art und Umfang von Massnahmen und ordnet bei Bedarf eine Nachbesserung der Massnahme an. Die Kosten der Wirkungskontrolle können gestützt auf Artikel 34 EnG ebenfalls entschädigt werden. Die Abläufe zur Abrechnung und Auszahlung der Wirkungskontrolle sind gleich wie die Abläufe bei der Abrechnung der Massnahmen (siehe Phase 4). Die notwendigen Inhalte der Wirkungskontrolle sind in Kap. 4 dieses Vollzugshilfemoduls aufgeführt.

Nachträgliche Neubeurteilung der wesentlichen Beeinträchtigung und Sanierungspflicht

Eine Neubeurteilung der wesentlichen Beeinträchtigung und Sanierungspflicht einzelner Anlagen nach der kantonalen strategischen Planung ist im Grundsatz möglich. Es braucht dazu eine materielle Begründung, warum eine von der strategischen Planung abweichende Beurteilung vorliegt (z. B. neue Erkenntnisse aus der Studie über Art und Umfang von Massnahmen). Das Neubeurteilungsverfahren besteht aus drei Schritten: 1) Neubeurteilung mit schriftlicher Begründung durch den Kanton an das BAFU, 2) Beurteilung durch das BAFU, welche die Auffassung des Kantons stützt und 3) eine schriftliche Bestätigung der Neubeurteilung durch das BAFU an den Kanton (analog der Stellungnahme des BAFU für die kantonalen Schlussberichte, eben für die Einzelanlage).

2.2 Ablauf der Sanierung bei Nicht-Wasserkraftanlagen

Der Ablauf bei der Sanierung von Nicht-Wasserkraftanlagen (Abb. 4) entspricht grundsätzlich demjenigen bei Wasserkraftanlagen. Trotzdem sind folgende Besonderheiten zu erwähnen:

Anhörung bei Sanierungsprojekten (Phase 2)

Das BAFU wird vor dem Sanierungsentscheid nur angehört, wenn die Sanierung im Rahmen eines Einzelprojekts³ zum Hochwasserschutz oder zur Revitalisierung umgesetzt und finanziert wird.

Finanzierung (Phasen 3, 4, 5)

Kosten für Sanierungsmassnahmen bei Nicht-Wasserkraftanlagen können nicht gestützt auf Artikel 34 EnG über den Netzzuschlagsfonds (Artikel 35 Abs. 2 Bst. h EnG) entschädigt werden. Einmalige bauliche Massnahmen wie Umbau oder Rückbau gelten aber als Revitalisierung und sind entsprechend beitragsberechtigt, wenn damit die natürlichen Funktionen eines durch die betreffende Anlage beeinträchtigten Gewässers wiederhergestellt werden. Allerdings werden Beiträge an den Rückbau einer Anlage nur dann geleistet, wenn kein Inhaber dazu verpflichtet ist (Artikel 62b Abs. 4 GSchG), bzw. der Um- oder Rückbau nicht aus Hochwasserschutzgründen erfolgt (z. B. aufgrund notwendiger baulicher Ertüchtigung). Das Vorgehen bei der Subventionierung folgt den Regeln für Revitalisierungsprojekte, wie sie im Handbuch Programmvereinbarungen im Umweltbereich festgelegt sind (BAFU 2018, Teil 11). Werden Umbau und Rückbau aus Hochwasserschutzgründen durchgeführt, wird eine allfällige Entschädigung über das Programm Schutzbauten abgewickelt. Das Vorgehen bei der Subventionierung folgt den Regeln für Hochwasserschutzprojekte, wie sie im Handbuch Programmvereinbarungen im Umweltbereich festgelegt sind (BAFU 2018, Teil 6). Betriebliche Massnahmen und Massnahmen bei Kiesentnahmen werden nicht subventioniert.

2.3 Grundsätze beim Bau von neuen Anlagen und Erweiterung bestehender Anlagen

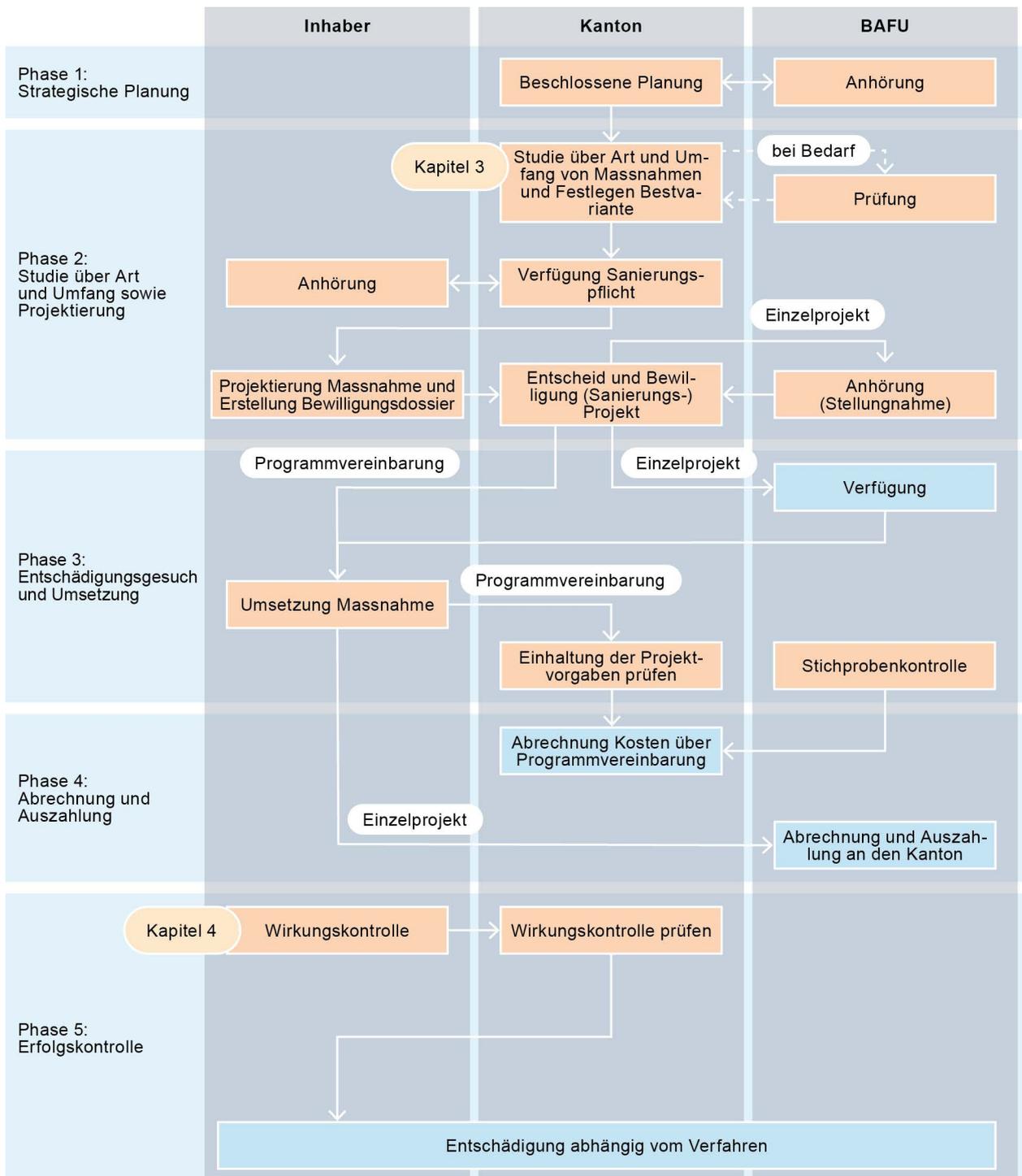
Für neue Anlagen (dazu zählen auch Hochwasserschutz- und Revitalisierungsprojekte), bei der Erweiterung von Anlagen und bei Neukonzessionierungen bestehen die gleichen Anforderungen an den Geschiebehaushalt wie bei der Sanierung bestehender Anlagen. Es gelten die folgenden Grundsätze:

- Eine wesentliche Beeinträchtigung durch einen veränderten Geschiebehaushalt muss verhindert werden.
- Neue Anlagen müssen grundsätzlich für Geschiebe durchgängig konzipiert werden.
- Bei Hochwasserschutzprojekten darf nur so viel Geschiebe entnommen werden, wie zum Schutz vor Hochwasser unbedingt notwendig ist. Sohlenabsenkungen, mit welchen ein Gefälle kleiner als das Talgefälle resultiert, sind zu vermeiden und nur dann gesetzeskonform, wenn dadurch der Geschiebehaushalt im Unterwasser nicht wesentlich beeinträchtigt wird.
- Bei Neuanlagen und Erweiterungen von Anlagen muss deren Inhaber aufzeigen, welche Auswirkungen die Anlage auf den Geschiebehaushalt hat. Es wird empfohlen, dass der Inhaber der Anlage die entsprechenden Arbeitsschritte der Studie über Art und Umfang der Massnahmen (Kap. 3) im Rahmen der Projektierung, beziehungsweise bei Kraftwerksanlagen im Rahmen des Konzessionsverfahrens durchführt.
- Bei Neuanlagen werden Kanton und BAFU bei Projektierung und beim Konzessionsverfahren einbezogen.
- Bei der Erweiterung einer Wasserkraftanlage wird nur der Teil der Massnahmen entschädigt, welcher die bereits bestehenden Beeinträchtigungen durch einen veränderten Geschiebehaushalt beseitigt.

³ Einzelprojekt im Sinne des Handbuchs Programmvereinbarungen im Umweltbereich (BAFU 2018).

Abb. 4: Gesamtablauf der Sanierung von Nicht-Wasserkraftanlagen

Die Finanzierung bei Einzelprojekten und Projekten nach Programmvereinbarungen ist im Handbuch Programmvereinbarungen im Umweltbereich geregelt.



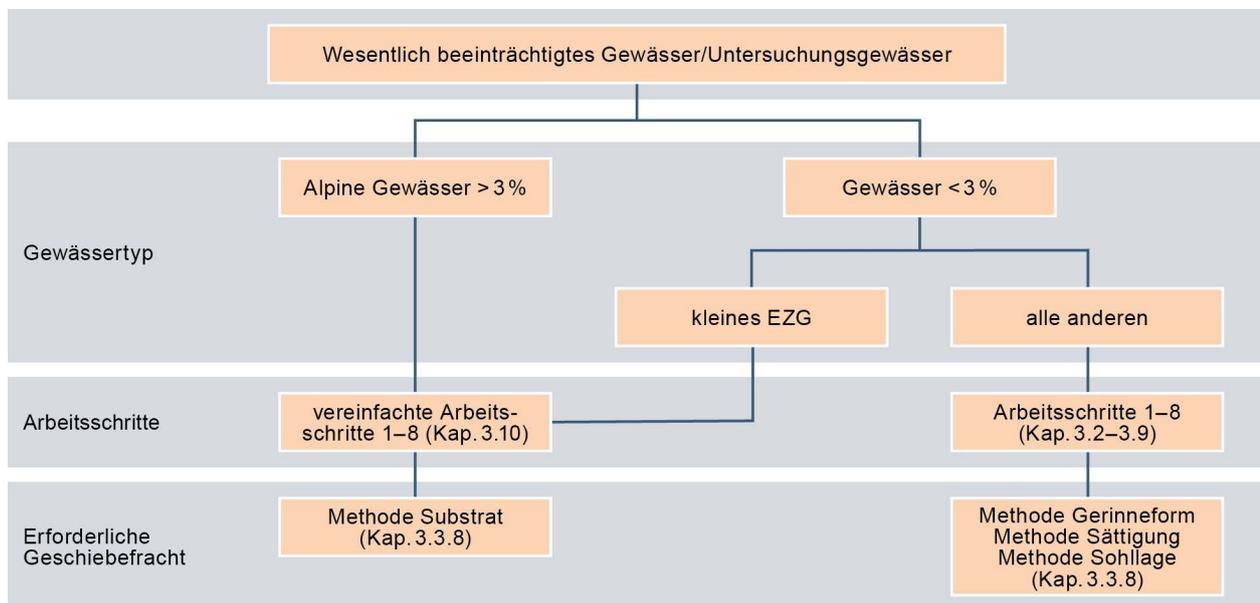
3 Studie über Art und Umfang der Massnahmen

3.1 Überblick

3.1.1 Arbeitsschritte

Je nach Gewässertyp sind bei der Studie über Art und Umfang von Massnahmen Arbeitsschritte in unterschiedlichem Umfang und verschiedene Methoden für die Bestimmung der erforderlichen Geschiebefracht sinnvoll (Abb. 5). In wenig steilen Gewässern (< 3 %) wird empfohlen alle Arbeitsschritte und Methoden gemäss Kap. 3.2–3.9 durchzuführen. In steilen alpinen Gewässern und bei Situationen, wo der Aufwand für die Studie über Art und Umfang im Verhältnis zu den möglichen Massnahmen gross ist (weil das Gewässer beispielsweise klein ist), können die Massnahmen auf eine einfachere Art und Weise geplant und umgesetzt werden. Die Arbeitsschritte des vereinfachten Vorgehens sind in Kap. 3.10 beschrieben.

Abb. 5: Empfohlene Arbeitsschritte und Methoden je nach Gewässertyp



Ziel der Studie ist es, dass Art und Umfang von Massnahmen an allen relevanten Anlagen in einem Einzugsgebiet feststehen. Mit diesen Angaben kann der Kanton den Anlageninhabern die Sanierungspflicht verfügen und die Projektierung der festgelegten Massnahmenart im ermittelten Umfang anordnen (Anhang C).

Die Studie über Art und Umfang von Massnahmen umfasst acht Arbeitsschritte (Abb. 6), mit denen Ist-, naturnaher und Zielzustand für die morphologische Strukturen und die Geschiebefracht bestimmt werden (Abb. 7).

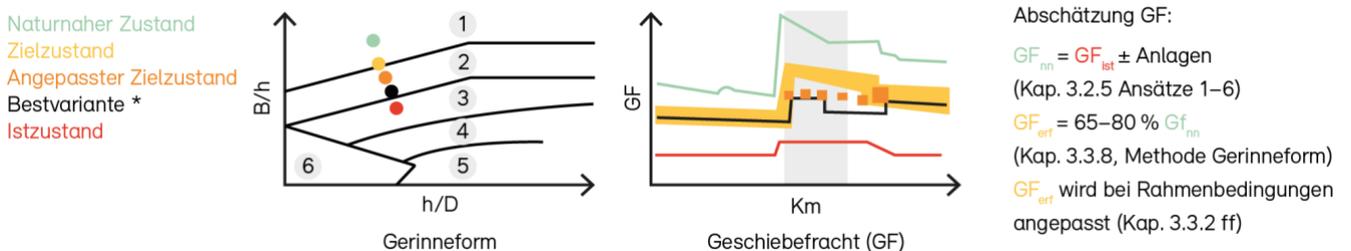
Abb. 6: Arbeitsschritte der Studie über Art und Umfang von Massnahmen

Der Pfeil von Arbeitsschritt 6 zu 3 weist darauf hin, dass das Sanierungsziel der Anlage überdacht werden muss, wenn keine verhältnismässige Massnahme gefunden werden kann, mit welcher das Sanierungsziel für eine Anlage erreicht wird.

Arbeitsschritte	Perimeter	Kapitel
Situationsanalyse		
1) Ist- und Naturnahen Zustand des Gewässers untersuchen	Einzugsgebiet Zielgewässer Anlagen	3.2
Zieldefinition		
2) Morphologische Ziele für das Gewässer und die erforderliche Geschiebefracht festlegen	Zielgewässer	3.3
3) Sanierungsziel für Anlagen festlegen	Anlagen	3.4
Massnahmendefinition		
4) Massnahmenkatalog erarbeiten	Anlagen	3.5
5) Massnahmenvarianten erarbeiten und bewerten	Anlagen	3.6
6) Bestvariante festlegen	Anlagen	3.7
7) Mit anderen Massnahmen am Gewässer koordinieren	Einzugsgebiet	3.8
Umsetzung		
8) Konzept der Wirkungskontrolle festlegen	Zielgewässer Anlagen	3.9

Abb. 7: Illustration der Ergebnisse der Arbeitsschritte

Die Ergebnisse können anhand der Gerinneform eines Gewässerabschnitts und der Geschiebefracht (GF) entlang des Gewässers (= Geschiebetransportdiagramm) im jeweiligen Zustand dargestellt werden. Die Gerinneform ist hier anhand der Parameter Breite B, Abflusstiefe h und Korngrösse D abgegrenzt (nach Ahmari & da Silva, 2011). Die Nummern beziehen sich auf die Gerinneformen in Abb. 8. Die GF wird für verschiedene Zustände abgeschätzt: im naturnahen Zustand GF_{nn} , im Istzustand GF_{ist} und die erforderliche Geschiebefracht GF_{erf} .



* Bestvariante: Grundsätzlich werden Varianten erarbeitet, die Zielzustand und GF_{erf} erreichen. Eine Reduktion des Zielzustands und der GF ist möglich, wenn Hochwasserschutz gefährdet oder die Variante unverhältnismässig wäre.

Situationsanalyse

Arbeitsschritt 1: Als Grundlage für alle Planungsschritte muss die Situation im Gewässersystem bekannt sein. Dazu gehören eine Beschreibung der Morphologie und des Geschiebehaushalts der Gewässer im Ist- und im naturnahen Zustand mit Fokus auf die in der strategischen Planung bezeichneten Zielgewässer sowie eine quantitative Analyse des Einflusses der Anlagen auf dieselben. Dazu werden im Arbeitsschritt 1 die entsprechenden Grundlagen aufbereitet, soweit sie nicht bereits im Rahmen der strategischen Planung erarbeitet worden sind.

Zieldefinition

Arbeitsschritt 2: Die Sanierungsmassnahmen müssen sich an definierten Zielen für das Gewässer und die Anlage orientieren. Diese Ziele sind in allgemeiner Form in Abschnitt 3.3.2 formuliert. Im Arbeitsschritt 2 werden sie für das zu untersuchende Gewässer quantifiziert und es wird diejenige Geschiebefracht in einem Gewässer bestimmt, welche erforderlich ist, damit sich bei uneingeschränkter Gerinnebreite gewässertypische morphologische Strukturen und eine Dynamik einstellen können, sowie der Grundwasserhaushalt und der Hochwasserschutz nicht wesentlich beeinträchtigt werden.

Arbeitsschritt 3: Aus der erforderlichen Geschiebefracht im Gewässer und den bestehenden Defiziten kann ein Sanierungsziel für die einzelnen Anlagen im Einzugsgebiet des Gewässers abgeleitet werden.

Massnahmendefinition

Arbeitsschritt 4: Auf der Basis eines Massnahmenkatalogs sollen die am besten geeigneten Massnahmen bestimmt werden.

Arbeitsschritt 5: In den meisten Fällen ist es notwendig, verschiedene Varianten zu erarbeiten und diese in einem Variantenstudium zu bewerten. Bei diesem Arbeitsschritt ist es besonders wichtig, die verschiedenen Anlagen an einem Gewässer und in dessen Einzugsgebiet gesamthaft zu betrachten und die Massnahmen an den einzelnen Anlagen aufeinander abzustimmen.

Arbeitsschritt 6: Aus den vorgeschlagenen Varianten kann schliesslich eine Bestvariante festgelegt werden, die umgesetzt werden soll.

Arbeitsschritt 7: Die Bestvariante soll mit anderen Massnahmen zum Gewässerschutz, insbesondere mit Revitalisierungen koordiniert werden. Unter Umständen lässt sich das Sanierungsziel für eine Anlage mit verhältnismässigen Massnahmen nicht erreichen. In dem Fall muss das Sanierungsziel für die Anlage (Arbeitsschritt 3) überdacht werden und es müssen neue Varianten erarbeitet und bewertet werden (Pfeil in Abb. 6).

Arbeitsschritt 8: Als letzter Arbeitsschritt soll ein Konzept für die Wirkungskontrolle erarbeitet werden.

3.1.2 Interessenabwägung und Berücksichtigung Hochwasserschutz

Bei der Geschiebesanierung ist eine Interessenabwägung unerlässlich. Das Sanierungsziel ist formal unabhängig von Interessensabwägungen (gemäss Artikel 43a Absatz 1 GSchG). Diese sind jedoch Teil der Festlegung der Massnahme (Arbeitsschritte 4–7), indem sich der Umfang der Massnahme auch nach den Interessen des Hochwasserschutzes, den energiepolitischen Zielen, sowie der Verhältnismässigkeit richtet (Artikel 43a Absatz 2 GSchG) (vgl. Kap. 3.6).

Dem Hochwasserschutz wird in zweierlei Hinsicht Rechnung getragen: die Ziele werden so definiert, dass ausreichend Geschiebe vorhanden ist, damit keine Sohlenerosion die Hochwassersicherheit gefährdet (Arbeitsschritt 2); und bei den Massnahmen wird sichergestellt, dass Auflandungen, die den Hochwasserschutz beeinträchtigen, verhindert werden (Arbeitsschritt 4, Kap. 3.5.4). Letzteres wird gewährleistet indem mögliche negative Auswirkungen auf den Hochwasserschutz in die Bewertung von Massnahmen und die Auswahl der Bestvariante einfließen und wo nötig begleitende Massnahmen zum Hochwasserschutz in die Planung einbezogen werden.

3.1.3 Synergien mit bestehenden Untersuchungen

Übernehmen von Ergebnissen der strategischen Planung

Wenn für einzelne Arbeitsschritte (Abb. 6) der Studie über Art und Umfang von Massnahmen bereits Ergebnisse mit dem Detaillierungsgrad einer Vorstudie bestehen, zum Beispiel aus der strategischen Planung der Kantone oder aus bestehenden Geschiebehauhaltstudien, können diese als Grundlage für die Verfügung der Sanierungspflicht verwendet werden und müssen nicht mehr neu erarbeitet werden. Für Anlagen, für die alle Arbeitsschritte der Studie bereits durchgeführt wurden oder nicht alle zweckmässig sind, weil es nur eine machbare Massnahme gibt und es keiner Koordination bedarf, kann die Massnahme aus der strategischen Planung direkt verfügt werden.

3.1.4 Variantenstudium im Rahmen der Projektierung

In einzelnen Fällen ist es zweckmässig, die Arbeitsschritte zur Massnahmendefinition (Variantenstudium samt Festlegung der Bestvariante) auf Stufe Projektierung erarbeiten zu lassen. Dieses Vorgehen ist dann angezeigt, wenn der Variantenentscheid einen höheren Detaillierungsgrad in der Massnahmenplanung erfordert, als er mit einer Vorstudie erarbeitet werden kann. Eine Koordination von Massnahmen im Einzugsgebiet muss dann auf Stufe Projekt sichergestellt sein. Wenn das Variantenstudium auf die Stufe Projekt verlagert wird, muss dies der Kanton in der Sanierungsverfügung an den Anlageninhaber anordnen (siehe auch die Inhalte einer Sanierungsverfügung in Anhang B). Auch in diesen Fällen muss der Variantenentscheid jedoch durch den Kanton gefällt und verfügt werden.

3.2 Arbeitsschritt 1: Ist- und naturnahen Zustand des Gewässers vertieft untersuchen

3.2.1 Einführung

Ziele und erwartete Ergebnisse des Arbeitsschritts

Mit diesem Arbeitsschritt sollen Kenntnisse über die Morphologie und den Geschiebehauhalt des Gewässers im naturnahen Zustand und im Istzustand gewonnen werden, so dass daraus die Defizite in der Geschiebefracht abgeleitet werden können.

Als Ergebnisse des Arbeitsschrittes werden erwartet:

- Beschreibung der Morphologie und der Dynamik des Gewässers im naturnahen Zustand und im Istzustand.
- Liste der Anlagen, welche die Geschiebefracht im Istzustand gegenüber der Fracht im naturnahen Zustand beeinflussen mit Angaben darüber, um welches Mass die Geschiebefracht von den Anlagen reduziert wird.
- Längsprofil der Geschiebefracht im naturnahen Zustand und im Istzustand.
- Beschreibung des Defizits der Geschiebefracht im Istzustand gegenüber der Geschiebefracht im naturnahen Zustand.

3.2.2 Definition von Naturzustand, naturnaher Zustand, Istzustand und Defizit

Naturzustand

Der Naturzustand entspricht dem Zustand des Fliessgewässers ohne anthropogene Eingriffe. Breite, Gerinneform und Verlauf des Gewässers im Naturzustand sind näherungsweise in historischen Karten oder anderen Dokumenten wie Fotos dargestellt. Im Naturzustand ist der Geschiebehauhalt nicht anthropogen beeinflusst.

Naturnaher Zustand

Der naturnahe Zustand ist der Zustand des Gewässers bezüglich Morphologie und Breite, Abflussregime, Geschiebehauhalt unter heutigen klimatischen Bedingungen aber ohne Nutzungen im und im unmittelbaren Umfeld des Gewässers. Der naturnahe Zustand unterscheidet sich vom Naturzustand nur durch grossräumige Waldrodungen, Trockenlegung von Feuchtgebieten und Gewässerumleitungen in einen See.

Der naturnahe Zustand dient dazu, die naturnahe Morphologie und Dynamik als Leitbild zu erkennen und aufzuzeigen, wie sich das Gewässer ohne negative Einflüsse durch Nutzungen im und am Gewässer entwickeln könnte. Aus dem Vergleich vom naturnahen Zustand und Ist-Zustand ergibt sich das Defizit, welches mit Massnahmen zumindest teilweise behoben werden soll. Der naturnahe Zustand ist die Basis für die Unterscheidung von wesentlichen und unwesentlichen Beeinträchtigungen und stellt den Ausgangspunkt zur Erarbeitung von Geschiebemaassnahmen dar.

Zielzustand

Der Zielzustand ist ein Zustand, bei dem das Gewässer nicht wesentlich durch einen veränderten Geschiebehauhalt beeinträchtigt ist. Morphologie und Geschiebefracht orientieren sich am naturnahen Zustand und sind ihm möglichst ähnlich. Der naturnahe Zustand stellt aber nicht das Ziel der Geschiebesanierung dar: Wesentliche Veränderungen gegenüber dem naturnahen Zustand sind zu beseitigen.

Wenn das Gerinne verbaut ist (eingeschränkte Breite) oder das Abflussregime oder die Geschiebelieferung verändert sind, kann eine naturnahe Morphologie und Dynamik nicht allein durch Geschiebemaassnahmen wiederhergestellt werden, da sie von diesen Rahmenbedingungen abhängig sind. In diesen Fällen können die morphologischen Ziele angepasst werden (Kap. 3.3.2 ff).

Der effektive Umfang von Geschiebemaassnahmen wird auch nach dem Grad der Beeinträchtigungen des Gewässers, dem ökologischen Potenzial des Gewässers, der Verhältnismässigkeit des Aufwandes, den Interessen des Hochwasserschutzes und den energiepolitischen Zielen zur Förderung erneuerbarer Energien ausgerichtet (Kap. 3.6). In Kap. 3.3 wird detailliert beschrieben, wie Ziele für Gewässer in unterschiedlichen Situationen hergeleitet werden können.

Istzustand

Der Istzustand beschreibt den aktuellen Zustand der Gewässer mit allen Anlagen und Gewässerverbauungen. Im Istzustand ist der Geschiebehauhalt des Gewässers gegebenenfalls durch Wasserkraftanlagen, Geschiebesammler, Gewässerverbauungen, Kiesentnahmen und andere Anlagen verändert.

Defizit

Das Defizit ergibt sich aus der Differenz zwischen dem naturnahen und dem Istzustand. Dabei interessieren in erster Linie die Defizite in der Morphologie und der Geschiebefracht.

3.2.3 Charakterisierung der Morphologie

Morphologische Merkmale

Die Morphologie eines Gewässers kann durch typische Merkmale beschrieben werden: die Gerinneform, das Vorkommen und die Ausdehnung von Geschiebeablagerungen, insbesondere von Kiesbänken und das Substrat. Als morphologische Merkmale zählen auch die Breite und das Längsgefälle des Gewässers.

Gerinneform

Die Gerinneform ist das Erscheinungsbild des Gewässers aus der Vogelperspektive. In Anlehnung an die Gerinneklassifizierung nach Leopold und Wolman (1959) und Ahmari und daSilva (2011) lassen sich Schweizer Gewässer gut mit den folgenden sechs Gerinneformen unterscheiden (Abb. 8):

(1) *Verzweigte Gerinne mit mehr als 2 Teilgerinnen*: Der Lauf des Gewässers teilt sich bei Mittelwasser in mehrere Arme auf. Dazwischen liegen Kiesbänke ohne Gehölz. Die Kiesbänke werden bei Hochwasser überflutet und ihre Lage ändert sich mit jedem Hochwasserereignis. Das Flussbett ist breit und die mittlere Abflusstiefe auch bei Hochwasser relativ gering.

(2) *Verzweigte Gerinne mit 2 Teilgerinnen*: Sehr ähnlich wie Gerinneform (1). Der Unterschied besteht in der Anzahl Teilgerinne. Das Flussbett ist im Verhältnis zum verzweigten Gerinne mit mehr als 2 Teilgerinnen etwas weniger breit.

(3) *Gewundene Gerinne mit Inseln und Bänken*: Das Gerinne besitzt ein bis mehrere Teilgerinne. Diese sind durch bewaldete Inseln voneinander getrennt, welche nur bei grossen Hochwasserereignissen durch Migration der Teilgerinne verändert werden. Kiesbänke begleiten die Inseln oder bilden sich an geeigneten Stellen entlang der Ufer.

(4) *Gewundene Gerinne mit Bänken*: Es bilden sich Bänke in strömungsberuhigten Zonen entlang des Ufers oder bei lokalen Verbreiterungen. Sie werden bei Hochwasser überflutet und sind, mit wenigen Ausnahmen, nicht mit Gehölz bewachsen. Diese Gerinneform kann auch als mäandrierendes Gerinne mit Geschiebetrieb bezeichnet werden.

(5) *Mäandrierende Gerinne ohne Geschiebetrieb*: Bei diesem Typ fließen Hoch- und Niedrigwasser in einem und demselben Gerinne ab. Die Sohle besteht überwiegend aus Sand.

(6) *Gewundene oder gestreckte Gerinne*: Bei steilen Gerinnen mit Gefälle von mehr als 3 % ist die Gerinneform von Geologie und Topographie abhängig und nicht von der Grösse der Geschiebefracht.

Die Gerinneform im naturnahen Zustand kann in Abhängigkeit der Hochwassergeschichte variiert haben. Oft stehen historische Karten verschiedener Jahre⁴, historische Luftbilder oder Pläne der ersten Flusskorrekturen zur Verfügung. Auf dieser Grundlage kann die Gerinneform des naturnahen Zustandes eines Gewässers bestimmt werden. Manchmal kann eine frühere Gerinneform aus Geländespuren, die in hochaufgelösten digitalen Geländemodellen noch heute sichtbar sind, oder aus einer bestehenden, naturnahen Strecke hergeleitet werden. Aus denselben Grundlagen kann die gehölzfreie Breite des Gewässers ermittelt werden. Die Gerinneform im Istzustand kann aus aktuellen Karten oder Luftbildern oder an einer Geländebegehung bestimmt und allenfalls mit Abgrenzungskriterien verifiziert werden (z. B. mit Ahmari & da Silva 2011, vgl. Anhang E).

4 z. B. für den Alpenrhein CH/AT: Römer und Duile-Karte; für den Aargau: Michaelis-Karte, für die ganze Schweiz: Siegfried-Karten

Abb. 8: Gerinneformen

Beispiele aus historischen Karten und aktuellen Luftbildern.

1 Verzweigte Gerinne mit mehr als 2 Teilgerinnen.



Karte: Hinterrhein bei Rhäzüns.
Fotos: Rotten bei Leuk;
Sense bei Plaffeien.

2 Verzweigte Gerinne mit 2 Teilgerinnen.



Karte: Alpenrhein bei Kriessern.
Fotos: Schwarzwasser bei Rüscheegg;
Ärgera bei Gifers.

3 Gewundene Gerinne mit Inseln und Bänken.



Karte: Limmat bei Dietikon.
Fotos: Moesa bei Soazza
Vorderrhein bei Disla

4 Gewundene Gerinne mit Bänken.



Karte: Aare bei Wynau.
Fotos: Saane bei Rougemont;
Töss bei Dättikon.

5 Mäandrierende Gerinne ohne Geschiebeführung.



Karte: Aare bei Grenchen.
Fotos: Aare bei Grenchen;
Biber bei Rothenthurm.

6 Gestreckte und gewundene Gerinne.



Karte: Chirel im Diemtigtal.
Fotos: Schmadri Lüttschine bei Stechelberg;
Verzasca bei Sonogno.

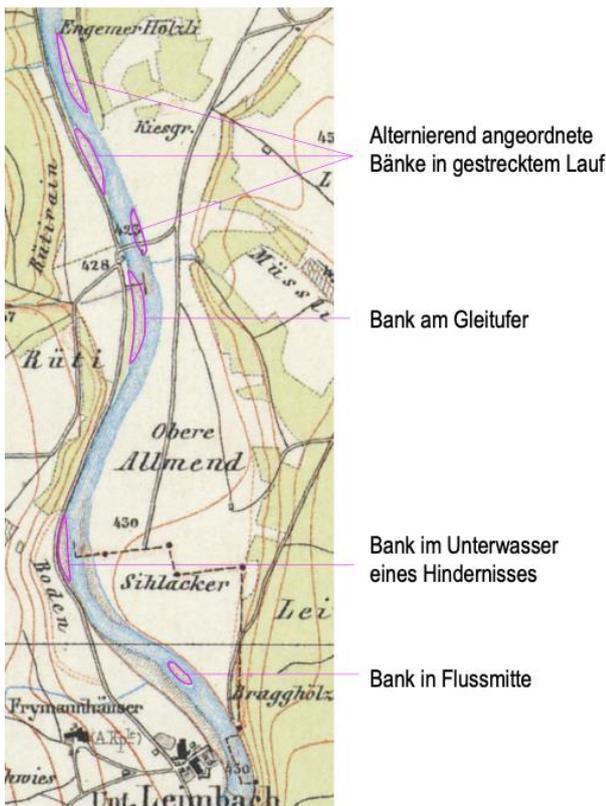
Geschiebeablagerungen

Geschiebe lagert sich bei allen Gerinneformen mit Geschiebetransport in strömungsberuhigten Sohlenbereichen ab. Kies kann flächig oder in Form von Bänken abgelagert werden. Geschiebeablagerungen, insbesondere Kiesbänke, können bei Niedrig- und Mittelwasser aus dem Wasser ragen. Aufgrund der Lage und Anordnung können folgende Typen von Ablagerungen unterschieden werden (Abb. 9):

- Ablagerung am Gleitufer einer Krümmung (stationäre Kiesbank; bei Migration des Gewässers beschränkt mobil).
- Ablagerung als Insel in einer Aufweitung oder in einem verzweigten Gewässer (stationäre oder mobile Kiesbank).
- An den Ufern alternierend angeordnete Ablagerungen in gestreckten Gewässerabschnitten (stationäre oder mobile Kiesbank).
- Ablagerungen hinter Hindernissen (stationäre Kiesbank).
- Ablagerungen im Talweg einer Rinne (bei kleinen Hochwasserabflüssen).

Abb. 9: Unterschiedliche Kiesbankstrukturen in der Sihl bei Zürich

Fliessrichtung von Süd nach Nord. Wild Karte 1843-51. Massstab 1 : 15 000.



Breite

Die Breite ist ein wesentliches morphologisches Merkmal der Gewässer. Sie ist abhängig von Abflussregime, Geschiebefracht, Korngrössen und geologischen Eigenschaften. Verzweigte Gerinne sind im Verhältnis zur Abflusstiefe meist deutlich breiter als gewundene oder gestreckte Gerinne. Die Übergänge zwischen Sohle, Uferböschungen, Weich- und Hartholzauen sind meist fliessend, sodass man die Breite je nach Anwendungszweck unterschiedlich definieren kann. Für morphologische Vergleiche von Gewässern wird oft die Wasserspiegelbreite beim bettbildenden Abfluss (z. B. HQ2) verwendet («bordvolle Breite» oder «Gerinnebreite»). Andere Definitionen wie etwa die «natürliche Sohlenbreite» sind für die Bestimmung des Gewässerraums von Bedeutung (BPUK et al. 2019, BAFU 2023).

Die Breite im naturnahen Zustand kann je nach Fall und vorliegenden Grundlagen anhand historischer Karten, Korrekionsplänen, Luftbildern und Referenzstrecken hergeleitet werden. Der benetzte Bereich entspricht in diesen Grundlagen häufig Mittelwasserverhältnissen. Es können dort aber auch andere Abflüsse dargestellt sein.

Die Breite variiert in Fliessrichtung und in Abhängigkeit der Hochwassergeschichte teilweise stark. In der Regel wird ein Mittelwert über eine morphologisch einheitliche Fliessstrecke als massgebend betrachtet. Bei Auswertung mehrerer historischer Karten und Luftbilder können Unterschiede infolge des Abflussgeschehens und anthropogener Eingriffe aufgezeigt werden.

Falls keine entsprechenden Grundlagen bestehen, kann die Breite durch empirische Methoden und Faustformeln angenähert werden (z. B. Parker 1979). Dabei sollte die Gerinneform im naturnahen Zustand berücksichtigt werden.

Die Breite im Istzustand kann im Gelände aus Querprofilen oder anhand von Luftbildern gemessen werden.

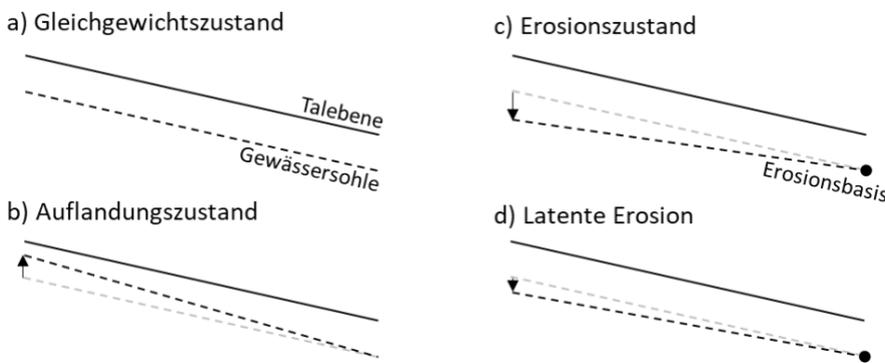
Längsgefälle

Das Längsgefälle im naturnahen Zustand kann aus historischen Karten mit Höhenlinien bestimmt (z. B. die Siegfriedkarte oder die Wild-Karte) oder aus dem Talgefälle abgeleitet werden. Das Längsgefälle im Istzustand wird aus aktuellen Querprofilvermessungen, aus topographischen Karten oder aus einem digitalen Höhenmodell ermittelt.

Das Längsgefälle und Talgefälle unterscheiden sich bei erodierenden und auflandenden Gewässern (Abb. 10):

- Gleichgewichtszustand: Längsgefälle = Talgefälle.
- Auflandung: Längsgefälle tendenziell grösser als Talgefälle. Entlang des Gewässers bestehen Uferwälle. Ein signifikantes Anwachsen des Längsgefälles über das Talgefälle hinaus wird bei Hochwasser durch Laufverlagerungen und Übersarungen verhindert.
- Erosion: Längsgefälle in der Regel kleiner als das Talgefälle.
- Latente Erosion⁵: Längsgefälle oft kleiner als das Talgefälle. Sohle gegenüber der seitlich angrenzenden Talebene in der Regel eingetieft.

Abb. 10: Längsgefälle der Gewässersohle und Talsohle bei unterschiedlichen Zuständen



Substrat

Das Substrat wird durch das Vorkommen verschiedener Substrattypen an der Oberfläche und durch den Grad der inneren Kolmation beschrieben (Abb. 11). Die innere Kolmation wird durch die Infiltration von Schwebstoffen verursacht und durch die Umlagerung der Gewässersohle wieder rückgängig gemacht (Dekolmation). Das Vorgehen zur Bewertung der Substrateigenschaften ist in Anhang H beschrieben.

Bei der Beurteilung der Kolmation sind die geologischen und glaziologischen Verhältnisse und die Hochwassergeschichte zu berücksichtigen. In Gewässern mit natürlicherweise hoher Trübung (zum Beispiel Einzugsgebiete mit Flysch, Mergel, Schiefer, glaziale Gebiete) kolmatisiert die Sohle tendenziell schneller. Ist seit langer Zeit kein Hochwasserereignis aufgetreten, bei dem die Sohle mobilisiert wurde, so ist ebenfalls von verstärkter Kolmation auszugehen.

Für den naturnahen Zustand darf man davon ausgehen, dass bei verzweigten Gerinnen laufendes Geschiebe auf der Sohle dominiert (Abb. 11: Substrattypen 2 und 3 vorherrschend) oder alle gleichmässig vorkommen und die Sohle vergleichsweise wenig kolmatisiert ist. Bei gewundenen Gerinnen dürfte entlang von Gleithängen vor allem Geschiebe abgelagert sein (Abb. 11: Substrattyp 2 und 3) und im Talweg mehrheitlich Sohlenmaterial mit Geschiebe durchsetzt oder abgeplästertes Sohlenmaterial vorkommen (Abb. 11: Substrattyp 4 und 5 vorherrschend). Die Sohle dürfte vergleichsweise wenig bis mittelmässig kolmatisiert sein (Abb. 11: Kolmationsgrad 1 bis 3). Vom Geschiebedefizit unbeeinflusste Vergleichsstrecken mit ähnlicher Neigung und ähnlichem Abfluss (zum Beispiel oberhalb von Anlagen) können Hinweise auf das Substrat im naturnahen Zustand liefern.

⁵ Bei einem Gewässer im Zustand der latenten Erosion ist die zugeführte Geschiebefracht kleiner als die transportierbare Geschiebefracht. Eine Eintiefung der Sohle wird aber durch grobes Sohlenmaterial verhindert.

Abb. 11: Substrattypen (links) und Grad der inneren Kolmation (rechts).

Beispiel links: Kander unterhalb des Zusammenflusses mit der Simme. Die absoluten Korngrössen der Substrattypen sind gewässerspezifisch. Die Bilder 2 bis 5 haben ungefähr den gleichen Massstab.



1: Schwebstoffablagerungen
Sand, Silt.



1: Keine Kolmation.
Unter den Deckschichtkörnern hat es vor allem Kies und wenig Sandablagerungen.



2: Feingeschiebe
Feinere Anteile des regelmässig transportierten Geschiebes.



2: Geringe Kolmation.
Unter den Deckschichtkörnern hat es wenig siltige und tonige Ablagerungen.



3: Grobgeschiebe
Größere Anteile des regelmässig transportierten Geschiebes.



3: Mittlere Kolmation.
Der Porenraum ist etwa zu einem Viertel mit siltigen und tonigen Ablagerungen verfüllt.



4: Sohlenmaterial mit Geschiebe
Zwischen den grossen Körnern des Sohlenmaterials sind Körner des Geschiebes abgelagert.



4: Starke Kolmation.
Der Porenraum ist etwa zur Hälfte mit siltigen und tonigen Ablagerungen verfüllt.



5: Grobes Sohlenmaterial
Grosse Körner des Sohlenmaterials dominieren.



5: Vollständige Kolmation.
Der Porenraum ist praktisch flächendeckend mit siltigen und tonigen Ablagerungen verfüllt.

3.2.4 Charakterisierung der Gewässer aufgrund des Geschiebehauhaltes

In Bezug auf den Geschiebehauhalt können Gewässerstrecken in vier Typen unterteilt werden (Tab. 1):

- Auflandungsstrecken
- Gleichgewichtsstrecken (auch als Umlagerungsstrecken bezeichnet)
- Strecken mit latenter Erosion
- Erosionsstrecken.

Auflandungsstrecken kommen hauptsächlich oberstrom der Einmündung in Seen (zum Beispiel Alpenrhein) oder von Rieden und Mooren (zum Beispiel Alte Aare, Minster) vor. Der Sättigungsgrad⁶ ist grösser als 1. In Auflandungsstrecken sind die Korngrössenverteilungen des transportierten Geschiebes und des Sohlenmaterials identisch.

Bei Gleichgewichtsstrecken entspricht die Geschiebezufuhr der transportierbaren Geschiebefracht und der Sättigungsgrad beträgt 1. Oft handelt es sich um postglaziale Auflandungsstrecken, bei denen der Auflandungsprozess seit langem abgeschlossen ist. In Gleichgewichtsstrecken sind die Korngrössenverteilungen des transportierten Geschiebes und des Sohlenmaterials identisch.

Viele Schweizer Fliessgewässer befinden sich im Zustand der latenten Erosion. Die Geschiebezufuhr ist kleiner als die transportierbare Geschiebefracht (Sättigungsgrad kleiner als 1) und eine stabile Deckschicht aus vergleichsweise grobem Sohlenmaterial verhindert Erosionen. Die Deckschicht bildet sich, wenn bei Hochwasserabfluss verhältnismässig wenig Geschiebe herangeführt wird und die feinen Kornfraktionen aus der Unterschicht ausgetragen werden. Sie wird erst bei grossen Hochwasserabflüssen aufgerissen. Bei kleineren Hochwasserabflüssen wird Geschiebe transportiert, das feiner als das Untergrundmaterial ist.

Bei Erosionsstrecken ist die Geschiebezufuhr kleiner als die transportierbare Geschiebefracht (Sättigungsgrad kleiner als 1) und der Abfluss deckt das Geschiebedefizit aus der Sohle, womit sich die Sohle eintieft. Erosionsstrecken kommen vorwiegend im oberen Einzugsgebiet von Gewässersystemen vor. Die Korngrössenverteilungen des transportierten Geschiebes und des Sohlenmaterials sind identisch.

Abb. 12: Zusammensetzung von Sohlenmaterial und Geschiebe

Links: Sohlenmaterial gröber als Geschiebe, Beispiel Brenno; rechts: Sohlenmaterial und Geschiebe identisch, Beispiel Alpenrhein. Fotos Flussbau AG.



⁶ Als Sättigungsgrad (auch relativer Geschiebetransport) wird das Verhältnis zwischen zugeführter Geschiebefracht und transportierbarer Geschiebefracht bezeichnet.

Tab. 1: Charakterisierung der Gewässer aufgrund des Geschiebehauhalts

Gewässer / Sättigungsgrad	Prozesse	Korngrößenverteilung Geschiebe/Sohlenmaterial	Beispiele im Naturzustand
Auflandungsstrecke / Sättigungsgrad > 1	Gewässer mit langfristiger Auflandungstendenz. Die Sohle hebt sich parallel an oder das Längsgefälle nimmt zu	Korngrößen Geschiebe = Korngrößen Sohlenmaterial	Gewässer, die in Seen münden: Alpenrhein unterhalb Chur, Urner Reuss unterhalb Erstfeld, Ticino in der Magadinoebene; Gewässer, die in verlandete Seen oder in Riede münden: Wyna oberhalb Zetzwil, Aare Aarberg bis Büren; Rhône in der Rhôneebene; Einige alpine Auen: Borgne d’Arolla
Gleichgewichtsstrecke / Sättigungsgrad = 1	Gewässer mit Fixpunkt im Unterwasser. Die Sohlenlage schwankt um einen Mittelwert und ist langfristig im Gleichgewicht. Im Gegensatz zur Auflandungsstrecke ändert sich die Lage und die Höhe des Fixpunktes nicht.	Korngrößen Geschiebe ≤ Korngrößen Sohlenmaterial	Aare vor Brugg, Limmat vor Oetwil, Reuss vor Bremgarten, Brenno in den Auen bei Marogno und Loderio.
Strecke in latenter Erosion / Sättigungsgrad < 1	Gewässer, bei dem die Geschiebefracht kleiner als die transportierbare Geschiebefracht ist, aber wegen der groben Deckschicht nur bei sehr grossen Hochwassern Sohlenerosionen auftreten.	Korngrößen Geschiebe < Korngrößen Sohlenmaterial	Sihl Schindellegi bis Adliswil, Doubs im CH-Abschnitt., Urner Reuss von Göschenen bis Amsteg.
Erosionsstrecke / Sättigungsgrad < 1	Gewässer mit fortschreitender Erosion bei Hochwasserabfluss.	Korngrößen Geschiebe ≤ Korngrößen Sohlenmaterial	Viele Gewässeroberläufe, insbesondere Wildbäche.

3.2.5 Quantifizieren der Geschiebefracht

Bedeutung der Geschiebefrachtabschätzungen

Die Geschiebefrachten im naturnahen und im Istzustand bilden die wichtigste Grundlage für die Planung von Geschiebemaassnahmen und damit der Sicherstellung von Hochwasserschutz und ökologischen Zielen.

Ansätze zur Quantifizierung der Geschiebefracht

Zur Charakterisierung der für die Gewässermorphologie typischen Geschiebefracht wird die mittlere jährlich transportierte Geschiebefracht verwendet.

Die Geschiebefrachten entlang eines Gewässers werden bestimmt, in dem die Geschiebelieferung aus allen Seitenbächen des Einzugsgebiets mit und ohne Anlagen ermittelt wird.

Auf langen Strecken müssen Sohlenerosionen, Ablagerungen und der Abrieb ebenfalls berücksichtigt werden. Für den Istzustand können diese Sohlenveränderungen durch die Auswertung von Querprofilvermessungen verschiedener Jahre abgeschätzt oder mit Hilfe einer numerischen Simulation quantifiziert werden. Im naturnahen Zustand sind Ablagerungen in ausgewiesenen Auflandungsstrecken massgebend. Der Abrieb kann nach dem Gesetz von Sternberg und einem Abriebskoeffizienten berechnet werden, der von der Gesteinsart abhängig ist (siehe zum Beispiel Bezzola 2019).

Im Anhang D werden sechs etablierte Ansätze zur Abschätzung der Geschiebefracht im Ist- und naturnahen Zustand vorgestellt. Die Unsicherheiten bei der Bestimmung der Geschiebefracht können gross sein. Es ist daher wichtig die Unsicherheiten durch Kombination verschiedener dieser Ansätze zu minimieren.

Die Geschiebefracht im naturnahen Zustand

Die Geschiebefracht im naturnahen Zustand GF_{nn} entspricht der Geschiebefracht im Istzustand GF_{Ist} plus/minus der Änderung der Geschiebefracht durch Anlagen A :

$$GF_{nn} = GF_{Ist} \pm A.$$

Daraus folgt, dass die Geschiebefracht im naturnahen Zustand hinsichtlich Klima, Bewaldung, Geschiebeherde, etc. auf dem heutigen Zustand des Einzugsgebietes basiert.

Defizite im Geschiebehauhalt

Die Differenz zwischen der Geschiebefracht im Istzustand und der Geschiebefracht im naturnahen Zustand zeigt die Defizite im Geschiebehauhalt des Gewässersystems.

Einfluss von Anlagen auf die Geschiebefracht

Anlagen im Gewässer wirken sich unterschiedlich auf die Geschiebefracht aus. Stauseen, Flusstauhaltungen oder Kiesentnahmen führen in der Regel zu einer Reduktion der Geschiebefracht. Das heisst, dass zur Bestimmung der Geschiebefracht des naturnahen Zustandes deren Rückhalt oder die Entnahmen zur Geschiebefracht im Istzustand dazuzuzählen sind.

Der Einfluss von Geschiebesammlern und Gewässerverbauungen ist teilweise etwas differenzierter:

Geschiebesammler führen dann zu einer Reduktion der Geschiebefracht, wenn im Sammler mehr Kies zurückgehalten und entnommen wird, als im naturnahen Zustand in der Unterwasserstrecke weiter transportiert werden konnte.

Wildbachsperrern führen besonders bei grossen Hochwasserereignissen zu einer Reduktion der Geschiebefracht. Bei kleinen Hochwasserereignissen, bei welchen auch im Zustand ohne Wildbachsperrern die Sohle nicht erodierte, sind die Unterschiede zwischen der Geschiebefracht im naturnahen und im Istzustand geringer.

Gewässerverbauungen auf Schwemmkegeln (Kanalisation, Bachschalen) verhindern die Ablagerung von Geschiebe und führen daher, verglichen mit dem naturnahen Zustand zu einer Erhöhung der Geschiebefracht. Im naturnahen Zustand kam es bei grossen Hochwasserereignissen zu einer Übersarung des Schwemmkegels, wodurch die Geschiebefracht und der Geschiebeeintrag in den Vorfluter stark abnahm. Bei kleinen Hochwasserereignissen sind die Unterschiede eher gering.

Dementsprechend haben Wildbachverbauungen und die Kanalisation der Gewässer auf Schwemmkegeln gegensätzliche Wirkungen. Die summierte Wirkung der zwei Anlagen ist stark von den spezifischen Verhältnissen abhängig und kann sich ausgleichen oder die Fracht kann im Unterwasser vergrössert oder verkleinert werden.

Die Einengung und Kanalisierung von Gewässern führt oft zu Sohlenerosion und einer Zunahme der Geschiebefracht in Fließrichtung. Wird die Sohle mit Schwellen gesichert, so wird dieser Prozess reduziert oder verhindert.

Mit Uferverbauungen wird der Eintrag von Geschiebe infolge Ufererosion verhindert.

Längsprofil der Geschiebefracht

Auf Grundlage der ermittelten Geschiebefrachten, dem Einfluss von Anlagen sowie dem Abrieb wird ein Längsprofil der mittleren jährlichen Geschiebefracht hergeleitet und dargestellt (Abb. 13).

Bei der Herleitung des Längsprofils der Geschiebefracht im naturnahen Zustand und im Istzustand muss das Transportvermögen in den Zwischenstrecken zwischen zwei Seitenzubringern berücksichtigt werden.

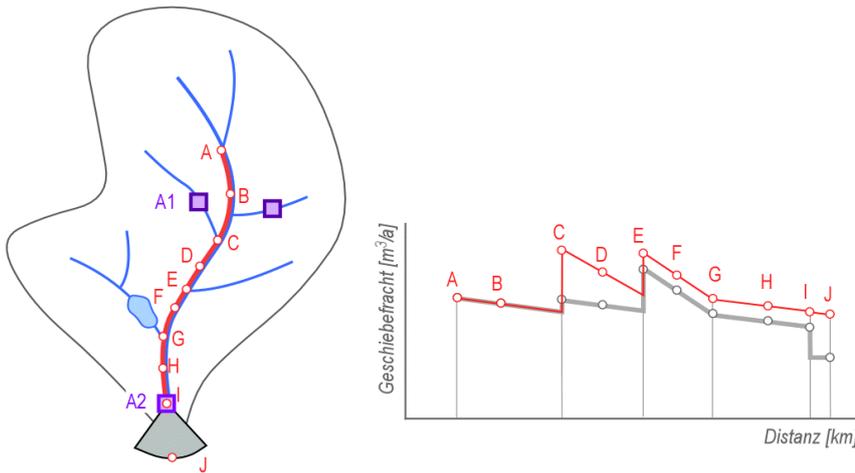
In Gleichgewichtsstrecken wird Geschiebe ablagerungsfrei flussabwärts verfrachtet. Die Geschiebefracht nimmt dann nur mit dem Abrieb ab.

In Auflandungsstrecken muss eine Abnahme der Fracht in Fließrichtung berücksichtigt werden. Morphologische Modellrechnungen können helfen, Auflandungsstrecken im naturnahen Zustand zu identifizieren. Für den Istzustand kann Auflandung durch die Auswertung von Querprofilvermessungen verschiedener Jahre abgeschätzt werden.

In Erosionsstrecken nimmt die Geschiebefracht zu, es sei denn, der Abrieb ist grösser als die Erosionsraten.

Abb. 13: Schematisches Einzugsgebiet (links) und Geschiebefrachtdiagramm entlang des Flusslaufs (rechts) für den Istzustand (graue Linie) und den naturnahen Zustand (rote Linie)

A1 und A2 sind Anlagen, Buchstaben A–J bezeichnen Punkte im Einzugsgebiet, für die eine Geschiebefracht hergeleitet wurde.



Längsprofil Fracht im Istzustand (graue Linie): In diesem fiktiven Beispiel wurden verschiedene Ansätze verwendet, um für die Punkte A bis J entlang der Fließstrecke die Fracht im Istzustand zu bestimmen:

- A:** Geschiebelieferung aus dem Oberlauf: Abschätzen von Ereignisfrachten bei Hochwasser in Teileinzugsgebieten und umrechnen auf die jährliche Fracht.
- B:** Das Geschiebe wird in einer Gleichgewichtsstrecke ablagerungsfrei transportiert. Die Geschiebefracht nimmt durch den Abrieb in Fließrichtung ab.
- C:** Geschiebelieferung aus dem Seitenzubringer mit Geschiebesammler (Anlage A1): Auswerten der Daten aus der Bewirtschaftung des Sammlers (Ansatz 1), Beurteilen der Geschiebedurchgängigkeit und Abschätzen der unterhalb des Sammlers mobilisierten und transportierten Geschiebefracht bei Hochwasser.
- D:** Das Geschiebe wird in einer Gleichgewichtsstrecke ablagerungsfrei transportiert. Die Geschiebefracht nimmt durch den Abrieb in Fließrichtung ab.
- E:** Geschiebelieferung aus dem Seitenzubringer: Übertragen der Geschiebefracht aus Vergleichsgewässern, zum Beispiel aus den Zubringern von Punkt A und den Daten von Anlage A1.
- F:** Auflandungsstrecke: Die Abnahme der Geschiebefracht entlang der Fließstrecke wird aus beobachteten Sohlenveränderungen ermittelt. Die Geschiebefracht nimmt ausserdem auch durch den Abrieb in Fließrichtung ab.
- G:** Keine Geschiebelieferung aus dem Seitenzubringer (Seeausfluss).
- H:** Die Geschiebefracht wird mit einer Transportrechnung in der flachen Schlüsselstrecke bestimmt.
- I:** Abnahme der Geschiebefracht an einer Baggerstelle (Anlage A2) wird über Kiesentnahmestatistiken hergeleitet.
- J:** Der resultierende Geschiebeeintrag in den See wird überprüft und das Längenprofil allenfalls angepasst, indem Daten zum Längenwachstum des Deltas ausgewertet werden.

Fracht im naturnahen Zustand (rote Linie): wird bestimmt, indem Einfluss von Anlagen entfernt wird:

- C:** Das im Sammler zurück gehaltene und entnommene Geschiebe wird zum Teil in den Vorfluter transportiert und zum Teil bei Hochwasser auf dem Schwemmkegel abgelagert. Die Geschiebezufuhr aus dem Seitenzubringer nimmt zu.
- D:** Die Fracht im naturnahen Zustand kann nicht mehr ablagerungsfrei transportiert werden. Die Fracht nimmt flussabwärts ab (größerer Gradient, aber auf höherem Ausgangsniveau).
- I:** Ohne Kiesentnahmen wird mehr Geschiebe in den See transportiert und im Delta (Punkt J) abgelagert.

3.3 Arbeitsschritt 2: Morphologische Ziele für das Gewässer und die erforderliche Geschiebefracht festlegen

3.3.1 Einführung

Ziele und Ergebnisse des Arbeitsschritts

Mit diesem Arbeitsschritt sind die Ziele für das Gewässer sowie die Anforderungen an die Geschiebefracht definiert.

Als Ergebnisse des Arbeitsschrittes werden erwartet:

- Eine Beschreibung der im Zielzustand angestrebten morphologischen Strukturen.
- Die Geschiebefracht, die in den Gewässerabschnitten erforderlich ist, um diese Ziele zu erreichen.
- Die Geschiebefracht, die erforderlich ist, um den Hochwasserschutz und den Grundwasserhaushalt nicht zu beeinträchtigen.

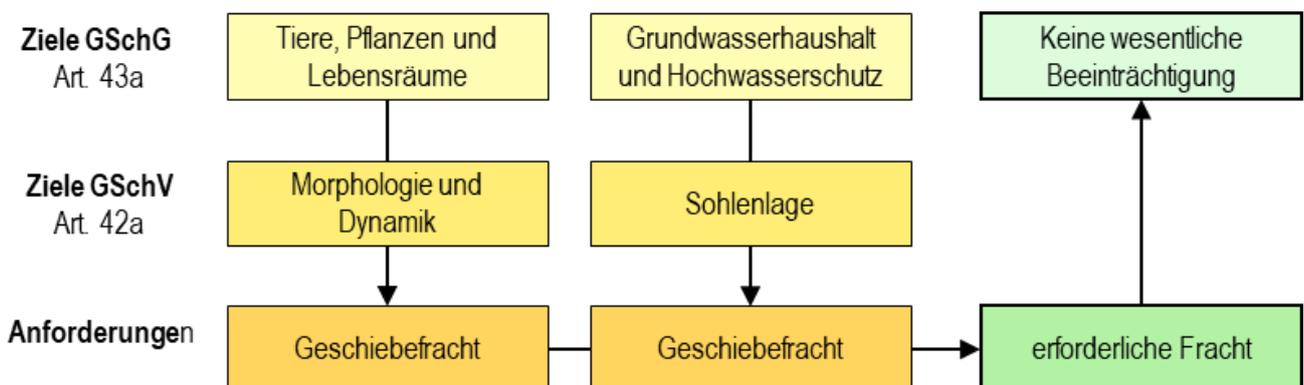
3.3.2 Überblick über Sanierungsziele und Anforderungen ans Geschiebe

Ziele nach Artikel 43a GSchG

Als übergeordnetes Ziel für die Gewässer steht im Artikel 43a GSchG, dass die einheimischen *Tiere und Pflanzen, deren Lebensräume*, der Grundwasserhaushalt und der *Hochwasserschutz* nicht wesentlich durch einen veränderten Geschiebehauhalt beeinträchtigt werden. Massnahmen zur Sanierung des Geschiebehauhalts dienen diesem übergeordneten Ziel (Abb. 14). Ob das übergeordnete Ziel erreicht werden kann, hängt aber auch von Faktoren ab, die unabhängig vom Geschiebehauhalt sind: Zum Beispiel kann der Fischbestand in einem Gewässer trotz unbeeinträchtigtem Geschiebehauhalt durch physikalisch-chemische Parameter wie Wasserqualität und Temperatur oder durch Wanderhindernisse beeinträchtigt sein.

Abb. 14: Übergeordnete Ziele des Gewässerschutzgesetzes und konkrete Ziele der Gewässerschutzverordnung

Aus den konkreten Zielen werden Anforderungen an die Geschiebefracht gestellt, auf welche die Massnahmen ausgerichtet werden. Erreicht die Geschiebefracht im Gewässer das erforderliche Mass, besteht keine wesentliche Beeinträchtigung mehr durch einen veränderten Geschiebehauhalt.



Ziele nach Artikel 42a GSchV und Anforderungen ans Geschiebe

Das übergeordnete Ziel für *Tiere, Pflanzen und Lebensräume* wird daher in der Gewässerschutzverordnung weiter konkretisiert: Die morphologischen Strukturen oder die morphologische Dynamik des Gewässers darf nicht nachteilig verändert sein (Artikel 42a GSchV). Geschiebetrieb und Morphologie sollen naturnahen Verhältnissen entsprechen (Anhang 1, Artikel 1, Abs. 2 GSchV). Ziele für den *Grundwasserhaushalt* und den *Hochwasserschutz* werden anhand einer minimalen und maximalen Sohlenlage konkretisiert.

Weil morphologische Strukturen und die Sohlenlage auch von der Grösse der Geschiebefracht abhängig sind, können die konkreten morphologischen Ziele mit einer erhöhten Geschiebefracht und in manchen Fällen – insbesondere in Restwasserstrecken und Auengebieten – mit ausreichend häufigen Hochwasserereignissen, welche das Geschiebe umzulagern vermögen, erreicht werden. Aus den konkreten Zielen werden deshalb Anforderungen an die Geschiebefracht abgeleitet.

Erforderliche Geschiebefracht

Die minimal notwendige Geschiebefracht, um die Ziele zu erreichen, wird hier als «erforderliche Geschiebefracht» bezeichnet. Wird sie im Gewässer erreicht oder überschritten, kann man davon ausgehen, dass die Ziele gemäss Artikel 43a GSchG erreicht werden (Abb. 14).

Morphologischer Zielzustand für naturnahe Gewässerabschnitte

Der Zielzustand bzgl. Morphologie ist dem naturnahen Zustand möglichst ähnlich. Die Morphologie und die Sohlenlage müssen aber nicht genau dem naturnahen Zustand entsprechen. Unwesentliche Beeinträchtigungen sind erlaubt (Abb. 15).

Die Gerinneform im Zielzustand soll dem gleichen Typ wie im naturnahen Zustand entsprechen (Abb. 8); die Formen dürfen aber weniger stark ausgeprägt sein. Eine quantitative Zieldefinition für die Gerinneform in Funktion der relativen Breiten (Verhältnis Breite zu Abflusstiefe) wird in Schälchli & Hunzinger (2021) vorgeschlagen.

Eine Morphologie und Sohlenlage ähnlich dem naturnahen Zustand kann sich nur einstellen, bei:

- Ausreichender Gerinnebreite und unbefestigten Uferbereichen,
- einem Abflussregime (v. a. Hochwasser) ähnlich jenem des naturnahen Zustands, und
- einer Geschiebelieferung ähnlich dem naturnahen Zustand.

Morphologischer Zielzustand bei Auen von nationaler Bedeutung

Der Zielzustand bezüglich Morphologie entspricht möglichst dem naturnahen Zustand.

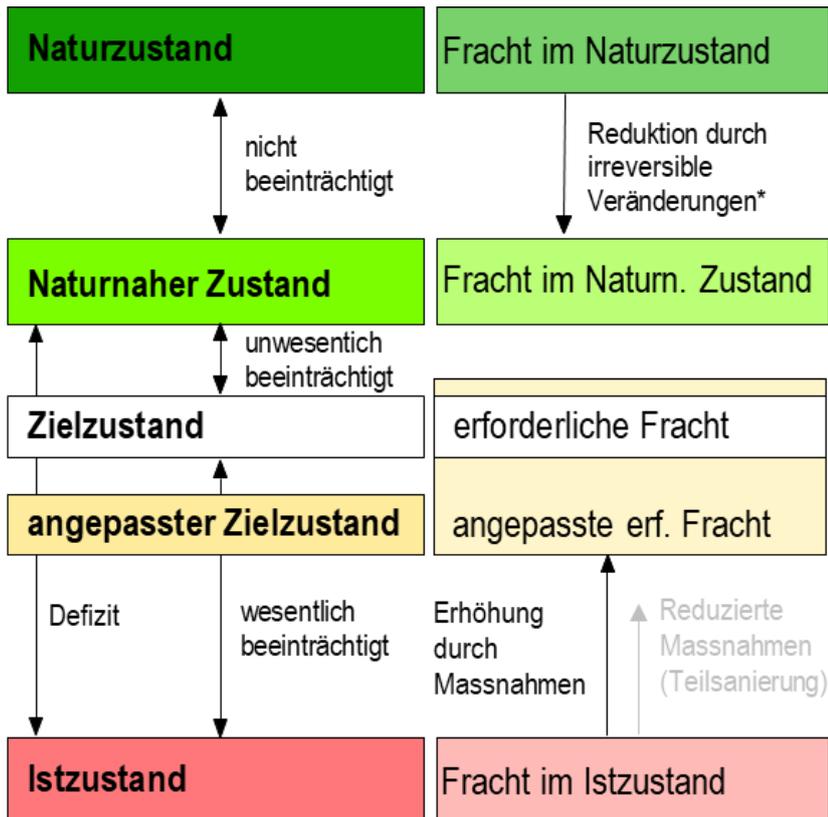
Reduzierter morphologischer Zielzustand bei eingeschränkter Breite, verändertem Abflussregime oder reduzierter Geschiebelieferung

Je nach Gewässersituation können ausreichend breite Gewässerabschnitte fehlen, und die Abflussdynamik oder die Geschiebelieferung kann stark reduziert sein. Diese Rahmenbedingungen verhindern die Entwicklung einer naturnahen Morphologie und Sohlenlage. Die oben genannten morphologischen Ziele können in diesem Fall nicht vollständig erreicht werden und werden «nach unten» angepasst (Abb. 15).

Bei der Formulierung von besonderen Rahmenbedingungen wird vorausgesetzt, dass die Renaturierungsmassnahmen gemäss strategischer Planung der Kantone, Hochwasserschutzprojekte und Restwasser-sanierungen nach Artikel 31–33 und Artikel 80 GSchG berücksichtigt werden.

Abb. 15: Verhältnis von Natur-, naturnahem, Ziel-, Istzustand und angepasstem Zielzustand, sowie die entsprechenden Geschiebefrachten

Adaptiert nach BAFU und EAWAG (2006). *Als irreversible Veränderungen werden bezeichnet: grossräumige Waldrodungen, Trockenlegung von Feuchtgebieten und Gewässerumleitungen in einen See.



Es gibt fünf unterschiedliche Situationen oder Rahmenbedingungen, die bei der Zieldefinition zu beachten sind (Tab. 2):

- Sanierungen in naturnahen Gewässern,
- Sanierungen in Auengebieten nationaler Bedeutung,
- in Gewässern mit eingeschränkter Breite,
- in Gewässern mit verändertem Abflussregime oder
- in Gewässern mit veränderter Geschiebelieferung.

Je nach Situation müssen Details der oben genannten Ziele und Anforderungen angepasst werden. Sie sind in den folgenden Kap. 3.3.3 bis 3.3.7 beschrieben.

Tab. 2: Übersicht über Rahmenbedingungen und Zieldefinitionen

Symbolbilder					
Situation	Naturnahe Gewässerabschnitte vorhanden oder durch Revitalisierung möglich	Auengebiet nationaler Bedeutung	Gerinnebreite eingeschränkt	Abflussregime verändert	Geschiebelieferung flussaufwärts verändert
Ziel Morphologie und Dynamik	Morphologie und Dynamik ähnlich wie im naturnahen Zustand.	Morphologie und Dynamik möglichst wie im naturnahen Zustand.	Reduziert, massgebend ist die im Hochwasserschutz- oder Revitalisierungsprojekt festgelegte Breite.	Reduziert, situativ skaliert.	Reduziert, abhängig von Geschiebezufuhr.
Ziel Sohlenlage	Längsgefälle der Sohle ist ähnlich dem naturnahen Zustand. In Auflandungsstrecken: Längsgefälle der Sohle ist nicht grösser als Talgefälle.	Sohlenlage möglichst wie im naturnahen Zustand.	Mögliche Auflandungen dürfen nicht dazu führen, dass Längsgefälle der Sohle grösser als das Talgefälle ist.	Längsgefälle der Sohle ist ähnlich dem naturnahen Zustand. Mögliche Auflandungen dürfen nicht dazu führen, dass Längsgefälle der Sohle grösser als das Talgefälle ist.	Mögliche Auflandungen dürfen nicht dazu führen, dass Längsgefälle der Sohle grösser als das Talgefälle ist.
Anforderung an die Geschiebefracht	Erforderliche Fracht nach Methoden von Kap. 3.3.8.	Fracht möglichst wie im naturnahen Zustand.	Erforderliche Fracht nach Methoden von Kap. 3.3.8.	Erforderliche Fracht skaliert.	Erforderliche Fracht = Geschiebezufuhr.
Kapitel	3.3.3	3.3.4	3.3.5	3.3.6	3.3.7

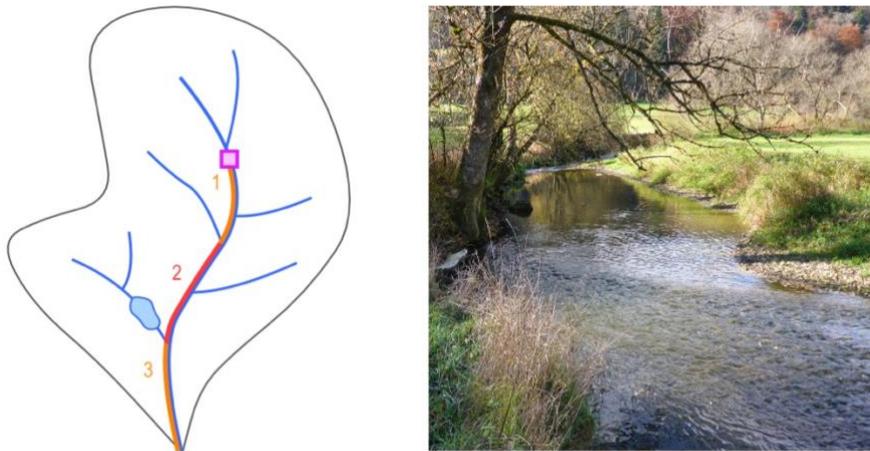
3.3.3 Morphologische Ziele und Anforderungen an Geschiebefracht bei naturnahen Gewässerabschnitten

Situation

Eine Anlage verursacht eine wesentliche Beeinträchtigung in einem Gewässersystem, in dem es naturnahe Gewässerabschnitte gibt oder solche, die sich zu einem naturnahen Gewässerabschnitt revitalisieren lassen (Abb. 16). Die Abschnitte zeichnen sich dadurch aus, dass ihre Breite nicht eingeschränkt ist oder dass das Potenzial besteht, sie mit einem verhältnismässigen Aufwand auf die natürliche Sohlenbreite zu verbreitern, dass ihre Wasserführung naturnah ist und dass die Geschiebelieferung einzig durch die sanierungspflichtigen Anlagen beeinflusst sind. Der Gewässerabschnitt ist für morphologische Prozesse ausreichend lang, also mindestens etwa 10-mal so lang wie das Gerinne im naturnahen Zustand breit ist.

Abb. 16: Situation mit naturnahem Abschnitt

Von den Zielgewässerabschnitten 1 bis 3 gibt es einen naturnahen Abschnitt 2. Foto: Beispiel Basse Allaine



Ziele für die Morphologie und Sohlenlage

Ziel 1: Morphologie und Dynamik

- Die Gerinneform des Gewässers ist ähnlich wie im naturnahen Zustand (gleicher Typ).
- Geschiebeablagerungen haben eine ähnliche Ausdehnung und Mächtigkeit wie im naturnahen Zustand.
- Die örtliche Verteilung der Substrattypen ist anteilmässig ähnlich wie im naturnahen Zustand. Die Geschiebeablagerungen werden mehr als einmal im Jahr erneuert.

Ziel 2: Sohlenlage

- Die Sohle und der mit dem Fliessgewässer korrespondierende Grundwasserspiegel liegen genügend hoch, so dass das nutzbare Grundwasservorkommen nicht beeinträchtigt ist.
- Das Längsgefälle im Gewässer ist ähnlich wie im naturnahen Zustand.
- Für Gewässer, welche im naturnahen Zustand eine Auflandungstendenz haben: Das Längsgefälle im Gewässer ist nicht grösser als das Talgefälle.

Anforderung an die Geschiebefracht

Die Geschiebefracht ist so gross, dass sich in den naturnahen Abschnitten eine Morphologie und Dynamik und eine Sohlenlage wie oben beschrieben einstellen können. Die erforderliche Geschiebefracht kann mit den Methoden von Kap. 3.3.8 bestimmt werden.

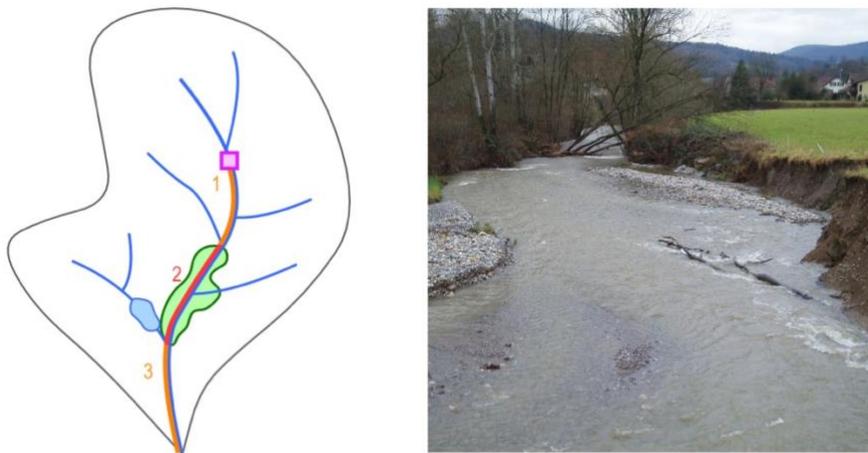
3.3.4 Morphologische Ziele und Anforderungen an Geschiebefracht bei Auen von nationaler Bedeutung

Situation

Eine Anlage verursacht eine wesentliche Beeinträchtigung in einer Aue von nationaler Bedeutung.

Abb. 17: Situation mit Aue nationaler Bedeutung

Von den Zielgewässerabschnitten 1 bis 3 liegt Abschnitt 2 in einem Auengebiet nationaler Bedeutung. Foto: Bünz bei Möriken-Wildegg



Ziele für die Morphologie und die Sohlenlage

Die in Artikel 4 Auenverordnung festgelegten Schutzziele verlangen die ungeschmälerte Erhaltung und, soweit es sinnvoll und machbar ist, die Wiederherstellung der natürlichen Dynamik des Wasser- und Geschiebehaushalts sowie die Erhaltung der geomorphologischen Eigenart:

Ziel 1: Morphologie und Dynamik

- Die Gerinneform des Gewässers entspricht möglichst dem naturnahen Zustand.
- Geschiebeablagerungen haben möglichst eine Ausdehnung und Mächtigkeit wie im naturnahen Zustand.
- Die örtliche Verteilung der Substrattypen ist anteilmässig möglichst wie im naturnahen Zustand. Die Geschiebeablagerungen werden mehr als einmal im Jahr erneuert.
- Weitere autentypische Strukturen – beispielsweise Trockenterrassen, Altläufe, Giessen oder vermoorte Senken – entsprechen möglichst dem naturnahen Zustand.

Ziel 2: Sohlenlage

- Die Sohle und der mit dem Fliessgewässer korrespondierende Grundwasserspiegel liegen genügend hoch, so dass autentypische Feuchtgebiete und Giessen wie im naturnahen Zustand benetzt sind.
- Die Sohle liegt genügend hoch, so dass an das Gewässer angrenzende Auengebiete bei Hochwasser regelmässig überflutet werden.

Anforderungen an die Geschiebefracht

Wenn sinnvoll und machbar sollte die Geschiebefracht der Fracht im naturnahen Zustand entsprechen. Die Geschiebefracht muss aber mindestens so gross sein, dass sich eine naturnahe Morphologie und Dynamik einstellen können. Die minimal erforderliche Geschiebefracht kann mit den Methoden von Kap. 3.3.8 ermittelt werden.

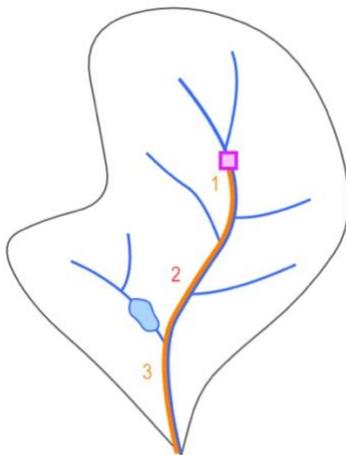
3.3.5 Morphologische Ziele und Anforderungen an Geschiebefracht bei eingeschränkter Breite

Situation

Eine Anlage verursacht eine wesentliche Beeinträchtigung in einem Gewässersystem, in dem die Gewässerbreite auf der ganzen Länge des beeinträchtigten Gewässers eingeschränkt ist und es ist nicht absehbar, dass die natürliche Sohlenbreite mit verhältnismässigem Aufwand je wiederhergestellt werden kann, weil zum Beispiel harte Randbedingungen wie Siedlungen oder wichtige Verkehrsinfrastrukturanlagen dies verhindern (Abb. 18).

Abb. 18: Situation mit eingeschränkter Breite

Von den Zielgewässerabschnitten 1 bis 3 gibt es keinen, in welchem sich eine natürliche Sohlenbreite realisieren liesse. Foto: Beispiel Hasli-Aaare beim Bahnhof Brienzwiler



Eine Gerinneform ähnlich wie im naturnahen Zustand kann wegen der eingeschränkten Breite zwar nicht erreicht werden. Aber Erosionstrends können verringert und die Ausdehnung von Kiesablagerungen und die Qualität des Substrats können mit einer höheren Geschiebefracht verbessert werden.

Ziele für die Morphologie und Sohlenlage

Die Ziele wie in naturnahen Gewässerabschnitten (Kap. 3.3.3) können nicht vollständig erreicht werden und werden angepasst.

Ziel 1: Morphologie und Dynamik

- Die Gerinneform, die Geschiebeablagerungen und die örtliche Verteilung der Substrattypen sind dem naturnahen Zustand soweit ähnlich, wie aufgrund der eingeschränkten Gerinnebreite möglich. Die massgebende Gerinnebreite hängt von der jeweiligen Situation ab. Im Rahmen von Hochwasserschutz- und Revitalisierungsprojekten ist die im Projekt festgelegte Breite massgebend. Wenn Revitalisierungsprojekte geplant sind, muss die geplante Breite dieser Projekte berücksichtigt werden. Wenn keine Verbreiterung geplant ist, wird die vorhandene Breite berücksichtigt.

Ziel 2: Sohlenlage

- Das Längsgefälle im Gewässer ist nicht grösser als das Talgefälle.

Anforderung an die Geschiebefracht

Die Anforderung an die Geschiebefracht ist die gleiche wie bei naturnahen Gewässerabschnitten (Kap. 3.3.3).

Wenn die Transportkapazität in einem eingengten Gewässerabschnitt grösser als die erforderliche Geschiebefracht ist und daraus Erosionsprobleme entstehen, müssen zusätzliche Massnahmen zur Eindämmung der Erosion im Rahmen von Wasserbauprojekten ergriffen werden.

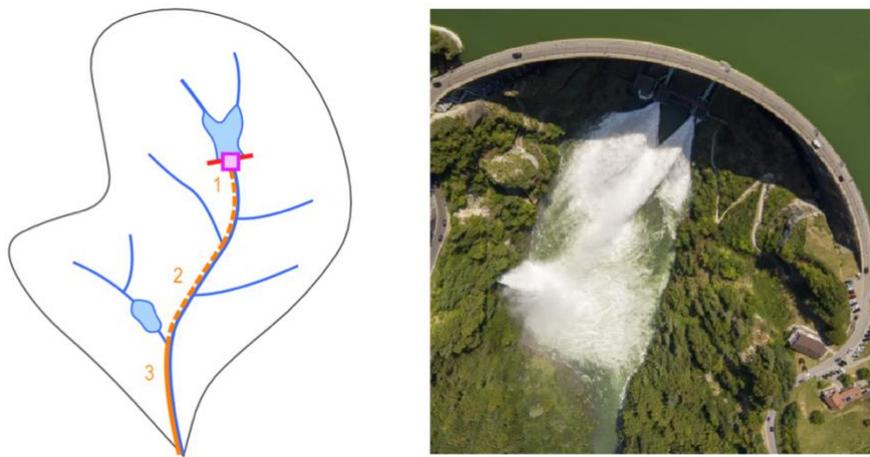
3.3.6 Morphologische Ziele und Anforderungen an Geschiebefracht bei verändertem Abflussregime

Situation

Eine Anlage verursacht eine wesentliche Beeinträchtigung in einem Gewässer, dessen Abflussregime unter dem Einfluss der Wasserkraftnutzung gegenüber dem Abflussregime im naturnahen Zustand massgeblich verändert ist. Je nach Situation ist der Einfluss auf die Morphologie und die Dynamik eines Gewässers verschieden. Der Einfluss muss daher im Einzelfall analysiert werden. Das hier beschriebene Vorgehen gibt eine Hilfestellung, wie man morphologische Ziele und Anforderungen an die Geschiebefracht festlegen kann, wenn ein verändertes Abflussregime vorliegt. Als verändertes Abflussregime wird ein Regime bezeichnet, bei dem der bettbildende Abfluss (ungefähr HQ_2) gegenüber dem naturnahen Zustand um mehr als 10 % vermindert ist.

Abb. 19: Situation mit reduziertem bettbildendem Abfluss

In den Zielgewässerabschnitten 1 und 2 ist HQ_2 mehr als 10 % kleiner als im Zustand ohne Wasserkraftnutzung. Rechts: Beispiel Staumauer Rossens an der Sarine (Bild: Forschungsgruppe Ökohydrologie ZHAW).



Hinweis: nach dem Zufluss eines oder mehrerer Seitenzubringer nähert sich der bettbildende Abfluss wieder dem Abfluss ohne Wasserentnahmen. Der Betrachtungsperimeter für diesen Fall ist demnach in der Länge begrenzt. Sanierungsmassnahmen müssen auch auf die Abschnitte ausgerichtet sein, bei denen der Abfluss nicht mehr verändert ist (Gewässerabschnitt 3 in Abb. 19).

Für das Vorgehen zur Bestimmung der Sanierungsziele ist es sinnvoll unterschiedliche Situationen zu berücksichtigen (Tab. 3):

Tab. 3: Situationen und Vorgehen bei unterschiedlich verändertem Abflussregime

Situation	A) Zielgewässer = Restwasserstrecke unterhalb eines Speichersees ohne oder mit episodischem Abfluss über die Hochwasserentlastung	B) Zielgewässer = Restwasserstrecke unterhalb eines Speichersees mit periodischem Abfluss über die Hochwasserentlastung	C) Zielgewässer = Restwasserstrecke eines Laufkraftwerks	D) Das Zielgewässer befindet sich unterhalb der Wasserrückgabe von grossen Speicherseen
Beispiel	Kraftwerk Rossens Lago di Lei	Etzelwerk Lai dad Ova Spin	Kraftwerk Wildegg- Brugg, Kraftwerk Felsenau	Alpenrhein Reichenau bis Illmündung
Merkmale des veränderten Abflussregimes	Nie oder nur selten Überlauf mit transportrelevanten Abflüssen. (weniger als einmal alle 3 Jahre)	Vereinzel bis regelmässig Überlauf mit transportrelevanten Abflüssen. (ca. alle 3 Jahre einmal bis dreimal pro Jahr)	Jährlich mehrmals transportrelevante Abflüsse.	Häufig transportrelevante Abflüsse, aber reduzierte Abflussspitzen im Sommer. Verlagerung von Sommer- auf Winterabflüsse.
Ziele Morphologie	Fallweise Betrachtung	Die morphologischen Ziele werden «skaliert» ¹	Die morphologischen Ziele werden «skaliert» ¹	Die morphologischen Ziele werden «skaliert» ¹
Anforderung an die Geschiebefracht	Fallweise Betrachtung. GF _{eff} wird skaliert ^{1,2}	GF _{eff} wird skaliert ^{1,2}	GF _{eff} wird skaliert ^{1,3}	GF _{eff} wird skaliert ¹
Wirkungskontrolle	Fallweise Betrachtung	keine Besonderheiten	keine Besonderheiten	keine Besonderheiten

1 Skalierung siehe Abschnitt «Skalierung des Gewässers» weiter unten.

2 Befinden sich im Unterwasser der Anlage ökologisch wertvolle Gewässerstrecken, so sind der Zielzustand, GF_{eff} und allenfalls künstliche Hochwasser im Einzelfall zu bestimmen.

3 Die Massnahme ist mit den Gewässerabschnitten im Ober- und Unterwasser abzustimmen. Falls vom Oberwasser mehr Geschiebe zugeführt wird als in der Restwasserstrecke transportiert werden kann und im Unterwasser Abschnitte mit grösserer erforderlicher Geschiebefracht bestehen, so ist zum Beispiel durch betriebliche Massnahmen zu gewährleisten, dass die erforderliche Fracht der Unterwasserstrecke durch die Restwasserstrecke transportiert werden kann.

Ziele für die Morphologie und Sohlenlage

Die Ziele wie in naturnahen Gewässerabschnitten (Kap. 3.3.3) können nicht vollständig erreicht werden und werden «nach unten» angepasst.

Ziel 1: Morphologie und Dynamik

- Die Gerinneform, die Kiesablagerungen, die örtliche Verteilung der Substrattypen sind dem naturnahen Zustand soweit ähnlich, wie aufgrund des veränderten Abflussregimes möglich:

Skalierung des Gewässers

Mit einem veränderten Hochwasserregime wird die Geschiebetransportkapazität verändert und es kann weniger Geschiebe transportiert werden. Damit sich mit dem veränderten Abflussregime eine ähnliche Morphologie wie im naturnahen Zustand einstellt, muss die Geschiebefracht ebenfalls reduziert werden. Unter diesen Verhältnissen wird die Grösse des Gewässers skaliert. Diese Skalierung ist zulässig, solange die (unveränderten) Korngrössen keinen signifikanten Einfluss auf die Gerinneform haben.

Die Gerinnebreite, welche mit dem reduzierten Abflussregime erreicht werden kann lässt sich in erster Näherung zu

$$BG_{red} = BG \sqrt{\frac{HQ_{red}}{HQ_2}}$$

bestimmen. Darin bezeichnen: BG_{red} die Gerinnebreite bei reduziertem Abfluss, BG die Gerinnebreite mit unverändertem Abflussregime, HQ_2 wird als bettbildender Abfluss im naturnahen Zustand betrachtet, HQ_{red} ist der massgebende Hochwasserabfluss im veränderten Abflussregime. Für die Situationen C und D (Tab. 3) entspricht HQ_{red} dem Abfluss HQ_2 des veränderten Regimes. Für Restwasserstrecke unterhalb eines Speichersees mit periodischem Abfluss über die Hochwasserentlastung (Situation B von Tab. 3) muss HQ_{red} im Einzelfall bestimmt werden.

Ziel 2: Sohlenlage

- Die Sohle und der mit dem Fliessgewässer korrespondierende Grundwasserspiegel liegen genügend hoch, so dass das nutzbare Grundwasservorkommen nicht beeinträchtigt ist.
- Das Längsgefälle im Gewässer ist ähnlich wie im naturnahen Zustand.
- Das Längsgefälle im Gewässer ist nicht grösser als das Talgefälle.

Anforderung an die Geschiebefracht

Um die erforderliche Geschiebefracht zu bestimmen wird die Methode 1 verwendet. Der Prozentsatz wird allerdings auf eine reduzierte Fracht im naturnahen Zustand $GF_{nn_{red}}$ angewandt. Für diese gilt:

$$GF_{nn_{red}} = GF_{nn} \frac{HQ_{red}}{HQ_2}$$

Damit bleibt das Verhältnis von Geschiebefracht und bettbildendem Abfluss gleich wie bei unverändertem Abflussregime.

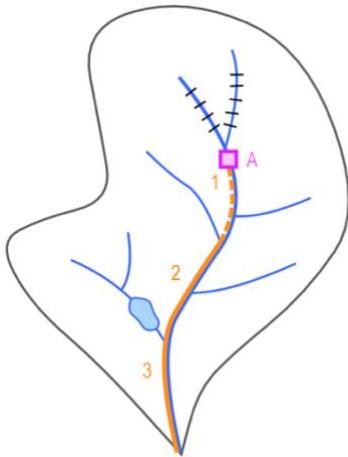
3.3.7 Morphologische Ziele und Anforderungen an Geschiebefracht bei veränderter Geschiebelieferung

Situation

Eine Anlage verursacht eine wesentliche Beeinträchtigung in einem Gewässersystem, in dem die Geschiebelieferung aus dem Einzugsgebiet durch weitere Anlagen, die nicht sanierungspflichtig sind oder bei denen eine Sanierung unverhältnismässig ist, gegenüber dem naturnahen Zustand verändert ist (zum Beispiel bei Wildbachverbauungen wie Sperrn und Wildbachschalen auf dem Schwemmkegel) (Abb. 20). Wenn dadurch die Geschiebezufuhr im Gewässersystem unterhalb dieser Anlagen kleiner ist als die erforderliche Fracht, ist dies bei den morphologischen Zielen und Anforderungen an die Geschiebefracht im Zielgewässer zu berücksichtigen.

Abb. 20: Situation mit reduzierter Geschiebezufuhr

Geschiebezufuhr zur Anlage A durch nicht sanierungspflichtige Anlagen im Einzugsgebiet reduziert, zum Beispiel durch Wildbachverbauungen. Foto: Beispiel Steinibach Dallenwil, Obwalden.

**Ziele für die Morphologie und Sohlenlage***Ziel 1: Morphologie und Dynamik*

- Die Ziele wie bei naturnahen Gewässerabschnitten können eventuell nicht vollständig erreicht werden und können «nach unten» angepasst werden. Die Gerinneform und die zu erwartende Gerinnebreite muss in Abhängigkeit der Geschiebezufuhr abgeschätzt werden.

Ziel 2: Sohlenlage

- Für Gewässer, welche im naturnahen Zustand eine Auflandungstendenz haben: Das Längsgefälle im Gewässer ist nicht grösser als das Talgefälle.

Anforderung an die Geschiebefracht

Die erforderliche Fracht entspricht der Geschiebezufuhr zur Anlage.

3.3.8 Methoden zur Bestimmung der erforderlichen Geschiebefracht

Die Methoden und Ansätze in diesem Kapitel dienen zur Ermittlung einer minimalen Geschiebefracht im Sinne Artikel 43a GSchG, mit der sich in naturnahen Gewässerabschnitten naturnahe morphologische Strukturen ausbilden können. Auf Basis der ermittelten erforderlichen Fracht werden Massnahmen erarbeitet. Mit Wirkungskontrollen wird überprüft, ob die Geschiebefracht ausreicht, um Sanierungsziele zu erreichen oder ob sie angepasst werden muss. In eingegengten Gewässerabschnitten kann es notwendig sein, diese Fracht zu erhöhen, um einen ausgeglichenen Geschiebehaushalt zu erhalten.

Tab. 4: Ansätze zur Bestimmung der erforderlichen Geschiebefracht

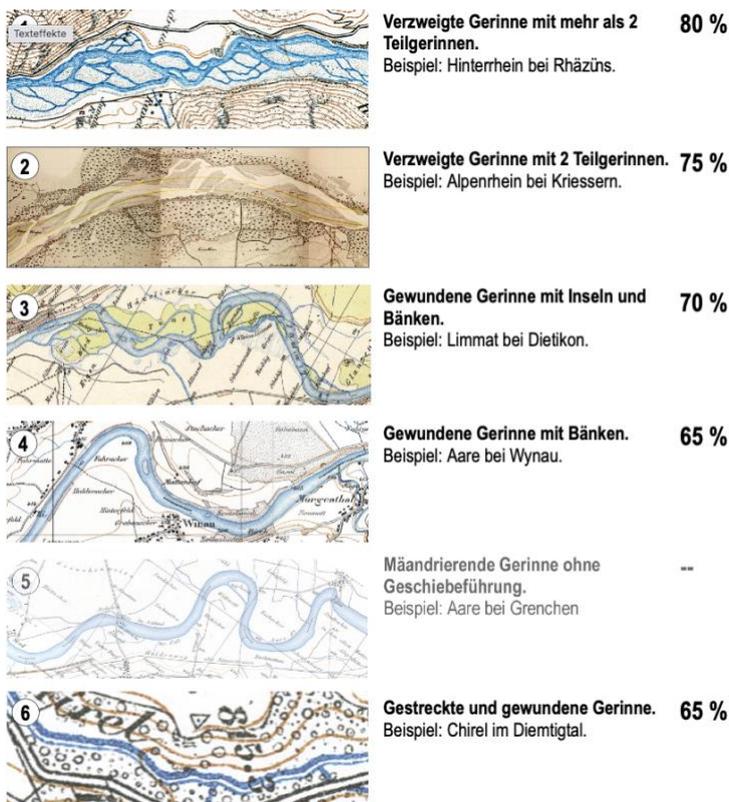
Gewässer < 3 %	Alpine Gewässer > 3 %*
Methode «Gerinneform» (Quantitative Bestimmung) entspricht 65–80 % der Fracht im naturnahen Zustand	Methode «Substrat» (Qualitative Bestimmung)
Ansatz «Sättigungsgrad 1» (Quantitative Bestimmung)	
Methode «Sohllage» (Qualitative Bestimmung)	

* Die Grenze von 3 % Gefälle wurde gewählt, weil die Gerinneform ab diesem Gefälle zunehmend gestreckt ist und das Substrat ein guter Indikator für morphologische Prozesse in diesen Gewässern ist. Zudem sind alpine Gewässer ab zirka 3 % kleine Gewässer, und der Aufwand für quantitative Methoden ist dort im Verhältnis zu den möglichen Massnahmen eher gross.

Methode «Gerinneform»

Die erforderliche Geschiebefracht entspricht einem prozentualen Anteil der Fracht im naturnahen Zustand. Bei Gerinnen, die im naturnahen Zustand verzweigt sind, ist der Prozentsatz höher als bei gewundenen Gerinnen:

Abb. 21: Die erforderliche Geschiebefracht ist ein Anteil der Geschiebefracht im naturnahen Zustand in Abhängigkeit der Gerinneform im naturnahen Zustand



Die Methode «Gerinneform» kann in allen Gewässern angewendet werden, bei denen die Geschiebefracht im naturnahen Zustand abgeschätzt werden kann. Sie wurde zur Umsetzung der Gewässerschutzgesetzgebung entwickelt und ist im Fachbericht von Schälchli und Hunzinger (2021) dokumentiert und hergeleitet. Anwendungsgrenzen:

Die Prozentwerte sind mit den für morphologische Prozesse typischen Unsicherheiten behaftet. Diese Unsicherheiten sind aber klein im Vergleich zu den Unsicherheiten bei der Bestimmung der Fracht im naturnahen Zustand, welche letztlich entscheidender fürs Ergebnis sind. Aus diesem Grund ist es wichtig, die Geschiebefracht im naturnahen Zustand so gut wie möglich, also auf Basis verschiedener und plausibler Grundlagen oder Annahmen abzuschätzen (vgl. Kap. 3.2.5). Die Anwendung der Methode ist im Anhang E beschrieben.

Tab. 5: Vor- und Nachteile der Methode «Gerinneform»

Vorteile	Nachteile
Methode verwendet explizit den naturnahen Zustand als Massstab für die Ziele, was dem gesetzlichen Auftrag entspricht. Methode stellt eine minimale Fracht sicher, die in Abschnitten mit naturnaher Breite eine naturnahe Morphologie ermöglicht.	Unsicherheiten bei der Bestimmung der Geschiebefracht im naturnahen Zustand.

Ansatz «Sättigungsgrad 1»

Der «Sättigungsgrad 1» ist ein theoretischer Ansatz, bei dem man von einem Gleichgewicht zwischen zugeführter Geschiebefracht und transportierbarer Geschiebefracht ausgeht. Das Verhältnis der beiden Grössen – der «Sättigungsgrad» – entspricht 1. Gleichzeitig gilt die Bedingung, dass das transportierte Geschiebematerial dem Sohlenmaterial entspricht.

Mit dem Ansatz lässt sich zum Beispiel im Rahmen von Wasserbauprojekten, bei denen durch äussere Randbedingungen die Gerinnebreite und Sohlenlage vorgegeben sind, eine Fracht bestimmen, welche zu einer natürlichen bzw. naturnahen Gerinnemorphologie führen kann.

Voraussetzung ist allerdings, dass sowohl die Gerinnebreite als auch die Sohlenlage (insbesondere das Gefälle) einem naturnahen Zustand entsprechen. Weiter ist wichtig, dass die notwendigen Eingangsgrössen für die Berechnung des Sättigungsgrads (z. B. Korndurchmesser des Sohlenmaterials bzw. des Geschiebes) und die resultierende Geschiebefracht anhand von Beobachtungen (z. B. Ablagerungs- oder Entnahmekubaturen) verifiziert werden.

Mit der Annahme von einem Sättigungsgrad = 1 alleine, ohne dass die oben genannten Voraussetzungen beachtet werden, lassen sich sonst beliebige Werte für die Geschiebefracht produzieren. Für Gewässerabschnitte mit abgesenkter (flacher) Sohle könnten trotz Sättigungsgrad = 1 Geschiebefrachten bestimmt werden, die wesentlich kleiner sind als naturnahe Werte. Die morphologischen Strukturen und Dynamik wären dabei stark eingeschränkt und nachteilig verändert im Sinne Artikel 42a GSchV.

Anwendungsgrenzen:

Die Methode kann nur angewandt werden, wenn sowohl die Gerinnebreite als auch die Sohlenlage (insbesondere das Gefälle) einem naturnahen Zustand entsprechen. In verbauten Gewässern mit reduzierter Breite und in steilen Gebirgsbächen ist die Methode aufgrund der hohen Transportkapazität nicht anwendbar: Die berechneten Frachten werden sehr hoch und es resultieren trotzdem keine naturnahen Strukturen.

Tab. 6: Vor- und Nachteile des Ansatzes «Sättigungsgrad»

Vorteile	Nachteile
Geeignet für die Bestimmung einer Fracht, welche im Projektperimeter von Wasserbauprojekten bei vorgegebenen Randbedingungen bzgl. Breite und Sohlenlage zu naturnahen Morphologien führen kann.	Die Geschiebefracht ist auf einen lokalen Gewässerabschnitt (Projektperimeter) ausgerichtet. Es ist deshalb zu beachten, dass die Geschiebefracht auch auf das unterliegende Gewässer ausgerichtet sein muss. Auswirkungen auf unterliegende Gewässerabschnitte sind zu prüfen. Sensitiver Berechnungsansatz bezüglich Wahl der Eingangsgrössen und Randbedingungen. Diese müssen mit Naturwerten aus dem Einzugsgebiet überprüft werden. So kann z. B. bei begrenzter Breite oder zu feinem Geschiebematerial die Fracht viel zu hoch und im Gegensatz dazu bei Gewässern mit abgesenkter (flacher) Sohle viel zu tief ausfallen.

Methode «Substrat»

Bei gestreckten und gewundenen Gewässern steiler als 3 % empfehlen wir, die erforderliche Geschiebefracht qualitativ anhand der Verteilung von Substrattypen und dem Kolmationsgrad abzuschätzen. In Abhängigkeit des Zustands der Sohle wird beurteilt, ob die Geschiebefracht im Gewässer ausreicht oder ob sie erhöht werden muss. Die Methode ist im Anhang E beschrieben.

Methode «Sohlenlage»

Die Methode Sohlenlage wird zur Überprüfung der Auswirkungen eines veränderten Geschiebehaushalts auf den Grundwasserhaushalt und den Hochwasserschutz angewandt.

Die Auswirkungen auf den Grundwasserhaushalt werden nur in Gewässerabschnitten mit nutzbaren Grundwasservorkommen und inventarisierten Auengebieten untersucht. Dabei wird überprüft, ob es infolge des veränderten Geschiebehaushalts zu einer wesentlichen Veränderung des Grundwasserspiegels gekommen ist. Als Indikatoren werden die Lage der Gewässersohle und des Grundwasserspiegels im Istzustand und im naturnahen Zustand verwendet. In Auengebieten kann zudem der Zustand der Auenvegetation berücksichtigt werden. Hat sich die Lage der Gewässersohle und des Grundwasserspiegels zwischen Ist- und naturnahen Zustand wesentlich verändert, so liegt eine wesentliche Beeinträchtigung des Grundwasserhaushalts vor.

Eine wesentliche Beeinträchtigung des Hochwasserschutzes liegt vor, wenn sich die Sohlenlage infolge verändertem Geschiebehaushalt wesentlich verändert hat. Als Indikatoren wird der Verlauf der Sohle im Istzustand und im naturnahen Zustand sowie der Verlauf des Talgefälles verwendet. Falls sich der Verlauf der Sohle infolge verändertem Geschiebehaushalt zwischen Ist- und naturnahen Zustand wesentlich verändert hat und das Längsgefälle kleiner als das Talgefälle ist, so ist von einer wesentlichen Beeinträchtigung des Hochwasserschutzes infolge verändertem Geschiebehaushalt auszugehen. Die Methode ist im Anhang E beschrieben.

Anwendungsgrenzen:

Die Anwendung der Methode auf Basis des Vergleichs von Sohlenlage, Gefälle und Grundwasserspiegel ist nur in Gewässerabschnitten ohne Einschränkung der Breite möglich. In eingegengten Gewässerabschnitten wird der Verlauf der Sohlenlage durch die Einengung dominiert.

In der Regel kann aber davon ausgegangen werden, dass bei Geschiebefrachten gemäss Methode «Gerinneform» der Grundwasserhaushalt und der Hochwasserschutz nicht mehr signifikant durch den veränderten Geschiebehaushalt beeinflusst wird.

3.4 Arbeitsschritt 3: Das Sanierungsziel für Anlagen festlegen

Ziel und Ergebnis des Arbeitsschritts

Mit diesem Arbeitsschritt sollen aus den Zielen für die Gewässer und der entsprechenden erforderlichen Geschiebefracht konkrete Sanierungsziele für Anlagen abgeleitet werden.

Als Ergebnis des Arbeitsschritts wird erwartet:

- Eine konkrete Vorgabe zur Geschiebefracht im Unterwasser einer Anlage. Angabe als Geschiebevolumen in m^3 pro Jahr, welches unterhalb der Anlage im Gewässer transportiert werden soll,⁷ oder
- Eine Vorgabe zur Häufigkeit von Geschiebetransportereignissen. Angabe als Anzahl Ereignisse pro Jahr, an denen im Unterwasser der Anlage Geschiebe transportiert werden soll.

Vorgehen bei einer und mehreren Anlagen im Gewässersystem

Besteht an einem Fliessgewässer nur eine sanierungspflichtige Anlage, entspricht das Sanierungsziel für die Anlage der erforderlichen Geschiebefracht für das Gewässer.

Sind in einem Gewässersystem mehrere Anlagen vorhanden, welche den Geschiebehaushalt verändern, muss das Sanierungsziel für die einzelnen Anlagen individuell festgelegt werden. Das nachfolgende Beispiel zeigt, dass bei gleichbleibendem Ziel für den Geschiebehaushalt des Gewässers verschiedene Sanierungsziele für eine Anlage möglich sind. Unter Umständen kann das Sanierungsziel für die Anlage erst definitiv festgelegt und verfügt werden, nachdem im Rahmen eines Variantenstudiums die optimale Massnahmenkombination für das gesamte Gewässersystem gefunden wurde.

3.5 Arbeitsschritt 4: Einen Massnahmenkatalog erarbeiten

3.5.1 Einführung

Ziele und Ergebnisse des Arbeitsschrittes

Mit diesem Arbeitsschritt sollen alle Massnahmen, mit denen die Geschiebefracht im Unterlauf einer bestimmten Anlage erhöht werden kann, gesammelt und beschrieben sein. Die Massnahmen sollen der Planungsstufe entsprechend so detailliert beschrieben sein, dass ihre Wirkung und ihre Kosten in den nachfolgenden Schritten beurteilt werden können.

Als Ergebnisse des Arbeitsschrittes werden erwartet:

- Eine Liste von baulichen und betrieblichen Massnahmen für jede der zu sanierenden Anlagen im Gewässersystem.
- Eine Beschreibung der Wirkung der Massnahmen in Bezug auf die in Kap. 3.6 formulierten Beurteilungskriterien.
- Eine Kostenschätzung für die Massnahmen.

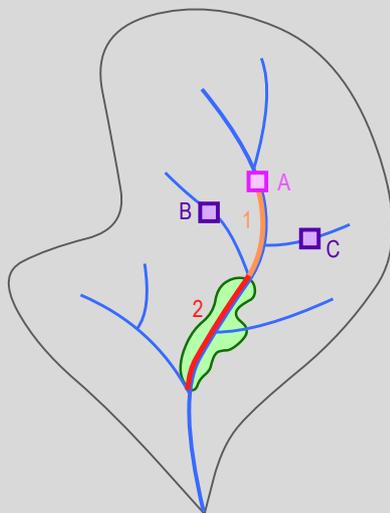
⁷ Durchschnittswert über einige Jahre.

Beispiel: Im Gewässersystem von Abb. 22 verändern drei Anlagen (A, B und C) den Geschiebehaushalt und sind sanierungspflichtig. Anlage A hält von 1000 m³ zugeführtem Geschiebe 800 m³ zurück und lässt 200 m³ passieren. Die Anlagen B und C halten sämtliches Geschiebe zurück, nämlich jeweils 200 m³/a und 100 m³/a.

Gewässerabschnitte 1 und 2 sind Zielgewässer. Für den Gewässerabschnitt 1 wurde eine erforderliche Geschiebefracht von 700 m³/a festgelegt, für den Gewässerabschnitt 2, welcher in einem Auengebiet liegt, eine erforderliche Geschiebefracht von 1000 m³/a.

Abb. 22: Abstimmen des Sanierungsziels pro Anlage bei mehreren Anlagen im Gewässersystem

Fiktives Beispiel mit den Anlagen A, B und C und zwei Gewässerabschnitten mit unterschiedlicher erforderlicher Geschiebefracht.



	Anlage A	Anlage B	Anlage C
Geschiebezufuhr	1000	200	100
Rückhalt	800	200	100
Durchgang	200	0	0
	Abschnitt 1		Abschnitt 2
Erforderliche Geschiebefracht	700		1000

alle Werte in m³/a

Die erforderlichen Geschiebefrachten lassen sich auf zwei Arten erreichen. Erstens: Anlage A lässt neu 70 % des zugeführten Geschiebes durch, also 700 m³/a, und Anlagen B und C jeweils 100 %; oder zweitens: Anlage A lässt 100 % des zugeführten Geschiebes durch und Anlagen B und C müssen kein Geschiebe durchlassen. Damit wird die erforderliche Fracht in Gewässerabschnitt 1 übertroffen, was zulässig ist, sofern der Geschiebeeintrag in diesen Abschnitt zu keinem Hochwasserschutzproblem führt.

3.5.2 Mögliche Massnahmen

Bei Wasserkraftanlagen sind Massnahmen zum Durchleiten des Geschiebes der Zugabe von Kies zu bevorzugen. Bei allen Anlagentypen ist auch ein vollständiger Rückbau der Anlage als Massnahme denkbar, sofern dies verhältnismässig ist. Zu den einzelnen baulichen und zu betrieblichen Massnahmen werden im Anhang F Hinweise für die Planung und Projektierung gegeben.

Tab. 7: Mögliche Massnahmen

		Fluss und Ausleitkraftwerke	Speicherkraftwerke (Stauseen)	Hochwasserrückhaltebecken	Geschiebesammler	Wasserbauliche Kiesentnahmen	Kommerzielle Kiesentnahmen	Gewässerverbauungen
Bauliche Massnahmen								
MN 1.1	Wehribau	x						
MN 1.2	Grundablassstollen umbauen		x					
MN 1.3	Geschiebeumleitstollen		x					
MN 1.4	Auslaufbauwerk umbauen, erst bei seltenen Hochwasserabflüssen eingestaut			x	x			
MN 1.5	Abflussrinne zur Geschiebedurchleitung bei kleinen Hochwasserereignissen				x			
MN 1.6	Anpassen der Anordnung von Rechenstäben				x			
MN 1.7	Bauliche Hochwasserschutzmassnahmen entlang des Gewässers				x	x		
MN 1.8	Rückbau von Querbauwerken und Zulassen von Sohlenerosion					x		x
MN 1.9	Rückbau von Ufersicherungen und Zulassen von Seitenerosion							x
MN 1.10	Beseitigen von Engstellen im Gerinne					x		
MN 1.11	Errichten eines Geschiebeablageplatzes im Nebenschluss					x		
MN 1.12	Rückbau	x	x	x	x	x	x	x
Betriebliche Massnahmen								
MN 2.1	Absenken Staupegels bei Hochwasser	x						
MN 2.2	Optimierung Stauraumpülung und -entleerung	x	x					
MN 2.3	Stauraum mit Geschiebe verlanden lassen, bis die Kontinuität wiederhergestellt ist	x			x			
MN 2.4	Kies im Unterwasser zugeben	x	x	x	x	x		
MN 2.5	Künstliche Hochwasser	x	x					
MN 2.6	Entnahme reduzieren oder ganz einstellen						x	

3.5.3 Massnahmen bei Hochwasserschutz- und Revitalisierungsprojekten

Hochwasserschutz- und Revitalisierungsprojekte bilden eine wichtige Grundlage für erfolgreiche Renaturierungen. Damit sie den Anforderungen an den Geschiebehaushalt genügen, sind die Projekte so zu konzipieren, dass

- möglichst keine Entnahmen notwendig sind (ausser bei natürlichen Auflandungsstrecken),
- Ablagerungen möglich sind. Notwendige Interventionen sollen z. B. nicht vorbeugend getätigt werden, sondern erst nachdem sich die angestrebten morphologischen Strukturen durch Ablagerungen haben bilden können, sofern die Hochwassersicherheit eingehalten werden kann,
- bei notwendigen Entnahmen oder Interventionen Ort und Zeitpunkt auch nach ökologischen und morphologischen Aspekten gewählt werden,
- das Längsgefälle möglichst nicht unter das Längsgefälle im naturnahen Zustand reduziert wird. In weiterhin eingegengten Abschnitten kann dieses Längsgefälle unterschritten werden, solange die Transportkapazität nicht kleiner ist als in Abschnitten ohne Einschränkung der Gerinnebreite.
- soweit möglich kein Geschiebedefizit unterhalb des Projektperimeters entsteht.

3.5.4 Auswirkungen auf Hochwasserschutz und Grundwasserhaushalt prüfen und minimieren

Mit Geschiebemaassnahmen wird die Geschiebefracht im Unterlauf der Anlage gegenüber dem Istzustand erhöht. Die erforderliche Geschiebefracht wurde im Arbeitsschritt 2 so festgelegt, dass in Gewässerabschnitten ohne Einschränkung der Sohlenbreite keine Tendenz zur Sohlenerosion mehr besteht.

Je nach Änderung der Geschiebefracht (klein, mittel, gross), des Schadenpotenzials und Gewässertyps sind die Auswirkungen der Massnahmen auf den Hochwasserschutz abzuklären. Abhängig vom möglichen Ablagerungsprozess kann sich die Massnahme unterschiedlich auf den Hochwasserschutz auswirken (Tab. 8). Zur genauen Abklärung der Auswirkungen stehen verschiedenen Methoden zur Verfügung (Tab. 9).

Führt die grössere Geschiebefracht zu unerwünschten Ablagerungen, welche die Abflusskapazität so verändert, dass der Hochwasserschutz entlang dieses Abschnittes unzulässig beeinträchtigt würde, muss die Geschiebefracht reduziert werden. Es ist zu prüfen, ob auch begleitende Hochwasserschutzmassnahmen notwendig und möglich sind, z. B. das Entfernen von Sperren zur Erhöhung des Längsgefälles oder eine massvolle Anpassung des Terrains und der Böschungsoberkanten, um sowohl die Ziele der Geschiebesanierung als auch das Interesse am Schutz vor Hochwasser zu berücksichtigen. Die begleitenden Hochwasserschutzmassnahmen sind dann Teil der Massnahme zur Sanierung des Geschiebehaushaltes und müssen in die Kostenschätzung und in die Bewertung von Massnahmenvarianten einberechnet werden. Können keine begleitenden Massnahmen zum Hochwasserschutz ergriffen werden, wird die Beeinträchtigung des Hochwasserschutzes als negative Wirkung der Massnahme in der Variantenbewertung berücksichtigt (vgl. Tab. 12).

Tab. 8: Auswirkung möglicher Ablagerungsprozesse auf den Hochwasserschutz

Ablagerungsprozess	Beeinträchtigung des Hochwasserschutzes
Lokale Bankbildung	nein
Lokale Anhebung der Sohle	abklären
Anhebung der Sohle mit Erhöhung des Längsgefälles über eine längere Strecke (≥ 10 x Sohlenbreite)	abklären (siehe Tab. 9)

Gibt es keine verhältnismässige Massnahme, mit welcher die in Arbeitsschritt 3 definierten Ziele erreicht werden können, ohne dass der Hochwasserschutz durch die Massnahme unzulässig beeinträchtigt würde, müssen alternative Massnahmen geprüft werden, welche die Ziele gegebenenfalls nur teilweise erreichen (vgl. auch die Ausführung in Kap. 3.7).

Tab. 9: Mögliche Methoden zur Abklärung der Auswirkungen auf den Hochwasserschutz

Prozessanalyse und qualitative Beurteilung	Siehe Tab. 8
Morphologische Modellberechnungen	Anhand von morphologischen Modellberechnungen wird abgeklärt, ob die Erhöhung der Geschiebefracht zu einer signifikanten Anhebung der Sohle und des Hochwasserspiegels führt.
Auswerten von Vermessungen	Die Gewässersohle wird vor und nach Erhöhung der Geschiebefracht in den bezüglich Geschiebetransport limitierenden Abschnitten vermessen. Die Auswertung zeigt, ob die Sohle auflandet. Die Anhebung des Hochwasserspiegels kann durch hydraulische Berechnungen ermittelt werden. Falls ältere Vermessungen verfügbar sind, sollten diese ebenfalls ausgewertet werden. Damit kann aufgezeigt werden, ob infolge der erhöhten Geschiebefracht frühere Eintiefungen (infolge des ausgelösten Geschiebedefizits) kompensiert wurden.

Die quantitativen wie auch qualitativen Auswirkungen der Massnahmen auf das Grundwasser sind ebenfalls bei der Auswahl der Massnahmen zu berücksichtigen. Dazu gehören insbesondere Auswirkungen auf Fassungen im öffentlichen Interesse bzw. Grundwasserschutzzonen oder Grundwasserschutzareale, bei welchen auch die Bestimmungen des planerischen Grundwasserschutzes einzuhalten sind. Ebenso sind Störungen der Vegetation durch Änderungen des Grundwasserspiegels zu beachten.

3.5.5 Kostenschätzung

Als Grundlage für die Beurteilung und Bewertung von verschiedenen Massnahmenvarianten – insbesondere für die Beurteilung der Verhältnismässigkeit des Aufwands – müssen die Kosten der Massnahmen ermittelt werden. Die Kostenschätzung muss die folgenden Positionen mit einer der Vorstudie entsprechenden Genauigkeit der Kostenschätzung von $\pm 30\%$ beinhalten:

- Investitionskosten
 - Projektierungskosten
 - Baukosten
 - Landerwerb
 - Risikokosten
- Wiederkehrende Kosten
 - Kosten für betriebliche Massnahmen
 - Kosten für den Unterhalt von Bauten und Anlagen⁸
 - Ertragseinbussen infolge Minderproduktion bei Massnahmen an Wasserkraftanlagen
- Kosten für die Wirkungskontrolle

Damit man die Kosten von baulichen und betrieblichen Massnahmen miteinander vergleichen kann, sollen entweder die Investitionskosten in jährliche Kosten umgerechnet werden oder die jährlichen Kosten über die Betriebsdauer kapitalisiert werden. Bei Massnahmen an Wasserkraftanlagen wird eine Betriebsdauer von 40 Jahren eingesetzt. Das entspricht der in der Gesetzgebung veranschlagten Dauer der Finanzierung von betrieblichen Massnahmen (Anhang 3, Ziffer 1, EnV). Bei Massnahmen an nicht-Wasserkraftanlagen wird als Betriebsdauer die Lebensdauer von Bauwerken betrachtet, welche auf Basis von SIA Normen berechnet wird.

3.6 Arbeitsschritt 5: Massnahmenvarianten erarbeiten und bewerten

3.6.1 Einführung

Ziele und Ergebnisse des Arbeitsschritts

Mit diesem Arbeitsschritt sollen aus dem Katalog von Massnahmen jene ausgewählt werden, welche die definierten Ziele für das Gewässer erfüllen, machbar und verhältnismässig sind. Als Ergebnis des Arbeitsschritts wird erwartet:

- Eine Liste von Varianten, welche die Massnahmen an verschiedenen Anlagen im Einzugsgebiet zusammenfassen.
- Erläuterung der Bewertungskriterien der Varianten.
- Eine Bewertungsmatrix für die Varianten.

⁸ Diese Kosten sind allerdings nicht anrechenbar und werden nicht entschädigt.

Aus dem im vorhergehenden Arbeitsschritt erarbeiteten Katalog von Massnahmen werden die machbaren Massnahmen zu Varianten kombiniert. Eine Variante umfasst Massnahmen an den verschiedenen Anlagen in einem Einzugsgebiet oder Gewässersystem, welche aufeinander abgestimmt sind.

Die Varianten werden nach verschiedenen Kriterien beurteilt. Die Kriterien stützen sich auf die Anforderungen von Artikel 43a Abs. 2 GSchG, wonach sich die Massnahmen richten nach

- dem Grad der Beeinträchtigungen des Gewässers,
- dem ökologischen Potenzial des Gewässers,
- der Verhältnismässigkeit des Aufwandes,
- den Interessen des Hochwasserschutzes und
- den energiepolitischen Zielen zur Förderung erneuerbarer Energien.

3.6.2 Verhältnismässigkeit des Aufwandes

Ein zentrales Beurteilungskriterium für eine Massnahme ist das Verhältnis zwischen Kosten und angestrebter Wirkung. Die Wirkung der Massnahme kann anhand der Geschiebefracht beurteilt werden. Dazu werden die zwei Kriterien «Geschiebefracht und Dynamik» sowie «Länge des Gewässerabschnittes» mit verbessertem Geschiebehauhalt herangezogen.

Für die beiden Kriterien wird in Tab. 10 ein Bewertungsschema vorgeschlagen. Im konkreten Einzelfall können die Bewertungen mit Punkten versehen und die Kriterien gewichtet werden, womit ein Grad der Zielerreichung bestimmt werden kann. Gleichzeitig muss für die beiden Kriterien eine Zielgrösse festgelegt werden, d.h. es muss festgelegt werden, welche Bewertung (einzeln je Kriterium oder kombiniert) eine Massnahme im Mindesten aufweisen muss. Beim Kriterium «Geschiebefracht und Dynamik» ist das Ziel erreicht, wenn die Geschiebefracht der erforderlichen Fracht entspricht, beim Kriterium «Länge des Gewässerabschnittes», wenn ein grosser Anteil der wesentlich beeinträchtigten Strecke aufgewertet wird. Massnahmen, welche bei einem der Kriterien mit dem Minimum bewertet werden, werden als wirkungslos und nicht geeignet bezeichnet. Sie sind in dem Fall unabhängig ihrer Kosten nicht verhältnismässig und sollen nicht weiterverfolgt werden. Die Kriterien werden auf den Abschnitt im Gewässersystem mit der höchsten erforderlichen Geschiebefracht oder mit der grössten Bedeutung angewandt.

Tab. 10: Mögliche Beurteilung der Wirkung von Massnahmen und Zielzustand

Beurteilungskriterium	Ziel	Mögliche Bewertung
Geschiebefracht und Dynamik	→	max Die Geschiebefracht erreicht das Niveau der Geschiebefracht im naturnahen Zustand oder alles Geschiebe wird durch die Anlage durchgeleitet.
		... Die Geschiebefracht erreicht das Niveau der erforderlichen Geschiebefracht.
		... Die Geschiebefracht wird gegenüber heute erhöht, die erforderliche Geschiebefracht wird aber nicht erreicht.
		min Die Geschiebefracht wird nicht erhöht oder die Dynamik im Gewässer wird durch begleitende Massnahmen (zum Beispiel Massnahmen zum Hochwasserschutz) eingedämmt.
Länge des Gewässerabschnittes mit verbessertem Geschiebehauhalt	→	max Der Geschiebehauhalt wird auf der gesamten wesentlich beeinträchtigten Gewässerstrecke verbessert.
		... Der Geschiebehauhalt wird auf einem grossen Teil der wesentlich beeinträchtigten Gewässerstrecke verbessert.
		... Der Geschiebehauhalt wird auf einem kleinen Teil der wesentlich beeinträchtigten Gewässerstrecke verbessert.
		min Der Geschiebehauhalt wird nur auf einem sehr kleinen Teil der wesentlich beeinträchtigten Strecke verbessert.

Fiktives Beispiel Kosten-Wirkungsanalyse mit fünf Massnahmenvarianten für eine kleine Stauanlage:

- **Variante 1:** Absenken des Stauziels bei Hochwasser und Durchleiten sämtlichen Geschiebes durch die Anlage.
- **Variante 2:** Geschiebeentnahmen bei der Stauwurzel und Zugabe eines Teils im Unterwasser der Anlage.
- **Variante 3:** Bau Geschiebeumleitstollen. Bei Hochwasser wird sämtliches Geschiebe weitergeleitet.
- **Varianten 4 und 5:** nicht näher spezifiziert.

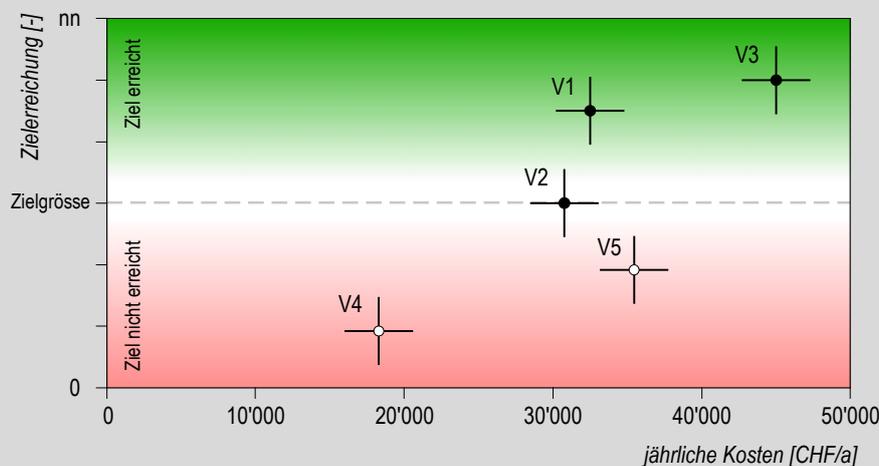
In Abb. 23 werden für die fünf Varianten die Wirkung den Kosten gegenübergestellt (siehe auch Tab. 11). Mit den Varianten V1 bis V3 werden die gesetzten Ziele erreicht, mit den übrigen Varianten nicht. Die Varianten V4 und V5 werden also nicht weiterverfolgt.

Tab. 11: Kosten-Wirkungsanalyse

	Variante 1	Variante 2	Variante 3
Wirkung			
Grad der Zielerreichung	gut erreicht	knapp erreicht	gut erreicht
Kosten			
Investitionskosten [Mio. CHF]	0,6	0,3	1,2
jährliche Kosten der Investition [CHF/a]	13 500	6750	27 000
Wiederkehrende Kosten			
betriebliche Massnahmen [CHF/a]	10 000	22 000	10 000
Unterhalt von Bauwerken [CHF/a]	4000	2000	8000
Ertragseinbussen [CHF/a]	5000	0	0
Total jährliche Kosten [CHF/a]	32 500	30 750	45 000
Wirkung im Verhältnis zu den Kosten	hoch	mittel	mittel

Abb. 23: Vergleich von Massnahmenvarianten: Bewertung von Wirkung und Kosten

Auf der Abszisse sind die jährlichen Kosten der Massnahmen aufgetragen, auf der Ordinate der Grad der Zielerreichung (Wirkung). Mit den Varianten V1 bis V3 werden die gesetzten Ziele erreicht, mit den Varianten 4 und 5 nicht.



3.6.3 Grad der Beeinträchtigung, ökologisches Potenzial, Interessen des Hochwasserschutzes und energiepolitische Ziele

Neben der Verhältnismässigkeit des Aufwandes richten sich die Massnahmen nach weiteren Kriterien: dem Grad der Beeinträchtigung des Gewässers, dem ökologischen Potenzial des Gewässers, den Interessen des Hochwasserschutzes und den energiepolitischen Zielen zur Förderung erneuerbarer Energien. Diese Kriterien sind deshalb für jede Variante zu bewerten, entsprechende Bewertungsvorschläge sind in Tab. 12 aufgeführt. Auen von nationaler Bedeutung weisen grundsätzlich einen hohen ökologischen Wert und damit ein hohes ökologisches Potenzial auf.

Tab. 12: Set von Kriterien für die Beurteilung von Massnahmen

Beurteilungskriterium	Mögliche Bewertung	
Beeinträchtigung der Geschiebeführung im Istzustand	max	Der Grad der Beeinträchtigung im Istzustand ist sehr stark.
	...	Der Grad der Beeinträchtigung im Istzustand ist stark.
	min	Der Grad der Beeinträchtigung im Istzustand ist wesentlich.
Ökologisches Potenzial des Gewässers mit verbesserter Geschiebeführung	max	Das Gewässer liegt in einem Auengebiet von nationaler Bedeutung.
	...	Das Gewässer ist ökomorphologisch wenig beeinträchtigt oder naturnah oder eine Revitalisierung in absehbarer Zukunft bringt einen grossen Nutzen für Natur und Landschaft.
	...	Das Gewässer ist ökomorphologisch stark beeinträchtigt oder naturfremd und eine Revitalisierung bringt einen mittleren Nutzen für Natur und Landschaft.
	min	Das Gewässer ist ökomorphologisch stark beeinträchtigt oder naturfremd und es besteht kein Nutzen für Natur und Landschaft einer Revitalisierung.
Auswirkungen auf die Hochwassersicherheit (sofern nicht durch begleitende Massnahmen abgewendet)	keine	Die Abflusskapazität im Gerinne wird nicht oder nur unwesentlich verändert und es werden keine Hochwasserschutzziele verletzt.
	...	Die Hochwasserschutzziele für die Objektkategorie 2.2 werden mit der Massnahme verletzt. ⁹
	...	Die Hochwasserschutzziele für die Objektkategorie 2.3 und 3.1 werden mit der Massnahme verletzt.
	gross	Die Hochwasserschutzziele für die Objektkategorien 3.2 und 3.3 werden mit der Massnahme verletzt.
Beeinträchtigung der Produktion erneuerbarer Energie (nur bei Massnahmen mit Auswirkungen auf Wasserkraftanlagen beurteilen)	keine	Die Stromproduktion der Wasserkraftanlage wird nicht tangiert.
	...	Die Stromproduktion der Wasserkraftanlage wird nur unwesentlich vermindert.
	...	Die Stromproduktion der Wasserkraftanlage wird wesentlich vermindert.
	gross	Die Stromproduktion der Wasserkraftanlage wird verunmöglicht.

Beim Variantenvergleich können weitere Aspekte eine Rolle bei der Bewertung spielen, wie zum Beispiel das nationale Eingriffsinteresse an der Energieproduktion¹⁰ (insbesondere bei Auen von nationaler Bedeutung), Emissionen (z. B. CO₂-Emissionen und Lärmbelastung bei Kiestransporten), Ressourcenverbrauch (z. B. Landbedarf bei baulichen Massnahmen), erhöhte Trübung oder der Einfluss auf das Grundwasser (z. B. bei einer Massnahme in einer Grundwasserschutzzone einer im öffentlichen Interesse liegenden Grundwasserfassung). Diese Aspekte müssen fallweise berücksichtigt werden.

⁹ Objektkategorien und Hochwasserschutzziele nach BRP, BWG & BUWAL (2005): Raumplanung und Naturgefahren.

¹⁰ Ab wann bei Wasserkraftanlagen von einem nationalen Eingriffsinteresse auszugehen ist, wird in Artikel 8 Abs. 1 Energieverordnung (EnV, SR 730.01) präzisiert. Neue Wasserkraftanlagen sind von nationalem Interesse, wenn sie über eine mittlere erwartete Produktion von jährlich mindestens 20 GWh oder eine mittlere erwartete Produktion von jährlich mindestens 10 GWh und über mindestens 800 Stunden Stauinhalt bei Volleleistung verfügen. Bestehende Wasserkraftanlagen sind von nationalem Interesse, wenn sie durch die Erweiterung oder Erneuerung eine mittlere erwartete Produktion von jährlich mindestens 10 GWh erreichen oder eine mittlere erwartete Produktion von jährlich mindestens 5 GWh erreichen und über mindestens 400 Stunden Stauinhalt bei Volleleistung verfügen.

Fiktives Beispiel Die drei verbleibenden Varianten aus dem Beispiel des vorangehenden Kapitels werden gemäss Tab. 13 bewertet.

Tab. 13: Bewertungsmatrix

	Variante 1	Variante 2	Variante 3
Verhältnismässigkeit des Aufwandes	hoch	mittel	mittel
Grad der Beeinträchtigung im Istzustand	stark	stark	stark
Ökologisches Potential	gross	gross	gross
Beeinträchtigung der Hochwassersicherheit	keine	keine	keine
Beeinträchtigung der Produktion erneuerbarer Energie	gering	keine	keine

3.7 Arbeitsschritt 6: Die Bestvariante festlegen

Ziel und Ergebnis des Arbeitsschritts

Mit diesem Arbeitsschritt soll die Bestvariante festgelegt werden, damit diese verfügt werden kann.

- Eine Begründung für die Wahl der Bestvariante.
- Eine Einschätzung der Verhältnismässigkeit der Bestvariante.

Gesamtbeurteilung

Die Wahl der am besten geeigneten Massnahme (Bestvariante) erfordert eine Gesamtbeurteilung hinsichtlich der in Kap. 3.6 definierten Kriterien. Dazu sind, besonders in komplizierteren Fällen, eine Gesamtsicht der Problematik, Erfahrung und Experten-Know-how notwendig.

Bei der vorzunehmenden Interessenabwägung handelt es sich um ein Werturteil, welches im Einzelfall gefällt werden muss und welches sich daher nur bis zu einem gewissen Grad schematisieren lässt. Gleichwohl ist die Wahl der Bestvariante in jedem Fall nachvollziehbar zu dokumentieren und zu erläutern.

Grundsätzlich muss die Bestvariante 1) die Sanierungsziele erreichen, 2) verhältnismässig sein und 3) möglichst die Durchgängigkeit der Anlage herstellen.

Fiktives Beispiel Im Beispiel von Kap. 3.6 wurden von den fünf ursprünglichen Massnahmenvarianten die Varianten V1 bis V3 bewertet. Die Variante V1 wird aus folgenden Gründen als Bestvariante festgelegt:

- Sie erreicht das Ziel zusammen mit Variante 3 am besten.
- Sie hat einen ähnlich grossen Nutzen wie Variante 3, ist aber wesentlich günstiger.
- Sie ist ähnlich teuer wie Variante 2, hat aber einen deutlich grösseren Nutzen als diese.
- Die Variante 1 erfüllt den Grundsatz, dass die Durchgängigkeit der Anlage vollständig hergestellt wird.

Verhältnismässigkeit

Die Bestvariante kann dann zur Umsetzung verfügt werden, wenn sie als verhältnismässig betrachtet wird, das heisst, wenn sie die folgenden Kriterien erfüllt:

- Die Massnahme ist geeignet, die Sanierungsziele zu erreichen.
- Die Massnahme ist erforderlich, d. h. es liegt einerseits eine wesentliche Beeinträchtigung gemäss Artikel 43a GSchG vor und andererseits kann das Sanierungsziel nicht mit einer mildereren, sprich kostengünstigeren, Massnahme erreicht werden.
- Die Massnahme weist einen Aufwand auf, der zur angestrebten Wirkung in einem vernünftigen Verhältnis steht.
- Die Massnahme ist zumutbar, d. h. der Eingriff in die Rechtsstellung von Privaten wiegt nicht schwer im Vergleich zum verfolgten öffentlichen Interesse. Zudem hat die Massnahme keine anderen, übermässig negativen Wirkungen.

Teilsanierungen und Konzessionserneuerung

Unter welchen Bedingungen Teilsanierungen zulässig sind und entschädigt werden können und was bei einer späteren Konzessionserneuerung passiert, ist in einer FAQ¹¹ des BAFU festgehalten.

3.8 Arbeitsschritt 7: Mit anderen Massnahmen am Gewässer koordinieren

Ziele und Ergebnisse des Arbeitsschritts

Mit diesem Arbeitsschritt soll gezeigt werden, wie die Massnahmen zur Sanierung des Geschiebehaushaltes auf andere Massnahmen am Gewässer abgestimmt werden können:

- Eine Liste mit weiteren Massnahmen im Einzugsgebiet und den möglichen Synergien und Opportunitäten bzw. Konflikte mit den Massnahmen zur Sanierung des Geschiebehaushalts.

Koordination mit Revitalisierungen

Der Geschiebetransport entfaltet seine ökologische Wirkung in naturnahen oder revitalisierten Gewässern am besten. Umgekehrt ist die Wirkung von Revitalisierungen in der Regel gering, wenn das Strukturen bildende Geschiebe nicht in der erforderlichen Menge herangeführt wird. Aus diesem Grund ist es wichtig, dass Massnahmen zur Sanierung des Geschiebehaushaltes und solche zur Revitalisierung eng aufeinander abgestimmt sind und zeitnah umgesetzt werden.

Koordination mit Massnahmen zum Hochwasserschutz

Die Nutzung von Synergien und Opportunitäten zum Schutz vor Hochwasser und zur Revitalisierung von Fliessgewässern ist bei wasserbaulichen Vorhaben die Regel. Dementsprechend können und sollen auch Massnahmen zur Sanierung des Geschiebehaushaltes mit jenen des Hochwasserschutzes und umgekehrt kombiniert werden. Potenzielle Zielkonflikte zwischen Hochwasserschutz und Geschiebehaushaltssanierung sollten schon bei der Massnahmenplanung gelöst worden sein.

11 www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/wasser/fachinfo-daten/oekologische-sanierung-wasserkraft-fragstellungen-zur-teilsanierung.pdf.download.pdf/%C3%96kologische_Sanierung_Wasserkraft_-_Fragstellungen_zur_Teilsanierung_-_Webversion.pdf

Koordination mit Massnahmen an Wasserkraftanlagen

Bei Wasserkraftanlagen werden gegebenenfalls auch Massnahmen zur Sanierung von Schwall und Sunk, der freien Fischwanderung oder Massnahmen zur Sicherung oder Sanierung Restwassermengen ergriffen. Aus Sicht des Anlageninhabers kann es sinnvoll sein, diese Massnahmen mit Massnahmen zur Sanierung des Geschiebehaushaltes zu kombinieren, insbesondere dann, wenn sie bauliche Veränderungen der Anlage erfordern.

Zeitpunkt der Umsetzung von Massnahmen

Die oben genannten Optionen der Koordination bedeuten nicht, dass Massnahmen zur Sanierung des Geschiebehaushaltes erst zum Zeitpunkt einer Revitalisierung oder einer Sanierungsmassnahme von Schwall und Sunk ergriffen werden sollen. Weil grössere Gewässersysteme träge auf Veränderungen im Sedimenthaushalt reagieren, sollen Massnahmen zur Sanierung des Geschiebehaushaltes immer so rasch als möglich eingeleitet werden. In den meisten Gewässersystemen gibt es Flussabschnitte, in welchen eine Sanierung des Geschiebehaushaltes auch ohne Revitalisierung eine Wirkung entfalten kann. Spätestens bis Ende 2030 muss mit der Umsetzung der Massnahmen begonnen worden sein.

3.9 Arbeitsschritt 8: Das Konzept der Wirkungskontrolle festlegen

Ziele und Ergebnisse des Arbeitsschritts

Mit diesem Arbeitsschritt soll festgelegt werden, wie und in welchem Umfang die Wirkung der Massnahmen kontrolliert wird.

Als Ergebnisse des Arbeitsschrittes werden erwartet:

- Eine Liste der gewählten Indikatoren und eine Begründung für deren Wahl.
- Die Bezeichnung der Untersuchungsabschnitte inkl. Vergleichsstrecken.
- Der Zeitplan für die Erhebungen inkl. der Erhebung des Istzustands vor Umsetzung der Massnahmen.
- Die voraussichtlichen Kosten der Wirkungskontrolle.
- Die Koordination mit Wirkungskontrollen bei anderen Massnahmen.

Details zu Zweck, Vorgehen und Umfang der Wirkungskontrolle sind in Kap. 4 aufgeführt. In Anhang H sind mögliche Indikatoren ausführlich beschrieben.

3.10 Vereinfachtes Vorgehen

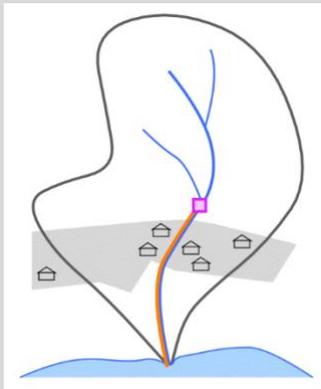
Beim vereinfachten Vorgehen werden Massnahmen zur Sanierung des Geschiebehaushaltes schrittweise umgesetzt. Die Geschiebefracht wird schrittweise erhöht, bis im besten Fall sämtliches in den Anlagen zurück gehaltenes Geschiebe dem Gewässer zur Verfügung steht. Ein besonderes Augenmerk wird auf die Wirkungskontrolle gelegt, welche primär dazu dient, die Massnahmen zu optimieren und die Grenzen der möglichen Geschiebefracht auszuloten. Die Arbeitsschritte können dann sehr viel einfacher bearbeitet werden:

- Arbeitsschritt 1: Die Situationsanalyse beschränkt sich darauf aufzuzeigen, um welches Mass die Geschiebefracht von den Anlagen reduziert wird. Man kann darauf verzichten, die Morphologie im naturnahen und im Istzustand zu beschreiben.
- Arbeitsschritt 2: Die erforderliche Geschiebefracht des Gewässers entspricht der grösstmöglichen Geschiebefracht, welche transportiert werden kann, ohne dass unverhältnismässige begleitende Hochwasserschutzmassnahmen notwendig sind. Die Fracht wird nicht a priori definiert, sondern empirisch während der Massnahmenumsetzung ermittelt.
- Arbeitsschritt 3: Das Sanierungsziel für die Anlage ist die möglichst vollständige Geschiebedurchgängigkeit.
- Arbeitsschritt 4: Der Massnahmenkatalog ist grundsätzlich der gleiche wie in Kap. 3.5 beschrieben. In kleinen Einzugsgebieten mit nur einer Anlage ist das Spektrum möglicher Massnahmen jedoch oft begrenzt.
- Arbeitsschritt 5: Wichtigstes Kriterium für die Beurteilung der Wirkung der Variante ist die Länge des Gewässerabschnitts mit verbessertem Geschiebehaushalt.
- Arbeitsschritt 6: Zwei Aspekte bestimmen die Wahl der Bestvariante: Die Kosten und die Möglichkeit, Massnahmen schrittweise zu erweitern.
- Arbeitsschritt 7: Die Koordination mit anderen Massnahmen im Einzugsgebiet entfällt häufig.
- Arbeitsschritt 8: Die Wirkungskontrolle dient vor allem dazu, das Funktionieren der Massnahme aufzuzeigen (wird Geschiebe in Anlagen oder an Zugabestellen mobilisiert?) und bei Bedarf die Geschiebeführung nach oben oder nach unten anzupassen. Eventuell ist die Veränderung der mittleren Sohlenlage zu beobachten, um Hochwasserrisiken zu erkennen und zu minimieren.

Fiktives Beispiel für das vereinfachte Vorgehen

In einem fiktiven Beispiel mündet ein kleiner Bach in einen See. Das Gewässer ist ein Fischgewässer. Als einzige sanierungspflichtige Anlage besteht ein Geschiebesammler oberhalb des Siedlungsgebiets.

Abb. 24: Kleines Einzugsgebiet mit einem Geschiebesammler (rosa Quadrat) oberhalb des Siedlungsgebiets (graue Fläche)



- Arbeitsschritt 1: Aus der periodischen Bewirtschaftung des Sammlers wird abgeleitet, dass im Sammler im langjährigen Durchschnitt 25 m^3 Geschiebe zurückgehalten werden.
- Arbeitsschritt 4: Folgende Massnahmen sind denkbar: Auslaufbauwerk des Geschiebesammlers umbauen (M1.4); Rückbau des Geschiebesammlers (M1.12); Kies aus dem Sammler unterhalb des Siedlungsgebiets zugeben (M2.4) sowie eine Kombination von M1.4 und M2.4.
- Arbeitsschritt 5: Der Rückbau des Geschiebesammlers (M1.12) verlangt nach aufwändigen und unverhältnismässigen begleitenden Hochwasserschutzmassnahmen im Siedlungsgebiet. Diese Massnahmen werden deshalb nicht empfohlen. Weil sich eine geeignete Kiesrückgabestelle erst unterhalb des Siedlungsgebiets befindet, kann die Massnahme M2.4 ihre Wirkung nur auf einem kurzen Abschnitt des Gewässers entfalten.
- Arbeitsschritt 6: Eine Kombination von Massnahmen wird als Bestvariante gewählt: Auslaufbauwerk umbauen (M1.4) und Kies im Unterwasser zugeben (M2.4). Dabei wird vorerst die bauliche Massnahme M1.4 umgesetzt und nach einigen Jahren mit der betrieblichen Massnahme M2.4 ergänzt. Die Kieszugaben werden erhöht, solange die Ablagerungen auf der Sohle die Hochwassersicherheit nicht beeinträchtigen.
- Arbeitsschritt 8: Bei der Wirkungskontrolle wird mit Indikator A1 (Ablagerungen von Geschiebe, Tab. 14) das Funktionieren der Massnahme gezeigt und in hochwasserkritischen Gewässerabschnitten mit Indikator A7 (Tab. 14) die mittlere Sohlage vermessen. Die Indikatoren werden alle zwei Jahre erhoben.

4 Wirkungskontrolle

4.1 Einführung

Zweck der Wirkungskontrolle

Die Wirkungskontrolle bildet zusammen mit der Umsetzungskontrolle die Erfolgskontrolle (vgl. Kap. 2.1). Mit der Wirkungskontrolle soll gezeigt werden, dass mit den Massnahmen die wesentlichen Beeinträchtigungen des Gewässers durch einen veränderten Geschiebehaushalt bei bestehenden Anlagen beseitigt und bei Neuanlagen verhindert wurden.

Die Wirkungskontrolle dient auch der Optimierung von Massnahmen, vor allem von betrieblichen Massnahmen. Damit kann den Unsicherheiten bei der Bestimmung der Anforderungen, der Dimensionierung der Massnahmen und der Prognose der Auswirkungen, beispielsweise auf den Hochwasserschutz, begegnet werden. Ganz besonders kommt das bei der erstmaligen Umsetzung von Massnahmen zum Tragen.

Schliesslich dient die Wirkungskontrolle dazu, der Öffentlichkeit Rechenschaft über die sinnvolle Verwendung der Ressourcen abzugeben. Damit von den Erfahrungen aus einzelnen Massnahmen auch weitere Sanierungsprojekte in anderen Gewässern profitieren können, müssen Vorgehen, Indikatoren und Umfang der Wirkungskontrollen möglichst einheitlich sein und den hier empfohlenen Vorgaben entsprechen.

Arbeitsschritte

Das Vorgehen der Wirkungskontrolle beinhaltet vier Arbeitsschritte (Abb. 25). Zunächst wird der Istzustand des Gewässers vor der ersten Umsetzung der Massnahme erhoben (Schritt 1). Nach Umsetzung der Massnahme wird im Feld geprüft, ob sie funktioniert (z. B. ob geschüttetes Kies mobilisiert wird) und wie sich der Zustand des Gewässers anhand der ausgewählten abiotischen und biotischen Indikatoren über die Zeit entwickelt (Schritt 2). Mit den Resultaten aus diesen Messungen wird die Zielerreichung überprüft (Schritt 3) und daraus der Bedarf für Anpassungen der Massnahmen abgeleitet (Schritt 4).

Abb. 25: Arbeitsschritte der Wirkungskontrolle

Je nach Indikator sind mehrere Messungen erforderlich, um die Wirkung aufzeigen zu können.

Arbeitsschritte	Kapitel
1) Istzustand vor Umsetzung der Massnahmen aufnehmen	4.2 - 4.3
2) Zustand nach Umsetzung der Massnahmen aufnehmen	4.2 - 4.3
3) Zielerreichung überprüfen	4.4
4) Nachbesserung der Massnahme	4.5

Koordination

Die Wirkungskontrolle sollte mit derjenigen anderer Gewässerschutzmassnahmen – vor allem Revitalisierungen und Sanierung der Fischwanderung – koordiniert werden. Damit können Doppelspurigkeiten bei den Messungen vermieden und Synergien, beispielsweise bei der Erhebung biotischer Indikatoren, genutzt werden. Einzelne der weiter unten aufgeführten Indikatoren werden auch bei der nationalen Wirkungskontrolle für Revitalisierungen empfohlen (BAFU 2021).

Aufwand der Wirkungskontrolle

Der Aufwand für die Wirkungskontrolle muss in einem vernünftigen Verhältnis

- zu Aufwand und Bedeutung der Sanierungsmassnahme und
- zur ökologischen Bedeutung des Gewässers

stehen. Aus diesem Grund werden je nach Umfang der Massnahme und ökologischer Bedeutung des Gewässers unterschiedliche Indikatoren für die Wirkungskontrolle verwendet.

4.2 Indikatoren

Mit Indikatoren wird kontrolliert, ob die gesetzten Ziele erreicht werden, das heisst, ob die Massnahmen die gewünschte Wirkung entfalten. Die hier vorgeschlagenen biotischen und abiotischen Indikatoren (Tab. 14 und Tab. 15) eignen sich um zu zeigen, ob Massnahmen funktionieren, ob die Geschiebefracht erreicht wurde, ob die konkreten Ziele zur Morphologie und Sohlenlage erreicht wurden und ob das übergeordnete Ziel für *Tiere, Pflanzen und ihre Lebensräume* erreicht wurde.

Indikatoren haben eine gute Aussagekraft und sind zweckmässig, wenn sie:

- messbar sind,
- stark auf die Massnahmen reagieren,
- zeitnah reagieren,
- möglichst unabhängig von anderen Einflussfaktoren sind,
- nicht oder nur schwach mit anderen, gleichzeitig erhobenen Indikatoren korrelieren.

Tab. 14: Abiotische Indikatoren

Indikator	Was wird überprüft?
• A1 Ablagerungen von Geschiebe in Anlagen oder an Zugabestellen	Funktionieren einer Massnahme
• A2 Geschiebefracht	Erreichen der erforderlichen Geschiebefracht
• A3 Gerinneform • A4 Ausdehnung von Geschiebeablagerungen • A5 Substrattypen • A6 Innere Kolmation • A7 Veränderung der mittleren Sohlenlage • A8 Veränderung der Höhenlage des Talwegs	Erreichen der Sanierungsziele (Morphologie und Dynamik, Hochwasserschutz, Grundwasserhaushalt)

Tab. 15: Biotische Indikatoren

Indikator	Was wird überprüft?
• B1 Vorkommen von Forellenbrütlingen • B2 Vorkommen von jungen Bachforellen • B3 Anzahl von Laichgruben in Gewässern der Forellen- oder Äschenregion • B4 Anzahl und Dichte von Brütlingen und Larven der Äsche • B5 Anzahl von Jungfischen von rheo-lithophilen (kieslaichenden) Arten	Erreichen der Sanierungsziele (Tiere, Pflanzen, Lebensräume)

Je nach zu sanierendem Gewässerabschnitt und insbesondere für Auen sind weitere biotische Indikatoren zu untersuchen, die auch amphibische und terrestrische Lebensräume und Organismen beschreiben. Weil die Erhebung und Auswertung dieser Indikatoren jedoch deutlich aufwendiger sind als für die biotischen Indikatoren in Tab. 15, sollen sie nur fallweise einbezogen werden und ihre Anwendung gegebenenfalls mit der Erfolgskontrolle von Revitalisierungen koordiniert werden:¹²

- die Zusammensetzung und Abundanz des Makrozoobenthos
- die Sukzession von Pflanzengesellschaften oder Pflanzenformationen
- die Zusammensetzung der Laufkäferfauna
- die Zusammensetzung der Kleinsäugerfauna
- die Brut des Flussregenpfeifers.

Die Indikatoren und Erhebungsmethoden sowie die zu beachtenden Besonderheiten sind im Anhang H beschrieben.

Messintervalle und -dauer

Messung vor Umsetzung: Die Erhebung des Istzustands vor Umsetzung der Massnahme ist notwendig, damit die Wirkung der Massnahme überhaupt qualitativ und quantitativ ermittelt werden kann.

Intervalle: Das Messintervall ist abhängig von der Art des Indikators. Neben regelmässigen Messintervallen ist ein ereignisbasiertes Monitoring in Betracht zu ziehen, beispielsweise nach Hochwasserereignissen oder vor und nach künstlichen Hochwassern.

Saisonalität biotischer Indikatoren: Die biotischen Indikatoren sind stark saisonabhängig. Deshalb muss die Wirkungskontrolle frühzeitig geplant werden. Im Hinblick auf die Klimaerwärmung sind dabei auch Verschiebungen beispielsweise von Laichperioden möglich, welche bei der Planung berücksichtigt werden müssen.

Schwankungen durch Aufnahmen in mehreren Jahren ausgleichen: Weiter ist zu berücksichtigen, dass biologische Parameter häufig starke interannuelle Schwankungen aufweisen, die auf verschiedenste Einflüsse zurückgeführt werden können. Dies bedeutet, dass die entsprechenden Indikatoren mehrmals und über längere Zeitperioden erhoben werden müssen, um einigermaßen zuverlässige Aussagen zu ermöglichen (siehe Kap. 4.3).

Dauer: Die Dauer der Wirkungskontrolle richtet sich nach der Reaktionszeit der massgebenden Prozesse. Weil Veränderungen im Geschiebehaushalt sich erst mit Hochwassern manifestieren, kann dies unterschiedlich lang dauern. Der Geschiebehaushalt von grossen Gewässern reagiert zudem träge auf Veränderungen. Unter Umständen müssen mehrere geschiebeführende Hochwasserereignisse abgewartet werden, ehe bei manchen Indikatoren Veränderungen nachgewiesen werden können (siehe Kap. 4.3).

Mess- und Kontrollabschnitte

Es werden jene Abschnitte untersucht, für welche Ziele definiert wurden. Dies entspricht den Abschnitten, wo aufgrund der Gewässerbreite oder der hydraulischen Situation eine besonders grosse Wirkung erwartet wird. Die Anzahl zu bearbeitender Messabschnitte ist abhängig von der Länge des durch die Sanierungsmassnahme beeinflussten Gewässerabschnittes.

¹² Koordinieren bedeutet hier, auch die Erhebungen von anderen Massnahmen im Gewässer zu nutzen, um vertiefte Aussagen zur Wirkung der Geschiebesanierung zu treffen.

Weiter ist zu überlegen – zumindest für die biotischen Indikatoren – ob ein Kontrollabschnitt in die Untersuchungen einbezogen werden soll, der nicht von den Sanierungsmassnahmen beeinflusst wird. Dieser liegt in der Regel oberhalb der zu sanierenden Anlage. Damit können übergeordnete Einflüsse auf die Biozönose abgeschätzt werden, die nicht in Zusammenhang mit der Sanierung des Geschiebehaushaltes stehen. Dazu gehören insbesondere Klimaveränderung, Hochwasserhäufigkeit und intensität, Parasiten- und Prädatorenhäufigkeit, Wassernutzung (Schwall-Sunk, Restwasser) und weitere anthropogene Einflüsse.

4.3 Umfang der Wirkungskontrolle

Gestützt auf die bisherigen Erfahrungen zu Aufwand, Kosten und Aussagekraft der verschiedenen Indikatoren wird vorgeschlagen, die abiotischen Indikatoren A1–A8 (Tab. 14) wenn sinnvoll immer zu verwenden. Von den biotischen Indikatoren sollen primär diejenigen zur Fischfauna je nach Fischregion in die Wirkungskontrolle einbezogen werden (B1–B5, Tab. 15). Der konkrete Umfang der Wirkungskontrolle richtet sich nach der Gewässergrösse, weil diese in der Regel stark korreliert mit:

- der Ereignisdynamik und damit der Reaktionszeit des Gewässers
- der ökologischen Bedeutung des Gewässers
- der Grösse und dem Aufwand der Sanierungsmassnahme.

Im Folgenden werden daher für vier typische Gewässergrössen die zu erhebenden Indikatoren, die Messintervalle und die Dauer der Erfolgskontrolle vorgeschlagen (Tab. 16).

Kleine Gewässer

Für Anlagen in kleinen Fliessgewässern ist eine umfassende Wirkungskontrolle in der Regel unverhältnismässig. Eine einfache Wirkungskontrolle anhand der Indikatoren A5 «Substrattypen» und A6 «Innere Kolmation der Gewässersohle» und «Veränderung der mittleren Sohlenlage» ist ausreichend.

Beim vereinfachten Vorgehen in kleinen Einzugsgebieten, reicht es, das Funktionieren der Massnahme aufzuzeigen (Indikatoren A1 «Ablagerungen in der Anlage oder an Zugabestellen» oder A2 «Geschiebefracht») und zu prüfen, ob mit den Massnahmen die Hochwassersicherheit nicht über Gebühr vermindert wird (Indikator A7 «Veränderung der mittleren Sohlenlage»).

Mittlere Gewässer

In Fliessgewässern mittlerer Grösse (zum Beispiel Ergolz, Gürbe, Reppisch) ist das Sanierungsprojekt im Kontext des gesamten Wirkungsabschnittes und dessen ökologischen Potentials zu betrachten. Bei geringem ökologischem Potential des betroffenen Abschnittes ist die Aufnahme abiotischer Indikatoren ausreichend. Bei grösserem ökologischem Potential sind auch biotische Indikatoren zur Fischfauna, insbesondere solche, welche die Fortpflanzung der Forelle beschreiben (B1-3), mehrmals zu erheben. Dabei wird ein Zeitraum von fünf Jahren als Mindestdauer betrachtet.

Grosse Gewässer

In grossen Fliessgewässern (zum Beispiel Areuse, Emme, Simme, Thur) ist das Sanierungsprojekt mit Bezug zum ökologischen Potential des gesamten betroffenen Abschnittes zu betrachten. Sind in absehbarer Zeit (< 10 Jahre) keine weiteren Revitalisierungen oder Gewässerschutzmassnahmen vorgesehen, oder beschränken sich die Auswirkungen der Geschiebehaushaltssanierung auf einen kurzen Gewässerabschnitt (< 3 km) mit geringem ökologischem Potential, kann die Wirkungskontrolle auf die zwei- bis dreimalige Aufnahme abiotischer

Indikatoren reduziert werden. Werden weitere Revitalisierungen geplant oder ist die ökologische Bedeutung gross, ist eine Wirkungskontrolle mit abiotischen und biotischen Indikatoren vorzusehen. Der Untersuchungszeitraum sollte sich dabei je nach Massnahme (einmalig oder wiederholt über mehrere Jahre) über fünf bis sieben und mehr Jahre erstrecken. Die biotischen Indikatoren müssen jährlich erhoben werden, um Auswirkungen der Massnahmen auf die kieslaichende Fischfauna mit einiger Sicherheit erkennen zu können.

Sehr grosse Gewässer

Bei grossen Flüssen (zum Beispiel Aare ab Thun, Alpenrhein und Hochrhein, Limmat ab Zürich, Reuss ab Luzern, Rhone ab Visp, Ticino ab Bellinzona) muss die Wirkungskontrolle auf einen Zeitraum von mindestens 5–10 Jahren nach Realisierung der Sanierungsmassnahmen ausgerichtet werden. Dabei sollten die abiotischen Indikatoren alle zwei Jahre oder ereignisbezogen nach grösseren Hochwassern, die biotischen Indikatoren jährlich aufgenommen werden. Bei der Interpretation der biologischen Daten sind auch die jeweiligen Abflussverhältnisse und Temperaturentwicklungen zu berücksichtigen, um übergeordnete Einflüsse auf die Bestandsentwicklung der kieslaichenden Fischarten zu erkennen. Um Art und Umfang der Sanierungsmassnahmen zu verifizieren und deren Wirkung zu überprüfen, soll anhand der Zwischenresultate in zwei- bis dreijährigen Intervallen vorläufige Bilanz gezogen und die Massnahmen bei Bedarf angepasst werden.

Tab. 16: Indikatortypen nach Gewässergösse und ökologischem Potential

Gewässergösse	Einzugsgebietsgösse, Mittlerer Abfluss	Ökologisches Potential	Abiotische Indikatoren	Biotische Indikatoren
Klein	< 20 km ² < 0,5 m ³ /s	gering-mittel	x*	–
Mittel	20–200 km ² 0,5–5,0 m ³ /s	gering-mittel	x	–
		gross	x	x
Gross	200–2000 km ² 5,0–50 m ³ /s	gering-mittel (keine Revitalisierung absehbar oder sanierter Abschnitt < 3 km)	x	–
		gross (Revitalisierung absehbar, oder sanierter Abschnitt ≥ 3 km)	x	x
Sehr gross	> 2000 km ² > 50 m ³ /s	gross	x	x

* mit begrenzter Anzahl Indikatoren, s. Haupttext.

4.4 Zielerreichung überprüfen

Mit der Auswertung der Messgrössen der verschiedenen Indikatoren kann der Grad der Zielerreichung überprüft werden. Dazu wird der Zustand vor Umsetzung der Massnahmen (Istzustand) und der Zustand nach Umsetzung mit dem Zielzustand verglichen.

Das Ziel ist grundsätzlich erreicht, wenn die massgebenden Indikatoren den Wert «gut» erreichen. Abweichungen von dieser Stufe sind bei einzelnen Indikatoren zulässig. Der systematische Vergleich der Zustände (siehe fiktives Beispiel in Abb. 26) dient als Interpretationshilfe. Im konkreten Einzelfall muss das Ergebnis jedoch mit einem Expertenurteil validiert werden.

Abb. 26: Bestimmung der Zielerreichung der Massnahme

Fiktives Beispiel

Indikator	Istzustand vor Massnahmen Messabschnitt			Zustand nach Massnahmen Messabschnitt			Bewertung
	a	b	c	a	b	c	
A2 Geschiebefracht	2	2	1	5	4	3	
A3 Gerinneform	3	3	2	4	3	3	
A4 Geschiebeablagerungen	2	1	1	4	4	3	
A5 Substrattypen	2	1	1	4	4	4	
A6 innere Kolmation	1	2	1	4	4	4	
B1 Vorkommen Forellenbrütlinge	2	2	2	4	4	2	
B3 Anzahl Laichgruben	2	2	1	4	4	3	

Bewertung	5	4	3	2	1
	sehr gut	gut	mässig	unbefriedigend	schlecht

4.5 Nachbesserung der Massnahme

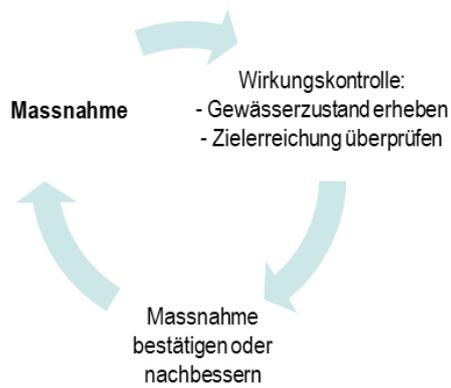
Aus der Wirkungskontrolle können Konsequenzen für die Massnahme abgeleitet werden, denn die Wirkungskontrolle ist Teil eines Optimierungsprozesses (Abb. 27). Folgende Szenarien sind denkbar:

- Alle Indikatoren werden als gut bewertet (für Abweichungen bei einzelnen Indikatoren s. Kap. 4.4): Die Massnahme wird im gleichen Umfang fortgeführt.
- Weder der Indikator Geschiebefracht noch die übrigen abiotischen und die biotischen Indikatoren werden als gut bewertet: Die Massnahme ist ungeeignet oder im Umfang nicht ausreichend und muss angepasst werden.
- Der Indikator Geschiebefracht wird gut bewertet, die übrigen abiotischen und die biotischen Indikatoren aber nicht: Entweder reicht die Dauer der Massnahme für die Zielerreichung noch nicht aus, dann wird die Massnahme fortgeführt, oder die erforderliche Geschiebefracht muss nach oben korrigiert und die Massnahme angepasst werden.
- Der Indikator Geschiebefracht wird höchstens als mässig bezeichnet, die übrigen abiotischen und die biotischen Indikatoren aber als gut: die Massnahme wird im gleichen Umfang fortgeführt, die erforderliche Geschiebefracht kann nach unten korrigiert werden.

Sollte sich aus der Wirkungskontrolle zeigen, dass die umgesetzten Massnahmen die Sanierungsziele nicht erreichen, können vom Kanton zusätzliche Massnahmen verfügt werden. Bei Wasserkraftanlagen kann in diesem Fall die Inhaberin wiederum ein Gesuch um Kostenentschädigung nach Artikel 28 EnV stellen.

Abb. 27: Wirkungskontrolle als Teil des Optimierungsprozesses der Massnahme

Falls die Ziele nicht erreicht werden, muss die Massnahme angepasst werden.





Anhang

Geschiebehaushalt – Massnahmen

Ein Modul der Vollzugshilfe Renaturierung der
Gewässer

Anhang A – Rechtliche Grundlagen

A.1 Gewässerschutzgesetz vom 24. Januar 1991 (GSchG, SR 814.20)

Art. 43a 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. 44 Ausbeutung von Kies, Sand und anderem Material

- 1 Wer Kies, Sand oder anderes Material ausbeuten oder vorbereitende Grabungen dazu vornehmen will, braucht eine Bewilligung.
- 2 Die Bewilligung für solche Arbeiten darf nicht erteilt werden:
 - a. in Grundwasserschutzzonen;
 - b. unterhalb des Grundwasserspiegels bei einem Grundwasservorkommen, das sich nach Menge und Qualität für die Wassergewinnung eignet;
 - c. in Fliessgewässern, wenn der Geschiebehaushalt nachteilig beeinflusst wird.

Art. 50 Information und Beratung

- 1 Bund und Kantone prüfen die Auswirkungen der Massnahmen dieses Gesetzes und informieren die Öffentlichkeit über den Gewässerschutz und den Zustand der Gewässer; insbesondere:
 - a. veröffentlichen sie die Erhebungen über den Erfolg der Massnahmen dieses Gesetzes;
 - b. können sie, soweit dies von allgemeinem Interesse ist, nach Anhören der Betroffenen die Ergebnisse der Erhebungen und Kontrollen an privaten und öffentlichen Gewässern veröffentlichen (Art. 52).

Art. 62b Revitalisierung von Gewässern

- 1 Der Bund gewährt den Kantonen im Rahmen der bewilligten Kredite und auf der Grundlage von Programmvereinbarungen Abgeltungen als globale Beiträge an die Planung und Durchführung von Massnahmen zur Revitalisierung von Gewässern.
- 2 Für besonders aufwendige Projekte können den Kantonen die Abgeltungen einzeln gewährt werden.
- 3 Die Höhe der Abgeltungen richtet sich nach der Bedeutung der Massnahmen für die Wiederherstellung der natürlichen Funktionen der Gewässer sowie nach der Wirksamkeit der Massnahmen.
- 4 Keine Beiträge werden an den Rückbau einer Anlage geleistet, wenn der Inhaber dazu verpflichtet ist.
- 5 Den Bewirtschaftern des Gewässerraums werden die Abgeltungen gemäss Landwirtschaftsgesetz vom 29. April 1998 für die extensive Nutzung ihrer Flächen entrichtet. Das Landwirtschaftsbudget sowie der entsprechende Zahlungsrahmen werden zu diesem Zweck aufgestockt.

Art. 83a Sanierungsmassnahmen

- 1 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.

Art. 83b Planung und Berichterstattung

- 1 Die Kantone planen die Massnahmen nach Artikel 83a und legen die Fristen zu deren Umsetzung fest. Die Planung umfasst auch die Massnahmen, die nach Artikel 10 des Bundesgesetzes vom 21. Juni 1991 über die Fischerei von den Inhabern von Wasserkraftwerken zu treffen sind.
- 2 Die Kantone reichen die Planung bis zum 31. Dezember 2014 dem Bund ein.
- 3 Sie erstatten dem Bund alle vier Jahre Bericht über die durchgeführten Massnahmen.

A.2 Gewässerschutzverordnung vom 28. Oktober 1998 (GSchV, SR 814.201)

Art. 42a 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. 42c 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 30 Absatz 1 EnV, ob die Anforderungen nach Anhang 3 Ziffer 2 EnV erfüllt sind.
- 4 Die Inhaber von Wasserkraftwerken prüfen nach Anordnung der kantonalen Behörde die Wirksamkeit der getroffenen Massnahmen.

Art. 49 Information

- 1 Das BAFU informiert über den Zustand der Gewässer und den Gewässerschutz, soweit dies im gesamtschweizerischen Interesse liegt; es veröffentlicht insbesondere Berichte über den Stand des Gewässerschutzes in der Schweiz. Die Kantone stellen ihm die notwendigen Angaben zur Verfügung.
- 2 Die Kantone informieren über den Zustand der Gewässer und den Gewässerschutz in ihrem Kanton; dabei informieren sie auch über die getroffenen Massnahmen und deren Wirksamkeit sowie über Badeplätze, bei denen die Voraussetzungen für das Baden (Anhang 2 Ziff. 11 Abs. 1 Bst. e) nicht erfüllt sind.

A.3 Energiegesetz vom 30. September 2016 (EnG, SR 730.0)

Art. 34 Entschädigung nach Gewässerschutz- und Fischereigesetz

Dem Inhaber einer Wasserkraftanlage (Wasserkraftwerk im Sinne der Gewässerschutzgesetzgebung) sind die vollständigen Kosten für die Massnahmen nach Artikel 83a des Gewässerschutzgesetzes vom

24. Januar 1991 oder nach Artikel 10 des Bundesgesetzes vom 21. Juni 1991 über die Fischerei zu erstatten.

A.4 Verordnung über den Schutz der Auengebiete von nationaler Bedeutung von 28. Oktober 1992 (Auenverordnung, SR 451.31)

Art. 4 Schutzziel

Die Objekte sollen ungeschmälert erhalten werden. Zum Schutzziel gehören insbesondere:

- a. die Erhaltung und Förderung der auentypischen einheimischen Pflanzen- und Tierwelt und ihrer ökologischen Voraussetzungen;
- b. die Erhaltung und, soweit es sinnvoll und machbar ist, die Wiederherstellung der natürlichen Dynamik des Gewässer- und Geschiebehauhalts;
- c. die Erhaltung der geomorphologischen Eigenart.

Art. 8 Beseitigung von Beeinträchtigungen

Die Kantone sorgen dafür, dass bestehende Beeinträchtigungen, insbesondere der natürlichen Dynamik des Gewässer- und Geschiebehauhalts von Objekten, bei jeder sich bietenden Gelegenheit soweit als möglich beseitigt werden.

Anhang B – Literaturverzeichnis

Abegg J., Kirchhofer A. & Rutschmann P. (2013). Masterplan – Massnahmen zur Geschiebereaktivierung im Hochrhein. *Bundesamt für Energie, Bern und Regierungspräsidium Freiburg*. 115 S. ([PDF](#))

Ahmari H. & da Silva A.M.F. (2011): Regions of bars, meandering and braiding in da Silva and Yalin's plan. *Journal of Hydraulic Research*, 49:6, 718-727. <https://doi.org/10.1080/00221686.2011.614518>. ([PDF](#))

BAFU (2014): Anpassung an den Klimawandel in der Schweiz. Aktionsplan 2014–2019. Zweiter Teil der Strategie des Bundesrates. ([PDF](#))

BAFU (2016): Ökologische Sanierung bestehender Wasserkraftanlagen: Finanzierung der Massnahmen. Ein Modul der Vollzugshilfe «Renaturierung der Gewässer». Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Vollzug Nr. 1634: 51 S. ([PDF](#))

BAFU (2018): Handbuch Programmvereinbarungen im Umweltbereich 2020 – 2024. Mitteilung des BAFU als Vollzugsbehörde an Gesuchsteller. Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Vollzug Nr. 1817: 294 S. ([PDF](#))

BAFU (Hrsg.) (2020): Wirkungskontrolle Revitalisierung – Gemeinsam lernen für die Zukunft. Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern. ([PDF](#))

BAFU (Hrsg.) (2023): Bestimmung der natürlichen Sohlenbreite von Fliessgewässern. Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern. ([PDF](#))

BAFU & EAWAG (Hrsg.) (2006): Ökomorphologie Stufe S (systembezogen). Methoden zur Untersuchung und Beurteilung der Fliessgewässer gemäss dem Modul-Stufen-Konzept. Entwurf. *Bundesamt für Umwelt*, Bern, 72 S. ([PDF](#))

Bezzola, Gian Reto (2019): Flussbau. Vorlesungsmanuskript. ETH Zürich.

BPUK, LDK, BAFU, ARE, BLW (Hrsg.) 2019: Gewässerraum. Modulare Arbeitshilfe zur Festlegung und Nutzung des Gewässerraums in der Schweiz. ([PDF](#))

BRP, BWG & BUWAL (2005): Empfehlung Raumplanung und Naturgefahren. ([PDF](#))

Church, Michael (2006): "Bed Material Transport and the Morphology of Alluvial River Channels." *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 34(1): 325-354.

Dietrich, W. E., Kirchner J. W., Ikeda H. & Iseya F. (1989). Sediment supply and the development of the coarse surface layer in gravel-bedded rivers. *Nature* 340(6230): 215-217. <https://doi.org/10.1038/340215a0>.

Friedl F., Kammerer S. Vanzo D., Weitbrecht V., Vetsch D., Boes R. (2017). Grundlagenversuche zur Untersuchung des Zusammenhangs zwischen Geschiebefracht und Morphodynamik in Kiesflüssen. Im Auftrag des Bundesamts für Umwelt BAFU. VAW Bericht 4348. VAW ETH Zürich, 89 S.

Gessler J. (1965). Der Geschiebetriebbeginn bei Mischungen untersucht an natürlichen Abpflasterungserscheinungen in Kanälen. *Mitteilung der Versuchsanstalt für Wasserbau und Erdbau der ETH Zürich, Hydrologie und Glaziologie*, **69**.

Günter A. (1971). Die kritische mittlere Sohlenschubspannung bei Geschiebemischungen unter Berücksichtigung der Deckschichtbildung und der turbulenzbedingten Sohlenschubspannungsschwankungen. *Mitteilung der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich*, **3**. ([PDF](#))

Hanus E., Roulier C., Paccaud G., Bonnard L. & Fragnière Y. (2014): Besoins de valorisation des zones alluviales d'importance nationale. Assainissement du charriage, des débits résiduels, des éclusées. Revitalisation. –Aufwertungsbedarf in den Auen von nationaler Bedeutung - Sanierung von Geschiebehaushalt, Restwasser und Schwall-Sunk. Revitalisierung. *Office fédéral de l'environnement (OFEV)*, Berne. 28 pp. + annexes. ([PDF](#))

Hunziker R., Niedermayer A., Irrniger A., Lehmann C., Gertsch E. & Heim, G. (2014): Abschätzung der mittleren jährlichen Geschiebelieferung in Vorfluter. Praxishilfe. *Bericht im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt*. ([PDF](#))

Leopold, L. B., & Wolman, M. G. (1957). *River channel patterns: braided, meandering, and straight*. US Government Printing Office.

Marti C. (2006): Morphologie von verzweigten Gerinnen. Ansätze zur Abfluss-, Geschiebetransport- und Kolkiefenberechnung. *Mitteilung der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich*, **199**, 282 S. ([PDF](#))

Métivier, F. & L. Barrier (2012). Alluvial Landscape Evolution: What Do We Know About Metamorphosis of Gravel-Bed Meandering and Braided Streams? 474-501.

Montgomery, D. R., & Buffington J. M. (1997): Channel-reach morphology in mountain drainage basins. *Geological Society of America Bulletin* **109.5**, 596-611. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1997\)109%3C0596:CRMIMD%3E2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1997)109%3C0596:CRMIMD%3E2.3.CO;2).

Parker G. (1979). Hydraulic Geometry of Active Gravel Rivers. *Proc. ASCE, J. of Hydr. Div.*, **105(HY9)**, 1185-1201.

Rosgen, D. L. (1994). A classification of natural rivers. *CATENA* 22(3), 169- 199.

Schager, E. & Peter A. (2001): Bachforellensömmerlinge Phase I. *Netzwerk Fischrückgang Schweiz Teilprojekt 00/12*: 321 S.

Schager, E. & Peter A. (2002): Bachforellensömmerlinge Phase II. *Netzwerk Fischrückgang Schweiz Teilprojekt 01/12*: 224 S.

Schager, E. & Peter A. (2004): Methoden zur Untersuchung und Beurteilung der Fließgewässer - Fische Stufe F (flächendeckend). *BAFU Vollzug Umwelt, Mitteilungen zum Gewässerschutz*, **44**: 63 S. ([PDF](#))

Schälchli, U. (1992). The clogging of coarse gravel river beds by fine sediment. *Sediment/Water Interactions: Proceedings of the Fifth International Symposium*. B. T. Hart and P. G. Sly. Dordrecht, Springer Netherlands: 189-197. <https://doi.org/10.1007/BF00026211>.

Schälchli U. (2005): Mathematische Modellierung des Geschiebehaushalts der Thur und des Sitter-Unterlaufs. *VAW 75 JAHRE, Festkolloquium 7. Oktober 2005. Mitteilung der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich*, **190**, 121-135. ([PDF](#))

Schälchli, U., Breitenstein M. & Kirchhofer A. (2010). Kiesschüttungen zur Reaktivierung des Geschiebehaushalts der Aare – die kieslaichenden Fische freut's. *Wasser Energie Luft* 102/3: 209-213.

Schälchli, U. & Hunzinger, L. (2021): Die erforderliche Geschiebefracht. Fachbericht zum Modul «Geschiebehaushalt – Massnahmen» der Vollzugshilfe Renaturierung der Gewässer. *Bericht im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt. Abteilung Wasser*. ([PDF](#))

Schälchli U. & Kirchhofer A. (2012). Sanierung Geschiebehaushalt. Strategische Planung. Ein Modul der Vollzugshilfe Renaturierung der Gewässer. *Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Vollzug Nr. 1226: 74 S.* ([PDF](#))

Schumm, S. A. (1985). Patterns of Alluvial Rivers. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, **13**, 5-27.

Schwindt S., Franca M. J., De Cesare G. & Schleiss A. (2016). Gestaltung effizienter Geschiebesammler anhand physikalischer Modellversuche mit Fallbeispiel. *18. Wasserbausymposium, Wallgau, Germany, 275-284.* ([PDF](#))

Thomas, G., Baumgartner, S., Haertel-Borer, S. (2019): Finanzierung. Merkblatt 6, V1.02. In: *Wirkungskontrolle Revitalisierung – Gemeinsam lernen für die Zukunft*. Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern, 2020.

VAW (2011, nicht publiziert): Alpenrhein Internationale Strecke. Nachhaltiger Hochwasserschutz auf der Flussstrecke der Internationalen Rheinregulierung. Machbarkeitsuntersuchung (11.7.2011). Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich. *VAW 4262-4. Im Auftrag der Internationalen Rheinregulierung.*

Yalin S. & da Silva A.M.F. (2001): Fluvial processes. *IAHR Monograph, IAHR International Association of Hydraulic Engineering and Research*, Delft, The Netherlands.

Zurwerra A, Meile T. & Käser S. (2016): Künstliche Hochwasser. Massnahme zur Beseitigung ökologischer Beeinträchtigungen in Restwasserstrecken unterhalb von Speicherseen. Auslegeordnung Grundlagen & Handlungsbedarf. Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt. ([PDF](#))

Anhang C – Inhalt einer Sanierungsverfügung

Folgende minimalen Anforderungen an die kantonalen Sanierungsverfügungen an die Anlageninhaber werden empfohlen:

- Anordnung der Sanierung, d.h. Sanierungspflicht klar statuieren (Art. 42c Abs. 2 GSchV), mit Bezugnahme auf die beschlossenen strategischen Planungen.
- Verpflichtung zur Ausarbeitung eines Sanierungsprojektes mit möglichst konkreter Vorgabe der Sanierungsziele (Art und Umfang).
- Fristen, innert welcher die Massnahmen projektiert (d.h. Vorlage eines bewilligungsfähigen Dossiers) und die Massnahmen umgesetzt werden müssen.
- Aufforderung zur Ausarbeitung eines Konzepts zur Wirkungskontrolle. Da bereits vor Umsetzung der Massnahme der Ausgangszustand des Gewässers dokumentiert sein muss, ist es sinnvoll, die Wirkungskontrolle bereits im Rahmen der Projektierung zu entwickeln.
- Angaben über notwendige Abstimmung der Massnahmen im Einzugsgebiet.

Wenn mit der vom Kanton durchzuführenden Studie über Art und Umfang von Massnahmen kein Variantenentscheid gefällt wird, sondern das Variantenstudium vom Kraftwerksinhaber durchgeführt werden soll, muss die Verfügung zudem enthalten:

- Frist, bis zu welcher ein Vorschlag für die Bestvariante vorgelegt wird.
- Regelung zum Entscheid über die Bestvariante.

Anhang D – Ansätze zur Bestimmung der Geschiebefracht im Ist- und Naturnahen Zustand

Nachfolgend werden sechs Verfahren zur Abschätzung der Geschiebefrachtvorgestellt (Tabelle D-1). Die Grundlagen sind immer auf ihre Qualität zu prüfen und zu plausibilisieren. Parameter, auf welche die Geschiebefracht sehr sensitiv reagiert (z.B. Korndurchmesser Geschiebe), sind mit Sorgfalt und möglichst grosser Genauigkeit zu erheben.

Ansatz 1 «Entnahmestatistiken» umfasst das Auswerten von verfügbaren Daten zu Kiesentnahmen (aus Fließgewässern, Geschiebesammlern, etc.) und Ablagerungen in Seen (Deltawachstum). Anhand von Kiesentnahmen können die Frachten von Teileinzugsgebieten oft mit hoher Genauigkeit abgeschätzt werden. Diese Frachten können auch als Kalibriergrößen für benachbarte Einzugsgebiete mit ähnlichen Eigenschaften dienen (Ansatz 3). Aufgrund des Deltawachstums oder Kiesentnahmen an Mündungen in Seen (Alpenrhein, Linth) kann die Geschiebefracht ganzer Gewässersysteme bestimmt werden.

Ansatz 2 «Prozessanalysen» umfasst die Erhebung des Geschiebeaufkommens im Gelände. Dabei werden Ereignisfrachten (bei HQ_{300} , HQ_{100} , HQ_{30} , HQ_{10} , HQ_2) in den Seitenzubringern bestimmt und anschliessend auf mittlere Jahresfrachten umgerechnet. Bei längeren Fließstrecken ist der Abrieb zu berücksichtigen. Die Methode liefert robuste Resultate. Das Vorgehen ist in (Hunziker *et al.* 2014) beschrieben. Bei Verfügbarkeit von Kiesentnahmen in Teileinzugsgebieten (Ansatz 1) können die Resultate von Ansatz 2 plausibilisiert und deren Genauigkeit erhöht werden.

Ansatz 3 «Vergleichsgewässer» umfasst das Übertragen der Geschiebefracht von Vergleichsgewässern auf das zu untersuchende (Teil-) Einzugsgebiet oder das Plausibilisieren der im Untersuchungsperimeter ermittelten Geschiebefracht. Dabei sind die für das Geschiebeaufkommen massgebenden Charakteristiken der Einzugsgebiete zu vergleichen und zu werten (Relief, Geologie, Geomorphologie, Bewuchs, Anteil Lockergestein und Konnektivität zum Gerinne etc.). In der Regel wird die spezifische Geschiebefracht unter Berücksichtigung der Einzugsgebietsgrösse abgeschätzt.

Ansatz 4 «Schlüsselstrecken» umfasst die Berechnung der Geschiebefracht in Schlüsselstrecken. Schlüsselstrecken sind Gewässerabschnitte mit der kleinsten Geschiebetransportkapazität innerhalb eines Betrachtungsperimeters. Dabei wird für ein Querprofil oder ein Abschnitt die transportierbare Geschiebefracht berechnet. Bei Gewässern, die sich bezüglich Geschiebetransport in einem Gleichgewichtszustand befinden, entspricht die berechnete Fracht der effektiven Geschiebefracht. Bei Gewässern, die sich im Zustand der latenten Erosion befinden, stellen die berechneten Frachten nur einen oberen Grenzwert dar. Die Berechnung der transportierbaren Geschiebefracht ist mit grossen Unsicherheiten verbunden. Die Anwendung von Ansatz 4 wird daher nur empfohlen, wenn sich ein Gewässer offensichtlich im Gleichgewichtszustand befindet und die sensitiven Parameter zuverlässig ermittelbar sind.

Ansatz 5 «Sohldifferenzen» umfasst das Auswerten von Sohlenveränderungen zwischen verschiedenen Jahren. Mit der Methode wird die Änderung der Geschiebefracht in Fließrichtung bestimmt und nicht die absolute Geschiebefracht. Die Methode eignet sich in langen Auflandungs- oder Erosionsstrecken zur Bestimmung des Längenprofils der Geschiebefracht, ausgehend von einer bekannten Geschiebefracht im Ober- oder Unterwasser. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die resultierende Geschiebefracht nur den Zustand des Gewässers im Zeitraum zwischen den betrachteten

Vermessungen charakterisiert, d.h. meist im Zustand mit Anlagen wie Gewässerverbauungen, Kraftwerken, Kiesentnahmen, etc. und nicht im Naturnahen Zustand.

Ansatz 6 «numerische Modellrechnungen» umfasst die Herleitung des Längenprofils der Geschiebefracht anhand von morphologischen Modellberechnungen. Dabei werden die Geschiebeeinträge in das Modell so gewählt, dass die Sohlenänderungen zwischen zwei Gerinnevermessungen möglichst genau reproduziert werden können. Neben den oft in hoher Genauigkeit zur Verfügung stehenden Grundlagendaten (Querprofile, Abflussganglinie) ist dem sensitiven Parameter Korndurchmesser grosse Aufmerksamkeit zu schenken. Zudem kann die resultierende Geschiebefracht bei Modellen mit verschiedenen Berechnungsansätzen (Transportformel, Schubspannung) stark variieren. Es empfiehlt sich, Modelle mit Einstellungen zu verwenden, die bereits an Gewässern mit bekannter Fracht (z.B. bei vollständiger Kiesentnahme, Ablagerung im Delta) kalibriert und erprobt wurden.

Grundsätzlich sollten zur Bestimmung der Geschiebefracht eine Kombination von mehreren Ansätzen verfolgt werden, weil damit eine grössere Genauigkeit erreicht werden kann. Abhängig von der Einzugsgebietsgrösse und des zu betreibenden Aufwandes ist beispielsweise folgende Kombination von Ansätzen sinnvoll:

- Grobabschätzung der Geschiebefracht im Schnellverfahren: Ansätze 1 und 3 (nur in kleinen Einzugsgebieten und mittelgrossen Einzugsgebieten mit eher geringer Bedeutung empfohlen).
- Robuste Bestimmung der Geschiebefracht mit mittlerem Aufwand: Ansätze 1, 2 und 3 (empfohlen in allen Einzugsgebietsgrössen).
- Zuverlässige und redundante Bestimmung der Geschiebefracht mit grossem Aufwand: Methoden 1, 2, 3 sowie 6, eventuell ergänzt mit Methoden 4 und 5.

Tabelle D-1: Ansätze zur Ermittlung der Geschiebefracht

Die Prozentangaben geben die erreichbare Abweichung (+/-) vom wahrscheinlichen Wert an.

Nr. Ansatz	Grundlagen	Sensitive Parameter (und Genauigkeit der Bestimmung)	Aufwand, Beurteilung und Nutzen des Ansatzes	Genauigkeit Geschiebefracht ¹
1	Entnahmestatistiken Entnahmekubaturen über mehrere Jahre Vermessungen, Luftbilder, etc.	<ul style="list-style-type: none"> • Datenverfügbarkeit (Jahre) und Zuverlässigkeit (10-40%) • Abschätzen Anteil an Gesamtfracht / Durchgängigkeit (10-40%) • Anteil Feinsedimente (10 - 30%) 	Aufwand klein Bei Verfügbarkeit von Daten ist die Auswertung zwingend	gut
2	«Prozessanalysen» Felderhebungen, Karten, Luftbilder etc.	<ul style="list-style-type: none"> • Erkennen der massgebenden Prozesse • Abschätzen Volumen Geschiebeherde (20-40%) • Anteil Feinsedimente (10 - 30%) • Abrieb (10 - 30%) 	Aufwand mittel Liefert robuste Resultate Anwendung sehr empfohlen	gut
3	Vergleichsgewässer Daten von Einzugsgebieten mit ähnlicher Charakteristik des EZG, bei dem robuste und plausibilisierte Geschiebefracht Daten vorliegen	<ul style="list-style-type: none"> • Charakterisierung Einzugsgebiet • Übertragbarkeit 	<ul style="list-style-type: none"> • Aufwand klein • Anwendung sehr empfohlen • Ermöglicht Plausibilisierung der anderen Methoden 	mittel
4	Schlüsselstrecken <ul style="list-style-type: none"> • Querprofile • Gefälle • Dauerkurve • Korndurchmesser • Rauheiten 	<ul style="list-style-type: none"> • Abfluss-Dauerkurve • Korndurchmesser • Gefälle • Transportformel 	Aufwand klein bis mittel Liefert nur oberen Grenzwert (Transportkapazität) -> Fracht kann begrenzt werden Anwendung nur in Strecken im Gleichgewichts- oder Auflandungszustand empfohlen	mittel
5	Sohldifferenzen <ul style="list-style-type: none"> • Querprofile Vermessungen aus mindestens zwei verschiedenen Jahren 	<ul style="list-style-type: none"> • Vergleichbarkeit der Profile (Breite etc.) • Abflüsse in der Periode zwischen Querprofil-Vermessungen 	Aufwand klein - mittel Ergibt nicht absolute Fracht, sondern nur Änderung der Fracht in Fliessrichtung In Auflandungs- und Erosionsstrecken von grösseren Fliessgewässern ev. sinnvoll	gut
6	Numerische Modellberechnungen <ul style="list-style-type: none"> • Querprofile von mindestens zwei Vermessungen • Abflussganglinie der Berechnungsperiode • Korndurchmesser • Rauheiten • Kiesentnahmen 	<ul style="list-style-type: none"> • Korndurchmesser Geschiebe (5-20%) • Korndurchmesser Sohle (5-20%) • Transportformel (bis 50%) • Hydraulik, Schubspannungen (bis 30%) • Kalibriergüte, Abweichungen soll/ist (bis 20%) 	Aufwand gross Bei Kenntnis der GF (Kiesentnahmen, Stauhaltung, Delta, etc.) gute Kalibrierung möglich Ohne Kenntnis der GF ist die zuverlässige Bestimmung der massgebenden Korndurchmesser zwingend -> je nach Anwender und Modelle sind grosse Unterschiede zu erwarten, weil viele Varianten für die Berechnung der Geschiebefracht möglich sind	mittel bis gut

¹ Die absolute Genauigkeit hängt stark davon ab, wie zuverlässig die Grundlagen sind und wie gut die sensitiven Parameter ermittelt werden können.

Anhang E – Methodik zum Bestimmen der erforderlichen Geschiebefracht

E.1 Einleitung

Der vorliegende Anhang erläutert das Vorgehen zur Bestimmung der erforderlichen Geschiebefracht, mit der die Ziele für das Gewässer erreicht werden können. Die Methoden wurden im Rahmen der Erarbeitung des Vollzugshilfemoduls entwickelt. Sie sind mit ihrer Herleitung im Detail in Schälchli und Hunzinger (2021) beschrieben. In diesem Anhang werden sie nur soweit ausgeführt, als es für das Verständnis der Anwendung erforderlich ist.

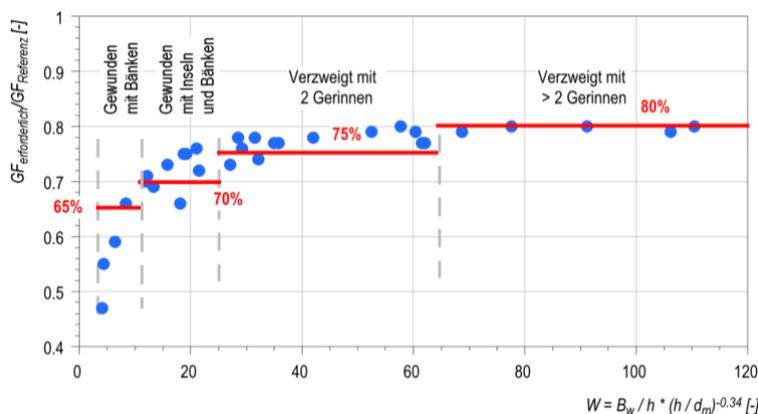
E.2 Methode: Gerinneform

E.2.1 Konzept der Methode

Methode «Gerinneform» ist die Hauptmethode, mit welcher die Geschiebefracht bestimmt wird, die für das Erreichen der morphologischen Ziele erforderlich ist. Sie gründet auf dem Zusammenhang zwischen der Geschiebefracht und der Breite und damit der Gerinneform eines kiesführenden Gewässers. Je grösser die Geschiebefracht in einem Gewässer ist, desto grösser ist seine Breite¹ und je breiter ein Gewässer ist (bei gleichem Abfluss und Gefälle), desto stärker ist es verzweigt.

Es wird also jene Geschiebefracht gesucht, mit der ein Gewässer eine Breite und Gerinneform ähnlich wie im Naturnahen Zustand erreichen kann. Die erforderliche Geschiebefracht wird mit der vorliegenden Methode als Prozentsatz der Fracht im Naturnahen Zustand angegeben. Die Herleitung der Prozentwerte basiert auf den in Schälchli und Hunzinger (2021) hergeleiteten Formeln und deren Anwendung auf mehr als 30 Beispielgewässer (Abbildung E-1).

Abbildung E-1 > Verhältnis der erforderlichen Geschiebefracht zur Geschiebefracht im Naturnahen Zustand in Abhängigkeit der Gerinneform für 30 Gewässer aus Schälchli und Hunzinger (2021).



¹ Wenn die Breitenentwicklung nicht durch Talflanken oder durch Verbauungen eingeschränkt ist.

E.2.2 Vorgehen

Für die Beurteilung werden die folgenden Grundlagen benötigt.

- Historische Karten (erste massstäbliche Karten) und Korrekionspläne, frühe Luftbilder.
- Geschiebefracht im Ist-Zustand (aus Geschiebehauhaltsstudien, Sanierungsplanung Geschiebehauhalt Phase I, Erhebungen im Feld).
- Geschiebefracht im Naturnahen Zustand (Geschiebefracht im Ist-Zustand zuzüglich der Änderung an der Geschiebefracht, welche durch bestehende Anlagen verursacht wird).

Schritt 1: Gerinneform

Aus historischen Karten, Korrekionsplänen und frühen Luftbildern wird die Gerinneform im Naturnahen Zustand visuell bestimmt. Es werden die Gerinneformen von Abbildung 8 (Kap. 3.2.3) unterschieden.

Kritische Einordnung historischer Karten

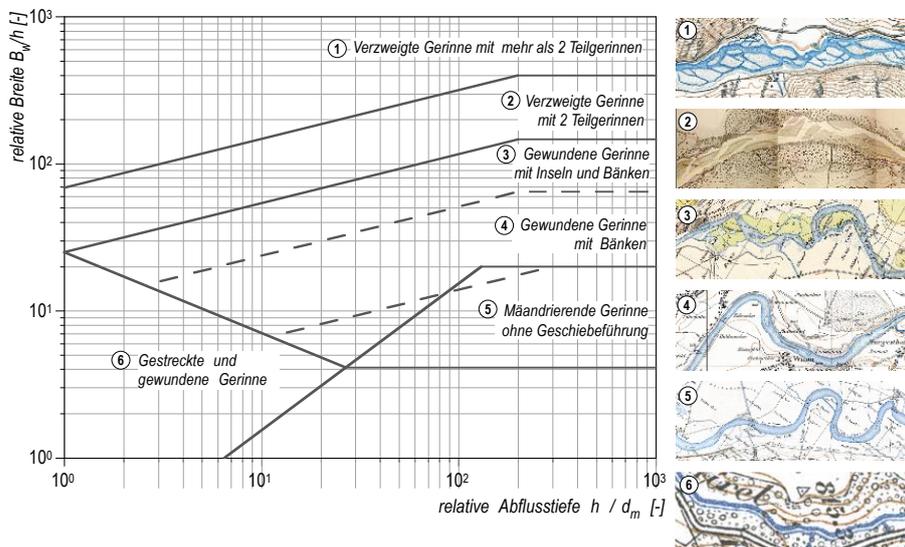
Historische Karten zeigen den Zustand eines Gewässers zum Aufnahmezeitpunkt. Bei der Verwendung der Karten sollten folgende Punkte beachtet werden:

- Zeigt die Karte einen Zustand mit nicht eingeschränkter Breite oder sind die Breite und die Gerinneform durch Verbauungen bereits verändert?
- Kann der dynamische Bereich (benetzter Bereich, Kiesbänke ohne / mit Pioniervegetation) gut vom angrenzenden Bereich (Wald, Streuwiesen, Riede) unterschieden werden? Ist die Unterscheidung plausibel?
- Welche Variation der Breite und der Gerinneform zeigen historische Karten aus verschiedenen Jahren? Sind die Unterschiede auf anthropogene Eingriffe oder auf die Hochwassergeschichte zurückzuführen?
- Sind bei gewundenen Gerinnen Anzeichen von Migration erkennbar?
- Wie stark schwankt die Gerinnebreite in Fließrichtung? Ist die Breite durch geomorphologische Formen eingeschränkt (Schwemmkegel, Bergsturzkegel, anstehende Talflanken)?

Mit einer entsprechenden Analyse der historischen Karten kann der Naturnahe Zustand hergeleitet und Fehlinterpretationen vermieden werden.

Bei Bedarf kann die Gerinneform mit Hilfe des modifizierten Ahmari & Da Silva Diagramms (Abbildung E-2) plausibilisiert und im Übergangsbereich zwischen zwei Gerinneformen eindeutig zugeordnet werden. Dazu sind folgende Eingangsgrößen erforderlich: Gerinnebreite B im Naturnahen Zustand, Sohlgefälle, bettbildender Abfluss HQ_2 und charakteristische Korndurchmesser (d_{90} , d_m) des Sohlenmaterials. Anhand einer Normalabflussberechnung in einem Rechteckgerinne mit Uferauheiten $k_{St(Ufer)} = 21\text{m}^{1/3}/\text{s}$ und Sohlenrauheit $k_{St(Sohle)} = 21/d_{90}^{1/6}$ werden die Abflusstiefe h und anschliessend die relative Breite B/h und die relative Abflusstiefe h/d_m bestimmt.

Abbildung E-2 > Modifiziertes Diagramm von Ahmari & da Silva zur Abgrenzung verschiedener Gerinneformen in Abhängigkeit der relativen Abflusstiefe und der relativen Breite.



Schritt 2: Erforderliche Geschiebefracht:

Die erforderliche Geschiebefracht GF_{ert} wird als prozentualer Anteil der Geschiebefracht im Naturnahen Zustand GF_{nn} bestimmt. Es gelten die Werte von Tabelle E-1 in Abhängigkeit der Gerinneform.

Tabelle E-1 > Vereinfachter Ansatz. Verhältnis der erforderlichen Geschiebefracht (GF_{ert}) zur Geschiebefracht im Naturnahen Zustand (GF_{nn}).

Gerinneform im Naturnahen Zustand	GF_{ert} / GF_{nn}
Verzweigte Gewässer mit mehr als 2 Gerinnen	0.80
Verzweigte Gewässer mit 2 Gerinnen	0.75
Gewundene Gewässer mit Inseln und Bänken	0.70
Gewundene Gewässer mit Bänken	0.65
Gestreckte bis gewundene Gewässer ($J > 3\%$)	0.65

Bei mehrfach verzweigten Gewässern entspricht das 80 % der Fracht im Naturnahen Zustand; bei verzweigten Gewässern sind es 75 %; bei gewundenen Gewässern mit Inseln und Bänken 70%; bei gewundenen Gewässern mit Bänken sowie bei gestreckten bis gewundenen Gewässern 65 %. Damit kommt zum Ausdruck, dass die Gerinneform verzweigter Systeme sensibler auf Geschiebeentzug reagiert als die Gerinneform gewundener und gestreckter Gewässer.

Bei steilen Gerinnen von mehr als 3 % ist die Gerinneform weniger von der Höhe der Geschiebefracht abhängig, sondern vielmehr von den topographischen Verhältnissen (grosses Gefälle, geologisch vorgegebene Talflanken). Die Gerinneform ist gewunden bis gestreckt. Was sich bei Geschiebedefiziten ändert, ist vorrangig die Zusammensetzung des Substrats und die lokalen Sohlenformen im Längenprofil. Als pragmatischer Ansatz kann davon ausgegangen werden, dass die Substratzusammensetzung und die Kiesablagerungen nicht wesentlich beeinträchtigt sind, wenn die Geschiebefracht ≥ 65 % der Geschiebefracht im Naturnahen Zustand erreicht.

E.3 Methode: Substrat

E.3.1 Verteilung von Substrattypen und Kolmation

Das Substrat wird durch die Variabilität der Substrattypen an der Oberfläche und die innere Kolmation beschrieben (vgl. Kap. 3.2.3). Die Variabilität der Substrattypen auf der Sohlenoberfläche ist das Ergebnis von Transport- und Ablagerungsprozessen. Es wird beurteilt, welche Substrattypen vorkommen und wie stark die Sohle kolmatiert ist. Die innere Kolmation wird durch die Infiltration von Feinsedimenten verursacht und durch die Umlagerung der Gewässersohle wieder verringert (Dekolmation). Bei der Bewertung sind die geologischen, glazialen und hydrologischen Eigenschaften des Einzugsgebiets zu berücksichtigen, die einen starken Einfluss auf Substrat und Kolmation haben.

Abbildung E-3 > Kleinräumige morphologische Strukturen mit verschiedenen Substrattypen. Links: naturnaher Zustand (Brenno bei Castro). Rechts: Zustand mit Geschiebedefizit (Sihl, Finsterseebrugg). Fotos Flussbau AG SAH.



Dynamik des Substrats

Die Dynamik von Mikrostrukturen äussert sich in einer Dekolmation der Gewässersohle und einer Änderung der lokalen Zusammensetzung des Substrats. Bei einer Mobilisierung der Deckschicht dekolmatiert die Sohle und die Durchlässigkeit des Substrats erreicht einen Maximalwert. Damit ist die innere Kolmation der Gewässersohle ein geeigneter Parameter zur Beurteilung der Dynamik des Substrats. Damit sich die Zusammensetzung des Substrats lokal wesentlich ändert, ist in der Regel eine Migration des Gerinnes oder eine Verlagerung von Bänken erforderlich.

E.3.2 Vorgehen

Für die Beurteilung werden die folgenden Grundlagen benötigt.

- Kartierung von Substrattypen und Kartierung des Grads der inneren Kolmation.

Bewertungsmuster für die Verteilung der Substrattypen und der Klassen der inneren Kolmation (Abbildung E-4).

Schritt 1: Substrattypen

Erheben des Flächenanteils der fünf Substrattypen im Feld entweder durch flächendeckende Kartierung oder Erhebung in mehreren Transsekten. Die Erhebungen erfolgen bei Niederwasserabfluss und umfassen auch sichtbare benetzte Sohlenbereiche. Für jeden Substrattyp werden die Flächenanteile in Prozent bestimmt und im Histogramm dargestellt. Die Verteilung des Vorkommens der fünf Substrattypen wird anhand der Musterverteilungen von Abbildung E-5 bewertet.

Schritt 2: Innere Kolmation der Sohle

Erhebung des Flächenanteils der fünf Grade der Kolmation im Feld in mehreren Transsekten. Die Erhebungen erfolgen bei Niederwasserabfluss und umfassen trockene Sohlenbereiche. Für jeden Grad der Kolmation werden die Flächenanteile in Prozent bestimmt und im Histogramm dargestellt. Die Verteilung des Vorkommens der fünf Grade wird anhand der Musterverteilungen von Abbildung E-5 bewertet.

Schritt 3: Beurteilen, ob eine Erhöhung der Geschiebefracht notwendig ist

Die in den Schritten 1 und 2 zugeordneten Verteilungen von Substrattypen und Kolmationsgraden werden in der Matrix von Abbildung E-5 eingetragen und das resultierende Schnittfeld bestimmt. Resultieren blaue oder grüne Schnittfelder, sind Geschiebefracht und -dynamik ausreichend. Bei gelben Feldern ist die Geschiebefracht nach Möglichkeit zu erhöhen. Bei roten Feldern ist die Geschiebefracht zwingend zu erhöhen. Mit einer Anpassung der Geschiebefracht wird die Bewertung des Substrats nach oben links verlagert.

Die lachs- und lilafarbenen Flächen E und F stellen Gewässerabschnitte dar, die in der Regel durch andere Prozesse geprägt sind. Fläche E können beispielsweise erodierende und Fläche F auflandende Gewässerabschnitte betreffen. Die Ursachen können natürlicher oder anthropogener Art sein. Eine Ursachenabklärung ist erforderlich.

Schritt 4: Erforderliche Erhöhung der Geschiebefracht

Aufgrund der Beurteilung gemäss Schritt 3 kann die Veränderung des Geschiebehauhalts qualitativ bewertet und das Ausmass der Sanierungsmassnahme eingegrenzt werden. Befindet sich ein Gewässerabschnitt in der Bewertungsmatrix unten rechts, so muss die Geschiebeführung stark erhöht werden. Je weiter oben links sich der Gewässerabschnitt befindet, desto eher kann sich die Massnahmenplanung auf eine moderate Erhöhung der Geschiebeführung beschränken.

Weil die Verteilung der Substrattypen und die innere Kolmation der Sohle im Naturnahen Zustand nicht bekannt sind, kann die erforderliche Geschiebefracht mit dieser Methode nicht quantifiziert werden.

Abbildung E-4 > Beurteilungsmatrix Geschiebehaushalt Anforderung 3: Substrat.

Blau und Grün: Keine Massnahmen. Gelb: Massnahme nach Möglichkeit anordnen. Rot: Massnahme anordnen. E und F: Ursachenabklärung erforderlich

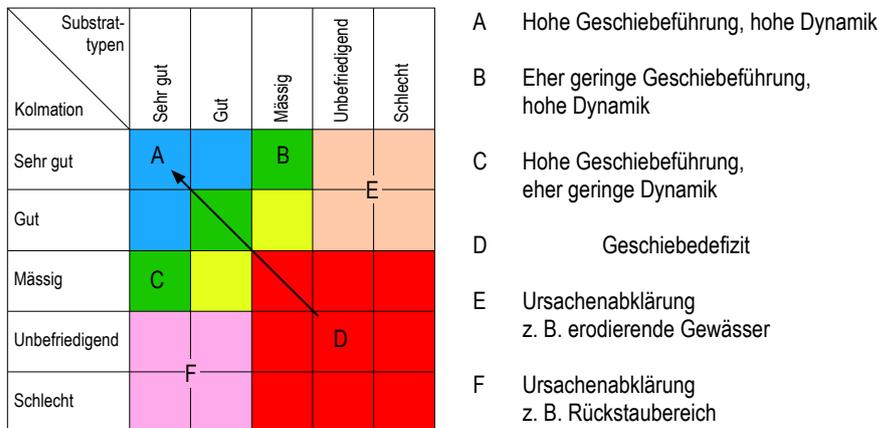
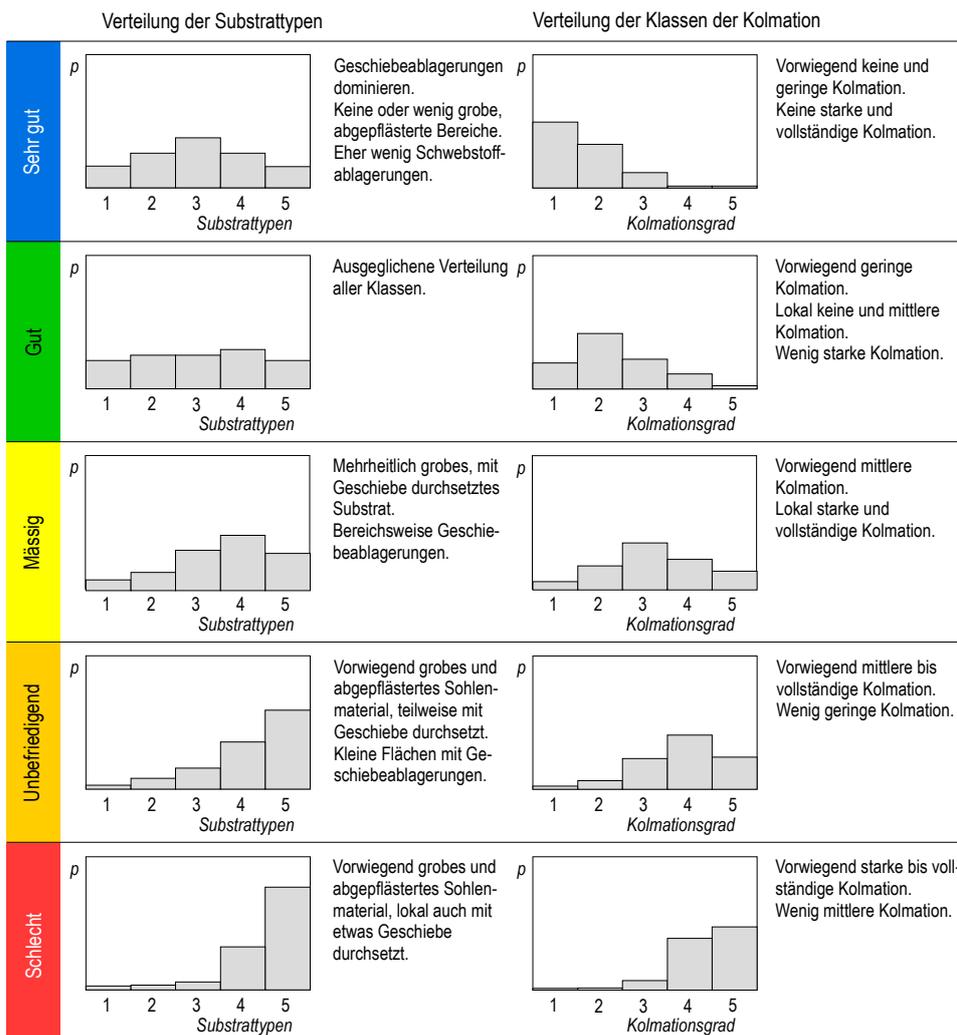


Abbildung E-5 > Bewertung der Verteilung der Substrattypen und des Kolmationsgrades. Die Verteilungskurven sind schematisch dargestellt, die absoluten Verteilungen sind natürlich abhängig von Einzugsgebietseigenschaften.



E.4 Methode Sohlenlage

E.4.1 Vorbemerkung

Wird die mit Methode «Gerinneform» bestimmte erforderliche Fracht erreicht, so kann man davon ausgehen, dass der Grundwasserhaushalt und der Hochwasserschutz durch den veränderten Geschiebehauhalt nicht signifikant beeinflusst werden. Die Anwendung der Methode «Sohlenlage» erübrigt sich dann.

E.4.2 Methode Sohlenlage für das Ziel Grundwasserhaushalt

Hydrogeologische Bedeutung

Für Grundwasservorkommen, die hydraulisch an das Fließgewässer angeschlossen sind, sind die Wasserspiegellage im Gewässer und die Durchlässigkeit der Sohle von grosser Bedeutung. Gewässerkorrekturen und Verbauungen haben diese stark verändert, wodurch auch der Grundwasserspiegel und der Grundwasserhaushalt beeinflusst worden sind. In den meisten Fällen hat sich der Grundwasserspiegel mit zunehmender Sohlenerosion im Gewässer und mit zunehmender Kolmation der Sohle abgesenkt. In der Folge sind Giessen und Feuchtwiesen trockengefallen und torfhaltige Böden haben sich abgesenkt. Grundwassernutzungen, Bauten und Infrastrukturen haben sich oft an diesem anthropogen beeinflussten Zustand orientiert, weshalb die Rückführung in naturnahe Verhältnisse oft nur noch beschränkt möglich ist.

Vorgehen

Für die Beurteilung werden die folgenden Grundlagen benötigt:

- Grundwasserkarten.
- Karten der Aueninventare.
- Beobachtungen von Sohlenveränderungen im Feld (Spuren von Sohlenerosion oder -auflandung).
- Längensprofil des Talwegs der Gewässersohle vor und nach der Realisierung von Anlagen, die zu einer wesentlichen Veränderung des Geschiebehauhalts haben führen können.
- Grundwasserspiegelbeobachtungen vor und nach der Realisierung von Anlagen, die zu einer wesentlichen Veränderung des Geschiebehauhalts haben führen können.

Schritt 1: Grundwasservorkommen

Es wird abgeklärt, ob im Gewässerabschnitt bedeutende Grundwasservorkommen bestehen oder inventarisierte Auengebiete vorkommen. Falls dies nicht der Fall ist, entfällt das Kriterium.

Schritt 2: Beeinträchtigung des Geschiebehauhalts

Es wird beurteilt, ob es in den Gewässerabschnitten ohne Einschränkung der Gerinnebreite zu einer bedeutenden Änderung der Höhenlage des Talwegs infolge verändertem Geschiebehauhalt gekommen ist. Deutet die Feldbegehung sowie die Auswertung allfällig verfügbarer Sohlenvermessungen auf entsprechende Prozesse hin, so sind folgende hydrogeologische Fragen zu klären:

- Hat sich der Grundwasserspiegel infolge der veränderten Sohlenlage signifikant verändert?
- Ist es infolge der Veränderung zu einer wesentlichen Beeinträchtigung des Grundwasserhaushalts gekommen?²

² Eine Beurteilung, ob der Grundwasserhaushalt durch einen veränderten Geschiebehauhalt wesentlich beeinträchtigt wird, ist ohne umfangreiche Modellierungen nur in Gewässerabschnitten ohne Einschränkung der Gerinnebreite möglich.

Falls beide mit «ja» beantwortet werden, so ist eine Sanierung erforderlich.

Schritt 3: Festlegen der erforderlichen Geschiebefracht

Liegt eine wesentliche Beeinträchtigung des Grundwasserhaushalts durch einen veränderten Geschiebehaushalt vor, so sind in langen Flussabschnitten morphologische Modellberechnungen mit verschiedenen Geschiebefrachten durchzuführen. Anhand der Berechnungsergebnisse kann aufgezeigt werden, welche Geschiebefracht zur Stabilisierung der Sohle erforderlich ist. Die erforderliche Geschiebefracht wird nach oben durch die Fracht im Naturnahen Zustand begrenzt.

E.4.3 Methode Sohlenlage für das Ziel Hochwasserschutz

Bedeutung

Eine stabile Sohlenlage mit tolerierbarem Schwankungsbereich, aber ohne Auflandungs- oder Erosionstendenz, ist für den Hochwasserschutz von grosser Bedeutung. Damit können Sohlenerosionen, die zu einer Gefährdung von Anlagen wie Ufersicherungen und Brücken führen können ebenso verhindert werden wie Auflandungen, welche die Abflusskapazität zu stark vermindern.

Vorgehen

Schritt 1: Längenprofile darstellen

Das Längenprofil der Sohle im Istzustand und im Naturnahen Zustand sowie das Längenprofil der Talebene werden dargestellt.

Schritt 2: Längenprofile vergleichen

Es wird beurteilt, ob eine Erhöhung der Geschiebefracht erforderlich ist. Dazu werden aus den Längenprofilen die Längsgefälle von Istzustand, Naturnahen Zustand und das Talgefälle herausgelesen und miteinander verglichen. Falls das Sohlengefälle im Istzustand signifikant flacher als im Naturnahen Zustand und auch flacher als das Talgefälle ist, liegt eine wesentliche Beeinträchtigung des Hochwasserschutzes infolge Reduktion der Geschiebefracht vor. Weil der Geschiebetransport sensibel auf Änderungen des Gefälles reagiert, können bereits kleine Abweichungen von Bedeutung sein.

Schritt 3: Festlegen der erforderlichen Geschiebefracht

Liegt eine wesentliche Beeinträchtigung des Hochwasserschutzes durch einen veränderten Geschiebehaushalt vor, so sind in möglichst langen Flussabschnitten morphologische Modellberechnungen mit verschiedenen Geschiebefrachten durchzuführen. Anhand der Berechnungsergebnisse kann aufgezeigt werden, welche Geschiebefracht zur Stabilisierung der Sohle erforderlich ist. Die erforderliche Geschiebefracht wird (nach oben) durch die Geschiebefracht im Naturnahen Zustand begrenzt.

Anhang F – Hinweise zur Planung, Projektierung und Umsetzung von einzelnen Massnahmenarten

Im Folgenden werden zu einzelnen baulichen (M 1.1 bis M 1.12) und zu betrieblichen Massnahmen (M 2.1 bis M 2.6) Hinweise für die Planung und Projektierung gegeben.

- M 1.1 **Umbau des Stauwehrs** so, dass Geschiebe bei Hochwasser über die Wehrschwelle transportiert werden kann: Der Geschiebetransport über die Wehrschwelle kann zu Abrasion an der Wehrschwelle führen. Die Gefahr der Verklausung durch Treibgut muss beachtet werden.
- M 1.2 **Umbau des Grundablasses** so, dass Geschiebe während Hochwasser bei abgesenktem Staupiegel durch den Grundablass transportiert werden kann: Diese Massnahme ist nur bei sehr kleinen Stauhöhen möglich und sinnvoll. Bei grossen Stauanlagen müsste der See vollständig entleert werden. Die Massnahme muss in Folge dessen mit der betrieblichen Massnahme „Entleeren und spülen“ kombiniert werden. Dabei muss die Auswirkung einer erhöhten Schwebstoffkonzentration im Unterwasser (Trübung, Kolmation) beachtet werden. Der Geschiebetransport durch den Grundablass kann zu Abrasion der Anlage führen.
- M 1.3 Erstellen eines **Geschiebeumleitstollens** oder eines Gerinnes zur Umleitung von Geschiebe: Der Geschiebetransport durch einen Stollen kann zu Abrasion im Stollen führen. Die Gefahr der Verklausung durch Treibgut muss beachtet werden.
- M 1.4 **Umbau des Auslaufbauwerks** so, dass das Becken erst bei seltenen Hochwasserabflüssen eingestaut wird: Häufige kleinere Hochwasser sollen ohne Rückstau durch das Becken fliessen können. Zu durchgängigen Geschiebesammlern hat die EPFL Lausanne geforscht und Bemessungsgrundlagen publiziert (z.B. Schwindt *et al.*, 2016).
- M 1.5 **Bau einer Abflussrinne im Geschiebesammler** mit ausreichender Geschiebetransportkapazität bei kleinen Hochwasserereignissen: Geschiebe soll sich dann nur bei grossen Hochwasserabflüssen ablagern, wenn die Rinne überläuft. Beim Betrieb ist zu beachten, dass die Abflussrinne nach Ablagerungen durch mittlere Hochwasserereignisse gegebenenfalls geräumt werden muss, auch wenn im Sammler noch ausreichend Platz für die Ablagerung bei grossen Hochwasserereignissen vorhanden wäre. Die Massnahme kann in Kombination mit M 1.4 durchgeführt werden. Zu durchgängigen Geschiebesammlern hat die EPFL Lausanne geforscht und Bemessungsgrundlagen publiziert (z.B. Schwindt *et al.*, 2016).
- M 1.6 **Anpassen der Anordnung von Rechenstäben**: Die Rechenstäbe in einem Geschiebe- oder Schwemmholzrückhalt können nur auf einem Teil des Abflussquerschnitts angeordnet werden, so dass Geschiebe mit dem Abfluss im freien Abflussquerschnitt transportiert wird.
- M 1.7 **Bauliche Hochwasserschutzmassnahmen** entlang des Gewässers: Bauliche Hochwasserschutzmassnahmen (z. B. Hochwasserschutzdämme) dienen als permanente Alternative zu Kiesentnahmen.
- M 1.8 **Rückbau von Querbauwerken** und Zulassen von Sohlenerosion: Mit dem Entfernen von Schwellen wird die Sohlenlage abgesenkt. Es kann ein grösseres Längsgefälle toleriert

werden, bei welchem mehr Geschiebe transportiert wird. Kiesentnahmen zum Schutz vor Hochwasser sind nicht mehr oder nur noch in geringerer Masse notwendig. Die Massnahme bietet sich im Oberlauf von Gewässern des Mittellandes oder der Voralpen an. In Wildbächen der Alpen gibt es oft keine verhältnismässige Alternative zur Sohlensicherung mittels Querbauwerken. Als begleitende bauliche Massnahmen müssen gegebenenfalls die Fundationen von Ufersicherungen angepasst werden.

- M 1.9 **Rückbau von Ufersicherungen und Zulassen von Seitenerosion:** Mit Seitenerosion wird die Geschiebeführung in einem Gewässer nur dort erhöht, wo durch die Erosion Kies aus einer hohen Schotterterrasse, einem Schwemmkegel oder aus einer Nagelfluhwand mobilisiert werden kann. Bei der Erosion einer niedrigen alluvialen Uferböschung wird an dem der Erosionsstelle gegenüberliegenden Ufer Geschiebe abgelagert, so dass die Gesamtbilanz ausgeglichen ist.
- M 1.10 **Beseitigen von Engstellen im Gerinne:** Engstellen, welche durch einen Rückstau bei Hochwasser die Ablagerung von Geschiebe verursachen, können gegebenenfalls beseitigt werden.
- M 1.11 **Errichten eines Geschiebeablagerungsplatzes im Nebenschluss:** Mit der gezielten Ablagerung von Geschiebe flussaufwärts der Entnahmestelle, z. B. in einem Geschiebeablagerungsplatz im Nebenschluss, kann die Belastung eines Gewässerabschnittes mit Geschiebe bei grossen Hochwasserabflüssen vermindert werden.
- M 1.12 **Rückbau der Anlage:** Bei allen Anlagentypen ist auch ein Rückbau der Anlage als Massnahme denkbar, sofern dies verhältnismässig ist.
- M 2.1 **Absenken des Staupegels bei Hochwasser:** Die Massnahme ist bei Wehranlagen geeignet, bei denen Geschiebe über die Wehrschwelle transportiert werden kann. Gegebenenfalls muss die Anlage umgebaut werden (M 1.1). Der Geschiebetransport über die Wehrschwelle kann zu Abrasion an der Wehrschwelle führen. Die Gefahr der Verklausung durch Treibgut muss beachtet werden.

Die Planung kann folgende Schritte enthalten:

- 1) Technische Machbarkeit prüfen
- 2) Randbedingungen für Staupegelabsenkungen ermitteln
- 3) Die Wirkung von Absenkszenarien ermitteln
- 4) Pilotversuche durchführen

Randbedingungen, welche das Ausmass von Staupegelabsenkungen beeinflussen können, sind: das bestehende Wehrreglement, die Stabilität von Uferböschungen, die Mobilisierung von Schadstoffen aus dem Stauraum, das Trockenfallen von Flachwasserzonen, die Trübung im Unterwasser, bestehende Freizeitnutzungen.

- M 2.2 **Stauraumspülungen und Entleerungen optimieren:** Der Stauraum muss bei Hochwasser abgesenkt werden, damit das Geschiebe von der Stauwurzel bis zum Grundablass transportiert werden kann. Die Spülung muss mit Unterliegern (Kraftwerken, Freizeitanlagen, etc.) abgesprochen sein. Bestehende Vorgaben für Stauraumspülungen müssen beachtet werden, damit insbesondere die Schwebstoffkonzentration im Unterwasser der Anlage wenig Auswirkungen hat (Trübung, Kolmation). Die Massnahme kann in Kombination mit der baulichen Massnahme Umbau des Grundablasses (M 1.2) umgesetzt werden.

- M 2.3 **Den Stauraum oder den Geschiebesammler mit Geschiebe verlanden** lassen, bis die Kontinuität wiederhergestellt ist: Bei grösseren Stauhaltungen dauert es sehr lange, bis der Stauraum verfüllt ist. Potenzielle Auswirkungen auf die Hochwassersicherheit müssen geprüft werden. Die Massnahmen kann deshalb mit temporären Kiesschüttungen im Unterwasser der Stauanlage (M 2.4) kombiniert werden.
- M 2.4 **Kiesschüttung im Unterwasser:** Kies sollte nur im Unterwasser zugegeben werden, wenn Massnahmen zum Durchleiten von Geschiebe durch die Anlage nicht machbar oder unverhältnismässig sind. Der Kies muss sich für die Zugabe eignen, d. h.: Die Korngrössenverteilung des zugegebenen Materials muss der natürlichen Verteilung des Geschiebes entsprechen. Gewässereigener Kies oder aus nahen Gewässern ist Kies aus Kieswerken zu bevorzugen. Es ist zu klären, ob das Risiko der Verschleppung invasiver Arten besteht.
Der Zeitpunkt der Zugabe muss auf die Fischschonzeiten abgestimmt sein. Das Intervall von Schüttungen soll so optimiert werden, dass Geschiebe regelmässig zum Weitertransport zur Verfügung steht und dass gleichzeitig möglichst selten Störungen durch die Schüttung verursacht werden. Die Schüttjahre und Schüttmengen können auch in Abhängigkeit der verfügbaren Geschiebemengen flexibel festgelegt werden, sodass die erforderliche Geschiebefracht im Mittel erreicht wird.
Als begleitende bauliche Massnahmen muss unter Umständen eine Dauerhafte Zufahrt zur Entnahme- und zur Zugabestelle errichtet werden.
- M 2.5 **Künstliche Hochwasser:** In Restwasserstrecken können künstliche Hochwasser zur Umlagerung von Geschiebe und zur Dekolmation der Sohle dotiert werden. Bei ungenügender Geschiebelieferung sind Kieszugaben erforderlich, um Abpflasterung und Erosion der Sohle zu verhindern. Wenn möglich sollen Synergien mit Stauraumspülungen genutzt werden. Hinweise zur Planung von künstlichen Hochwassern finden sich in der Auslegeordnung zu künstlichen Hochwassern von Zurwerra *et al.* (2016).
- M 2.6 **Entnahme reduzieren oder ganz einstellen:** Einrichtungen zur Entnahme sollen gleichzeitig zurück gebaut werden (M 1.12).

Anhang G – Checkliste: Studie über Art und Umfang der Massnahmen

Die inhaltlichen Anforderungen an die Studie über Art und Umfang von Massnahmen sind:

Ist- und Naturnahen Zustand des Gewässers (Arbeitsschritt 1)

- Eine Beschreibung der Morphologie (Gerinneform, Sohlenform und Substrat) des Gewässers im Naturnahen Zustand und im Ist-Zustand.
- Eine Liste der Anlagen, welche die Geschiebefracht im Ist-Zustand gegenüber der Fracht im Naturnahen Zustand beeinflussen mit Angaben darüber, um welches Mass die Geschiebefracht von den Anlagen reduziert wird.
- Ein Längsprofil der Geschiebefracht im Naturnahen und im Ist-Zustand (Geschiebetransportdiagramm).
- Eine Beschreibung des Defizits in der Geschiebeführung im Ist-Zustand gegenüber der Geschiebeführung im Naturnahen Zustand.

Ziele für das Gewässer und die erforderliche Geschiebefracht (Arbeitsschritt 2)

- Eine Beschreibung der im Zielzustand angestrebten morphologischen Strukturen (Gerinneform, Kiesablagerungen und Substrat).
- Die Geschiebefracht, die in den Gewässerabschnitten erforderlich ist, um diese Ziele zu erreichen (Darstellung im Geschiebetransportdiagramm).
- Die Geschiebefracht, die erforderlich ist, um den Hochwasserschutz und den Grundwassershaushalt nicht zu beeinträchtigen (Darstellung im Geschiebetransportdiagramm).

Das Sanierungsziel für Anlagen (Arbeitsschritt 3)

- Eine konkrete Vorgabe zur Geschiebefracht im Unterwasser einer Anlage. Angabe als Geschiebevolumen in m³ pro Jahr, welches unterhalb der Anlage im Gewässer transportiert werden soll, oder
- eine Vorgabe zur Häufigkeit von Geschiebetransportereignissen. Angabe als Anzahl Ereignisse pro Jahr, an denen im Unterwasser der Anlage Geschiebe transportiert werden soll.

Einen Massnahmenkatalog (Arbeitsschritt 4)

- Eine Liste von baulichen und betrieblichen Massnahmen für jede der zu sanierenden Anlagen im Gewässersystem.
- Eine Beschreibung der Wirkung der Massnahmen in Bezug auf die Beurteilungskriterien.
- Eine Kostenschätzung für die Massnahmen.

Eine Bewertung von Massnahmenvarianten (Arbeitsschritt 5)

- Eine Liste von Varianten mit Erläuterungstext
- Erläuterung der Bewertungskriterien
- Ausgefüllte Bewertungsmatrix

Die Bestvariante (Arbeitsschritt 6)

- Eine Begründung für die Wahl der Bestvariante.
- Eine Einschätzung der absoluten Verhältnismässigkeit der Bestvariante.

Koordination mit anderen Massnahmen am Gewässer (Arbeitsschritt 7)

- Eine Liste mit weiteren Massnahmen im Einzugsgebiet und den möglichen Synergien und Opportunitäten mit den Massnahmen zur Sanierung des Geschiebehaushalts.

Konzept der Wirkungskontrolle (Arbeitsschritt 8)

- Ein Vorgehen zur Funktionskontrolle.
- Eine Liste der gewählten Indikatoren und eine Begründung für deren Wahl.
- Eine Bezeichnung der Untersuchungsabschnitte inkl. Vergleichsstrecken.
- Einen Zeitplan für die Erhebungen inkl. der Nullmessung.
- Die voraussichtlichen Kosten der Wirkungskontrolle.
- Die Koordination mit Wirkungskontrollen bei anderen Massnahmen.

Anhang H – Indikatoren für die Wirkungskontrolle

H.1 Indikatoren

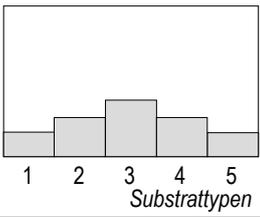
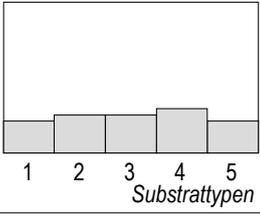
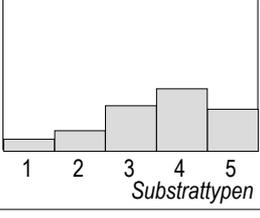
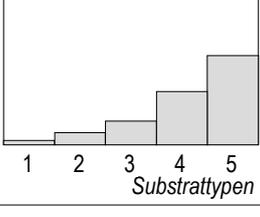
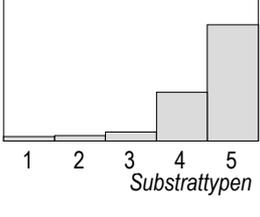
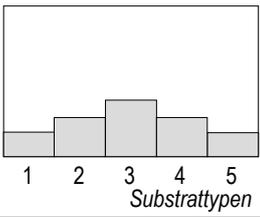
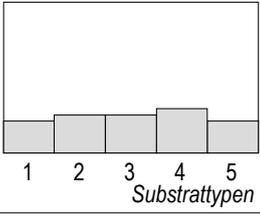
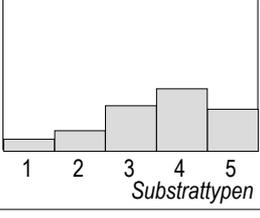
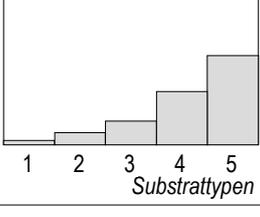
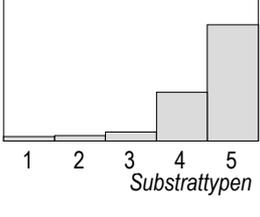
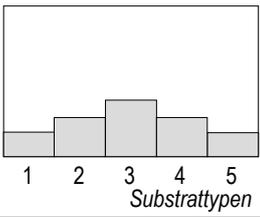
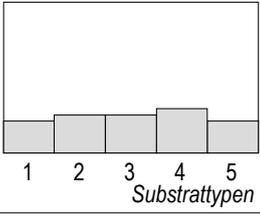
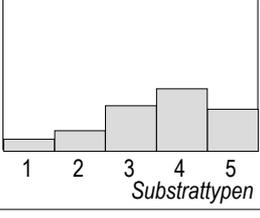
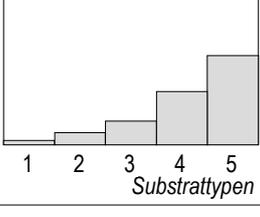
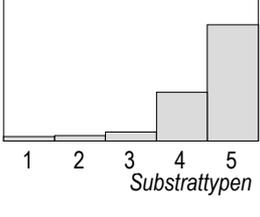
H.1.1 Abiotische Indikatoren

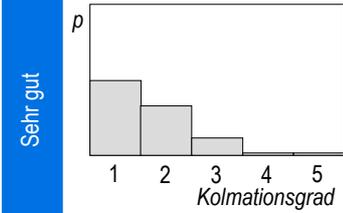
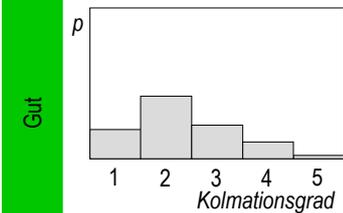
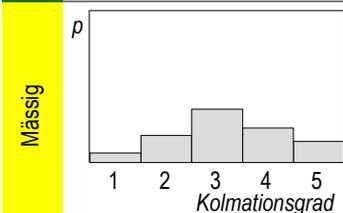
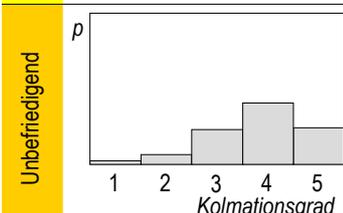
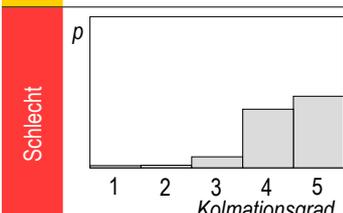
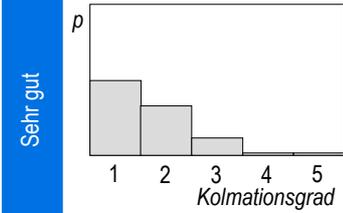
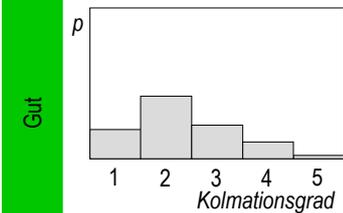
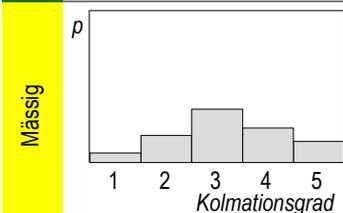
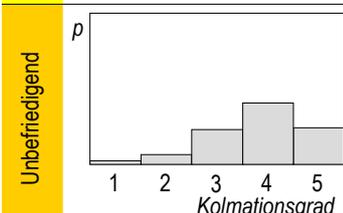
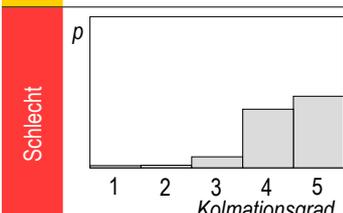
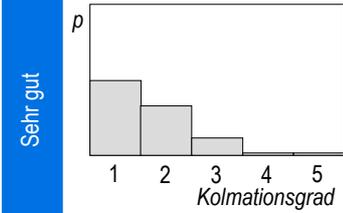
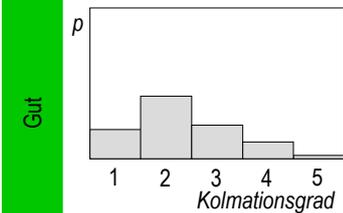
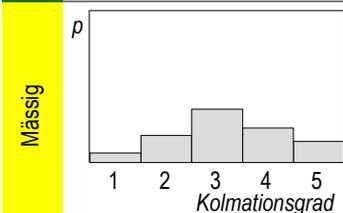
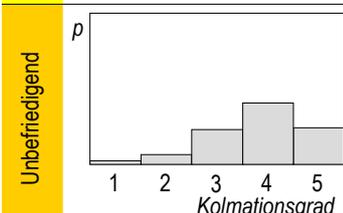
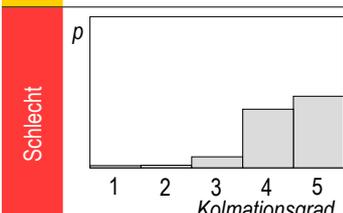
Indikator	A1 Ablagerungen in der Anlage oder an Zugabestellen	
Erhebungsmethode	<ul style="list-style-type: none"> Vermessen von Querprofilen im unmittelbaren Wirkungsbereich der Massnahme (Zugabestelle o.ä.) Prüfen, ob Geschiebe nicht mehr zurückgehalten wird oder ob zugegebenes Geschiebe weiter transportiert wurde. 	
Zeitpunkt der Erhebung	Bei Niedrigwasser	
Besonderheiten	Je nach Massnahme wird der Nachweis an unterschiedlichen Stellen im Gewässer erbracht: <ul style="list-style-type: none"> Geschiebe durch Wehr durchleiten (M 1.1, M 1.2, M 2.1, M 2.2): An der Stauwurzel Bau eines Geschiebeumleitstollen: (M 1.3): An der Stauwurzel Kiesschüttung im Unterwasser (M 2.4): An der Zugabestelle Umbau Geschiebesammler (M 1.4, M 1.5, M 1.6): Im Geschiebesammler Künstliche Hochwasser in Ausleitstrecken (M 2.5): An der Sohle und den Ufern der Ausleitstrecke 	
Bewertung	Zustand	effektive Geschiebefracht [m ³ /a]
	Gut	keine Ablagerungen mehr oder alles Geschiebe wurde weiter verfrachtet
	Mässig	weiterhin Ablagerungen aber in geringem Umfang oder nur ein Teil des Geschiebes wurde weiter verfrachtet
	Schlecht	Ablagerungen unverändert oder Geschiebe wurde nicht weiter verfrachtet.

Indikator	A2 Geschiebefracht	
Erhebungsmethode	<ul style="list-style-type: none"> Vermessen von Querprofilen an neuralgischen Stellen Bestimmen der effektiven Geschiebefracht (mehrfähriger Durchschnitt) durch eine Bilanzierung von Sohlenveränderungen und Geschiebezugaben indirekte Geschiebemessungen (z.B. Geophone) 	
Zeitpunkt der Erhebung	Bei Niedrigwasser, bei indirekten Geschiebemessungen kontinuierlich	
Besonderheiten	Die Sohlenveränderung in Querprofilen sollte auch im Feld visuell überprüft werden.	
Bewertung	Zustand	effektive Geschiebefracht [m ³ /a]
	Sehr gut	≥ Geschiebefracht im Naturnahen Zustand
	Gut	= erforderliche Geschiebefracht
	Mässig	< erforderliche Geschiebefracht
	Unbefriedigend	< 50 % der erforderlichen Geschiebefracht
	Schlecht	≈ 0

Indikator	A3 Gerinneform	
Erhebungsmethode	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Bestimmen der Gerinneform visuell durch Feldbegehung oder aus aktuellen Luftbildern, ▪ Bestimmen der Sohlenbreite durch Feldbegehung oder aus aktuellen Luftbildern, ▪ Bestimmen der Korngrössenverteilung bzw. des Korndurchmessers d_m mit Hilfe von Linienzahlanalysen, ▪ Berechnen der Abflusstiefe bei HQ_2 und Bestimmen der Wasserspiegelbreite B_W (in erster Näherung gleich der Sohlenbreite). ▪ Überprüfen der visuell bestimmten Gerinneform mit Hilfe der Wertepaare $(B_W/h; h/d_m)$ im Diagramm von Ahmari & da Silva und vergleichen mit der Gerinneform im Naturnahen Zustand. 	
Zeitpunkt der Erhebung	Felderhebungen und Luftbilder bei Niedrigwasser	
Besonderheiten	Im Ist-Zustand kann der massgebliche Querschnitt für die Bestimmung der Breite und Abflusstiefe aus vermessenen Querprofilen bestimmt werden.	
Bewertung	Zustand	Gerinneform (Typen gemäss Kapitel 3.2.3)
	Sehr gut	Eindeutig gleiche Gerinneform wie im Naturnahen Zustand $B_W/h = B_W/h_{nn}$
	Gut	Gleiche Gerinneform wie im Naturnahen Zustand oder im Übergangsbereich zur nächsten Gerinneform ($B_W/h \leq B_W/h_{nn}$)
	Mässig	–
	Unbefriedigend	Gerinneform deutlich anders als im Naturnahen Zustand ($B_W/h \ll B_W/h_{nn}$)
	Schlecht	Mäandrierende Gerinne ohne Geschiebeführung

Indikator	A4 Ausdehnung und Mächtigkeit von Geschiebeablagerungen	
Erhebungsmethode	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Vermessen der Ausdehnung von Kiesbänken in m^2 mittels Profilen oder aus aktuellen Luftbildern und Vergleich mit der Fläche im Naturnahen Zustand. ▪ Bestimmen der Mächtigkeit von Kiesbänken aus dem Vergleich von Querprofilaufnahmen verschiedener Jahre. 	
Zeitpunkt der Erhebung	Bei Niedrigwasser	
Besonderheiten	Die Bewertung ist qualitativ und auch abhängig davon, wie genau die Ausdehnung im Naturnahen Zustand bestimmt werden kann.	
Bewertung	Zustand	Ausdehnung Kiesbänke
	Sehr gut	Gleich wie im Naturnahen Zustand
	Gut	Ausdehnung ähnlich wie im Naturnahen Zustand (> 60%)
	Mässig	Ausdehnung wesentlich geringer als im Naturnahen Zustand (< 60%)
	Unbefriedigend	Ausdehnung viel geringer als im Naturnahen Zustand (< 30%)
	Schlecht	≈ 0

Indikator	A5 Substrattypen																		
Erhebungsmethode	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Erheben des Vorkommens der Substrattypen im Feld entweder durch flächendeckende Kartierung oder Erhebung in mehreren Transekten. Es werden auch sichtbare, benetzte Bereiche der Sohle erhoben. ▪ Bestimmen der Flächenanteile der Substrattypen in Prozent und darstellen im Histogramm. 																		
Zeitpunkt der Erhebung	Bei Niedrigwasser																		
Bewertung	<table border="0" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 10%;"></th> <th style="width: 40%; text-align: center;">Verteilung der Typen</th> <th style="width: 50%; text-align: center;">Qualitativ</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="background-color: #0070C0; color: white; text-align: center; vertical-align: middle;">Sehr gut</td> <td style="text-align: center;">  </td> <td style="vertical-align: top;"> <p>Geschiebeablagerungen dominieren. Keine oder wenig grobe, abgeplästerte Bereiche. Eher wenig Schwebstoffablagerungen</p> </td> </tr> <tr> <td style="background-color: #00B050; color: white; text-align: center; vertical-align: middle;">Gut</td> <td style="text-align: center;">  </td> <td style="vertical-align: top;"> <p>Ausgeglichene Verteilung aller Klassen.</p> </td> </tr> <tr> <td style="background-color: #FFD700; color: black; text-align: center; vertical-align: middle;">Mässig</td> <td style="text-align: center;">  </td> <td style="vertical-align: top;"> <p>Mehrheitlich grobes, mit Geschiebe durchsetztes Substrat. Bereichsweise Geschiebeablagerungen.</p> </td> </tr> <tr> <td style="background-color: #FFA500; color: black; text-align: center; vertical-align: middle;">Unbefriedigend</td> <td style="text-align: center;">  </td> <td style="vertical-align: top;"> <p>Vorwiegend grobes und abgeplästertes Sohlenmaterial, teilweise mit Geschiebe durchsetzt. Kleine Flächen mit Geschiebeablagerungen.</p> </td> </tr> <tr> <td style="background-color: #FF0000; color: white; text-align: center; vertical-align: middle;">Schlecht</td> <td style="text-align: center;">  </td> <td style="vertical-align: top;"> <p>Vorwiegend grobes und abgeplästertes Sohlenmaterial, lokal auch mit etwas Geschiebe durchsetzt.</p> </td> </tr> </tbody> </table>		Verteilung der Typen	Qualitativ	Sehr gut		<p>Geschiebeablagerungen dominieren. Keine oder wenig grobe, abgeplästerte Bereiche. Eher wenig Schwebstoffablagerungen</p>	Gut		<p>Ausgeglichene Verteilung aller Klassen.</p>	Mässig		<p>Mehrheitlich grobes, mit Geschiebe durchsetztes Substrat. Bereichsweise Geschiebeablagerungen.</p>	Unbefriedigend		<p>Vorwiegend grobes und abgeplästertes Sohlenmaterial, teilweise mit Geschiebe durchsetzt. Kleine Flächen mit Geschiebeablagerungen.</p>	Schlecht		<p>Vorwiegend grobes und abgeplästertes Sohlenmaterial, lokal auch mit etwas Geschiebe durchsetzt.</p>
	Verteilung der Typen	Qualitativ																	
Sehr gut		<p>Geschiebeablagerungen dominieren. Keine oder wenig grobe, abgeplästerte Bereiche. Eher wenig Schwebstoffablagerungen</p>																	
Gut		<p>Ausgeglichene Verteilung aller Klassen.</p>																	
Mässig		<p>Mehrheitlich grobes, mit Geschiebe durchsetztes Substrat. Bereichsweise Geschiebeablagerungen.</p>																	
Unbefriedigend		<p>Vorwiegend grobes und abgeplästertes Sohlenmaterial, teilweise mit Geschiebe durchsetzt. Kleine Flächen mit Geschiebeablagerungen.</p>																	
Schlecht		<p>Vorwiegend grobes und abgeplästertes Sohlenmaterial, lokal auch mit etwas Geschiebe durchsetzt.</p>																	

Indikator	A6 Innere Kolmation der Gewässersohle																			
Erhebungsmethode	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Bestimmen der inneren Kolmation im Feld in mehreren Transekten. ▪ Darstellen der prozentualen Flächenanteile der fünf Klassen der Kolmation im Histogramm. 																			
Zeitpunkt der Erhebung	Bei Niedrigwasser																			
Bewertung	<table border="0" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 10%;"></th> <th style="width: 40%; text-align: center;">Verteilung der Klassen</th> <th style="width: 50%; text-align: center;">Qualitativ</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="background-color: #0070C0; color: white; text-align: center; vertical-align: middle;">Sehr gut</td> <td style="text-align: center;">  </td> <td style="vertical-align: top;"> Vorwiegend keine und geringe Kolmation. Keine starke und vollständige Kolmation. </td> </tr> <tr> <td style="background-color: #00B050; color: white; text-align: center; vertical-align: middle;">Gut</td> <td style="text-align: center;">  </td> <td style="vertical-align: top;"> Vorwiegend geringe Kolmation. Lokal keine und mittlere Kolmation. Wenig starke Kolmation. </td> </tr> <tr> <td style="background-color: #FFD700; color: black; text-align: center; vertical-align: middle;">Mässig</td> <td style="text-align: center;">  </td> <td style="vertical-align: top;"> Vorwiegend mittlere Kolmation. Lokal starke und vollständige Kolmation. </td> </tr> <tr> <td style="background-color: #FFA500; color: black; text-align: center; vertical-align: middle;">Unbefriedigend</td> <td style="text-align: center;">  </td> <td style="vertical-align: top;"> Vorwiegend mittlere bis vollständige Kolmation. Wenig geringe Kolmation. </td> </tr> <tr> <td style="background-color: #FF0000; color: white; text-align: center; vertical-align: middle;">Schlecht</td> <td style="text-align: center;">  </td> <td style="vertical-align: top;"> Vorwiegend starke bis vollständige Kolmation. Wenig mittlere Kolmation. </td> </tr> </tbody> </table>			Verteilung der Klassen	Qualitativ	Sehr gut		Vorwiegend keine und geringe Kolmation. Keine starke und vollständige Kolmation.	Gut		Vorwiegend geringe Kolmation. Lokal keine und mittlere Kolmation. Wenig starke Kolmation.	Mässig		Vorwiegend mittlere Kolmation. Lokal starke und vollständige Kolmation.	Unbefriedigend		Vorwiegend mittlere bis vollständige Kolmation. Wenig geringe Kolmation.	Schlecht		Vorwiegend starke bis vollständige Kolmation. Wenig mittlere Kolmation.
	Verteilung der Klassen	Qualitativ																		
Sehr gut		Vorwiegend keine und geringe Kolmation. Keine starke und vollständige Kolmation.																		
Gut		Vorwiegend geringe Kolmation. Lokal keine und mittlere Kolmation. Wenig starke Kolmation.																		
Mässig		Vorwiegend mittlere Kolmation. Lokal starke und vollständige Kolmation.																		
Unbefriedigend		Vorwiegend mittlere bis vollständige Kolmation. Wenig geringe Kolmation.																		
Schlecht		Vorwiegend starke bis vollständige Kolmation. Wenig mittlere Kolmation.																		

Indikator	A7 Veränderung der mittleren Sohlenlage		
Erhebungsmethode	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Vermessen von Querprofilen. ▪ Bestimmen der Lage der mittleren Sohle und darstellen des Längsprofils der mittleren Sohle. ▪ Vergleich mit dem Längsprofil im Ausgangs-Zustand, mit dem Längsprofil im Naturnahen Zustand und mit dem Tal-Längsprofil. 		
Zeitpunkt der Erhebung	Bei Niedrigwasser		
Besonderheiten	Es wird unterschieden zwischen der Bewertung in Abschnitten ohne Einschränkung der Gerinnebreite und ohne potenziellen Schutzdefizite und kanalisiertem Abschnitt mit eingeschränkter Sohlenbreite und potenziellen Hochwasserschutzdefiziten.		
Bewertung	Zustand	Längsgefälle	
		ohne Einschränkung der Gerinnebreite	mit Einschränkung der Gerinnebreite
	Sehr gut	–	–
	Gut	≈ Längsgefälle im Naturnahen Zustand	< Talgefälle
	Mässig	< Längsgefälle im Naturnahen Zustand	≈ Talgefälle
	Unbefriedigend	<< Längsgefälle im Naturnahen Zustand	> Talgefälle
	Schlecht		

Indikator	A8 Veränderung der Höhenlage des Talwegs	
Erhebungsmethode	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Vermessen von Querprofilen. ▪ Bestimmen der Höhenlage des Talwegs und darstellen im Längsprofil. ▪ Vergleich des Längsprofils mit dem Längsprofil im Ausgangszustand. 	
Zeitpunkt der Erhebung	Bei Niedrigwasser	
Besonderheiten	<p>Der Talweg wird als Proxi-Indikator verwendet, um den Einfluss der Geschiebeführung auf den Grundwasserspiegel aufzuzeigen. Der Proxi-Indikator kann dort angewandt werden, wo der Grundwasserspiegel direkt mit dem Wasserspiegel des Fliessgewässers korrespondiert.</p> <p>Der Talweg interessiert in freien Fliessstrecken ohne Einschränkung der Sohlenbreite durch Uferverbauungen.</p>	
Bewertung	Zustand	Lage des Talwegs
	Sehr gut	–
	Gut	Lage des Talwegs höher als im Ausgangszustand
	Mässig	Lage des Talwegs gegenüber dem Ausgangszustand unverändert.
	Unbefriedigend	Lage des Talwegs tiefer als im Ausgangszustand
		Schlecht

H.1.2 Biotische Indikatoren

Vom Geschiebehauhalt direkt betroffen sind insbesondere kieslaichende Fischarten, die ihre Eier in der Kiessohle ablegen. Damit sich Eier und Embryonen richtig entwickeln können, muss die Kiessohle locker und gut durchströmt sein, damit die permanente Sauerstoffversorgung von Eiern und Embryonen gewährleistet ist. Die direkte Erhebung der Bestandesgrösse der Fischfauna ist speziell in grossen Flüssen kaum möglich. Zudem ist der Gesamtbestand der Fischarten in einem Gewässerabschnitt von vielen verschiedenen Faktoren abhängig (Abflussgeschehen, Befischungintensität, Besatzmassnahmen, Temperaturbedingungen, Prädatorenhäufigkeit etc.). Deshalb ist im Rahmen der Wirkungskontrolle vor allem der Fortpflanzungserfolg kieslaichender Arten zu untersuchen. Dieser ist auch direkt abhängig vom Zustand der Flusssohle und vom Geschiebehauhalt. Je nach fischbiologischer Region sind einer oder mehrere der nachfolgend aufgeführten Indikatoren für die Wirkungskontrolle geeignet.

In Gewässern der Brachsmenregion ist der Geschiebehauhalt weniger relevant, da das Substrat sandig ist und lithophile Fischarten kaum noch vorkommen. Auf die Erhebung von Indikatoren zur Fischfauna kann deshalb verzichtet werden.

Indikator	B1 Vorkommen von Forellenbrütlingen	
Fischbiologische Region	Gewässer der Forellenregion	
Erhebungsmethode	Punktbefischungen	
Zeitpunkt der Erhebung	Kurz nach der Emergenz (Verlassen der Kiessohle) der Brütlinge, je nach Höhenlage Anfangs April bis Anfangs Juni.	
Besonderheiten	–	
Bewertung	Zustand	CPUE* Brütlinge
	Sehr gut	>1
	Gut	0.6 – 1.0
	Mässig	0.4 – 0.6
	Unbefriedigend	0.1 – 0.4
	Schlecht	<0.1

* CPUE = Catch per unit effort = Anzahl gefangene Individuen pro Standort

Indikator	B2 Vorkommen von jungen Bachforellen, Anteil am Gesamtbestand			
Fischbiologische Region	Hoch gelegenen Gewässer der Forellenregion mit starkem Einfluss der Schneeschmelze			
Erhebungsmethode	Abfischen und zählen der Jungfische			
Zeitpunkt der Erhebung	In den Sommer- und Herbstmonaten vor Wintereinbruch			
Besonderheiten	Alternative Erhebung zur Punktbefischung von Forellenbrütlingen. Die Erhebung erlaubt ebenfalls eine Aussage zum Fortpflanzungserfolg, der erfahrungsgemäss stark vom Geschiebehauhalt abhängig ist.			
Bewertung	Zustand	Sömmerlingsdichte n/ha		
		Alpen	Voralpen	Mittelland/Jura
	Sehr gut	> 400	> 2000	> 2500
	Gut	300 – 400	1000 – 2000	1500 – 2500
	Mässig	200 – 300	500 – 1000	1000 – 1500
	Unbefriedigend	100 – 200	250 – 500	250 – 1000
	Schlecht	< 100	< 250	< 250

Indikator	B3 Anzahl von Laichgruben in Gewässern der Forellen- oder Äschenregion	
Fischbiologische Region	Gewässer der Forellen- oder Äschenregion	
Erhebungsmethode	Kartieren der Laichgruben und potenziellen Laichplätze.	
Zeitpunkt der Erhebung	Herbst/Frühwinter (möglichst kurz nach der Laichsaison der Bach- und Seeforellen)	
Besonderheiten	Die Erhebung liefert einen Anhaltspunkt zum Bestand der vorhandenen Forellenpopulation und deren Fortpflanzungsaktivität und eine Einschätzung der Brütlingsvorkommen nach der Emergenz im Frühjahr. Der Indikator soll ergänzend zu den Brütlingsbefischungen aufgenommen werden. Der Fluss soll maximal 40 m breit sein und es sollen mindesten 1'000 m Gewässerstrecken kartiert werden.	
Bewertung	Zustand	Anzahl Laichgruben/km
	Sehr gut	≥ 20
	Gut	12 – 19
	Mässig	6 – 11
	Unbefriedigend	1 – 5
	Schlecht	0

Indikator	B4 Anzahl und Dichte von Brütlingen und Larven der Äsche	
Fischbiologische Region	Gewässer der Äschen- und Barbenregion	
Erhebungsmethode	Zählen (visuell) der Anzahl der Äschenlarven in Streckenabschnitten von 100 - 200 m Länge in Ufernähe und Bestimmen der Dichte (Anzahl Larven je 100 m)	
Zeitpunkt der Erhebung	Frühling (April bis Mai).	
Besonderheiten	Das gleichzeitige Erfassen der potenziell für Äschenlarven geeigneten Kleinhabitate in Ufernähe erlaubt zudem Rückschlüsse zum Lebensraumangebot für diesen bestandesbestimmenden Lebensabschnitt der Äsche.	
Bewertung	Dichte	Äschenlarven/100m
	Sehr gross	>250
	Gross	100 – 250
	Mittel	10 – 100
	Klein	< 10
	Kein Nachweis	0

Indikator	B5 Anzahl von Jungfischen von rheo-lithophilen Arten	
Fischbiologische Region	Artenreiche Gewässer der Äschen- und Barbenregion	
Erhebungsmethode	Punktbefischungen im Uferbereich und zählen der Jungfische des Jahres aus der Gilde der rheo-lithophilen Arten (Barbe, Nase, Schneider, Hasel, Bachforelle, Groppe etc.)	
Zeitpunkt der Erhebung	Spätsommer/Herbst	
Besonderheiten	–	
Bewertung	Zustand	CPUE rheo-lithophile Arten (Längen 1-5 cm)
	Sehr gut	> 2
	Gut	1 – 2
	Mässig	0.5 – 1
	Unbefriedigend	0.25 – 0.5
	Schlecht	< 0.25