



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für  
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK

**Bundesamt für Energie BFE**  
Sektion Wasserkraft



**Baden-Württemberg**

REGIERUNGSPRÄSIDIUM FREIBURG

ABTEILUNG UMWELT

Flussbau AG / WFN – Wasser Fisch Natur

März 2013

---

## Masterplan

### Massnahmen zur Geschieberekativierung im Hochrhein

---



**Auftraggeber:**

Bundesamt für Energie BFE, CH-3003 Bern  
Regierungspräsidium Freiburg, D-79114 Freiburg i. Br.

**Auftragnehmende**

Flussbau AG, Holbeinstrasse 34, 8008 Zürich  
WFN – Wasser Fisch Natur, Murtenstrasse 52, 3205 Gümmenen

**Autoren**

Johannes Abegg, Flussbau AG  
Dr. Arthur Kirchhofer, WFN - Wasser Fisch Natur  
Prof. Dr. Peter Rutschmann, Technische Universität München (Kapitel 3.1, 3.2, 3.3 und 3.6)

**Fachliche Begleitung (Fachausschuss)**

Bernhard Hohl, Bundesamt für Energie BFE (Vorsitz)  
Uwe Gläser, Regierungspräsidium Freiburg  
Dr. Christian Marti, Kanton Zürich  
Dr. Jürg Bloesch, Aqua Viva – Rheinaubund (vormals Rheinaubund)  
Dr. Armin Fust, Energiedienst Holding AG  
Philippe Müller, Axpo AG

**Begleitgruppe (Projektgruppe Geschiebehaushalt Hochrhein PGG)**

Natalie Beck Torres, BFE	Patrick Rötheli, Kt. Aargau
Horst Richter, Regierungspräsidium Freiburg	Jürg Schulthess, Kt. Schaffhausen
Thomas Oswald, BFE	Christoph Noll, Kt. Zürich
Renaud Juillerat, BFE (bis Sept. 2011)	Ulrich Wagner, Landratsamt Waldshut
Stephan Bieri, BFE (bis Juli 2010)	Henrike Fuss, Landratsamt Lörach
Werner Röthlisberger, BFE (bis Juli 2010)	Ingo Kramer, Landesfischereiverband Baden
Manuel Epprecht, BAFU	Bettina Fehring, Landesfischerverband Baden
Manfred Kummer, BAFU	Tobias Winzeler, Arbeitsgemeinschaft Renaturierung des Hochrhein
Pierre-Yves Christen, Kt. Aargau (bis Sept. 2010)	

**Bezug**

Als Download unter:  
<http://www.bfe.admin.ch/dokumentation/publikationen/>  
BFE > Dokumentation > Publikationen > Datenbank allgemeine Publikationen

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichtes verantwortlich.

Eidgenössisches Departement für Umwelt,  
Verkehr,  
Energie und Kommunikation UVEK  
**Bundesamt für Energie BFE**

Mühlestrasse 4, 3063 Ittigen  
Postadresse: 3003 Bern  
Tel: +41 31 322 56 11  
Fax : +41 31 323 25 00  
[www.bfe.admin.ch](http://www.bfe.admin.ch)

**Regierungspräsidium Freiburg**  
Abteilung 5 Umwelt  
Referat 58 Wasserstrassen

Bissierstraße 7, 79114 Freiburg i. Br.  
Postadresse:  
Abhofach, 79083 Freiburg i. Br.  
Tel: +49 761 208-0  
Fax : +49 0761 208-394200  
[www.rp-freiburg.de](http://www.rp-freiburg.de)

# Inhalt

Zusammenfassung .....	1
1 Einleitung.....	3
1.1 Zweck des Masterplans.....	3
1.2 Inhalt des Masterplans und Projektbegleitung .....	4
1.3 Fachliche Grundlagen .....	5
1.4 Gesetzliche Grundlagen.....	5
1.5 Bisherige Untersuchungen .....	9
2 Geschiebemechanik .....	11
2.1 Geschiebetransport.....	11
2.2 Kolmation.....	14
2.3 Geschiebetransport in Flie遝strecken.....	15
2.4 Geschiebetransport in Stauhaltungen .....	15
2.5 Geschiebetransport und Grundwasser .....	18
2.6 Stabilität von Kiesschüttungen .....	18
3 Hydraulische und geschiebemechanische Berechnungen .....	19
3.1 Generelles zur numerischen Modellierung .....	19
3.2 Modellgenauigkeit .....	20
3.3 Berechnungsmodelle .....	20
3.4 Berechnungen im Rahmen der Konzessionserneuerung Kraftwerk Eglisau .....	21
3.4.1 Überblick .....	21
3.4.2 Resultate .....	22
3.5 Berechnungen im Rahmen der Konzessionserneuerung KW Ryburg-Schwörstadt ..	24
3.5.1 Überblick .....	24
3.5.2 Resultate .....	25
3.6 Berechnungen der Technischen Universität München (TUM).....	28
4 Zusammenhang zwischen Geschiebe und Ökologie.....	30
4.1 Allgemein .....	30
4.2 Algen und Wasserpflanzen .....	30
4.3 Wirbellose Kleintiere .....	30
4.4 Fischfauna .....	31
4.5 Mikroorganismen.....	32
4.6 Richtwerte .....	32
5 Historische und aktuelle Situation der Fischfauna.....	33
6 Geschiebehaushalt Hochrhein .....	35
6.1 Hydrologie.....	35
6.2 Korngrößen.....	36
6.3 Morphologie .....	38
6.4 Geschiebeeinträge .....	39
6.4.1 Historische Entwicklung .....	39
6.4.2 Aktueller Zustand.....	41
6.5 Entnahmen aus der Rheinsohle .....	43
6.6 Geschiebetransportvermögen und Geschiebefrachten .....	46
6.6.1 Änderungen gegenüber der Geschiebehaushaltstudie 2000.....	46
6.6.2 Aktuelle Verhältnisse .....	50
6.6.3 Stauhaltung Kembs .....	54
6.7 Zusammenfassende Beschreibung des Geschiebehaushaltes.....	54
6.8 Defizite, Aufwertungspotenzial .....	55
7 Anzustrebende Geschiebefracht.....	62
7.1 Methodik .....	62
7.2 Abschnittweise Bestimmung der anzustrebenden Geschiebefracht im Hochrhein ..	64

8	Erfahrungen mit Kiesschüttungen .....	66
8.1	Schüttung Ellikon .....	66
8.1.1	Auslöser, Ziel der Schüttung .....	66
8.1.2	Resultate, Entwicklung .....	66
8.1.2	Beurteilung .....	67
8.2	Schüttung Zurzach .....	68
8.2.1	Auslöser, Ziel der Schüttung .....	68
8.2.2	Schüttmaterial .....	69
8.2.3	Schüttstelle Zurzach .....	70
8.2.4	Schüttstelle Riethem .....	70
8.2.5	Resultate, Entwicklung .....	71
8.2.6	Beurteilung .....	73
8.3	Schüttung Restwasserstrecke KW Albrück-Dogern (RADAG) .....	75
8.3.1	Auslöser, Ziel der Schüttung .....	75
8.3.2	Resultate, Entwicklung .....	77
8.3.3	Beurteilung .....	78
8.4	Schüttung Mumpf .....	78
8.4.1	Auslöser, Ziel der Schüttung .....	78
8.4.2	Resultate, Entwicklung .....	79
8.5	Schüttungen an der Aare .....	79
8.5.1	Auslöser, Ziel der Schüttung .....	79
8.5.2	Resultate, Entwicklung .....	79
8.5.3	Erfolgskontrolle Fischfauna .....	82
8.5.4	Beurteilung .....	83
9	Massnahmen zur Verbesserung des Geschiebehaushaltes .....	84
9.1	Ziele und Randbedingungen .....	84
9.2	Grundsätzliche Möglichkeiten .....	85
9.2.1	Stauabsenkung bei Hochwasser .....	85
9.2.2	Geschiebezugaben .....	86
9.2.3	Ufererosionen .....	86
9.2.4	Geschiebemanagement in den Zuflüssen .....	86
9.2.5	Geschiebereaktivierung in den Zuflüssen .....	86
9.3	Fokussierung auf bestehendes Aufwertungspotenzial .....	87
9.4	Massnahmenübersicht .....	87
9.5	Anmerkungen zu einzelnen Massnahmen: .....	98
9.6	Wirkung der Massnahmen .....	99
9.7	Grobe Kostenschätzung .....	103
9.7.1	Vorbemerkung .....	103
9.7.2	Annahmen .....	103
9.7.3	Kostenvergleich, Beurteilung .....	104
10	Monitoringkonzept .....	105
10.1	Empfohlenes Vorgehen .....	105
10.2	Morphologie .....	106
10.3	Monitoring kieslaichender Fischarten .....	107
10.4	Benthosfauna .....	108
10.5	Terrestrische Organismen .....	108
10.6	Sohlenentwicklung und Auswirkungen auf Hochwasserspiegel .....	109
11	Schlussfolgerungen und weiteres Vorgehen .....	109

## Anhang

- 1 Grundlagen
- 2 Linienproben
- 3 Bankflächen und Richtwerte für Geschiebefracht
- 4 Einfluss der Schüttungen bei Zurzach auf die Reproduktion von kieslaichenden Fischarten
- 5 Massnahmenblätter (Geschiebezugaben und Ufererosionen)
- 6 Geologie und Hydrogeologie
- 7 Geschiebemechanische Untersuchungen Stauhaltung Kembs
- 8 Grobe Kostenschätzung

## Beilage

Plan 1 Massnahmen 1:100'000

## Zusammenfassung

Der Hochrhein lässt sich in einen natürlicherweise geschiebearmen oberen Abschnitt zwischen Bodenseeausfluss und Thurmündung und einen unteren Abschnitt mit ursprünglich umfangreichen Geschiebeumlagerungen zwischen der Thurmündung und Basel unterteilen. Die Thur, die Töss und die Aare als ursprünglich grösste Geschiebelieferanten trugen jährlich mehrere  $10'000\text{m}^3$  Geschiebe in den Rhein ein. Durch den um 1900 einsetzenden Bau der Kraftwerke am Rhein und an der Aare sowie Verbauungen in den Zuflüssen wurden der Geschiebeeintrag in den Rhein und das Transportvermögen zunehmend eingeschränkt.

Durch die heute bestehenden 11 Staustufen wird die 142km lange Hochrheinestrecke auf einer Länge von 90 - 100km eingestaut und das Geschiebetransportvermögen reduziert oder unterbunden. Natürliche oder naturnahe Fliessverhältnisse finden sich in den vier frei fliessenden Strecken nach dem Bodenseeausfluss, vor dem Rheinfall, vor der Thurmündung und zwischen dem Kraftwerk Reckingen und der Aaremündung sowie in den Stauwurzelbereichen einiger Kraftwerke. In diesen Strecken besteht auch ein wenig oder nicht beeinflusstes Geschiebetransportvermögen.

Durch das Kraftwerk Eglisau werden die Geschiebeeinträge aus der Thur und der Töss unterbunden und im Klingnauer Stausee wird das Geschiebe aus der Aare zurückgehalten. Damit sind die ursprünglich dominanten Geschiebezubringer vom Hochrheinsystem abgetrennt. Von den Strecken mit natürlichen oder naturnahen Fliessverhältnissen und Geschiebetransportvermögen wird nur noch ein kurzer Abschnitt zwischen Wutach und dem Kraftwerk Albruck-Dogern mit Geschiebe aus der Wutach alimentiert.

Dieser fehlende Geschiebenachschub hat weitreichende Konsequenzen für die Lebensgemeinschaften des Hochrheins. Da viele strömungsliebende Fischarten für ihre erfolgreiche Fortpflanzung auf eine lockere Kiessohle angewiesen sind, ist ihre Bestandserhaltung bei fehlender Erneuerung der Kiesschicht nicht mehr gewährleistet. Weiter bildet die Flusssohle einen wichtigen Lebensraum, indem viele Kleintiere das Hohlraumsystem der Kiesschicht bewohnen. Wird die Flusssohle nicht periodisch umgelagert so wird das Hohlraumsystem durch Verdichtung (Kolmation) zerstört und diese Kleinlebensräume sind nicht mehr benutzbar. Zahlreiche Stömungsspezialisten des Hochrheins sind denn auch auf den Roten Listen der gefährdeten Tierarten aufgeführt.

Im Gegensatz zu den Kraftwerken Rheinau, Eglisau und Reckingen, bei denen auch bei extremen Hochwasserabflüssen kein Geschiebe durch die Stauhaltungen transportiert wird, ist bei den anderen Kraftwerken bei mehr oder weniger grossen Hochwasserabflüssen ein Geschiebetransport durch die Stauhaltung möglich. Bezüglich Geschiebetransport werden die Stauhaltungen der Kraftwerke Schaffhausen, Albruck-Dogern, Laufenburg und Rheinfelden als günstig eingestuft. Bezüglich Geschiebetransport ungünstige Stauhaltungen sind Ryburg-Schwörstadt und Birsfelden, bei denen der Geschiebetransport erst bei Hochwasserabflüssen mit Wiederkehrperioden von 10 Jahren ( $HQ_{10}$ ) möglich ist.

Das Ziel der Massnahmen zur Reaktivierung des Geschiebehaushaltes ist die Erhöhung der Geschiebefrachten in den Abschnitten mit natürlichen oder naturnahen Fliessverhältnissen und Geschiebetransportvermögen. Dabei sollen insbesondere die heute weitgehend geschiebelose frei fliessende Strecke zwischen dem Kraftwerk Reckingen und der Aaremündung sowie der anschliessende Abschnitt bis zum Kraftwerk Laufenburg aufgewertet

werden. Damit könnte der Geschiebehaushalt auf einer 31km langen, zusammenhängenden Strecke mit sehr grossem, grossem und mittlerem Aufwertungspotenzial reaktiviert werden. Weitere Massnahmen werden für die Aufwertung der Stauwurzelbereiche mit sehr grossem und grossem Aufwertungspotenzial vorgeschlagen.

Die untersuchten Massnahmen zur Erhöhung der Geschiebeführung umfassen Geschiebezugaben in geeignete Rheinabschnitte, Ufererosionen durch die Reaktivierung von Prallhängen sowie die Geschiebebewirtschaftung in eingestauten Mündungsstrecken von Zuflüssen. Die untersuchten Massnahmen zur Verbesserung des Geschiebetransports umfassen temporäre Stauabsenkungen bei denjenigen Kraftwerken, wo ein regelmässiger Geschiebetransport durch die Stauhaltung nicht möglich ist, und die Aufhebung von lokalen Geschiebefallen.

Da in der Baubewilligung des Kraftwerks Eglisau von periodischen Stauabsenkungen abgesehen wird, konzentrieren sich die im Masterplan vorgeschlagenen Massnahmen zur Reaktivierung des Geschiebehaushaltes im Abschnitt Reckingen – Laufenburg auf Geschiebezugaben an verschiedenen Stellen. Die Richtgrösse für die jährliche Zugabemenge wurde anhand der Vollzugshilfe für die strategische Planung zur Sanierung des Geschiebehaushaltes (gemäss dem schweizerischen Gewässerschutzgesetz) abgeschätzt.

In den unterliegenden Strecken kann der Geschiebehaushalt entweder durch Geschiebezugaben in die Stauwurzelbereiche oder temporäre Stauabsenkungen reaktiviert werden. Der Vorteil von Geschiebezugaben ist die unmittelbare Wirkung nach der Zugabe und die Möglichkeit, das Geschiebe direkt im Bereich von potenziellen Laichplätzen zuzugeben. Nachteilig wirkt sich die Umweltbelastung durch den erforderlichen Werkverkehr aus.

Bis Geschiebe mit periodischen Stauabsenkungen durch eine Stauhaltung transportiert werden kann, müssen sich gewisse Stauraumverlandungen bilden. Dieser Verlandungsprozess dauert voraussichtlich mehrere Jahre und ist relativ schlecht prognostizierbar. Vorgängig zu den periodischen Stauabsenkungen sind Planungen und Untersuchungen betreffend Schadstoffbelastungen von Sedimentablagerungen, Uferstabilitäten usw. sowie bauliche Anpassungen an Uferverbauungen, Bootsplätzen, Schifflanlegestellen usw. erforderlich. Diesen nicht unerheblichen Vorinvestitionen stehen Unsicherheiten bezüglich dem Erfolg der Umsetzung, resp. den Begleiterscheinungen gegenüber.

Die Kosten-Nutzenanalyse ergibt für die Geschiebezugaben in der frei fliessenden Strecke rheinabwärts des Kraftwerks Reckingen das beste Verhältnis zwischen finanziellem Aufwand und aufwertbarer Abschnittlänge. In die gleiche Grössenordnung fallen die Reaktivierungen von Prallhängen rheinaufwärts der Thur- und Wutachmündung sowie die Geschiebezugaben bei der Aaremündung und in der Restwasserstrecke des Kraftwerks Albruck-Dogern. Die Geschiebezugaben in den Stauwurzelbereichen der unteren Kraftwerke (Ryburg-Schwörstadt bis Birsfelden) weisen aufgrund der kürzeren Wirkungsstrecken etwas schlechtere Kosten-Nutzenverhältnisse auf.

Die temporären Stauabsenkungen weisen aufgrund der umfangreichen Vorinvestitionen, der beträchtlichen Produktionsverluste und der eher kurzen Wirkungsstrecken Kosten-Nutzenverhältnisse auf, die im Vergleich zu den Geschiebezugaben in die frei fliessende Strecke rheinabwärts des Kraftwerks Reckingen um mindestens einen Faktor 10 höher liegen.

## Dank

Der Masterplan entstand in enger Zusammenarbeit mit dem Fachausschuss der Projektgruppe Geschiebehaushalt Hochrhein. An dieser Stelle sei den Herren B. Hohl, BFE, U. Gläser, RPF, Dr. J. Bloesch, Aqua Viva-Rheinaubund (vormals Rheinaubund), Dr. Ch. Marti, AWEL, Dr. A. Fust, Kraftwerk Ryburg-Schwörstadt AG und Ph. Müller, Axpo AG, für die kritische Durchsicht der zahlreichen Entwürfe, den wertvollen Beiträgen und fachlichen Diskussionen bestens gedankt.

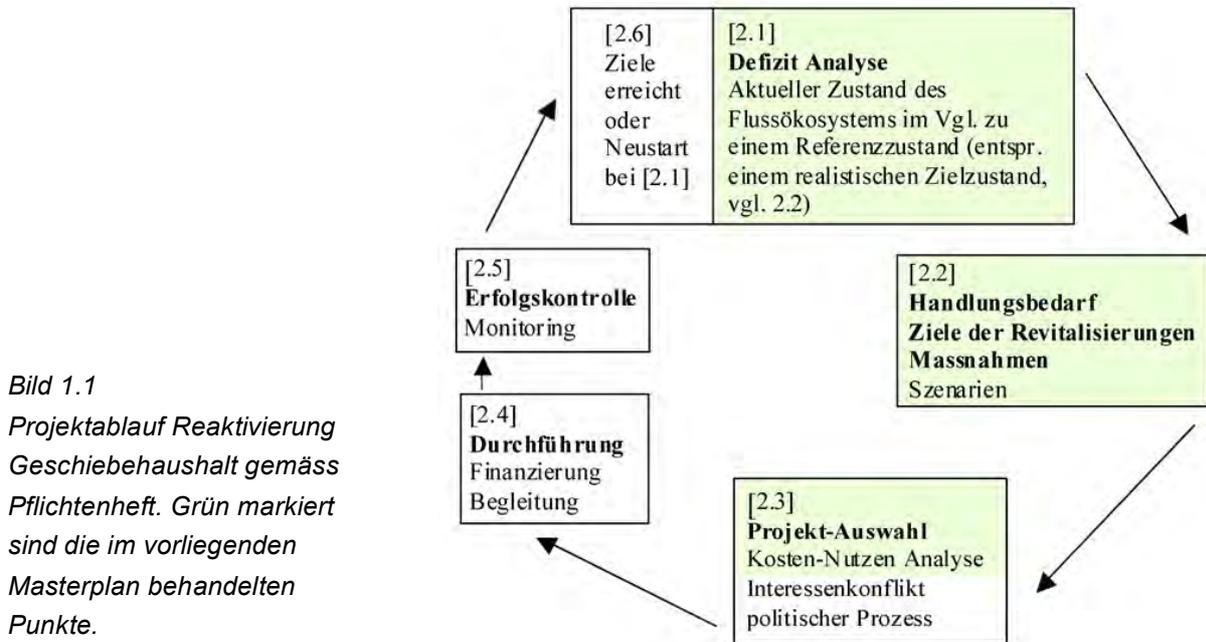
## 1 Einleitung

### 1.1 Zweck des Masterplans

Seit dem Bau der Kraftwerke am Hochrhein (Rheinfelden 1898 bis Säckingen 1966) und der Aare wurde das aus den Zuflüssen in den Hochrhein transportierte Geschiebe zunehmend in den Stauhaltungen zurückgehalten. Weiter führten Flussverbauungen sowie Kiesentnahmen in den Zuflüssen zu geringeren Geschiebeeinträgen in den Rhein. Dadurch wurde der Fliessgewässercharakter und der Flusslebensraum verändert, die Flusssohle entweder mit Feinstoffen überdeckt (in den Stauräumen) oder ausgewaschen und kolmatiert (in noch frei fliessenden Strecken). In der Folge hat sich die Organismengemeinschaft stark gewandelt, insbesondere sind mehrere Fischarten, die für ihre Fortpflanzung zwingend auf lockere Kiesbänke angewiesen sind, in den letzten Jahrzehnten aus dem Hochrhein verschwunden.

Der Geschiebehaushalt eines Flusses wird durch viele Faktoren beeinflusst und kann kaum durch lokale, nur kleinräumig wirksame Massnahmen saniert werden. Dies zeigten auch auf einzelne Kraftwerke ausgerichtete Studien und UV-Berichte. Aus diesem Grund beschloss die Projektgruppe Geschiebehaushalt Hochrhein (PGG) die Ausarbeitung eines Masterplans „Massnahmen zur Geschiebereaktivierung im Hochrhein“. Neben der Darstellung des Geschiebehaushalts sowie einer Defizit- und Potenzialanalyse sollen Massnahmenvorschläge ausgearbeitet werden, mit denen der Geschiebehaushalt reaktiviert werden könnte. Damit sollen die Habitate und die Lebensbedingungen für standorttypische, gewässerspezifische Arten der Fischfauna und des Benthos aufgewertet und verbessert werden. Der Masterplan beruht auf der Vorgabe, dass die Kraftwerke auch weiterhin betrieben werden.

Der Umfang der Untersuchungen richtet sich nach dem Pflichtenheft, das von der PGG für die Ausschreibung des Masterplans erstellt wurde. Demnach soll der Masterplan bei der ganzen weiteren Umsetzungsarbeit als Richtlinie dienen. Die Projektierungs- und Umsetzungsphase sowie die Erfolgskontrolle sind nicht Gegenstand des Masterplans. Gemäss dem Ablaufschema aus dem Pflichtenheft (Bild 1.1) sind im Masterplan die grün markierten Felder behandelt.



## 1.2 Inhalt des Masterplans und Projektbegleitung

Der Masterplan behandelt folgende Themen:

- Zusammenfassung der Erkenntnisse aus früheren Untersuchungen zum Geschiebehaushalt des Hochrheines und der wichtigsten Zuflüsse. Die Auswirkungen von baulichen Veränderungen seit der Erarbeitung der Studie „Geschiebehaushalt Hochrhein“ vom 5. Juli 2000 (Grundlage [1]) wurden analysiert und beschrieben.
- Die wichtigsten geschiebemechanischen Zusammenhänge und die Erfahrungen von Kiesschüttungen im Rhein und der Aare sind beschrieben.
- Die Defizite bezüglich dem Geschiebehaushalt sind beschrieben und das Aufwertungspotenzial hergeleitet sowie Ziele und Randbedingungen formuliert.
- In Anlehnung an die Vollzugshilfe „Sanierung Geschiebehaushalt, strategische Planung“<sup>1</sup> des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) wird ein Ansatz zur überschlägigen Abschätzung der erforderlichen Geschiebeführung vorgestellt. Dieser wurde auf die relevanten Abschnitte des Hochrheines angewandt und entsprechende Zugabevolumina vorgeschlagen.
- Ausgehend von obigen Grundlagen werden mögliche Massnahmen (insbesondere gezielte, künstlich Geschiebezugaben) aufgezeigt.
- Die Massnahmen werden nach ökologischem Potential, Kosten-Nutzen-Relation und Machbarkeit priorisiert.
- Zudem enthält der Bericht einen Vorschlag für das Monitoring.

<sup>1</sup> Sanierung Geschiebehaushalt – Strategische Planung, Ein Modul der Vollzugshilfe Renaturierung der Gewässer, BAFU 2012 (<http://www.bafu.admin.ch/umsetzungshilfe-renaturierung/>)

Die Erarbeitung des Masterplans erfolgte in enger Zusammenarbeit mit dem Fachausschuss der Projektgruppe Geschiebehaushalt Hochrhein (PGG). Das in der ersten Phase erstellte Arbeitspapier wurde anlässlich diverser Besprechungen und fachlicher Diskussionen bis zum Masterplan weiterentwickelt.

Der Entwurf vom 22. August 2012 wurde den Mitgliedern der PGG abgegeben und an der Veranstaltung vom 11. September 2012 in Rheinfelden präsentiert und diskutiert. Die im Rahmen der anschliessenden Vernehmlassungsrunde eingegangenen Anregungen und Ergänzungswünsche wurden soweit möglich in die vorliegende Schlussfassung eingearbeitet.

### 1.3 Fachliche Grundlagen

Die konsultierten Grundlagen sind in Anhang 1 zusammengestellt, im Kapitel 1.5 die wichtigsten Erkenntnisse daraus zusammengefasst und in verschiedenen Kapiteln des vorliegenden Berichts detaillierter beschrieben.

### 1.4 Gesetzliche Grundlagen

Heute werden Fliessgewässer ganzheitlich betrachtet und sie haben neben der Sicherheit und den wasserwirtschaftlichen Aspekten auch ökologische und soziale Funktionen zu erfüllen. Dies widerspiegelt sich in der aktuellen schweizerischen Gesetzgebung, speziell im revidierten Gewässerschutzgesetz (GSchG), das zum Ziel hat, insbesondere folgende nachteilige Einwirkungen auf Gewässer zu verhindern oder zu beheben:

#### *Art. 36a Gewässerraum*

<sup>1</sup> Die Kantone legen nach Anhörung der betroffenen Kreise den Raumbedarf der oberirdischen Gewässer fest, der erforderlich ist für die Gewährleistung folgender Funktionen (Gewässerraum):

- a. die natürlichen Funktionen der Gewässer;
- b. den Schutz vor Hochwasser;
- c. die Gewässernutzung.

#### *Art. 37 Verbauung und Korrektion von Fliessgewässern*

<sup>1</sup> Fliessgewässer dürfen nur verbaut oder korrigiert werden, wenn:

- a. ...
- b. ...
- c. dadurch der Zustand eines bereits verbauten oder korrigierten Gewässers im Sinn dieses Gesetzes verbessert werden kann.

<sup>2</sup> Dabei muss der natürliche Verlauf des Gewässers möglichst beibehalten oder wiederhergestellt werden. Gewässer und Gewässerraum müssen so gestaltet werden, dass:

- a. sie einer vielfältigen Tier- und Pflanzenwelt als Lebensraum dienen können;
- b. die Wechselwirkungen zwischen ober- und unterirdischem Gewässer weitgehend erhalten bleiben.

*Art. 38a Revitalisierung von Gewässern*

<sup>1</sup> Die Kantone sorgen für die Revitalisierung von Gewässern. Sie berücksichtigen dabei den Nutzen für die Natur und die Landschaft sowie die wirtschaftlichen Auswirkungen, die sich aus der Revitalisierung ergeben.

*Art. 43a Geschiebehaushalt*

<sup>1</sup> 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.

<sup>2</sup> 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.

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

Ebenfalls enthält das GSchG Fristen für die Sanierung und Detailvorschriften:

*Art. 83a Sanierungsmassnahmen*

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

*Art. 83b Planung und Berichterstattung*

<sup>1</sup> 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.

<sup>2</sup> Die Kantone reichen die Planung bis zum 31. Dezember 2014 dem Bund ein.

<sup>3</sup> Sie erstatten dem Bund alle vier Jahre Bericht über die durchgeführten Massnahmen.

Die natürlichen Funktionen der Gewässer werden in Anhang 1 der Gewässerschutzverordnung (GSchV) als ökologische Ziele für oberirdische Gewässer folgendermassen festgehalten:

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

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

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

Weiter wird in der GSchV die wesentliche Beeinträchtigung des Geschiebehaushalts definiert und die Planung von Sanierungsmassnahmen geregelt:

*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. 42b Planung der Massnahmen zur Sanierung des Geschiebehaushalts*

<sup>1</sup> *Die Kantone reichen dem BAFU eine Planung der Massnahmen zur Sanierung des Geschiebehaushalts nach den in Anhang 4a Ziffer 3 beschriebenen Schritten ein.*

<sup>2</sup> *Die Inhaber von Anlagen müssen der für die Planung zuständigen Behörde Zutritt gewähren und die erforderlichen Auskünfte erteilen, insbesondere über:*

- a. die Koordinaten und die Bezeichnung der Anlagen und bei Wasserkraftwerken der einzelnen Anlagenteile;*
- b. den Umgang mit Geschiebe;*
- c. die durchgeführten und die geplanten Massnahmen zur Verbesserung des Geschiebehaushalts;*
- d. die vorhandenen Untersuchungsergebnisse zum Geschiebehaushalt;*
- e. die vorgesehenen baulichen und betrieblichen Veränderungen der Anlage.*

*Art. 42c Massnahmen zur Sanierung des Geschiebehaushalts*

<sup>1</sup> *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.*

<sup>2</sup> *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.*

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

<sup>4</sup> *Die Inhaber von Wasserkraftwerken prüfen nach Anordnung der kantonalen Behörde die Wirksamkeit der getroffenen Massnahmen.*

Nebst dem GSchG ist auch das Bundesgesetz über die Fischerei (BGF) für den Geschiebehaushalt relevant. In Art. 9 Absatz 1 wird gefordert, bei Anlagen (z.B. zur Wasserkraftnutzung):

*a. günstige Lebensbedingungen für die Wassertiere zu schaffen hinsichtlich:*

...

- 3. der Beschaffenheit der Sohle und der Böschungen,*
- 4. der Zahl und Gestaltung der Fischunterschlupfe,*
- 5. der Wassertiefe und -temperatur,*
- 6. der Fliessgeschwindigkeit;*

...

*c. die natürliche Fortpflanzung zu ermöglichen;*

Die EU-Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) gibt für die einzelnen Bereiche der Gewässerqualität keine detaillierten Vorgaben wie dies im GSchG der Schweiz zum Teil der Fall ist. Die WRRL gibt jedoch einen Rahmen vor, indem sie festlegt, dass die Gewässer einen „guten ökologischen Zustand“, resp. das „gute ökologische Potential“ im Falle künstlicher

oder stark veränderter Gewässer erreichen müssen. Zentral sind in der WRRL Aspekte wie die gewässersystembezogene Betrachtung und Beurteilung, das Verschlechterungsverbot, das Verbesserungsgebot (Sanierungspflicht), die Fristensetzung zur Erreichung des guten ökologischen Zustandes und die Orientierung am natürlichen, typspezifischen Referenzzustand (Grundlage [22]).

Der Geschiebehaushalt wird in der WRRL nicht explizit erwähnt, ist jedoch in der Forderung nach hydromorphologisch gutem Zustand mit eingeschlossen. In Anhang V, in dem der gute ökologische Zustand und die zu messenden Parameter definiert werden, findet das Geschiebe folgende Erwähnung: V 1.1.1 hydromorphologische Qualitätskomponente u. a. Struktur und Substrat des Flussbettes sowie V 1.2 Definition des sehr guten/guten Zustandes für Fließgewässer „hydromorphologische Qualitätskomponente“ mit Stichwort „Struktur und Substrat des Flussbettes“ (Grundlage [23]). Somit fließt der Geschiebehaushalt auch im biologisch guten Zustand des Parameters Fischfauna (Vorkommen und Reproduktion standorttypischer Fischarten) indirekt mit ein.

Gemäss der Fristensetzung in der WRRL muss der „gute ökologische Zustand“ bzw. das „gute ökologische Potential“ der Fließgewässer bis 2015 erreicht sein. Die Umsetzung ist im Bewirtschaftungsplan mit dem zugehörigen Maßnahmenprogramm dokumentiert<sup>2</sup>. Die WRRL sieht zu begründende Verlängerungsmöglichkeiten um zwei mal sechs Jahre vor (Grundlage [24]).

Die WRRL gilt nicht unmittelbar, es wurde in nationales Recht (Wasserhaushaltsgesetz - WHG) und in Landesrecht (Wassergesetz Baden-Württemberg - WG) umgesetzt. Danach sind insbesondere folgende Vorschriften relevant:

WHG § 6 Abs. 1 Nr. 1	Allg. Grundsätze Gewässerbewirtschaftung
WHG § 27	Bewirtschaftungsziele oberirdische Gewässer
WHG § 36	Anlagen ... oberirdische Gewässer
WHG § 39	Gewässerunterhaltung
	4. Förderung ökol. Funktionsfähigkeit,
	5. Erhaltung Zustand Geschiebe (entspr) wasserwirtschaftl. Bedürfnissen
WHG § 28	Maßnahmenprogramm
WG § 68 a	Naturnahe Entwicklung

Die oben erwähnten Massnahmenprogramme sind als fachliche Rahmenplanung zu verstehen, deren Massnahmen zu konkretisieren sind und bis zum Jahr 2012 in den Verwaltungsverfahren mittels der zuvor genannten Rechtsvorschriften im Einzelfall umgesetzt werden sollen. Im Massnahmenprogramm wird unterschieden zwischen Grundlegenden Massnahmen gem. Art. 11 (3) WRRL und Ergänzenden Massnahmen gem. Art. 11 (4) WRRL. Ausführungen speziell zur Hydromorphologie finden sich ab S. 172 des erwähnten Bewirtschaftungsplanes.

---

<sup>2</sup> [http://www.um.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/63578/Bewirtschaftungsplan\\_Hochrhein\\_26\\_11\\_09.pdf](http://www.um.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/63578/Bewirtschaftungsplan_Hochrhein_26_11_09.pdf)

Weitere, gewässerspezifische Bestimmungen finden sich im Übereinkommen zum Schutz des Rheins (Rheinschutzübereinkommen) sowie in den darauf abgestützten Vorgaben der IKS (Internationale Kommission zum Schutz des Rheins).

## 1.5 Bisherige Untersuchungen

Der ursprüngliche Geschiebehaushalt und die Entwicklung seit dem Bau der Kraftwerke sind in Grundlage [1] beschrieben. In dieser Arbeit wurden auf Konzeptstufe Massnahmenvarianten zur Reaktivierung des Geschiebehaushaltes erarbeitet. Diese umfassten die Reaktivierung von Erosionsufern, das Einstellen von Geschiebeentnahmen, die Rückgabe von Geschiebe aus Baggerungen und temporäre Stauabsenkungen bei verschiedenen Kraftwerken. Neben dem Massnahmenbeschrieb wurden die positiven und negativen Auswirkungen sowie der bestehende Abklärungsbedarf aufgezeigt. Betreffend die temporären Stauabsenkungen wurde beispielsweise neben den negativen Auswirkungen für den Kraftwerkbetreiber auf die Problematik der Resuspension von Feinsedimentablagerungen, die Auswirkungen auf das Grundwasser und die Instabilität von Uferböschungen aufgrund von Hangentwässerungen hingewiesen und für diese Themen eine prioritäre vertiefte Abklärung empfohlen.

Für die Kraftwerke Eglisau und Ryburg-Schwörstadt erfolgten die entsprechenden Untersuchungen im Rahmen der Neukonzessionierungen (Grundlagen [13, 14]). Beim Kraftwerk Eglisau zeigte sich, dass mit Uferinstabilitäten u.a. im Siedlungsgebiet von Eglisau und Auswirkungen auf das Grundwasser zu rechnen ist. Zudem zeigten detaillierte Simulationsrechnungen, dass mit temporären Stauabsenkungen bei den Kraftwerken Eglisau und Reckingen mit einer Dauer von rund 75 Jahren zu rechnen ist, bis das Geschiebe aus der Thur und der Töss durch die beiden Stauhaltungen in die Fließstrecke Reckingen – Koblenz transportiert werden kann. Die gegenüber den Angaben in Grundlage [1] längere Dauer ergab sich aufgrund von zusätzlichen Geschiebeablagerungen, die das Volumen von ausgespülten Feinsedimenten ersetzen müssen (vgl. Kapitel 2.4). Temporäre Stauabsenkungen in Eglisau werden zudem aus gewässerökologischer Sicht eher negativ beurteilt (Grundlage [13]).

Im Rahmen der Untersuchungen zur Konzessionserneuerung des Kraftwerks Ryburg-Schwörstadt (Grundlage [14]) wurden verschiedene Szenarien mit unterschiedlichen Stauabsenkungen und Geschiebeeinträgen für die Kraftwerke Ryburg-Schwörstadt, Rheinfeld, Augst-Wyhlen und Birsfelden berechnet. Es konnte aufgezeigt werden, dass mit temporären Stauabsenkungen ein Geschiebetransport durch die Stauhaltungen aus hydraulischer Sicht möglich ist, aufgrund des heute weitgehend geschiebelosen Zustandes temporäre Stauabsenkungen jedoch zu keiner Aufwertung des Geschiebehaushaltes führen. Aus ökologischer Sicht sind temporäre Stauabsenkungen aufgrund von trocken fallenden Flachwasserzonen, Auswaschung von Feinsedimenten, Mobilisierung von kontaminierten Ablagerungen usw. umstritten. Zudem zeigt ein geohydraulisches Gutachten, dass bei Stauabsenkungen Uferinstabilitäten nicht ausgeschlossen werden können. Im Rahmen der Neukonzessionierung des Kraftwerks Albruck-Dogern wurde von Untersuchungen betreffend temporäre Stauabsenkungen unter das konzessionierte Stauziel abgesehen (Grundlage [16]). In den Untersuchungen wird darauf hingewiesen, dass bei einer Reaktivierung des Geschiebehaushaltes mit Ablagerungen im Stauwurzelbereich (rheinaufwärts der Aaremündung) und entsprechenden Anhebungen des Hochwasserspiegels zu

rechnen ist. Die entsprechenden geschiebetechnischen Nachweise für die Bildung der angenommenen umfangreichen Geschiebeablagerungen und deren Verhalten bei Extremhochwasser sind in den Untersuchungen nicht enthalten.

Der Geschiebehaushalt der grössten Schweizer Zuflüsse ist in diversen Studien untersucht worden. Die im Rahmen der Studien durchgeführten Abklärungen und Simulationsrechnungen zeigen, dass in der Thur (Grundlage [5]) und der Töss [6] mittelfristig mit keinen signifikanten Änderungen der Geschiebefrachten zu rechnen ist und aus der Aare kein Geschiebe in den Rhein eingetragen wird (Grundlage [3]).

Die umfangreichen Untersuchungen zum Geschiebehaushalt der Thur (Grundlage [5]) zeigen, dass langfristig mit einem Geschiebeeintrag in die Mündungsstrecke von rund  $10'000\text{m}^3/\text{Jahr}$  zu rechnen ist. Die untersuchten Erhöhungen der Geschiebefrachten im Einzugsgebiet (Einstellung von Entnahmen) vermögen diesen Wert nicht massgeblich zu beeinflussen.

Die Auswirkungen des Thurauenprojekts auf den Geschiebehaushalt sind im Auflageprojekt erläutert (Berechnungen Büro Hunziker, Zarn & Partner AG, Aarau, Grundlage [46]). Im Istzustand wird beim Eggrank (obere Auenperimetergrenze, ca. 5km vor Mündung) von einer Geschiebefracht von  $7'500 - 8'500\text{m}^3$  ausgegangen, in den verschiedenen Szenarien mit reaktivierter Thuraue von Geschiebefrachten von  $2'700 - 11'000\text{m}^3/\text{a}$ . Für den Istzustand wird ein Geschiebeeintrag in den Rhein von  $7'000 - 8'000\text{m}^3$  angegeben. In den ersten 20 Jahren nach Projektumsetzung wird ein Geschiebeeintrag in den Rhein von  $500 - 2'000\text{m}^3/\text{a}$  (Bild 15.3.8) und für die Periode 50 – 75 Jahre nach Projektumsetzung ein Geschiebeeintrag in den Rhein von  $2'500 - 4'000\text{m}^3/\text{a}$  (Bild 15.3.10) prognostiziert. Diese Frachten sind deutlich tiefer als der im Masterplan angegebene Wert von  $10'000\text{m}^3/\text{a}$ . Wie das in den letzten Jahren umgesetzte Thurauenprojekt den Geschiebeeintrag in den Rhein effektiv beeinflusst, werden die zukünftigen Gerinnevermessungen zeigen.

Die Untersuchungen zum Geschiebehaushalt der Töss ergaben einen langfristigen Geschiebeeintrag in den Rhein von  $2'500\text{m}^3/\text{Jahr}$ .

Die Geschiebeeinträge aus den kleineren Zuflüssen wurden entweder im Feld abgeschätzt (Grundlage [1, 2]) und anhand von Vergleichswerten plausibilisiert oder im Rahmen von anderen Projekten hergeleitet.

Erfahrungen mit Kiesschüttungen und deren Auswirkungen auf die ökologischen Verhältnisse liegen aus Projekten an der Aare (Grundlage [22, 25, 31]) und im Rhein [12] vor. Diese sind im vorliegenden Bericht beschrieben.

## 2 Geschiebemechanik

### 2.1 Geschiebetransport

Der Geschiebetransport in einem Fließgewässer hängt von verschiedenen Faktoren ab. Massgeblichen Einfluss haben:

1. Abfluss
2. Gerinnegeometrie
3. Gefälle
4. Korngrößenverteilung des Geschiebes
5. Korngrößenverteilung des Sohlenmaterials
6. Geschiebezufuhr aus Zuflüssen
7. Geschiebezufuhr aus Ufer- und Sohlenerosionen

Bei einem bestimmten Abfluss kann eine bestimmte Menge Sedimente transportiert werden (Geschiebetransportvermögen). Das Geschiebetransportvermögen ist neben dem Abfluss abhängig von der Gerinnegeometrie, dem Energieliniengefälle und der Korngrößenverteilung. Wird einem Fließgewässer gleich viel Geschiebe zugeführt, wie es transportieren kann, befindet es sich im Gleichgewicht. Wird mehr Geschiebe zugeführt, ergeben sich Auflandungen. Wird weniger Geschiebe zugeführt, versucht das Gewässer, das Geschiebedefizit durch Geschiebeaufnahme aus der Sohle zu kompensieren. Durch das Ausschwemmen von feinkörnigen Komponenten ergibt sich eine zunehmende Vergrößerung der Sohle und die grösseren Komponenten werden durch die hydraulische Belastung dachziegelartig ausgerichtet (Deckschichtbildung). Bis grössere Sedimentmengen aus der Sohle mobilisiert werden können, muss diese Deckschicht aufgerissen werden, wozu ein bestimmter Grenzabfluss erforderlich ist.

Das Transportvermögen kann mit Hilfe von Geschiebetransportformeln berechnet werden. In Gerinnen mit Energieliniengefällen zwischen 0.4‰ und 2.3% kommt beispielsweise die Formel von Meyer-Peter und Müller (1948) zur Anwendung<sup>3</sup>:

$$g_b = \frac{8g^{0.5}\rho_s}{(s-1)} \left[ \left( \frac{k_{StS}}{k_{Str}} \right)^{3/2} R_b J - 0.047(s-1)d_m \right]^{3/2}$$

mit

$g_b$  Gewicht des pro Meter Gerinnebreite und Sekunde transportierten Geschiebes [kg/s/m]

$\rho_s$  spezifisches Gewicht des Geschiebes [kg/m<sup>3</sup>]

$s-1$  =1.65, Berücksichtigung des Auftriebs

$k_{StS}$  Rauigkeitsbeiwert der Sohle (Kornrauigkeit und Formrauigkeit) [m<sup>1/3</sup>/s]

$k_{Str}$  Rauigkeitsbeiwert Kornrauigkeit [m<sup>1/3</sup>/s]

$R_b$  hydraulischer Radius [m]

$J$  Energieliniengefälle [-]

$d_m$  massgebender Korndurchmesser des Geschiebes [m]

---

<sup>3</sup> Die Referenzen sind in Grundlage [43] aufgeführt.

Der Transportbeginn, d.h. derjenige Abfluss, ab dem Geschiebe transportiert werden kann, wird mit einem Vergleich der an einem Korn angreifenden Schubspannung und dem Erosionswiderstand bestimmt. Liegt die dimensionslose Schubspannung ( $\Theta$ ) über dem kritischen Wert von  $\Theta_{cr} = 0.05$ , kann Geschiebe mit einem bestimmten mittleren Korndurchmesser transportiert werden. Ist  $\Theta$  kleiner als 0.05, ist kein Geschiebetransport möglich und zugeführtes Geschiebe lagert sich auf der Sohle ab.

$$\Theta = \frac{hJ}{(s-1)d_m} \quad \text{mit}$$

- h      Abflusstiefe [m]  
 J      Energieliniengefälle [-]  
 s-1    = 1.65, Berücksichtigung des Auftriebs [-]  
 d<sub>m</sub>    mittlere Korndurchmesser des Geschiebes [m]

Bei einer ausgebildeten Deckschicht wird das darunter liegende Sohlenmaterial solange vor Erosion geschützt, bis die Deckschicht aufgerissen wird. Der dazu erforderliche Grenzabfluss  $Q_D$  kann je nach Korngrößenverteilung des Sohlenmaterials deutlich grösser sein, als der Abfluss  $Q_0$ , der für den Transport des unter der Deckschicht liegenden (feineren) Geschiebes notwendig wäre.

Im Abflussbereich zwischen  $Q_0$  und  $Q_D$  verhindert die Deckschicht eine Erosion der Sohle mit entsprechender Geschiebeaufnahme und die tatsächliche Geschiebeführung entspricht dem Geschiebeeintrag in den betrachteten Abschnitt (aus Oberlauf und Zuflüssen).

Für die Berechnung von  $Q_D$  kann das Verfahren von Gessler (1965) oder die Formel von Günter (1971) angewendet werden.

$$\Theta_{cD} = \Theta_{cr} \left( \frac{d_{mD}}{d_m} \right)^{2/3} \approx 0.05 \left( \frac{d_{90}}{d_m} \right)^{2/3} \quad \text{mit}$$

- d<sub>mD</sub>    mittlerer Korndurchmesser der Deckschicht (beliebige Einheit, da Verhältnisse gebildet werden)  
 d<sub>m</sub>    mittlerer Korndurchmesser der Unterschicht  
 d<sub>90</sub>    Korndurchmesser mit 90%igem Siebdurchgang der Unterschicht

Durch das Rollen und Gleiten während dem Transport werden die Geschiebekörner abgeschliffen und entsprechend verkleinert (Abrieb). Der Massenverlust kann mit dem Gesetz von Sternberg (1875) beschrieben werden. Bezogen auf den Korndurchmesser (d), resp. auf die Geschiebefracht (V) gilt

$$d_x = d_0 e^{\frac{-cx}{3}}, \quad V_x = V_0 e^{-cx}$$

mit

- d<sub>x</sub>, V<sub>x</sub>    Korndurchmesser, resp. Geschiebevolumen an der Stelle x  
 d<sub>0</sub>, V<sub>0</sub>    Korndurchmesser, resp. Geschiebevolumen an der Stelle 0  
 x          Transportdistanz zwischen der Stelle 0 und der Stelle x in [km]  
 c          Abriebkoeffizient, für Thurgeschiebe gilt c = 0.012

Die Feinsedimente (Ton-, Silt- und Sandfraktionen<sup>4</sup>) können als Schweb oder Geschiebe transportiert werden oder sie lagern sich auf der Sohle ab. Der Transport eines Partikels ist abhängig vom Partikeldurchmesser und der Fliessgeschwindigkeit.

Kresser (1964)<sup>5</sup> definierte eine Beziehung für die Grenzgeschwindigkeit eines Korns zwischen dem Transport als Geschiebe oder als Schweb:

$$v_m^2 = 360 g d$$

Kozyeny (1953) untersuchte, bei welcher Grenzgeschwindigkeit der Transport von Körnern mit verschiedenen Durchmessern beginnt:

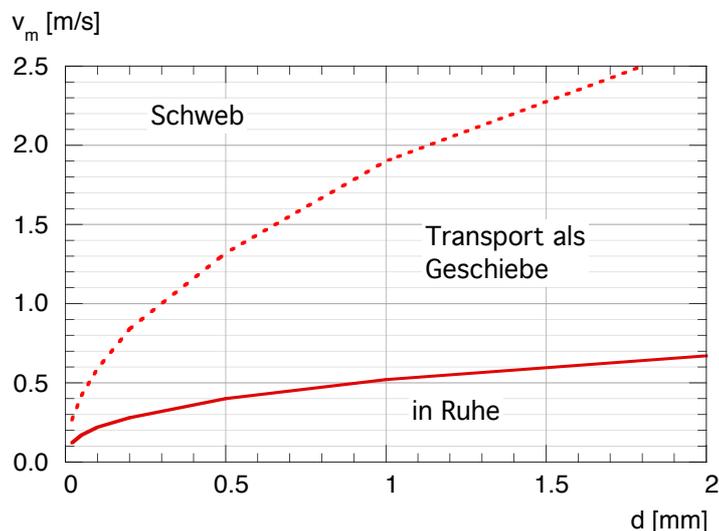
$$v_m = 6.93 d^{3/8}$$

In Bild 2.1 sind die zwei Beziehungen grafisch dargestellt. Es können folgende Feststellungen gemacht werden:

Bei  $v_m = 0.5\text{m/s}$  sind Partikel mit einem Durchmesser von  $0.1\text{mm}$  in Schweb und Sandkörner bis  $0.9\text{mm}$  werden als Geschiebe über die Sohle transportiert. Bei  $v_m = 0.4\text{m/s}$  betragen die entsprechenden Durchmesser  $0.05\text{mm}$  und  $0.5\text{mm}$ .

Sind in einem Fliessgewässer permanente Schwebstoffablagerungen und damit eine zunehmende Verlandung zu vermeiden, so müssen Ablagerungen von kohäsiven Partikeln (Tone, Silte mit Tonanteil) verhindert werden. Kohäsive Ablagerungen können erst wieder bei einer viel grösseren Fliessgeschwindigkeit erodiert werden. Dies bedeutet, dass bei schwebstoffführenden Abflüssen eine mittlere Fliessgeschwindigkeit von mindestens  $0.4\text{m/s}$  erreicht werden muss, damit sich keine kohäsiven Feinsedimentablagerungen bilden.

*Bild 2.1*  
Abhängigkeit des Transportverhaltens von Schwebstoffkörnern mit unterschiedlichem Durchmesser  $d$  von der mittleren Fliessgeschwindigkeit  $v_m$ .



<sup>4</sup> Ton:  $d < 0.002\text{mm}$ , Silt:  $d = 0.002 - 0.06\text{mm}$ , Sand:  $d = 0.06 - 2\text{mm}$

<sup>5</sup> Die Referenzen für die Grenzkriterien zum Feinsedimenttransport sind in Grundlage [44] beschrieben.

## 2.2 Kolmation

Die Ablagerung von Feinsedimenten auf der Gewässersohle wird als äussere Kolmation und die Einlagerung von Feinsedimenten im Porenraum der Gewässersohle als innere Kolmation bezeichnet.

Die äussere Kolmation stellt sich in Zonen ein, die aufgrund von zu kleinen Fließgeschwindigkeiten zu einem Absetzen der Feinsedimente auf der Gewässersohle führen (z.B. in Flusstauhaltungen). Steigen die Fließgeschwindigkeiten bei zunehmendem Abfluss an, können die abgelagerten Feinsedimente wieder abgeschwemmt werden.

Die innere Kolmation ergibt sich durch schwebstoffhaltiges Wasser, das in die poröse Gewässersohle eindringt. Dabei werden die Feinsedimente in der Kornmatrix der Gewässersohle ausfiltriert. Dieser Ablagerungsprozess findet massgeblich in der obersten Schicht der Gewässersohle statt und führt zu einer Verkleinerung des Porenraums (Lebensraum Makrozobenthos, Reproduktionsraum für kieslaichende Fischarten, vgl. Kapitel 4), der Durchlässigkeit und des Sauerstoffeintrags. Für die innere Kolmation von besonderer Bedeutung sind dabei die feinen Schwebstoffpartikel der Ton- und Siltfraktion, die aufgrund ihrer kohäsiven Eigenschaft die Sohle verfestigen und die Durchlässigkeit entscheidend verringern. Eine Kolmation kann sich bei der Exfiltration von Grundwasser nicht und bei klarem Wasser (z.B. Seeausfluss) nur unwesentlich entwickeln.

Bei Abflüssen, die zu einem Aufreissen der Deckschicht führen ( $Q > Q_D$ ), werden die eingelagerten Feinsedimente wieder freigespült (Dekolmation). Die massgebenden Einflussgrößen zur Ausbildung der inneren Kolmation sind in Tabelle 2.1 zusammengestellt.

Tabelle 2.1 Einflussgrößen der inneren Kolmation.

Einflussgrösse	Langsame Kolmation	Rasche Kolmation
Schwebstoffkonzentration (C)	Bei tiefer C (klarem Wasser) praktisch vernachlässigbare Kolmationsentwicklung Beispiele: Niederwasserabfluss im Winter oder Seeausfluss	Hohe C führen zu einer raschen Durchlässigkeitsabnahme und Verfestigung der Sohle Beispiele: Hochwasserabfluss ohne Dekolmation, Spülungen
Kornverteilung des Sohlenmaterials (KV)	Sohlen mit schmaler KV zeigen eine höhere Porosität. Zur Auffüllung des Lückenraums sind mehr Feinpartikel erforderlich, d.h. langsamere Kolmationsentwicklung Beispiel: Rollkieslage, Sohle im Bereich von Schnellen (riffle)	Bei Sohlen mit breiter (gut abgestufter) KV bildet sich unter der Deckschicht relativ rasch eine dünne Kolmationsschicht Beispiel: Rinne (pool), Furt (run)
Sickerströmung, hydraulischer Gradient (i)	Bei kleinen hydraulischen Gradienten bilden sich dünne Kolmationshorizonte. Die innere Kolmation kann sich nur beschränkt ausbilden. Beispiel: Hochliegender Grundwasserspiegel, eher in Rinne	Hohe hydraulische Gradienten (tiefer Grundwasserspiegel) führen zu starker innerer Kolmation Beispiel: Perkolierende Infiltration, verstärkt in Furt
Abfluss, Sohlenschubspannung (Q)	Kleine Schubspannungen zeigen keinen Einfluss auf die Kolmationsentwicklung Beispiel: eher in Rinne	Steigende Schubspannungen führen zu einer beschleunigten Kolmationsentwicklung (Einvißieren der Feinpartikel). Dies trifft zu, solange keine Dekolmation der Sohle eintritt (d.h. solange die Deckschicht nicht aufgerissen wird) Beispiel: eher in Furt
Wassertemperatur	Tiefe Wassertemperaturen (Winter) resp. grosse Zähigkeiten führen zu verzögerter innerer Kolmation	Erhöhte Wassertemperaturen (Sommer) resp. kleine Zähigkeiten führen zu verstärkter innerer Kolmation

## 2.3 Geschiebetransport in Flie遝sstrecken

In frei flie遝nde Strecken eingetragenes Geschiebe wird bei erhöheten Abflüssen in Sohlennähe transportiert und kann sich im Strömungsschatten von bestehenden Strukturen (z.B. Inseln, Uferbuchten), bei Mandern entlang von Gleithängen oder in Aufweitungen und Verzeigungen über der ganzen Gewässersohle ablagern, bevor es bei nachfolgenden Hochwasserabflüssen wieder mobilisiert und weiter transportiert wird. Der Ablagerungsprozess an Gleithängen wird durch die Spiralstromung in Flusskrümmungen verursacht, bei welcher die sohlennahe Strömung gegen den Gleithang und die oberflächennahe Strömung gegen den Prallhang gerichtet ist.

Ist die Geschiebefracht in einem Streckenabschnitt grösser als das Transportvermögen, ergeben sich Ablagerungen, die sich ausgehend von einem Sohlenfixpunkt (Schwelle, Felsaufschluss usw.) keilförmig gegen die Flie遝srichtung ausbreiten.

Ist die Geschiebefracht kleiner als das Transportvermögen, wird das Geschiebe ablagerungsfrei transportiert. Eine Geschiebeaufnahme infolge Sohlenerosion setzt dann ein, wenn der Grenzabfluss für das Aufreissen der Deckschicht ( $Q_D$ , vergl. Kapitel 2.1) überschritten wird.

## 2.4 Geschiebetransport in Stauhaltungen

Aufgrund der Stauwirkung nimmt das Transportvermögen in Flie遝srichtung zunehmend ab. Das Geschiebe lagert sich im Stauwurzelbereich ab und wird bei Hochwasserabflüssen etwas weiter in den Staubereich verlagert. Mit zunehmender Wassertiefe ist in der Regel eine klare Geschiebefront erkennbar. Oft erfolgt auch eine gewisse Sortierung des Geschiebes in Flie遝srichtung, wobei sich die grobkörnigen Fraktionen im Stauwurzelbereich ablagern und die feineren Geschiebefraktionen und Feinsedimente weiter in die Stauhaltung gelangen. Im Wehrbereich ergeben sich oft mächtige Feinsedimentablagerungen.

Der Ablagerungsprozess dauert so lange, bis das Transportvermögen wieder ausreicht, um das anfallende Geschiebe durch die Stauhaltung zu transportieren. Dies kann aus Hochwasserschutzgründen häufig nicht zugelassen werden.

Aufgrund von Schubspannungsberechnungen (Kapitel 2.1) in den verschiedenen Stauhaltungen können den Kraftwerken grob die in Tabelle 2.2 aufgeführten Abflüsse zugeordnet werden, die erforderlich sind, um Geschiebe bis in die Wehrrahe zu transportieren. Wie gross der Geschiebeein- und -austrag ist und welchen Einfluss die Feinsedimentablagerungen haben, die bei Hochwasserabflüssen resuspendiert werden können, kann mit diesem Ansatz nicht beurteilt werden.

*Tabelle 2.2 Grössenordnung der erforderlichen Mindestabflüsse für die Gewährleistung des Geschiebetransportes bis in Wehrröhre der Kraftwerke mit Wehrbetrieb gemäss bestehenden Konzessionen. Q<sub>x</sub>: Abfluss der an x Tagen/Jahr erreicht oder überschritten wird, HQ<sub>x</sub>: Hochwasserabfluss mit Wiederkehrperiode von x Jahren. Zu beachten: die Angaben stammen aus älteren Untersuchungen, wodurch die Auftretenshäufigkeiten (Q<sub>x</sub>, HQ<sub>x</sub>) nicht mehr mit den aktuellen Werten gemäss Kapitel 6.1 übereinstimmen.*

Kraftwerk	Ungefäher Mindestabfluss	Quelle	Bemerkung
Schaffhausen	730m <sup>3</sup> /s (ca. Q <sub>9</sub> )	[1]	
Rheinau	> 880m <sup>3</sup> /s (> ca. HQ <sub>10</sub> )	[1]	Aufgrund der Wehrkonstruktion ist kein Geschiebetransport durch das Wehr möglich.
Eglisau	Kein Transport möglich	[13]	
Reckingen	Kein Transport möglich	[13]	
Albruck-Dogern	< 3'580m <sup>3</sup> /s (HQ <sub>10</sub> )	[1]	1996 konnten im Unterwasser des Wehrs Geschiebeablagerungen beobachtet werden, welche nur aus der Stauhaltung stammen konnten [3]. Bei einer Reaktivierung des Geschiebehaushalts ist in der tieferen Stauhaltung mit Ablagerungen zu rechnen, die den Geschiebetransport begünstigen [13].
Laufenburg	Q <sub>9</sub> = 2'053m <sup>3</sup> /s	[1]	Durch den Standort des Kraftwerks unmittelbar rheinabwärts des heute eingestauten Laufens, werden die Strömungsverhältnisse in der Stauhaltung gegenüber früher nur geringfügig verändert.
Säckingen	<HQ <sub>10</sub> = 3'576m <sup>3</sup> /s	[1]	
Ryburg-Schwörstadt	HQ <sub>10</sub> = 3'576m <sup>3</sup> /s	[14]	Im Anschluss an das Hochwasser vom August 2005 (ca. HQ <sub>10</sub> ) konnten im Unterwasser des Kraftwerks und im Bereich der Insel bei Rheinfeldern frische Feingeschiebeablagerungen festgestellt werden.
Rheinfeldern	>Q <sub>9</sub> = 2'053m <sup>3</sup> /s	[14]	Der mit der Neukonzessionierung erfolgte Höherstau ist berücksichtigt.
Augst-Wyhlen	<HQ <sub>10</sub> = 3'576m <sup>3</sup> /s	[1, 14]	
Birsfeldern	HQ <sub>10</sub> = 3'700m <sup>3</sup> /s	[14]	

Bei einer Absenkung des Stauspiegels bei Hochwasserabflüssen wird das Geschiebe tiefer in die Stauhaltung transportiert und die Ablagerungen, die für den Durchtransport des Geschiebes erforderlich sind, fallen weniger mächtig aus. Die Prozesse sind in Bild 2.2 schematisch dargestellt.

In der Anfangsphase der Absenkung werden Feinsedimentablagerungen aus der tieferen Stauhaltung resuspendiert und aus dem Stauraum ausgetragen (Schritt 1 in Bild 2.2). In welchem Umfang die abgelagerten Feinsedimente resuspendiert werden, hängt von den hydraulischen Verhältnissen, resp. vom Mass der Absenkung ab. Geschiebeablagerungen aus dem Stauwurzelbereich werden mobilisiert, tiefer in die Stauhaltung eingetragen und dort auf der ursprünglichen Sohle oder nicht erodierten Feinsedimenten abgelagert (Schritt

2)<sup>6</sup>. Aus Zuflüssen und dem Oberlauf eingetragenes Geschiebe wird in die Stauhaltung transportiert und lagert sich ebenfalls ab (Schritt 3). Mit jeder Stauabsenkung wachsen die Ablagerungen in der Stauhaltung bis die Mächtigkeit ausreicht, um das Geschiebe durch die Stauhaltung zu transportieren. Je grösser die Ablagerungen im Stauwurzelbereich sind, desto rascher kann mit einem Durchtransport gerechnet werden.

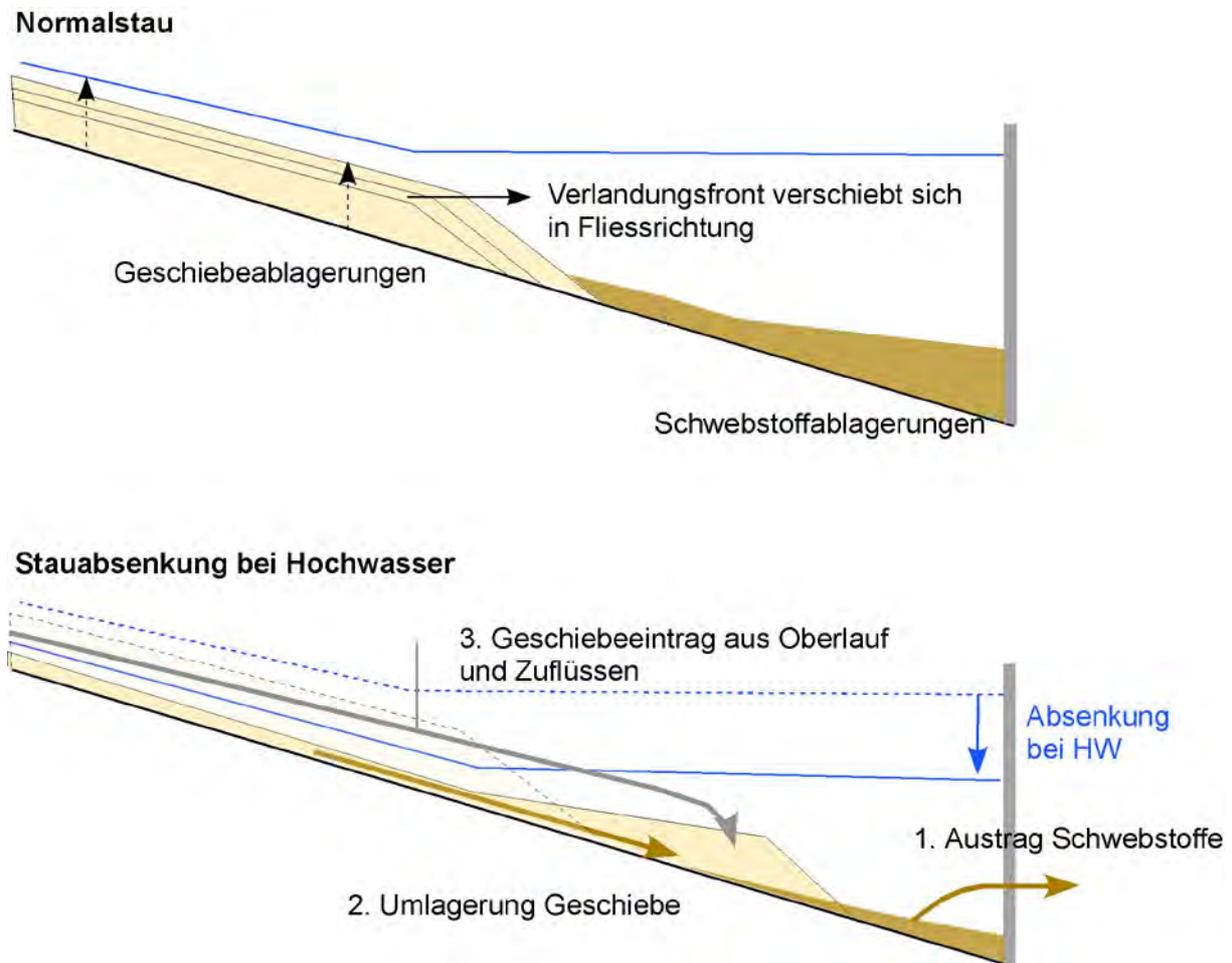


Bild 2.2 Umlagerungsprozesse in Stauhaltungen bei Normalstau (oben) und während Stauabsenkungen bei Hochwasser (unten).

Die Untersuchungen im Rahmen der Neukonzessionierungen der Kraftwerke Eglisau und Ryburg-Schwörstadt (Grundlagen [13, 14]) zeigten, dass während Stauabsenkungen beim Kraftwerk Eglisau mit einem Feinsedimentaustrag von rund 700'000m<sup>3</sup> und beim Kraftwerk Ryburg-Schwörstadt von 180'000m<sup>3</sup> zu rechnen ist.

Es ist zu beachten, dass sich diese Prozesse nur während Stauabsenkungen abspielen und auf kurze Zeit und grössere Abflüsse beschränkt sind. Auf die hydraulischen Verhältnisse (Abflusstiefen, Fließgeschwindigkeit und -verteilung) haben sie im Normalfall keinen Einfluss. Das in der tieferen Stauhaltung ab- oder zwischengelagerte Geschiebe kann zudem

<sup>6</sup> Der Prozess der Überlagerung von Schwebstoffen durch Geschiebe wurde anhand von physikalischen Modellversuchen für die Inn-Stauhaltung Pradella im Engadin untersucht (Grundlage [48]).

von Feinsedimenten überdeckt werden. Es erfolgt zwar eine Dekolmation während der Stauabsenkung, bei der das Geschiebe umgelagert wird. In der Aufstauphase werden jedoch immer noch Feinsedimente in die Stauhaltung eingetragen und auf dem frisch umgelagerten Geschiebe abgelagert. Die Überdeckung von in Stauhaltungen abgelagertem Geschiebe mit Feinsedimenten kann beispielsweise bei der Tössmündung beobachtet werden. Somit sind temporäre Stauabsenkungen als technische Massnahmen ausschliesslich zur Weiterleitung des Geschiebes durch die Stauhaltung bis ins Unterwasser des Wehrs zu verstehen, die jedoch zu keiner ökologischen Aufwertung des Stauraums führen.

## 2.5 Geschiebetransport und Grundwasser

Die Grundwasserverhältnisse entlang dem Hochrhein sind im Anhang 6 beschrieben (aus [1]). Demnach besteht über weite Strecken eine Wechselwirkung mit Grundwasserinfiltration und –exfiltration. In Abschnitten, in welchen der Rhein ins Grundwasser infiltriert, wird die Infiltrationsrate durch den Kolmationsgrad der Rheinsohle bestimmt. Da die Deckschicht der grobkörnigen Rheinsohle nur bei sehr grossen Hochwasserereignissen aufgerissen werden kann, ist davon auszugehen, dass die Sohle weitgehend kolmatiert und die Infiltrationsrate entsprechen klein ist. Bei einer Reaktivierung des Geschiebehaushaltes wird sich das feinkörnige Geschiebe auf der grobkörnigen Sohle ab- und umlagern. Die Zusammensetzung des Sohlenmaterials und damit der Erosionswiderstand ändern sich nicht. Somit kann davon ausgegangen werden, dass sich die Grundwasserverhältnisse bei vermehrten Geschiebeumlagerungen nicht verändern.

In den tieferen Stauhaltungen wird die Grundwasserinfiltration durch die Feinsedimente, welche auf der grobkörnigen Sohle abgelagert sind, beeinflusst. Eine Veränderung ist höchstens bei einer vollständigen Auswaschung der Feinsedimente mit entsprechender Freilegung der ursprünglichen Flusssohle denkbar. Grössere Ausspülungen sind aber nur bei Stauabsenkungen zu erwarten. Auch in diesem Fall ist davon auszugehen, dass die Deckschicht nicht oder nur in Kombination mit ausserordentlichen Hochwasserereignissen aufreisst und die Veränderungen somit von untergeordneter Bedeutung sind.

Wie die Untersuchungen zu den Neukonzessionierungen der Kraftwerke Eglisau und Ryburg-Schwörstadt zeigten, können Stauabsenkungen zu einer Umkehr der Strömungsrichtung des Grundwassers mit einer Exfiltration in den abgesenkten Stauraum führen. Je nach Absenkgeschwindigkeit und –mass können sich Uferinstabilitäten ergeben. Ob und in welchem Umfang mit Uferinstabilitäten gerechnet werden muss, ist im konkreten Fall durch Fachspezialisten abzuklären.

## 2.6 Stabilität von Kiesschüttungen

Die Stabilität von Kiesschüttungen wird anhand einer Schubspannungsbetrachtung beurteilt. Dazu wird der Grenzabfluss für den Geschiebetransportbeginn streifenweise über der Kiesbankoberfläche, der Kiesbankböschung und am Böschungsfuss berechnet (Bild 2.3).

Sobald die dimensionslose Schubspannung den kritischen Wert von  $\Theta_{cr} = 0.05$  am Böschungsfuss erreicht, wird dieser erodiert und die Kiesbankböschung rutscht nach (Auflockerungserscheinung). Wird  $\Theta_{cr}$  über der ganzen Böschung erreicht erfolgt eine seitliche Erosion gegen das Kiesbankinnere. Wird  $\Theta_{cr}$  auf der Kiesbankoberfläche erreicht, beginnt der flächige Abtrag der Schüttung.

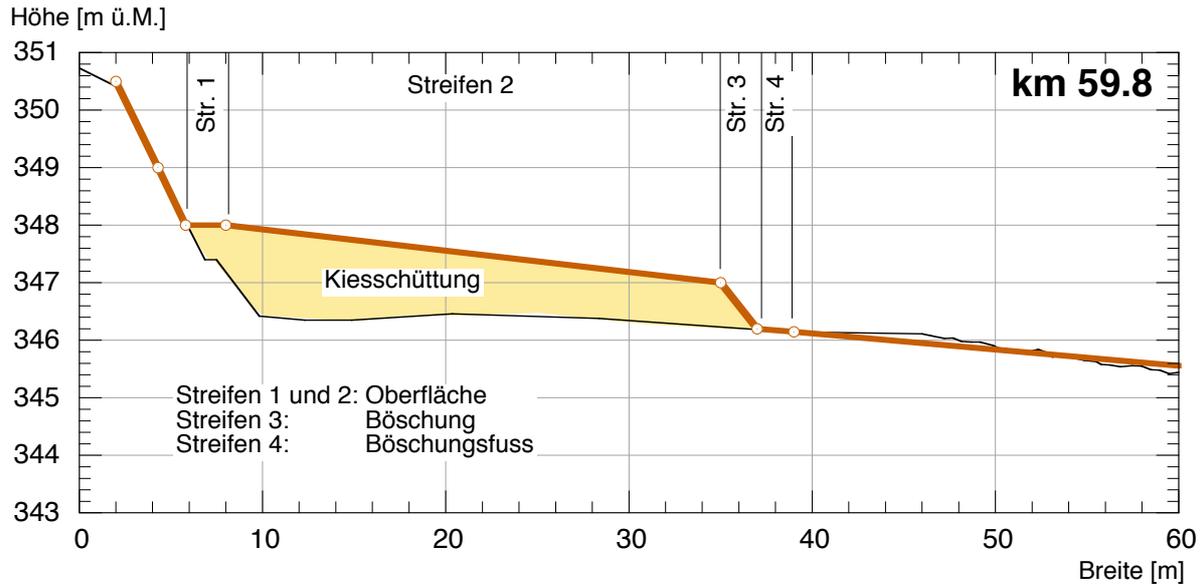


Bild 2.3 Streifenweise Schubspannungsberechnung zur Beurteilung der Stabilität von Schüttungen.

## 3 Hydraulische und geschiebemechanische Berechnungen

### 3.1 Generelles zur numerischen Modellierung

Ein numerisches Modell ist der Versuch einer mathematischen Abbildung der Wirklichkeit. Er beruht im Ansatz auf den Erhaltungsgleichungen der Physik, insbesondere der Erhaltung von Masse und Impuls. Zur Simulation der Wasserströmung können diese Gleichungen fehlerfrei gelöst werden, wobei die Rechenzeiten dann sehr hoch sind und geeignete Vereinfachungen zur Beschleunigung der Berechnungen gewählt werden. Der Geschiebetrieb basiert auf wesentlich komplexeren physikalischen Prozessen und wird in den Modellen vereinfacht mittels empirischer Beziehungen nachgebildet.

Ein grundsätzliches Problem der numerischen Modellierung des Geschiebetransports in Flüssen ist die oft unzureichende Kenntnis des natürlichen Systems. Geschiebeanalysen, Sohllagen oder Geschiebefrachten liegen nur an diskreten Punkten oder zu diskreten, meist weit auseinanderliegenden Zeitpunkten vor. Gerade weil die Prozesse nicht vollständig physikalisch sondern auch empirisch beschrieben werden müssen, wäre es wichtig, das Verhalten des Natursystems genau zu kennen, weil damit die freien Parameter der empirischen Beschreibungen geeicht und dann eine extrapolierende Prognose besser abgestützt werden könnte. Aufgrund der vorliegenden Datenlage am Hochrhein war der Kalibrierungsprozess schwierig und die Resultate sind entsprechend zu werten.

Als Berechnungsmodelle wurden ein- und zweidimensionale, numerische Modelle eingesetzt. Während ein 1D Modell die relevante Geometrie und die Strömung in aufeinanderfolgenden Querschnitten betrachtet, kann das 2D Modell eine flächige Darstellung der Topographie und der Strömungsparameter abbilden. Generell können mit beiden Modellen gute Resultate erreicht werden, wobei im 1D Modell die physikalischen Vereinfachungen mittels Erfahrung und damit Wahl der Rechenparameter wettgemacht werden müssen. Da

das 2D Modell die Physik mehr berücksichtigt, können weniger Parameter frei gewählt werden, allerdings werden die Berechnungen komplexer und sensitiver und Expertenwissen ist gefragt. Die 1D Rechnungen ergeben gute Aussagen in Bezug auf die transportierten Geschiebevolumina, während die 2D Rechnungen zusätzlich die hydraulischen Parameter, die Sohllagen und Sohlzusammensetzungen in hoher flächiger und zeitlicher Auflösung liefern. Im Gegensatz zum 1D Modell kann somit auch das Wandern von Sohlstrukturen bzw. Geschiebeeinstössen durch das Rechengebiet zeitlich verfolgt werden. Dem 2D Modell wurde zusätzlich zur Hydraulik und dem Geschiebe- und Schwebstofftransport ein Fischhabitatmodell angekoppelt. Damit können Veränderungen in Lage und Zusammensetzung der Sohle dynamisch mit den Habitatbedingungen verbunden werden.

### 3.2 Modellgenauigkeit

Neben den in Kapitel 3.1 erwähnten Vereinfachungen in der mathematischen Abbildung der komplexen Prozesse müssen bei Simulationsrechnungen auch Annahmen bezüglich der Randbedingungen getroffen werden. Als Eingangsgrößen werden Angaben zur Gerinnetopografie, zur Hydrologie (Abflussganglinien) sowie zur Kornverteilung des Sohlenmaterials und des Geschiebes verwendet. Die grössten Unsicherheiten bei Prognoserechnungen bestehen bei hydrologischen Annahmen resp. beim zukünftigen Auftreten von Hochwasserabflüssen. Insbesondere sind alle Aussagen zum Ablauf dynamischer Prozesse mit dieser Annahme gekoppelt. Betroffen sind die zeitliche Entwicklung der Sohle, der Habitate sowie der Geschwindigkeit, mit der Geschiebematerial durch eine Stauhaltung transportiert wird. Die Resultate der Modellberechnungen dürfen daher nicht als absolute Werte betrachtet werden, sondern vielmehr als Aussage über die Machbarkeit sowie die zu erwartenden Grössenordnungen.

In Grundlage [14], Fachbericht C.5.1 (UVB KW Ryburg – Schwörstadt) konnte bezüglich der Kornzusammensetzung gezeigt werden, dass eine veränderte Annahme des mittleren Korndurchmessers (dm 2.0cm anstatt 1.8cm) nach einer Simulationszeit von 48 Jahren eine Verminderung des berechneten Geschiebeaustrags von rund 15 - 50% zur Folge hat (vgl. auch Kapitel 3.5). Die grundsätzliche Aussage, dass ein Geschiebeaustrag erfolgt, wird dadurch aber nicht verändert. Da die Geschiebe-Transportfähigkeit recht genau nachgebildet werden kann, sind die Angaben zu den erforderlichen Absenkhöhen der Staukoten relativ zuverlässig.

### 3.3 Berechnungsmodelle

Für die Defizitanalyse und die Ermittlung des Aufwertungspotenzials (Kapitel 6.6 – 6.8) wurden eindimensionale Staukurvenmodelle eingesetzt, die anhand von gemessenen Wasserspiegellagen geeicht wurden. Mit diesen Modellen wurden für den Hochrhein zwischen der oberen Konzessionsgrenze des Kraftwerks Schaffhausen (Diessenhofen) und dem Kraftwerk Birsfelden für ausgewählte Abflüsse die mittleren Fliessgeschwindigkeiten und die für die Beurteilung des Geschiebetransportvermögens relevanten hydraulischen Grössen (Abflusstiefen, Energieliniengefälle) berechnet.

Für die Beurteilung des Einflusses von Stauabsenkungen auf das Geschiebetransportvermögen wurden Simulationsmodelle eingesetzt, die Sohlenveränderungen aufgrund von Geschiebeumlagerungen berücksichtigen. Für die Stauhaltungen der Kraftwerke Eglisau,

Reckingen, Ryburg-Schwörstadt, Rheinfelden, Augst-Wylen und Birsfelden standen die Resultate von eindimensionalen Simulationen, die im Rahmen von Neukonzessionierungen durchgeführt wurden, zur Verfügung (Kapitel 3.4 und 3.5).

Als Zusatzauftrag zum Masterplan wurden durch die Technische Universität München (TUM) in der Fließstrecke Reckingen – Koblenz und den anschliessenden Stauhaltungen und Restwasserstrecke der Kraftwerke Albruck-Dogern, Laufenburg, Säckingen und Ryburg-Schwörstadt zweidimensionale Simulationen mit gekoppeltem Fischhabitatmodell durchgeführt. In der Stauhaltung Ryburg-Schwörstadt wurden die zweidimensionalen Berechnungsergebnisse mit den eindimensionalen Simulationsrechnungen, die im Rahmen der Neukonzessionierung des Kraftwerks durchgeführt wurden, verglichen. Zusätzlich lieferten die zweidimensionalen Berechnungen örtlich und zeitlich hoch aufgelöste Resultate, wie sie für eine Beurteilung dynamischer Prozesse auf der Flusssohle als auch dynamischer Entwicklungen von Fischhabitatsbedingungen erforderlich sind. Die Resultate sind in einem separaten Bericht der TUM dokumentiert und die wichtigsten Resultate in Kapitel 3.6 zusammengefasst.

### 3.4 Berechnungen im Rahmen der Konzessionserneuerung Kraftwerk Eglisau

#### 3.4.1 Überblick

Im Rahmen der Untersuchungen zum UVB für die Neukonzessionierung des Kraftwerks Eglisau wurden 1-dimensionale Simulationsrechnungen für die Stauhaltungen der Kraftwerke Eglisau und Reckingen sowie für die frei fließende Strecke zwischen dem Kraftwerk Reckingen und der Aaremündung durchgeführt (Grundlage [13], Fachbericht 4C). Im Berechnungsmodell der Stauhaltung Eglisau wurde der 5km lange Mündungsabschnitt der Thur mitberücksichtigt. Die Simulationen erfolgten mit dem an der ETH Zürich erstellten und von der Flussbau AG weiterentwickelten Programm MORMO. Die verwendete Modellversion (4-Korn) erlaubt die getrennte Betrachtung von grobkörnigem Sohlenmaterial und Geschiebe.

Das Modell der Stauhaltung Eglisau wurde anhand von gemessenen Wasserspiegeln und Sohlenveränderungen im Stauwurzelbereich (Periode 1997 – 2002 ohne Baggerungen) geeicht und die Eicheinstellungen in den anderen Modellen übernommen.

Für die Simulationsberechnungen wurden die Stundenmittelwerte der eidgenössischen Abflussmessstationen Rhein-Neuhausen und Thur-Andelfingen (Abschnitt Thurmündung bis Tössmündung) sowie Rhein-Rekingen verwendet. Die Messperiode 1977 - 2002 wurde zwei Mal aneinander gehängt, um mit den verfügbaren digitalen Daten eine möglichst lange Abflussganglinien zu generieren. Abflüsse unter  $450\text{m}^3/\text{s}$  wurden nicht berücksichtigt (keine Geschiebeumlagerungen). In allen untersuchten Abschnitten wurden folgende Modelleinstellungen gewählt:

- Ufer- und Sohlenrauigkeiten gem. Eichung Eglisau.
- Massgebender Korndurchmesser Geschiebe:  $d_m = 2.2\text{cm}$  (entspricht Thurgeschiebe), Kontrastrechnungen mit  $d_m = 2\text{cm}$ .
- Transportformel: Meyer-Peter/Müller, modifiziert nach Hunziker, streifenweise Berechnung des Geschiebetransportes (vgl. Grundlage [43]).

- Geschiebeeintrag Thur  $13'000\text{m}^3/\text{Jahr}$  (Kontrastrechnung mit  $16'000\text{m}^3/\text{Jahr}$ ), Töss  $3'000\text{m}^3/\text{Jahr}$ .
- Stauabsenkungen: Beginn jeweils ab  $Q = 900\text{m}^3/\text{s}$ , bei  $Q_9 = 880\text{m}^3/\text{s}$  um 4.5m unter Stauziel abgesenkt.

Während den Stauabsenkungen ergeben sich grössere hydraulische Belastungen, die in der Anfangsphase zu einer teilweisen Erosion der Schwebstoffe führen. Sobald die Geschiebefront die tiefere Stauhaltung erreicht, werden die restlichen Schwebstoffe überdeckt und deren weitere Erosion verhindert (vgl. Kapitel 2.4).

Für die Erosion der Schwebstoffe gilt:

- Bereiche, die während Stauabsenkungen trocken fallen, werden nicht erodiert.
- Für die Erosion der Schwebstoffe ist eine bestimmte Fließgeschwindigkeit erforderlich, die von den Korngrößen der Schwebstoffe (Kohäsion) abhängt.

Die Grenzgeschwindigkeit, die zur Erosion der Feinsedimente führt, wurde anhand von Querprofilvergleichen und Staukurvenberechnungen in der Stauhaltung Eglisau ermittelt. In einem ersten Schritt wurden anhand eines Vergleichs der Querprofilvermessungen aus verschiedenen Aufnahmejahren die Rheinabschnitte ermittelt, in denen keine zunehmende Feinsedimentverlandung feststellbar ist. Danach wurden die Fließgeschwindigkeiten in diesen Abschnitten unter Berücksichtigung des normalen Wehrbetriebs berechnet. Anschliessend wurden die Querprofile in den betroffenen Abschnitten (tiefere Stauhaltung) so angepasst, dass sich bei abgesenktem Staupegel die gleichen Fließgeschwindigkeiten ergaben.

Aufgrund der geringeren Bearbeitungstiefe wurde für die Stauhaltung Reckingen der Austrag von Feinsedimenten nicht berücksichtigt.

### 3.4.2 Resultate

Mit den Simulationsrechnungen wurden die zeitliche Entwicklung der Sohle und die transportierten Geschiebefrachten untersucht. Die transportierten Geschiebefrachten sind in Transportdiagrammen dargestellt. Darin bedeuten ansteigende Linien eine Erhöhung der Geschiebefracht aufgrund von seitlichen Einträgen oder Sohlenerosionen und abfallende Linien eine Verminderung der Geschiebefracht aufgrund von Ablagerungen.

In den Bildern 3.1 und 3.2 sind die Resultate für den Fall mit einem Geschiebeeintrag von  $16'000\text{ m}^3/\text{Jahr}$  (Thur;  $13'000\text{ m}^3/\text{Jahr}$ , Töss:  $3'000\text{ m}^3/\text{Jahr}$ ) in der Stauhaltung des Kraftwerks Eglisau dargestellt.

Die Berechnungen in der Stauhaltung des Kraftwerks Reckingen zeigten, dass auch bei grossen Geschiebeeinträgen in die Stauhaltung (sämtliches Geschiebe aus Thur und Töss) und mit temporären Stauabsenkungen von 4m mit mehreren Jahrzehnten gerechnet werden müsste, bis das Geschiebe durch die Stauhaltung in die anschliessende frei fließende Strecke transportiert werden kann.

Die Berechnungen in der frei fließenden Strecke hingegen zeigten, dass das Geschiebe aus der Thur und der Töss durch diesen Abschnitt transportiert werden könnte, ohne dass sich stetig anwachsende Ablagerungen bilden würden, die zu einer grösseren Hochwassergefährdung führen würden.

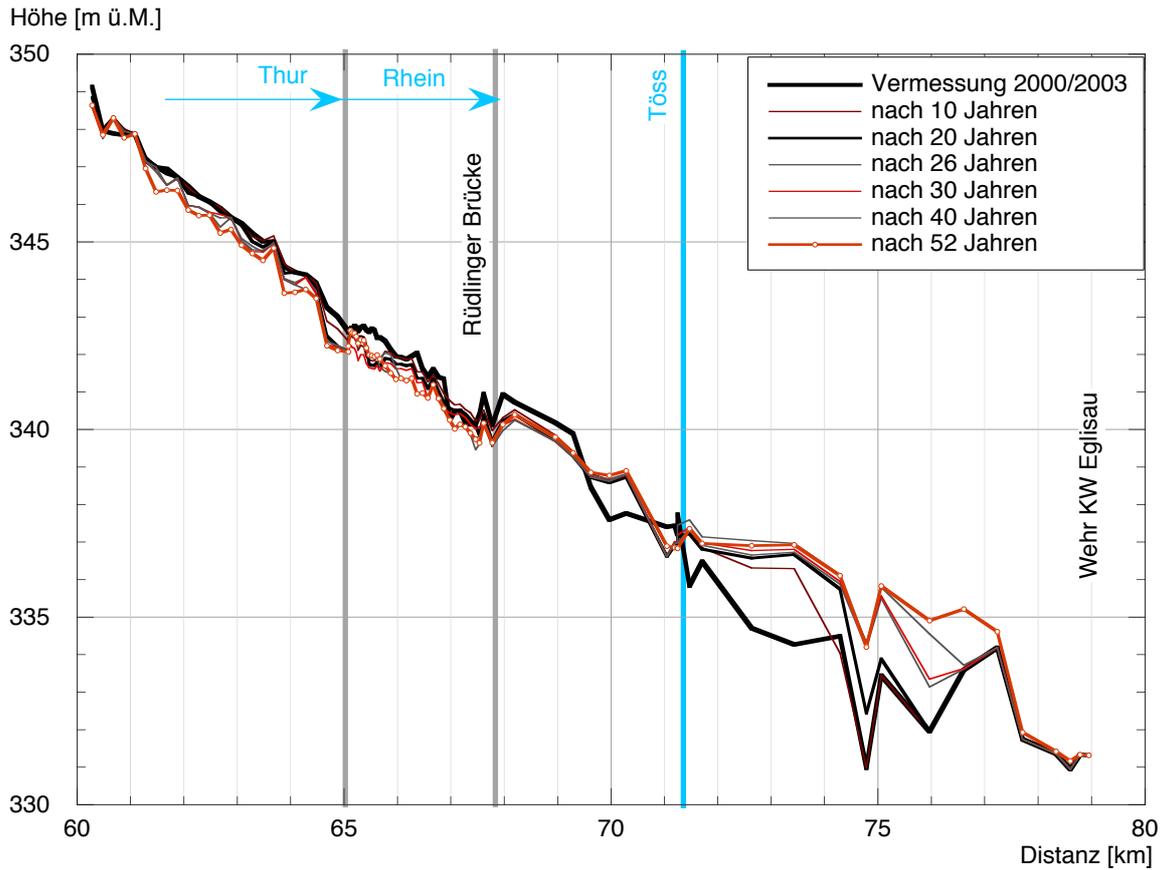


Bild 3.1 Längenprofil der mittleren Sohle im Mündungsabschnitt der Thur und der Stauhaltung Egglisau: Vermessene Sohle und berechnete Sohlenlage zu verschiedenen Zeitpunkten für den Fall mit Geschiebeeinträgen aus der Thur von 13'000 m<sup>3</sup>/Jahr und aus der Töss von 3'000 m<sup>3</sup>/Jahr.

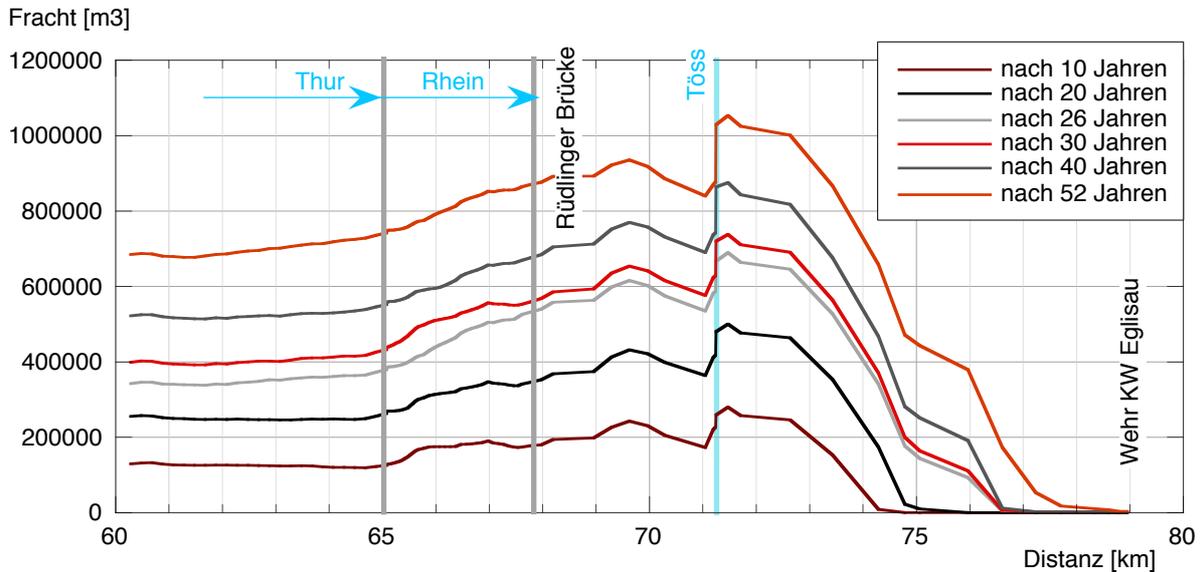


Bild 3.2 Längenprofil der transportierten Geschiebefrachten für den Fall gemäss Bild 3.1. Ansteigende Linien: Erhöhung der Geschiebefracht durch seitliche Einträge (Töss) oder Sohlenerosion. Abfallende Linien: Verkleinerung der Geschiebefracht durch Geschiebeablagerungen.

## 3.5 Berechnungen im Rahmen der Konzessionserneuerung Kraftwerk Ryburg-Schwörstadt

### 3.5.1 Überblick

Im Rahmen der Untersuchungen zum UVB für die Neukonzessionierung des Kraftwerks Ryburg – Schwörstadt wurden 1-dimensionale Simulationsrechnungen für die Stauhaltungen der Kraftwerke Ryburg-Schwörstadt, Rheinfelden, Augst-Wyhlen und Birsfelden durchgeführt (Grundlage 14, Fachbericht C.5.1). Die Simulationsrechnungen erfolgten wie in den Stauhaltungen Eglisau und Reckingen mit dem Programm MORMO.

Das Modell der Stauhaltung Ryburg-Schwörstadt wurde anhand von gemessenen Wasserspiegeln geeicht und die Eicheinstellungen in den anderen Modellen übernommen.

Für die Simulationsberechnungen wurden die Stundenmittelwerte der eidgenössischen Abflussmessstation Rheinfelden verwendet. Die Messperiode 1980 - 2003 wurde zwei Mal aneinander gehängt, um mit den verfügbaren digitalen Daten eine möglichst lange Abflussganglinien zu generieren. Abflüsse unter  $1'500\text{m}^3/\text{s}$  wurden nicht berücksichtigt (keine Geschiebeumlagerungen). Da mit den Simulationen die Verhältnisse bei normalem Hochwasseraufkommen darzustellen waren, wurden die grossen Abflüsse während dem ausserordentlichen Hochwasser 1999 ( $Q_{\text{max}} = 4'550\text{m}^3/\text{s}$ , Wiederkehrperiode ca. 100 Jahre) auf  $2'500\text{m}^3/\text{s}$  (Wiederkehrperiode ca. 1 Jahr) reduziert.

In allen untersuchten Stauhaltungen wurden folgende Modelleinstellungen gewählt:

- Ufer- und Sohlenrauigkeiten gem. Eichung Ryburg-Schwörstadt.
- Massgebender Korndurchmesser Geschiebe:  $d_m = 1.8\text{cm}$ , (entspricht Thurgeschiebe unter Berücksichtigung des Abriebs auf der Strecke Turmündung – Stauwurzel Ryburg-Schwörstadt, Abriebsbeiwert  $c = 0.012$ ).
- Transportformel: Meyer-Peter/Müller, modifiziert nach Hunziker, streifenweise Berechnung des Geschiebetransportes (vgl. Grundlage [43]).
- Geschiebeeintrag in die Stauhaltungen  $2'000$ ,  $5'000$  und  $10'000\text{m}^3/\text{Jahr}$ .
- Stauabsenkungen: Beginn jeweils ab  $Q = 2'000\text{m}^3/\text{s}$ , bei  $Q_9 = 2'050\text{m}^3/\text{s}$  auf abgesenkter Staukote.

Während den Stauabsenkungen ergeben sich grössere hydraulische Belastungen, die in der Anfangsphase zu einer teilweisen Erosion der Schwebstoffe führen. Sobald die Geschiebefront die tiefere Stauhaltung erreicht, werden die restlichen Schwebstoffe überdeckt und deren weitere Erosion verhindert (vgl. Kapitel 2.4).

Für die Erosion der Schwebstoffe gilt:

- Bereiche, die während Stauabsenkungen trocken fallen, werden nicht erodiert.
- Für die Erosion der Schwebstoffe ist eine bestimmte Fliessgeschwindigkeit erforderlich, die von den Korngrössen der Schwebstoffe (Kohäsion) abhängt.

Die Grenzgeschwindigkeit, die zur Erosion der Feinsedimente führt, wurde anhand von Querprofilvergleichen und Staukurvenberechnungen in der Stauhaltung Ryburg-Schwörstadt ermittelt. In einem ersten Schritt wurden anhand eines Vergleichs der Querprofilver-

messungen aus verschiedenen Aufnahmejahren die Rheinabschnitte ermittelt, in denen keine zunehmende Feinsedimentverlandung feststellbar ist. Danach wurden die Fließgeschwindigkeiten in diesen Abschnitten unter Berücksichtigung des normalen Wehrbetriebs berechnet. Anschliessend wurden die Querprofile in den betroffenen Abschnitten (tieferer Stauhaltung) so angepasst, dass sich bei abgesenktem Staupegel die gleichen Fließgeschwindigkeiten ergaben.

Aufgrund der geringeren Bearbeitungstiefe wurde für die Stauhaltungen rheinabwärts des Kraftwerks Ryburg–Schwörstadt der Austrag von Feinsedimenten nicht berücksichtigt.

### 3.5.2 Resultate

Mit den Simulationsrechnungen wurde die zeitliche Entwicklung des Geschiebeaustrags aus den Stauhaltungen bei Normalbetrieb (bestehendes Betriebsregime) und Stauabsenkungen mit unterschiedlichen Absenkhöhen sowie verschiedenen Eintragsraten berechnet. Als Beispiel sind in Bild 3.4 die berechneten Geschiebeausträge aus der Stauhaltung des Kraftwerks Ryburg-Schwörstadt mit der heutigen Betriebsweise und in Bild 3.5 mit unterschiedlichen Stauabsenkungen dargestellt. Die Berechnungen zeigen, dass bei der heutigen Betriebsweise ab Hochwasserereignissen mit Spitzen von rund  $3'400\text{m}^3/\text{s}$  Geschiebe durch die Stauhaltung ins Unterwasser transportiert wird. Dieses Berechnungsergebnis deckt sich mit Beobachtungen von frischen Geschiebeablagerungen, die im Anschluss an das Hochwasser vom August 2005 im Unterwasser des Kraftwerks und in Rheinfeldern gefunden wurden (Bild 3.3). Im Vergleich zu den berücksichtigten Eintragsraten von  $2'000$  und  $5'000\text{m}^3/\text{Jahr}$  (Gesamteintrag während 48-jährigem Berechnungszeitraum:  $96'000$ , resp.  $240'000\text{m}^3$ ) sind die berechneten Austräge mit der heutigen Betriebsweise gering und betragen nach 48 Jahren rund  $11'000 - 12'000\text{m}^3$ .



*Bild 3.3 Flächige, geringmächtige Ablagerung von Feingeschiebe im Unterwasser des Kraftwerks Ryburg-Schwörstadt (links) und darunter liegende ursprüngliche, kolmatierte Sohlenoberfläche (rechts). Zustand vor Höherstau KW Rheinfeldern.*

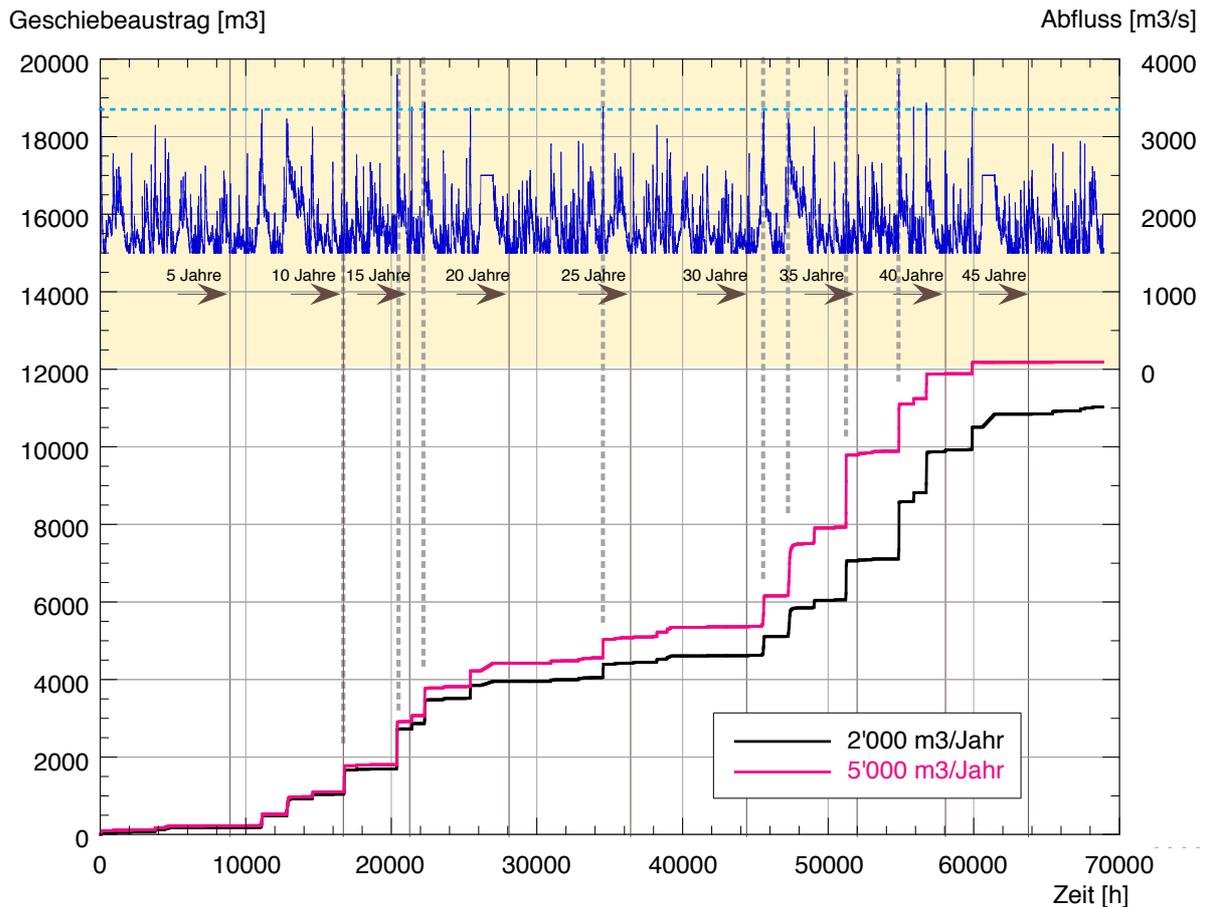


Bild 3.4 Zeitlicher Verlauf des berechneten Geschiebeaustrags aus der Stauhaltung Ryburg-Schwörstadt mit bestehender Betriebsweise und Eintragsraten von  $2'000\text{m}^3/\text{Jahr}$  und  $5'000\text{m}^3/\text{Jahr}$ . Die hauptsächlichen Geschiebeausträge erfolgen bei Hochwasserabflüssen mit Spitzen von mindestens  $3'400\text{m}^3/\text{s}$  (hellblau punktierte Linie, Skala rechts).

Mit periodischen Stauabsenkungen kann der Geschiebeaustrag aus der Stauhaltung markant erhöht werden (Bild 3.5). Je nach Eintragsrate kann mit Stauabsenkungen von 2m (bei Eintragsrate  $2'000\text{m}^3/\text{Jahr}$ ), 2.5m (Eintragsrate  $5'000\text{m}^3/\text{Jahr}$ ) oder 3m (Eintragsrate  $10'000\text{m}^3/\text{Jahr}$ ) ein Grossteil des Geschiebes durch die Stauhaltung ins Unterwasser transportiert werden.

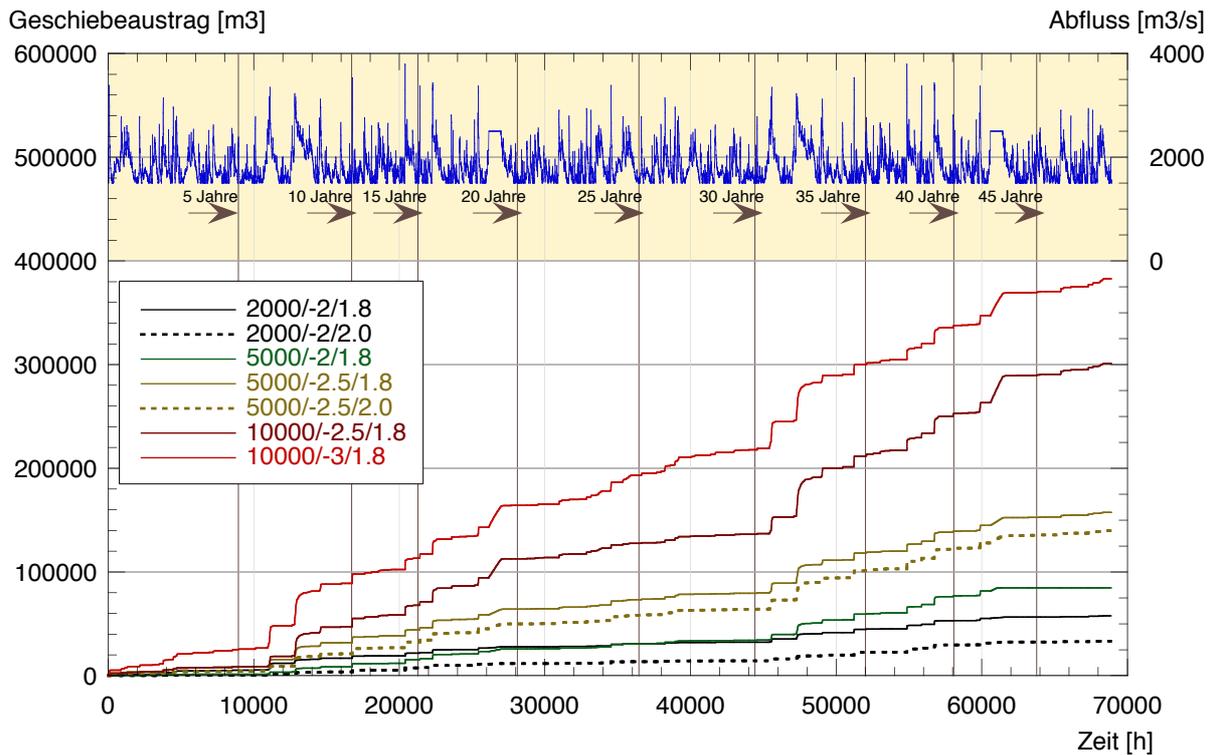


Bild 3.5 Zeitlicher Verlauf des berechneten Geschiebeaustrags aus der Stauhaltung Ryburg-Schwörstadt bei unterschiedlichen Absenkhöhen und Eintragsraten (ausgezogene Linien). Punktierte Linien: Kontrastrechnungen mit größerem Korndurchmesser. Legende: 1. Zahl = Eintragsrate in [m<sup>3</sup>/Jahr] / 2. Zahl = Absenkhöhe in [m] / 3. Zahl = Korndurchmesser  $d_m$  in [cm].

Zusammenfassend zeigten die im Rahmen der Neukonzessionierung des Kraftwerks Ryburg-Schwörstadt durchgeführten Simulationsrechnungen, dass bei den untersuchten Kraftwerken das Geschiebe mit periodischen Stauabsenkungen (Abfluss  $\geq 2'050\text{m}^3/\text{s}$ ,  $Q_9$ ) durch die Stauhaltung ins Unterwasser transportiert werden kann. Mit den getroffenen Annahmen (v.a. Hydrologie, Vernachlässigung des Feinsedimentaustrags aus den Stauhaltungen Rheinfelden, Augst-Wyhlen und Birsfelden) stellt sich innerhalb einiger Jahre ein Geschiebeaustrag aus den Stauhaltungen ein (vgl. Grundlage [14], Fachbericht C.5.1).

Damit das Geschiebe möglichst effizient (d.h. ohne die Bildung von grossflächigen Ablagerungen) ins Unterwasser transportiert wird, wurden in Abhängigkeit der Grösse des Geschiebeeintrags die nachfolgend aufgeführten Absenkhöhen ( $\Delta h$ ) berechnet.

- Eintrag 2'000 m<sup>3</sup>/Jahr
  - KW Ryburg - Schwörstadt:  $\Delta h = 2\text{m}$  (auf 279.14m ü.M.)
  - KW Rheinfelden:  $\Delta h = 0\text{m}$  (projektiertes Stauziel 270.50m ü.M.)
  - KW Augst-Wyhlen:  $\Delta h = 1\text{m}$  (auf 260.0m ü.M.)
  - KW Birsfelden:  $\Delta h = 1 - 2\text{m}$  (auf 253.25-252.25m ü.M.)
  
- Eintrag 5'000 m<sup>3</sup>/Jahr
  - KW Ryburg - Schwörstadt:  $\Delta h = 2 - 3\text{m}$  (auf 279.14m ü.M.)
  - KW Rheinfelden:  $\Delta h = 0\text{m}$  (projektiertes Stauziel 270.50m ü.M.)
  - KW Augst-Wyhlen:  $\Delta h = 1\text{m}$  (auf 260.0m ü.M.)
  - KW Birsfelden:  $\Delta h = 1 - 2\text{m}$  (auf 253.25-252.25m ü.M.)
  
- Eintrag 10'000 m<sup>3</sup>/Jahr
  - KW Ryburg - Schwörstadt:  $\Delta h = 3\text{m}$  (auf 279.14m ü.M.)
  - KW Rheinfelden:  $\Delta h = 0\text{m}$  (projektiertes Stauziel 270.50m ü.M.)
  - KW Augst-Wyhlen:  $\Delta h = 2\text{m}$  (auf 260.0m ü.M.)
  - KW Birsfelden:  $\Delta h = 2\text{m}$  (auf 253.25-252.25m ü.M.).

Bei geringeren Absenkhöhen lagern sich in den Stauhaltungen grössere Geschiebemengen ab und der Geschiebeaustrag ins Unterwasser wird verringert.

Zu beachten ist, dass es sich bei den angenommenen Geschiebeeinträgen um Grössen handelt, die heute bei weitem nicht erreicht werden. Periodische Stauabsenkung werden erst dann effizient, wenn die Geschiebefrachten im Rhein durch andere Massnahmen gegenüber dem Istzustand markant erhöht werden.

### 3.6 Berechnungen der Technischen Universität München (TUM)

Für die Stauhaltung des Kraftwerks Ryburg-Schwörstadt wurde von der TUM ein kommerzielles 1-dimensionales (HEC-RAS) und ein 2-dimensionales hydromorphologisches Simulationsmodell (FAST, 2D Eigenentwicklung der TUM mit Verwendung der instationären, zweidimensionalen Flachwasser-Gleichungen, fraktioniertem Geschiebetransport und Schwebstofftransport) verwendet. Für die übrigen Abschnitte gelangte anschliessend nur mehr FAST zum Einsatz, da sich HEC-RAS für die Geschiebetransportrechnungen in Stauhaltungen als ungeeignet erwies. Das Modell FAST ist mit einem Fischhabitatsmodell gekoppelt, welches den Einfluss veränderter Fliesstiefen, Fließgeschwindigkeit oder Substratzusammensetzung der Sohle als Folge geänderter Geschiebezufuhr oder Kraftwerksbetriebs auf das Laichplatzangebot für die kieslaichende Äsche prognostizieren kann.

Aufgrund der Resultate der TUM können die nachfolgenden Schlüsse gezogen werden:

- Die im Rahmen des UVB zur Neukonzessionierung des Kraftwerks Ryburg – Schwörstadt durchgeführten Simulationsrechnungen (MORMO) weisen im Vergleich mit den 2D Simulationen der TUM gewisse Unterschiede auf. Die 2D Simulationen für die Stauhaltung

Ryburg-Schwörstadt ergeben unter Annahme des heutigen Wehrbetriebs grössere Sedimentausträge als dies mit dem Programm MORMO berechnet wurde. Bei den simulierten temporären Stauabsenkungen sind die berechneten Austräge vergleichbar. Diese Differenzen sind angesichts der unterschiedlichen Modellansätze zu erwarten und erklärbar.

- Die Deckschicht der Sohle in den Fliesstrecken ist sehr stabil und wird auch bei extremen Hochwasserabflüssen nicht in Bewegung gesetzt. In den tieferen Stauhaltungen ist die Deckschicht mit Feinsedimenten überdeckt.
- Während temporären Stauabsenkungen kann das Geschiebetransportvermögen in den Stauhaltungen verbessert werden. Insbesondere führen Stauabsenkungen zu erhöhten Fließgeschwindigkeiten in der Stauhaltung und damit zu einem höheren Sedimenttransportvermögen, einer verstärkten Sohlumlagerung und zur Aktivierung der feineren Sedimente.
- Der Geschiebeausstrag und die Ablagerung von Geschiebe in der Stauhaltung sind abhängig vom Geschiebeeintrag, allerdings ist der Zusammenhang nicht linear.
- Die Geschiebeumlagerungen in den frei fließenden Strecken verstärken sich durch höhere Geschiebezugabe. Zusätzlich kann mit einer geeigneten Wahl der Zugabemenge und deren Kornverteilung die Habitatqualität für den Äsche-Laich gezielt verbessert werden.
- In den Stauhaltungen gibt es nicht nur wegen der abgelagerten Feinsedimente, sondern auch wegen der grossen Fliesstiefen in jedem Fall kein geeignetes Habitat für den Äschenlaich. Selbst wenn durch gezielte Geschiebezugaben das Sohlsubstrat flächig verbessert werden könnte, wären die sehr guten Laichplätze nur in den flachen Uferbereichen zu erwarten.
- Die Habitatbedingungen während der Äschelaichzeit (Anfang Februar bis Ende April) unterscheiden sich nicht nur von Jahr zu Jahr, sondern auch innerhalb des gleichen Jahres beträchtlich, wobei die Habitatbedingungen im Februar in der Regel die besten sind.
- In der am besten geeigneten Teilstrecke, der freien Fliesstrecke, vergrößert sich der Flächenanteil von geeigneten Habitaten für die laichende Äsche bei einer jährlichen Geschiebezugabe von  $7'000\text{m}^3/\text{a}$  von knapp  $1'000\text{m}^2$  (Fall ohne Geschiebezugaben) auf rund  $78'000\text{m}^2$ . Wenn man nur die sehr gut geeigneten Habitate berücksichtigt, so ist die Verbesserung sogar noch signifikanter (von  $0\text{m}^2$  auf rund  $28'000\text{m}^2$ ).
- Die Verdopplung der Geschiebezugabe von  $7'000\text{m}^3/\text{a}$  auf  $14'000\text{m}^3/\text{a}$  in der freien Fliesstrecke hat dagegen einen geringeren Einfluss, die Fläche wächst nicht linear proportional an. Bei den geeigneten Äschehabitaten ergibt sich bei einer Verdoppelung der Geschiebezugabe ein um etwa 7% höherer Flächenanteil ( $83'000\text{m}^2$  gegenüber  $78'000\text{m}^2$ ), bei den sehr gut geeigneten Habitatsflächen ist die Steigerung allerdings höher, sie liegt bei etwa 30% ( $36'000\text{m}^2$  gegenüber  $28'000\text{m}^2$ ).

## 4 Zusammenhang zwischen Geschiebe und Ökologie

### 4.1 Allgemein

Der regelmässige Geschiebetrieb bewirkt, dass die Gewässersohle bei Hochwasserereignissen bewegt, umgestaltet und neu strukturiert wird. Bei diesem Vorgang werden auch eventuell abgelagerte Feinpartikel aus dem Porensystem der Sohle ausgeschwemmt (Dekolmation) und das Gewässerbett damit «gereinigt» und die Durchlässigkeit erhöht.

Die Sohle eines Fließgewässers ist ein hoch komplexer Lebensraum für viele spezialisierte Organismen. Aufgrund der reduzierten Strömung zwischen den Steinen finden Kleintiere hier Schutz vor Abschwemmung und das kleinräumige Lückensystem in der Sohle (Interstitial) bietet Schutz vor grösseren Räubern. Mehrere spezialisierte Fischarten benutzen zudem das Interstitial als geschützten Platz zur Erbrütung ihrer Eier. Die nur schwache Durchströmung hat aber zur Folge, dass der im Wasser gelöste Sauerstoff durch die Atmung der Tiere und mikrobiologische Abbauprozesse relativ rasch aufgebraucht wird. Bei einer durchlässigen Sohle stellt die ständige Frischwasserzufuhr aus dem Gewässer sicher, dass immer genügend Sauerstoff vorhanden ist.

### 4.2 Algen und Wasserpflanzen

Die Oberfläche des Bach- oder Flusssedimentes bildet das Substrat für verschiedenste Algenarten (=Aufwuchs), die sich auf der harten Unterlage ansiedeln und grössere Lager oder Beläge bilden können. Bei Hochwasser wird die Sohlenoberfläche bewegt und die Aufwuchsalgen werden abgescheuert. Nach Rückgang der Wasserführung werden die nun wieder «sauberen» Steine durch spezialisierte Arten sofort neu besiedelt. Bei mittlerer bis hoher Nährstoffbelastung und während längerer Zeit fehlender Bewegung der Flusssohle, werden die empfindlichen Kieselalgen (braune, leicht schmierige Beläge) schnell durch fädige Grünalgen (lange, grüne Zotteln) verdrängt. Nur mit mehrmals jährlich einsetzendem Geschiebetrieb können die Kieselalgenbestände – eine wichtige Nahrungsgrundlage für viele Köcherfliegen- oder Eintagsfliegenlarven und einzelne Fischarten (z.B. die Nase) – in diesem dynamischen Lebensraum bestehen.

Auch höhere Wasserpflanzen, die mit ihrem Wurzelsystem im Flussbett verankert sind, werden bei Geschiebeführung reduziert (z.T. abgeschert, z.T. ausgerissen), so dass wieder freier Platz für Neubesiedlung entsteht.

### 4.3 Wirbellose Kleintiere

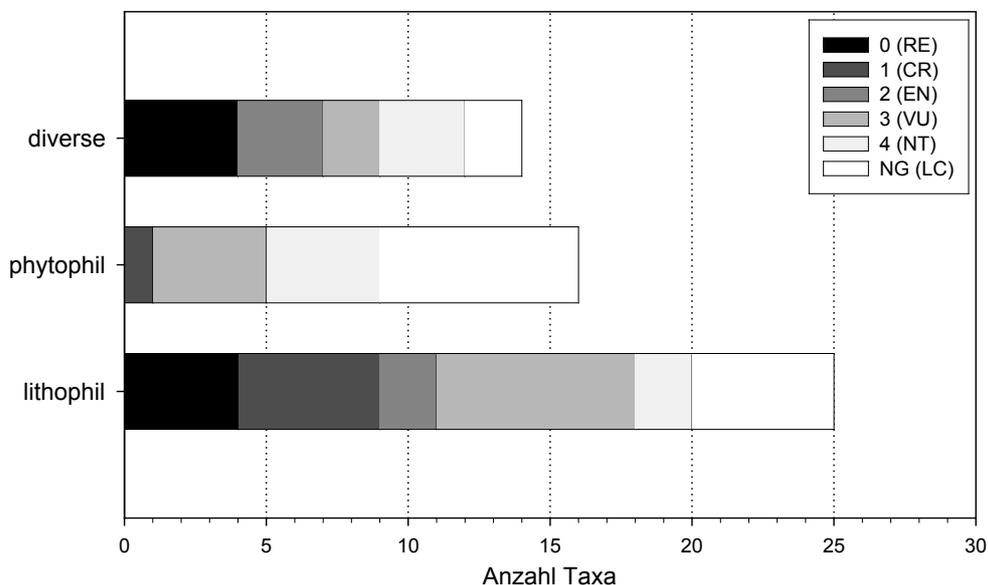
Im lockeren, gut durchfluteten Hohlraumsystem der Gewässersohle leben unzählige Arten wirbelloser Kleintiere, und auf der Sohlenoberfläche finden sie im Aufwuchs Nahrung. Bei fehlendem Geschiebetrieb wird das Hohlraumsystem der Sohle mit Feinstoffen aufgefüllt, und die Flusssohle kolmatiert. In diesem verstopften Lückensystem fehlen die Unterschlüpfen, und die mangelnde Durchflutung mit Frischwasser unterbindet die Sauerstoffzufuhr. Für viele Bewohner dieses speziellen Lebensraumes wird das Überleben ohne genügenden Schutz und ausreichend Sauerstoff äusserst schwierig, so dass bei fehlendem Geschiebetrieb ein grosser Teil der Artenvielfalt bei den Kleintieren verloren geht. Damit wird auch das Nahrungsangebot für die Fischfauna wesentlich geschmälert. Bei Hochwasser suchen zudem viele Benthosorganismen in der Tiefe des Sedimentes und in Randbereichen mit

geringerer Strömung Schutz vor der Verdriftung. Aus diesen Reservoiren findet anschliessend rasch eine Wiederbesiedlung der Flusssohle statt.

#### 4.4 Fischfauna

Verschiedene Fischarten der Fliessgewässer benötigen für ihre Fortpflanzung lockere Kiessohlen, in oder auf denen sie ihre befruchteten Eier ablegen (z.B. Bachforelle, Äsche, Alet, Nase, Schneider, Strömer, Barbe oder Elritze) oder paketweise unter grösseren Steinen deponieren und bewachen (Groppe). Die Eier dieser Arten weisen unterschiedliche Entwicklungszeiten auf. So bleiben z.B. die Eier der Bachforelle im Winter bis zu vier Monaten im Kies, diejenigen der kleinen Elritze im Sommer dagegen nur etwa 10 Tage. Während der gesamten Zeitspanne muss aber der extrem hohe Sauerstoffbedarf der sich entwickelnden Embryonen aus durchströmendem Frischwasser gedeckt werden. Nach dem Schlüpfen verkriechen sich die noch nicht voll entwickelten Fischlarven in der Regel im Hohlraumssystem des Flussbettes, bis sie ihren Dottersack aufgebraucht haben und zur Nahrungssuche an die Oberfläche der Flusssohle kommen. Auch in dieser Zeit ist die Sauerstoffversorgung von grösster Bedeutung, da ein auch nur geringfügig reduziertes Sauerstoffangebot zum Absterben der Jungfische führt.

Einige dieser «kieslaichenden» Arten sind europaweit bedroht und auf den Roten Listen aufgeführt. Diese Gefährdung ist nicht zuletzt auch auf die Fortpflanzungsprobleme bei gestörtem Geschiebehalt der Fliessgewässer zurückzuführen. In der Schweiz werden z.B. zwei Drittel der 21 als Kieslaicher (lithophile Arten) bezeichneten heute noch vorkommenden Fischarten in der Roten Liste in den Gefährdungsstufen 1 – 3 aufgeführt (Bild 4.1, Grundlage [27]).



**Bild 4.1** Fischarten der Schweiz nach Fortpflanzungssubstrat (lithophil = Kieslaicher, phytophil = Pflanzenlaicher, „diverse Arten“: ostracophile, psammophile, speleophile, pelagophile und der Aal) und Gefährdungsgrad (Gefährdungskategorie nach VBGf: 0 = in der Schweiz ausgestorben, 1 = vom Aussterben bedroht, 2 = stark gefährdet, 3 = gefährdet, 4 = potenziell gefährdet, NG = nicht gefährdet; Gefährdungsgrad nach IUCN: RE = regionally extinct, CR = critical, EN = endangered, VU = vulnerable, NT = nearly threatened, LC = least concern) Grundlage [27].

Für viele Fischarten sind die wirbellosen Kleintiere der Gewässersohle die Hauptnahrungsquelle. Im Rhein zwischen Bodensee und Basel werden 14 von 31 vorkommenden einheimischen Fischarten bezüglich Ernährungsweise als «bentivor/insectivor» ausgewiesen. Das heisst, sie ernähren sich zum grossen Teil von den Wirbellosen der Gewässersohle und ihr Nahrungsangebot wird durch die Kolmation des Flussbettes als Folge eines gestörten Geschiebehaltens wesentlich reduziert. Auch wenn in einem Bachoberlauf die Fortpflanzung der Bachforelle erfolgreich verläuft, so sind doch die abwandernden Jungtiere im Unterlauf auf genügend Nahrungsorganismen des Gewässergrundes angewiesen. Bei kolmatierter Gewässersohle ist jedoch das Nahrungsangebot reduziert und unter Umständen nicht mehr ausreichend, um starken Jahrgängen das Überleben sicherzustellen. Damit beeinflusst die kolmatierte Gewässersohle des Hochrheins indirekt auch die Fischfauna der Zuflüsse.

#### 4.5 Mikroorganismen

Verschiedenste mikroskopisch kleine Organismen (Bakterien, Pilze) des Gewässergrundes sind am Abbau des organischen Materials im Gewässer beteiligt. Die aeroben Abbauprozesse sind nur möglich, wenn im Wasser genügend gelöster Sauerstoff vorhanden ist. Bei dieser Selbstreinigung des Fliessgewässers wird nicht nur das von aussen ins Gewässer eingetragene organische Material abgebaut, sondern auch die wegen einer grossen Nährstoffbelastung wuchernden Algen und Wasserpflanzenbestände. Weiter werden auch Schad- und Fremdstoffe (z.B. Stickstoffverbindungen, organische Kohlenstoffe) durch diese Prozesse zerlegt und abgebaut, sodass deren Schädlichkeit mindestens teilweise reduziert wird. Der Selbstreinigungsprozess ist damit ein wichtiger Faktor im Gewässerschutz. Bei gestörtem Geschiebehalt sind diese natürlichen Abbauprozesse in und auf der Sohle nur noch eingeschränkt möglich. Einerseits ist die Oberfläche im kolmatierten Bachbett – die Wachstumsbasis für diese Kleinorganismen – stark reduziert und andererseits ist im Lückensystem bei eingeschränktem Sauerstoffangebot nur eine geringe Abbauleistung möglich.

#### 4.6 Richtwerte

Jede Fischart hat eigene, ganz spezifische Ansprüche an die Umwelt und kann sich so in Konkurrenz mit anderen Arten eine ökologische Nische erobern. Bezüglich Geschiebe sind dabei Fortpflanzungszeitpunkt (wird durch die Wassertemperatur bestimmt) und Laichhabitat (Korngrösse, Wassertiefe, Fliessgeschwindigkeit) die wichtigsten Faktoren, die eine erfolgreiche Erhaltung der Population im dauernden Konkurrenzkampf ermöglichen.

Für die wichtigsten lithophilen Fischarten des Hochrheins können dabei die in Tabelle 4.1 aufgeführten Richtwerte wegweisend sein (nach Grundlagen [26, 29, 33, 47, 48]).

Tabelle 4.1 Laichplatzanforderungen für die wichtigsten Fischarten. Rote Liste: Gefährdungskategorien nach VBGF, vgl. Bild 4).

Art	Rote Liste	Laichzeit	Korngrösse	Wassertiefe	Fliessgeschwindigkeit
Lachs ( <i>Salmo salar</i> )	0	Okt. – Dez.	25 – 150 mm	0.15 – 1.2 m	0.4 – 1.0 m/s
Bachforelle ( <i>Salmo trutta fario</i> )	4	Nov. – Dez.	20 – 50 mm	0.1 – 0.6 m	0.1 – 0.8 m/s
Seeforelle ( <i>Salmo trutta lacustris</i> )	2	Okt. – Jan.	30 – 65 mm	0.2 – 0.8m	0.1 – 0.8m/s
Äsche ( <i>Thymallus thymallus</i> )	3	Feb. - März	2 – 64 mm (15 – 30 mm)	0.05 – 2.3 m	0.2 – 1.0 m/s
Barbe ( <i>Barbus barbus</i> )	4	Mai – Juni	10 – 30 mm	0.11 – 0.3 m	0.2 – 1.2 m/s
Nase ( <i>Chondrostoma nasus</i> )	1	April – Mai	20 – 150 mm	< 0.5 – 1.5 m	0.2 – 1.0 m/s
Schneider ( <i>Alburnoides bipunctatus</i> )	3	Mai – Aug.	2 – 60 mm	0.05 – 1 m	0.1 – 0.5 m/s
Strömer ( <i>Leuciscus souffia agassii</i> )		April – Mai	2 – 30 mm	0.2 – 1 m	0.15 – 0.4 m/s
Groppe ( <i>Cottus gobio</i> )	4	März – April	50 – 200 mm	0.05 – 0.5 m	0.1 – 1.0 m/s
Bachneunauge ( <i>Lampetra planerii</i> )	2	April – Juni	5 – 45 mm	0.1 – 0.3 m	0.1 – 0.25 m/s

## 5 Historische und aktuelle Situation der Fischfauna

Die Veränderungen im Geschiebehaushalt des Hochrheins zeigen sich auch in der Entwicklung von Zusammensetzung und Häufigkeit der Fischbestände. Fischereibiologisch war der Hochrhein vor dem Bau der Kraftwerke grösstenteils der Äschenregion zuzuordnen. Seit der Errichtung der Stauwehre gehören lange Flussstrecken der Brachsenregion an. Die Zusammenstellung nach Grundlagen [34, 35] der Entwicklung von 1900 – 1995 unter Einbezug aktueller Daten des Schweizerischen Zentrums für die Kartographie der Fauna, CSCF, Neuchâtel, bis 2005 zeigt, dass 6 Arten ausgestorben sind, 13 Arten abnehmende Bestände aufweisen, 2 Arten mehr oder weniger gleichgeblieben sind, die Bestände von 16 Arten zunehmen und 5 Arten neu eingewandert sind (Tabelle 5.1).

Bei den verschwundenen Arten handelt es sich ausschliesslich um Langdistanzwanderer, die im Laufe ihrer Entwicklung vom Süsswasser ins Meer und wieder zurück in die Flüsse migrieren. Die Ursache für deren Aussterben im Hochrhein liegt vor allem in den Wanderhindernissen (Kraftwerke mit Turbinen und Wehren, Hochwasserwehre und z.T. auch Schifffahrtsschleusen), die diese Migration weitgehend verunmöglichten. Die Mehrzahl der Arten mit abnehmenden Beständen sind Kieslaicher, während die Mehrzahl der zunehmenden Arten als Pflanzenlaicher zu bezeichnen sind (Tabelle 5.2). Dies zeigt eindrücklich die Veränderung der Fischfauna aufgrund der veränderten Fliessverhältnisse und des gestörten Geschiebehaushaltes.

Tabelle 5.1 Entwicklung der Fischfauna im Hochrhein zwischen Bodensee und Basel zwischen 1900 und 2005 (nach versch. Quellen, s. Text).

Wissenschaftl. Name	Artnamen deutsch	RL	LS	Entwicklung 1900-2005
<i>Abramis bjoerkna</i>	Blicke	4	ph	→
<i>Abramis brama</i>	Brachsmen	NG	ph	↑
<i>Acipenser sturio</i>	Stör	0		×
<i>Alburnoides bipunctatus</i>	Schneider	3	li	↓
<i>Alburnus alburnus</i>	Laube	NG	ph	↓
<i>Alosa alosa</i>	Maifisch	0	pe	×
<i>Anguilla anguilla</i>	Aal	3	pe	↓
<i>Aspius aspius</i>	Rapfen	NA	li	↑
<i>Barbatula barbatula</i>	Bartgrundel	NG	li	↑
<i>Barbus barbus</i>	Barbe	4	li	↓
<i>Carassius carassius</i>	Karausche	NA	ph	–
<i>Chondrostoma nasus</i>	Nase	1	li	↓
<i>Coregonus sp.</i>	Felchen	4	pe	→
<i>Cottus gobio</i>	Groppe	4	sp	↑
<i>Ctenopharyngodon idella</i>	Weisser Amur	NA		–
<i>Cyprinus carpio</i>	Karpfen	3	ph	↑
<i>Esox lucius</i>	Hecht	NG	ph	↑
<i>Gasterosteus aculeatus</i>	Stichling	4	ph	↑
<i>Gobio gobio</i>	Gründling	NG	ps	↓
<i>Gymnocephalus cernuus</i>	Kaulbarsch	NG	li	↑
<i>Lampetra fluviatilis</i>	Flussneunauge	0	li	×
<i>Lampetra planeri</i>	Bachneunauge	2	li	↓
<i>Lepomis gibbosus</i>	Sonnenbarsch	NA	po	–
<i>Leuciscus cephalus</i>	Alet	NG	li	↓
<i>Leuciscus leuciscus</i>	Hasel	NG	li	↓
<i>Leuciscus souffia</i>	Strömer	3	li	↓
<i>Lota lota</i>	Trüsche	NG	pe	↑
<i>Oncorhynchus mykiss</i>	Regenbogenforelle	NA	li	–
<i>Perca fluviatilis</i>	Egli	NG	ph	↑
<i>Petromyzon marinus</i>	Meerneunauge	0		×
<i>Phoxinus phoxinus</i>	Elritze	NG	li	↓
<i>Rutilus rutilus</i>	Rotauge	NG	ph	↑
<i>Salmo salar</i>	Lachs	0	li	×
<i>Salmo trutta trutta</i>	Meerforelle	0	li	×
<i>Salmo trutta fario</i>	Bachforelle	4	li	↓
<i>Salmo trutta lacustris</i>	Seeforelle	2	li	↑
<i>Salvelinus fontinalis</i>	Bachsaibling	NA	li	–
<i>Sander lucioperca</i>	Zander	NA	ph	↑
<i>Scardinius erythrophthalmus</i>	Rotfeder	NG	ph	↑
<i>Silurus glanis</i>	Wels	4	ph	↑
<i>Thymallus thymallus</i>	Äsche	3	li	↓
<i>Tinca tinca</i>	Schleie	NG	ph	↑

## Legende:

**RL Rote Liste nach [27]**

- 0 Ausgestorben
- 1 Vom Aussterben bedroht
- 2 Stark gefährdet
- 3 Gefährdet
- 4 Potenziell gefährdet
- NG Nicht gefährdet
- NA Neozoe

**LS Laichsubstrat**

- li lithophil (Kies)
- ph phytophil (Pflanzen)
- ps psammophil (Sand)
- pe pelagophil (Freiwasser)
- sp speleophil (Höhlen)
- os ostracophil (Muscheln)

**Entwicklung 1900-2005**

- × Ausgestorben |- ↓ Abnehmende Bestände |- Gleichbleibend |- ↑ Zunehmende Bestände |- Neozoe |

Tabelle 5.2 Anzahl Taxa der Fischfauna im Hochrhein mit Bestandesentwicklung 1900 – 2005 und Fortpflanzungstyp.

Bestandesentwicklung	Fortpflanzungstyp			Total
	lithophil	phytophil	andere	
abnehmend	10	3		<b>13</b>
gleichbleibend		2		<b>2</b>
zunehmend	4	10	2	<b>16</b>
<b>Total</b>	<b>14</b>	<b>15</b>	<b>2</b>	<b>31</b>

## 6 Geschiebehaushalt Hochrhein

### 6.1 Hydrologie

Am Hochrhein werden die Abflüsse vom Bundesamt für Umwelt (BAFU) in Neuhausen, Rekingen, Rheinfelden und Basel registriert. Zudem bestehen an allen grossen Schweizer Zuflüssen (Thur, Töss, Glatt, Aare, Birs) und diversen kleineren Gewässern Messstationen, die von Baden-Württemberg, dem BAFU oder den Kantonen betrieben werden. Die Messstationen sind in Plan 1 eingezeichnet.

In Tabelle 6.1 sind charakteristische Abflüsse der Messstationen am Rhein und den grössten Schweizer Zuflüssen zusammengestellt. Bei der Messstation Rhein-Neuhausen ist das  $Q_9$  grösser als das  $HQ_2$ . Dies ist auf die unterschiedlichen Quellen und Herleitungen zurückzuführen ( $Q_9$ : BAFU, ermittelt aus den langjährigen Messwerten,  $HQ_2$ : Karlsruher Institut für Technologie 2010 (Grundlage [40]), statistische Auswertung).

Tabelle 6.1 Charakteristische Abflüsse der Messstationen am Hochrhein und den grössten Schweizer Zuflüssen (Thur, Glatt, Aare, Birs: Messstationen BAFU, Töss: Kanton ZH).  $Q_{\text{Monat}}$ : Monatsmittel der ganzen Messperiode,  $Q_m$ : mittlerer Jahresabfluss,  $Q_x$ : Abfluss der durchschnittlich an  $x$  Tagen/Jahr überschritten wird,  $HQ_x$ : Hochwasserspitze mit Wiederkehrperiode von  $x$  Jahren. Angaben aus [www.hydrodaten.admin.ch](http://www.hydrodaten.admin.ch), Abfrage 2011 und Grundlage [40] für  $HQ_2$ ,  $HQ_{10}$  und  $HQ_{100}$ .

Messstation	Massgebender Abschnitt	$Q_{\text{Januar}}$	$Q_{\text{Mai}}$	$Q_m$	$Q_9$	$HQ_2$	$HQ_{10}$	$HQ_{100}$
Rhein-Neuhausen	Bodensee-Thur	246	440	367	731	720	910	1'100
Rhein-Rekingen	Thur-Aare	298	519	441	897	1'180	1'590	2'160
Rhein-Rheinfelden	Aare-Ergolz	772	1257	1037	2053	3'060	3'840	4'630
Rhein-Basel	Ergolz-Basel	768	1298	1051	2081	3'160	3'980	4'780
Thur-Andelfingen		40	59	47	172	630	930	1'300
Töss-Freienstein		9	10	9	32			420
Glatt-Rheinfelden		9	9	8	22	57	95	170
Aare-U'siggenthal		407	716	560	1158	1'680	2037	2565
Birs-Münchenstein		18	17	15	58	136	228	374

## 6.2 Korngrößen

Die Korngrößenverteilungen des Geschiebes und des Sohlenmaterials der Zuflüsse und des Rheins sind im Rahmen diverser Geschiebestudien und Untersuchungen bestimmt worden. Dazu wurden Linienzahlanalysen durchgeführt und mit dem Verfahren nach Fehr in Korngrößenverteilungen der Unterschicht umgerechnet.

In Bild 6.1 sind die aus den Korngrößenverteilungen abgeleiteten charakteristischen Korndurchmesser  $d_m$  und  $d_{90}$  dargestellt<sup>7</sup>. Eine Zusammenstellung aller aus Linienzahlanalysen berechneten Korngrößen befindet sich in Anhang 2. Das Geschiebe aus der Thur, dem mit Abstand grössten Lieferanten, weist einen massgebenden Korndurchmesser von  $d_m = 1.8 - 2.2\text{cm}$  auf und liegt damit in der gleichen Grösse wie das Geschiebe aus der Sissle, der Ergolz und der Birs (oranger Balken in Bild 6.1). Das Geschiebe aus der Töss, der Wutach und weiteren kleinen Bächen ist etwas grobkörniger und weist massgebende Korndurchmesser von maximal 3cm auf. Die wenigen vorhandenen Kiesbänke im Rhein sind grobkörniger als das Geschiebe aus den Zuflüssen. Dies kann als Hinweis auf einen gestörten Geschiebehaushalt gedeutet werden (Auswaschung der feineren Fraktionen, kein ausreichender Geschiebenachschub).

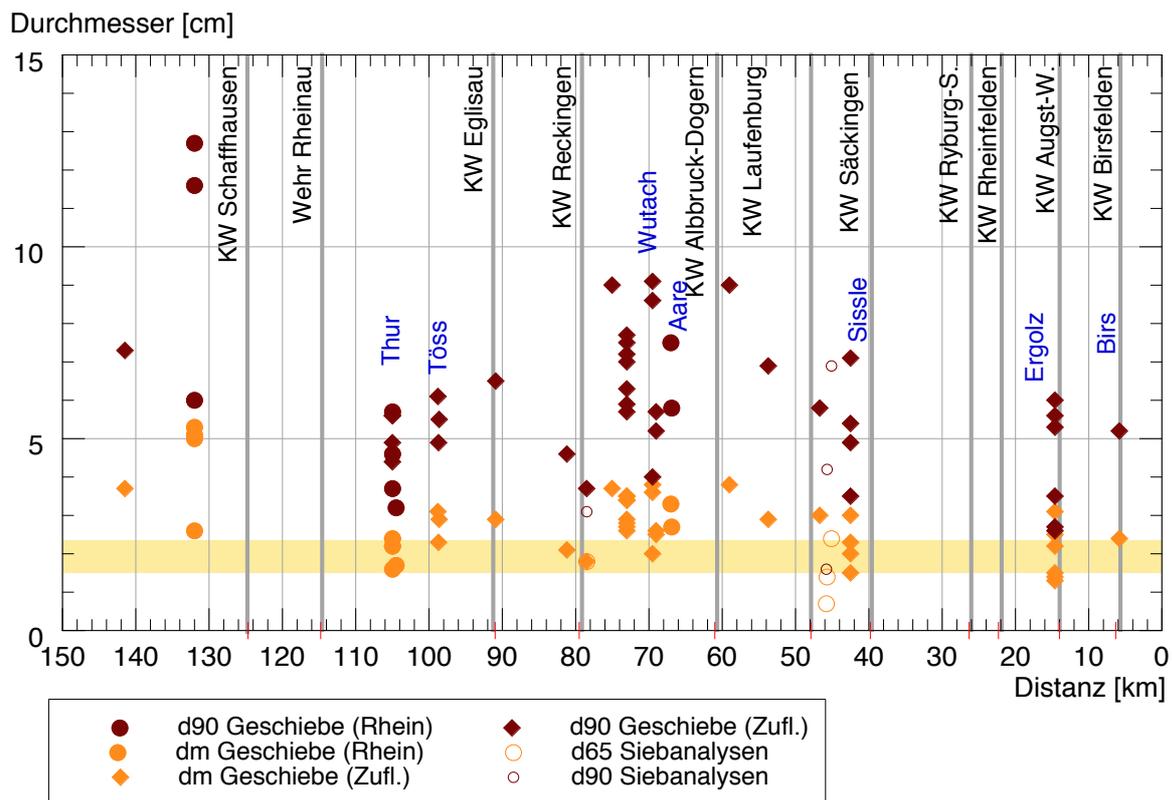
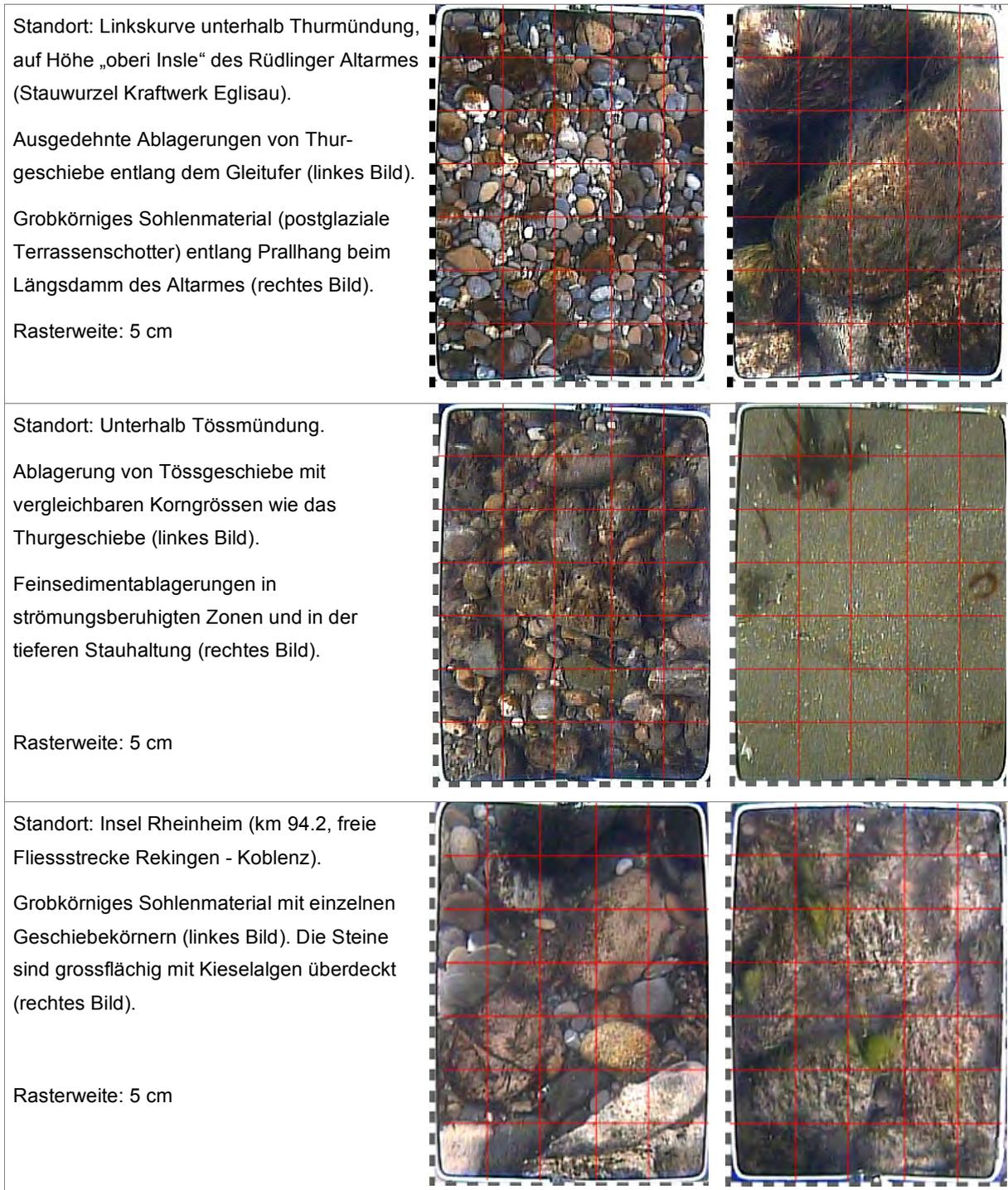


Bild 6.1 Charakteristische Korndurchmesser der vorhandenen Geschiebeproben aus dem Rhein und den Zuflüssen (Zufl.). Gelber Balken: Bandbreite des massgebenden Korndurchmessers des Thurgeschiebes.

<sup>7</sup>  $d_m$ : mittlerer Korndurchmesser,  $d_x$ : Korndurchmesser mit x-prozentigem Siebdurchgang.

Aufgrund der morphologischen Entwicklung besteht ein deutlicher Unterschied zwischen der Körnung des Geschiebes und des Sohlenmaterials. Gegenüber dem feinkörnigen Geschiebe, das im Hochrhein nur noch an wenigen Stellen zu finden ist, ist die Sohle deutlich gröber und abgepflästert. In den Stauhaltungen ist die grobkörnige Sohle grossflächig mit Feinsedimenten überdeckt.

Die nachfolgenden Bilder illustrieren diesen Sachverhalt.



Quelle: Videoquerprofile Limnex AG, Februar 2003.

## 6.3 Morphologie

### 6.3.1 Ursprünglicher Zustand

Im unbeeinflussten Zustand tiefte sich der Rhein in die postglazialen Schotter ein. Dadurch bildeten sich unregelmässige Talmäander mit Kiesbänken sowie vereinzelt Inseln und Nebengerinnen. Abschnittsweise wurden die Schotter bis auf den Fels erodiert. Die Felsaufschlüsse wirkten als Fixpunkte im Längsprofil der Sohle. Mit Ausnahme des Rheinfalls, des Koblenzer Laufen und der Überreste im Unterwasser des neuen Kraftwerks Rheinfeldens ("Gwild") sind diese Felsaufschlüsse heute eingestaut und nicht mehr wirksam.

Die ursprünglichen Fließgeschwindigkeiten in den Abschnitten zwischen den Felsaufschlüssen waren vergleichbar mit den Verhältnissen in der heute noch frei fließenden Strecke zwischen Rekingen und Koblenz.

Die Morphologie eines Fließgewässers lässt sich in Abhängigkeit des Verhältnisses von Gerinnebreite zu Abflusstiefe ( $B/h$ ) und der relativen Rauigkeit (Abflusstiefe  $h$ /Korndurchmesser  $d$ ) in Mäandern, Gerinne mit alternierenden Bänken und verzweigte Gerinne einteilen (Grundlage [45]). Die Abflusstiefe bezieht sich auf ein Hochwasser mit einer Wiederkehrperiode von 2 bis 5 Jahren. Bild 6.2 zeigt, dass der Hochrhein im Übergangsbereich von leichten Mäandern und alternierenden Kiesbänken liegt. Der leicht mäandrierende Verlauf ist auch aus historischen Karten ersichtlich und heute weitgehend erhalten (vgl. Plan 1).

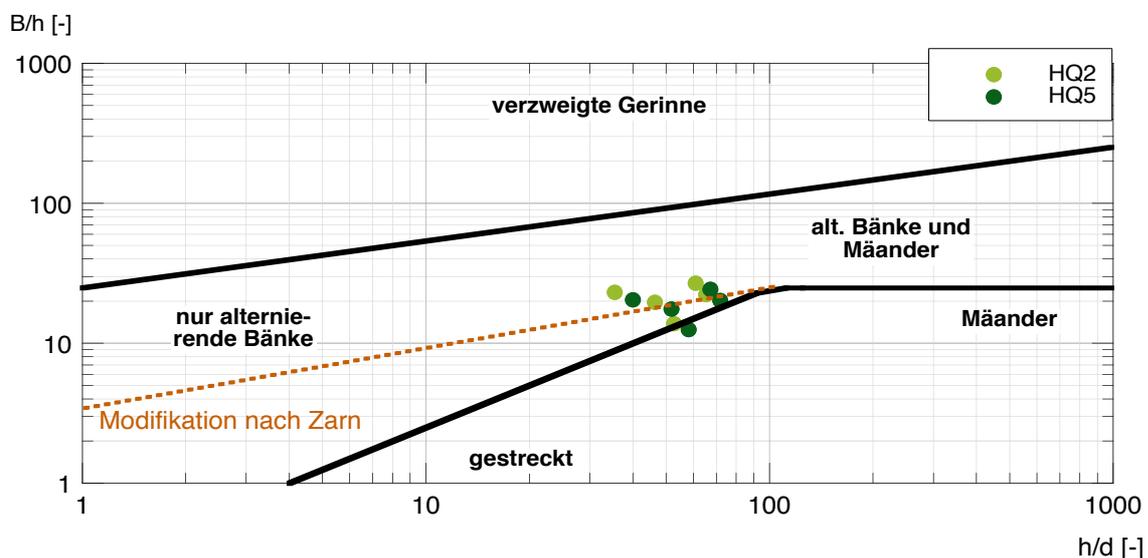


Bild 6.2 Zuordnung des Hochrheins zu morphologischen Gewässertypen. Einteilung der Morphologie in Mäander, alternierende Kiesbänke und verzweigte Gerinne. Die orange gestrichelte Linie zeigt die modifizierte Abgrenzung zwischen alternierenden Bänken und Mäandern nach Zarn (für  $h/d \leq 100$ ).

### 6.3.2 Aktueller Zustand

Seit dem Bau der ersten Kraftwerke am Hochrhein wurden die Fließverhältnisse zunehmend beeinflusst. Im heutigen Zustand bestehen noch vier Rheinabschnitte, in denen die Fließverhältnisse und das Transportvermögen nicht durch Kraftwerke beeinflusst ist:

- Ausfluss Bodensee bis Diessenhofen,
- Unterwasser Kraftwerk Schaffhausen bis Rheinflall,
- Rückgabe Kraftwerk Rheinau bis Thurmündung und
- Unterwasser Kraftwerk Reckingen bis Aaremündung.

In den übrigen Abschnitten ist der Abfluss eingestaut oder wird durch Wasserausleitungen reduziert (Restwasserstrecken der Kraftwerke Rheinau und Albruck-Dogern).

Bild 6.3 zeigt das Längenprofil zwischen dem Bodensee und Basel mit den bestehenden Kraftwerken, Restwasserstrecken und den noch vorhandenen frei fließenden Abschnitten.

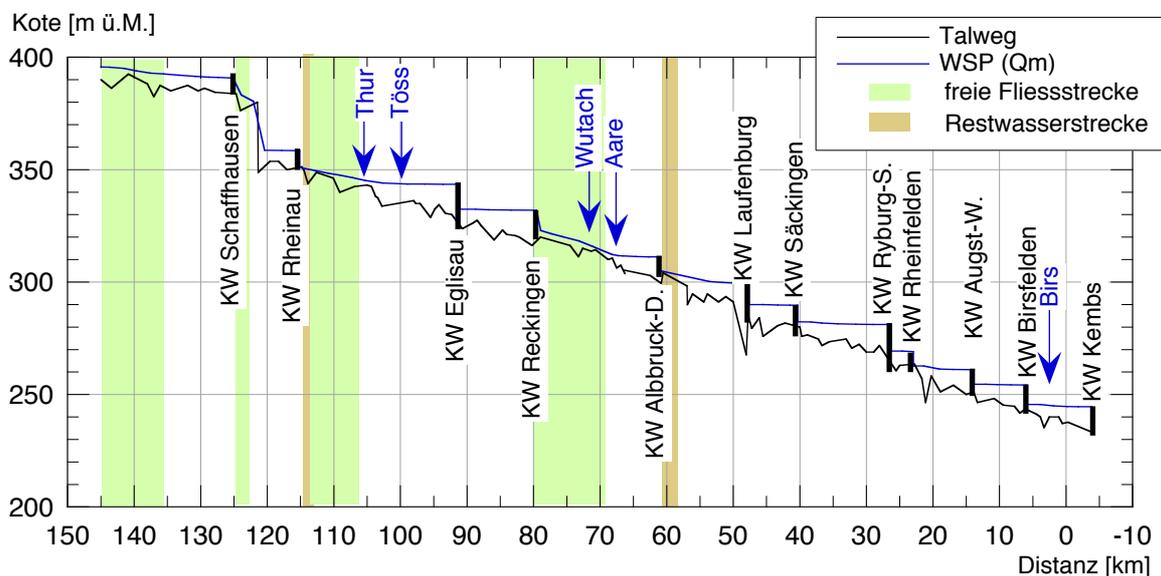


Bild 6.3 Längsprofil der Sohle (Talweg) und des Wasserspiegels bei Mittelwasserabfluss. (Grün: frei fließende Abschnitte, braun: Restwasserstrecken).

## 6.4 Geschiebeeinträge

### 6.4.1 Historische Entwicklung

Die grössten Geschiebelieferanten um 1850 waren die Thur, die Töss und die Aare. Die Korngrößen des umgelagerten Geschiebes waren aufgrund der Herkunft (grosse Hangerosionen bei Rüdlingen und im Unterlauf der Thur) wahrscheinlich eher etwas größer als das Geschiebe, das heute von der Thur in den Rhein eingetragen wird.

Bild 6.4 zeigt ein Längsprofil der im ursprünglichen Zustand transportierten mittleren jährlichen Geschiebefracht (aus Grundlage [1]). Diese lag zwischen dem Bodenseeausfluss und der Thurmündung natürlicherweise bei wenigen  $100\text{m}^3/\text{a}$ . Der erste grosse Geschiebe-

und Feinsedimentzubringer war die Thur (rund  $15'000\text{m}^3/\text{a}$ ). Zusammen mit den Geschiebeeinträgen aus den Hangerosionen bei Rüdlingen nahm die Geschiebefracht auf rund  $30'000\text{m}^3/\text{a}$  zu. Der Massenverlust aufgrund des Abriebs wurde durch die Einträge aus Töss und Glatt kompensiert. Rheinabwärts nahm die Fracht wegen dem Abrieb bis zur Aaremündung auf rund  $25'000\text{m}^3/\text{a}$  ab und erreichte mit dem Geschiebeeintrag aus der Aare ( $20'000\text{m}^3/\text{a}$ ) eine Spitze von  $45'000\text{m}^3/\text{a}$ . Rheinabwärts der Aare nahm die Geschiebefracht wegen dem Abrieb deutlich ab, wobei die zahlreichen Zuflüsse mit ihren geringen Geschiebeeinträgen den Massenverlust nicht kompensieren konnten. Bis zur Ergolz- mündung nahm die Geschiebefracht auf  $20'000\text{m}^3/\text{a}$  ab. Unter Berücksichtigung des Abriebs und der Geschiebeeinträge aus Ergolz, Birs und Wiese lag die Geschiebefracht im Raum Basel in der Grössenordnung von  $25'000\text{m}^3/\text{a}$ .

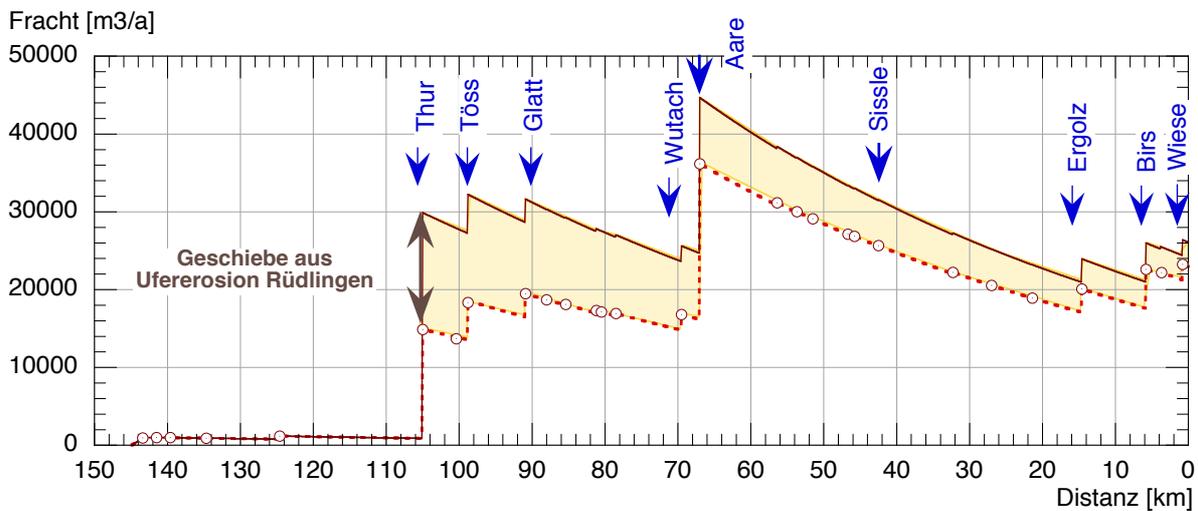


Bild 6.4 Längenprofil der mittleren jährlichen Geschiebefracht im unbeeinflussten Zustand um 1900.

Mit zunehmender Verbauung der Zuflüsse (z.B. Mündungsstrecke der Thur) und der Rheinufer (Rüdlingen) wurden die Geschiebeeinträge ab etwa 1850 reduziert und durch den ab 1898 einsetzenden Bau der Kraftwerke das Geschiebetransportvermögen abschnittsweise verringert.

In Bild 6.5 ist die Entwicklung des Geschiebehaushaltes zwischen der Thurmündung und Basel seit dem ausgehenden 19. Jahrhundert schematisch dargestellt. Darin bedeutet der oberste Balken die durchschnittliche Geschiebeführung vor dem Bau der Kraftwerke und die darunter liegenden Balken die Abnahme der Geschiebeführung als Folge der Inbetriebnahme der Kraftwerke. Ausserordentliche Hochwasser, bei denen auch heute noch gewisse Geschiebeumlagerungen möglich sind, sind nicht berücksichtigt.

Durch das erste Hochrheinkraftwerk (Rheinfelden) wurde der ursprüngliche Geschiebehaushalt kaum beeinflusst. Mit der Inbetriebnahme der Kraftwerke Augst-Wylen (1912) und Laufenburg (1914) verringerte sich die Geschiebefracht, es war aber noch ein durchgehender Geschiebetransport vorhanden. Es kann davon ausgegangen werden, dass zu dieser Zeit noch erhebliche Geschiebefrachten durch die Wehre dieser Kraftwerke transportiert wurden. Nach der Inbetriebnahme des Kraftwerks Eglisau (1920) wurden die

Einträge aus der Thur und der Töss dem System entzogen. Es entstand erstmals ein geschiebeloser Abschnitt (Stauhaltung Eglisau bis Wutachmündung). Mit der Inbetriebnahme des Kraftwerks Ryburg-Schwörstadt (1927) entstand ein weiterer geschiebeloser Abschnitt (Stauhaltung Ryburg-Schwörstadt – Basel). Durch den Bau des Aare-Kraftwerks Klingnau (1935) wurde die Geschiebezufuhr aus der Aare vollständig unterbunden. Als einziger grösserer Geschiebezubringer verblieb die Wutach.

Die Kraftwerke Reckingen und Birsfelden wurden in Abschnitten gebaut, in denen die Geschiebezufuhr bereits unterbunden war. Damit wurde der Geschiebehalt bis zur Inbetriebnahme des letzten Kraftwerks (Säckingen, 1956) nicht weiter beeinflusst.

Wegen den Sohlenbaggerungen in der Restwasserstrecke des Kraftwerks Albruck-Dogern und im Unterwasser der Kraftwerke Laufenburg und Säckingen ist der Geschiebetransport heute auch in diesen Strecken behindert.

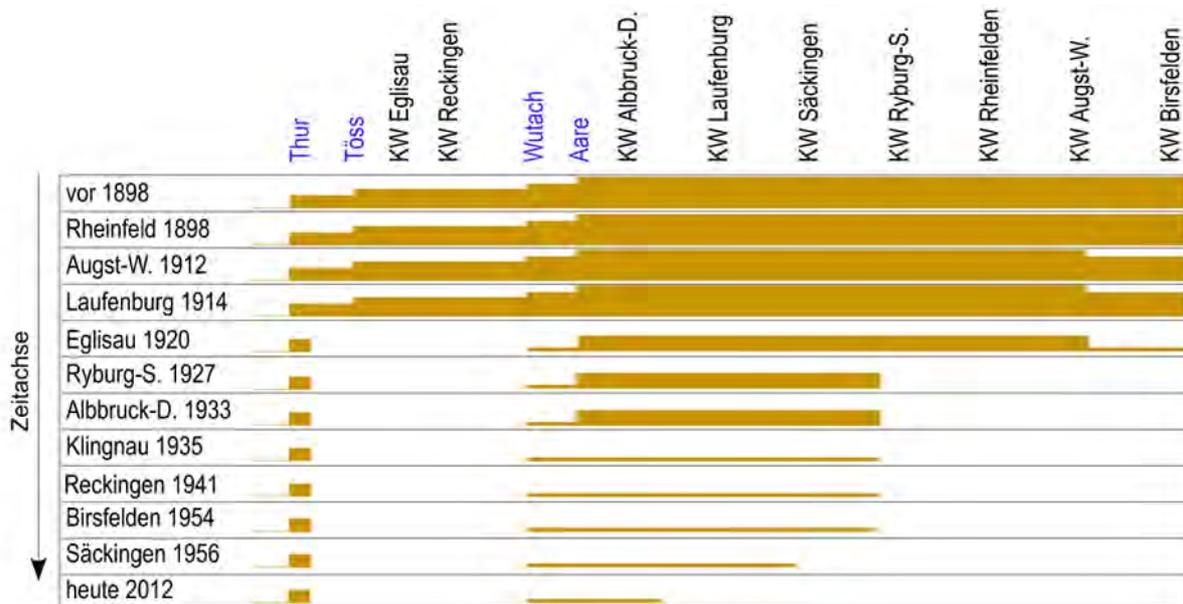


Bild 6.5 Schematische Darstellung der Veränderung der Geschiebeführung im Hochrhein.

### 6.4.2 Aktueller Zustand

Die Geschiebeeinträge aus den Zuflüssen wurden im Rahmen der Erarbeitung der Geschiebehaltstudie (Grundlage [1]) hergeleitet. Aufgrund von Arbeiten, die seither ausgeführt wurden (Geschiebehaltstudien Thur und Töss, Grundlagen [5, 6], Untersuchungen zum UVB Neukonzessionierung KW Eglisau, Grundlage [13]) konnten die festgelegten Einträge verifiziert und teilweise leicht angepasst werden (Thur und Töss, Bild 6.6).

**Legende**

1 : 400'000

-  Stauwehr
-  Geschiebezufuhr
- Sissle** Gewässer
- 0** effektiver Geschiebeeintrag
- (500 - 800)** Geschiebezufuhr
- Angaben in [m<sup>3</sup>/a], lose (2t/m<sup>3</sup>)

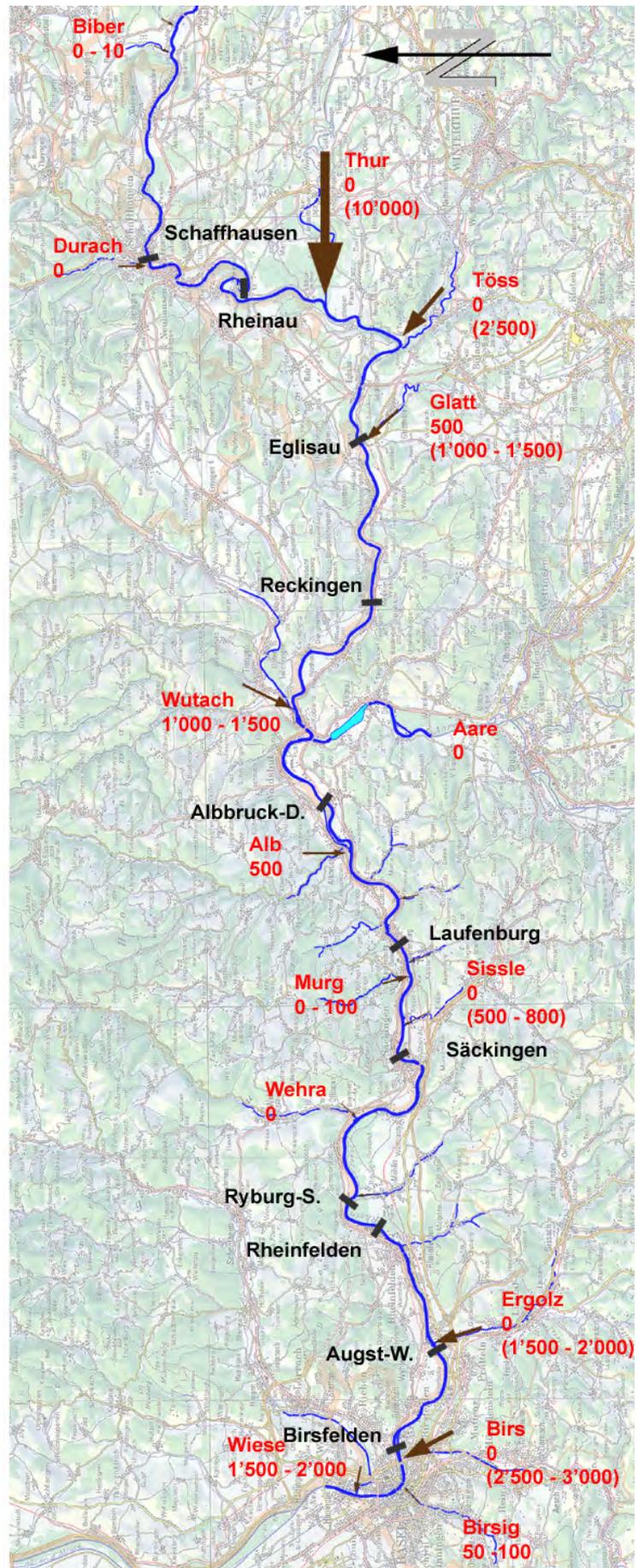


Bild 6.6

Geschiebeeinträge aus den massgebenden Zuflüssen. Die Pfeildicke deutet in qualitativer Weise die Grösse der Geschiebezufuhr an. Die Zahlenwerte beziehen sich auf die mittleren jährlichen Geschiebeeinträge in den Rhein (in [m<sup>3</sup>/a]). Die Werte in Klammern bezeichnen die Geschiebezufuhr, die im Mündungsbereich entnommen wird und dadurch dem System entzogen wird.

Zudem wurde die Wutach bei Tiengen und im Mündungsbereich revitalisiert. An beiden Stellen wurden entlang von Gleithängen Seitengerinne angelegt. Aufgrund der in Kapitel 2.3 beschriebenen Geschiebeumlagerungsprozesse in Flusskrümmungen ist der Seitenarm bei Tiengen bereits mit Geschiebe verfüllt (Bild 6.7). Im Mündungsbereich zeigen Spuren, dass sich in den Seitengerinnen Geschiebe abgelagert und der Eintrag in den Rhein vorübergehend vermindert wird (Bild 6.8).

Mit der am 22. Dezember 2011 erteilten Baubewilligung für das Kraftwerk Eglisau wird von temporären Stauabsenkungen abgesehen und die Kraftwerksbetreiberin verpflichtet, ein in der Baubewilligung vorgegebenes Geschiebezugabekonzept umzusetzen. Dieses sieht an insgesamt 8 Zugabestellen Initialschüttungen von insgesamt 19'500m<sup>3</sup> und jährliche Nachschüttungen von 6'600m<sup>3</sup>/Jahr vor. Die ersten Schüttungen sind für 2013 vorgesehen.

*Bild 6.7*

*Revitalisierung Wutach bei Tiengen. Der entlang dem Gleithang angelegte Seitenarm ist vollständig mit Geschiebe verfüllt. Blick gegen Fließrichtung.*



*Bild 6.8*

*Revitalisierung Mündungsabschnitt Wutach. Geschiebeablagerungen im Einlaufbereich eines Seitenarms, der entlang eines Gleithangs angelegt wurde.*



## 6.5 Entnahmen aus der Rheinsohle

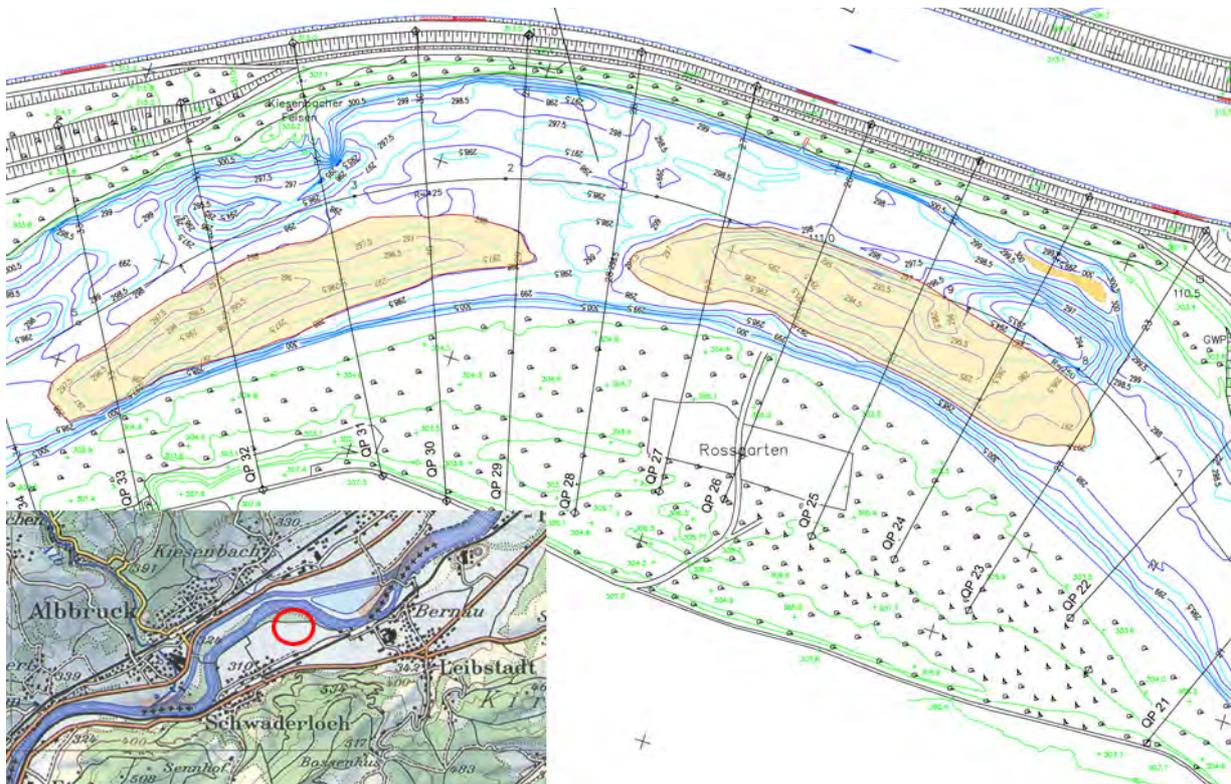
Neben den mehr oder weniger regelmässigen Geschiebeentnahmen im Mündungsbereich einzelner Zuflüsse wurden zwischen Kadelburg und Rietheim, in der Restwasserstrecke des Kraftwerks Albruck-Dogern sowie in der Stauhaltung und dem Unterwasser des Kraftwerks

Säckingen auf Längen von je rund 2km erhebliche Kiesmengen (mehrere 10'000m<sup>3</sup>) aus der Sohle gebaggert.

Zudem wurde im Rahmen des Neubaus des Kraftwerks Rheinfelden im Unterwasser eine rund 100m breite Rinne in den anstehenden Fels abgetieft (vgl. Kapitel 6.6.1).

Von der Baggerung in Rietheim sind ausser einigen Fotos im Gemeindehaus von Rietheim keine Unterlagen vorhanden.

Die Baggerung in der Restwasserstrecke des Kraftwerks Albruck-Dogern erfolgte um 1985 und erstreckte sich auf die Gleithangseite am Schweizer Ufer zwischen km 110.75 und km 111.55 (Bereich Rossgarten, Bild 6.9). Die Baggerung und die danach erfolgten Verlandungsprozesse sind aus den periodisch durchgeführten Querprofilaufnahmen ersichtlich (Bild 6.10<sup>8</sup>). Wie der Vergleich der Querprofile zeigt, sind die Baggerlöcher zwischen den Aufnahmen von 1991 und 1999 (nach dem ausserordentlichen Hochwasser vom Mai 1999) teilweise aufgefüllt worden. In der nachfolgenden Periode (1999 – 2010) hat sich die Sohlenlage nur noch unwesentlich verändert und die ursprüngliche Sohlenlage von 1981 wurde nicht erreicht.



*Bild 6.9 Ungefähres Ausmass der Baggerlöcher in der Restwasserstrecke des Kraftwerks Albruck-Dogern, abgeleitet aus den Höhenlinienplänen (Sohlenaufnahme Juli 1996).*

<sup>8</sup> Vermessungen 1981 und 1991: Querprofilplan 1:200 hydrographische Vermessung, Egle, das Büro für Vermessung, 26.3.1992. Vermessungen 1999 und 2010: Ingenieurteam Trenkle GmbH, 19.9.2011.

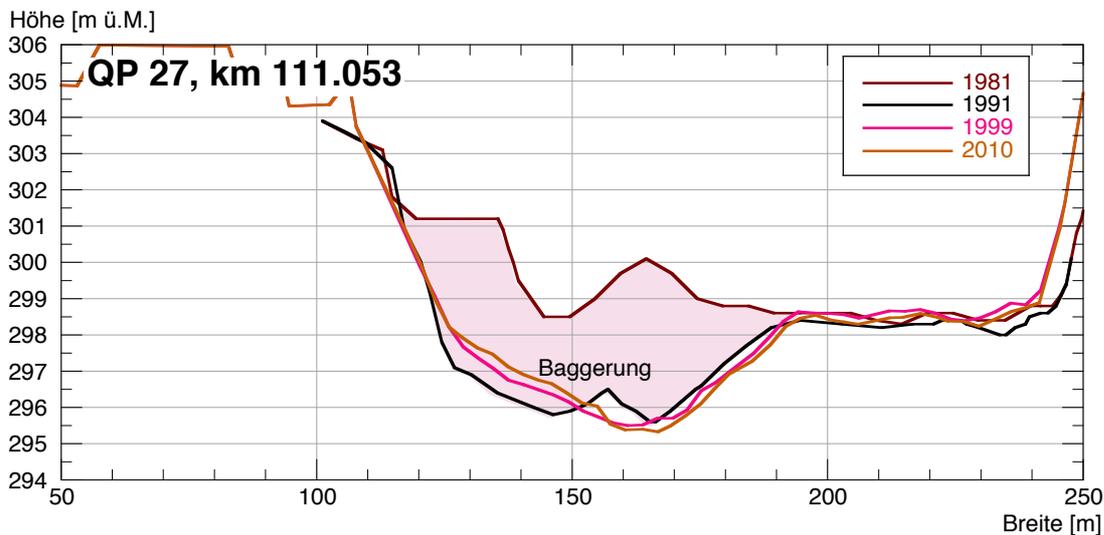
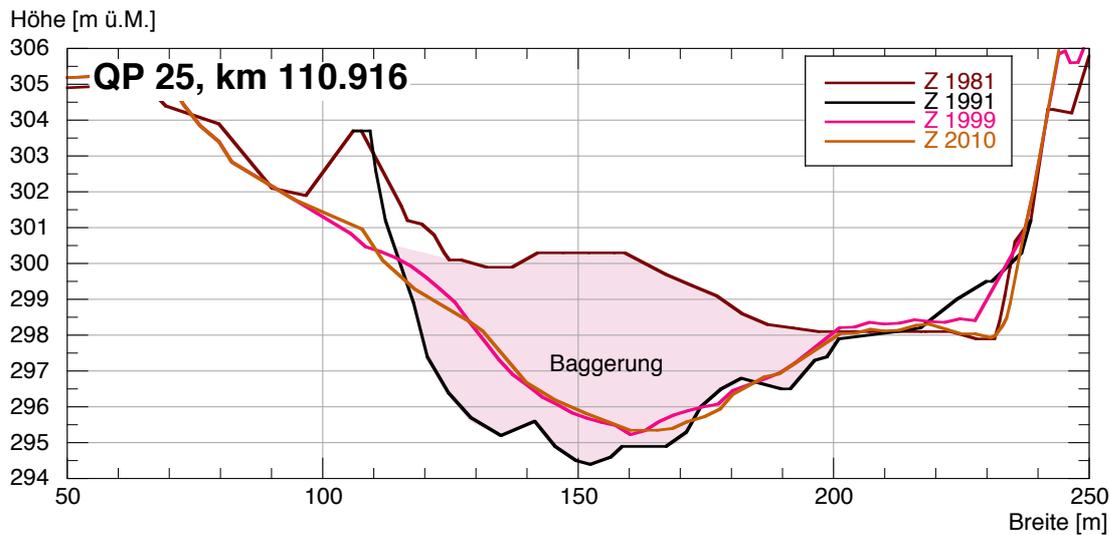
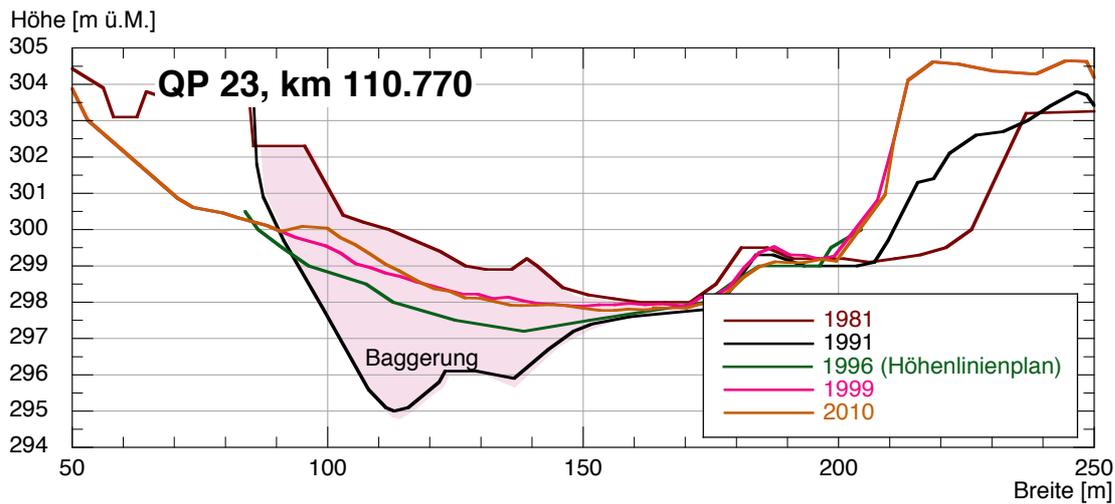


Bild 6.10 Querprofile 23, 25 und 27 in der Restwasserstrecke des Kraftwerks Albrück-Dogern mit Aufnahmen vor und nach der Sohlenbaggerung. Mit der Baggerung wurde die Sohle um gegen 6m abgetieft. Die Baggerlöcher wurden bis heute nur teilweise aufgefüllt. Die Profüänderungen am linken Ufer sind auf abgeschwemmte Feinsedimente während dem Hochwasser 1999 zurückzuführen.

Der Einfluss der Baggerung in der frei fliessenden Strecke auf den heutigen und reaktivierten Geschiebehalt dürfte gering sein. Die Baggerungen aus der Restwasserstrecke Albbruck-Dogern und im Konzessionsgebiet des Kraftwerks Säckingen werden die Reaktivierung jedoch beeinflussen und sind in der Massnahmenplanung entsprechend berücksichtigt.

## 6.6 Geschiebetransportvermögen und Geschiebefrachten

### 6.6.1 Änderungen gegenüber der Geschiebehaltstudie 2000

Das Geschiebetransportvermögen und die im heutigen Zustand transportierten Geschiebefrachten sind in der Geschiebehaltstudie beschrieben. In der Zwischenzeit haben sich die Verhältnisse wie folgt verändert:

- Kraftwerk Schaffhausen

Im Rahmen der Ökostromzertifizierung wurden der Geschiebehalt und das Transportvermögen detailliert untersucht. Die Berechnungen mit der aktuellsten Gerinnegeometrie (Aufnahme 2001) sowie Unterwasseraufnahmen rheinabwärts des Kraftwerks zeigen, dass Geschiebe mehr oder weniger regelmässig durch die ganze Stauhaltung und das Wehr transportiert werden kann. Mit der Zertifizierung wird der Kraftwerksbetreiber verpflichtet, das beim Kraftwerk antransportierte Geschiebe ins Unterwasser weiterzugeben.

- Kraftwerk Albbruck-Dogern

In das bestehende Wehr wurde ein Dotierkraftwerk eingebaut, wobei die Stauhöhe unverändert belassen wurde. Das Dotierkraftwerk ist auf einen Abfluss von  $300\text{m}^3/\text{s}$  ausgelegt, womit der Ausbauabfluss der Gesamtanlage auf  $1'400\text{m}^3/\text{s}$  gesteigert wurde. Mit dem Dotierkraftwerk wird die ehemalige Dotierung der Restwasserstrecke (Altrhein) von  $40\text{m}^3/\text{s}$  auf mindestens  $200\text{m}^3/\text{s}$  (Mindestabgabe gemäss Konzession), resp.  $300\text{m}^3/\text{s}$  (Ausbauabfluss Dotierkraftwerk) markant erhöht. Wegen der Sohlenbaggerung im Unterwasser des Wehrs und im Abschnitt Rossgarten (vgl. Bilder 6.11 und 6.12) liegt die dimensionslose Schubspannung bei  $Q_9$  deutlich tiefer als der kritische Wert von 0.05, womit auch mit der erhöhten Wasserführung kein regelmässiger Geschiebetransport möglich ist (Bild 16). Um Geschiebe im Unterwasser des Wehrs transportieren zu können, sind Abflüsse  $\geq HQ_{10}$  erforderlich. Ein Geschiebetransport durch den Abschnitt mit den Baggerlöchern ist bei einem  $HQ_{10}$  möglich.

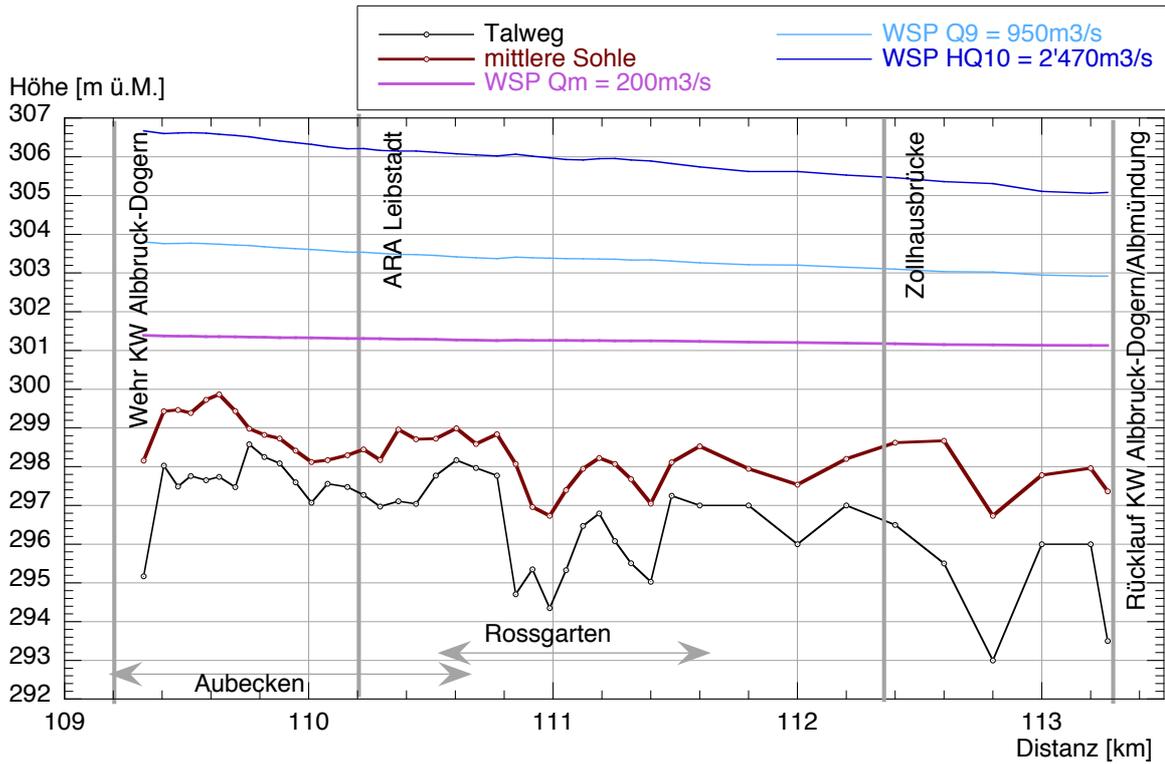


Bild 6.11 Längenprofil von Talweg, mittlerer Sohle (aus Höhenlinienplänen) und Wasserspiegeln bei verschiedenen Abflüssen in der Restwasserstrecke des Kraftwerks Albruck-Dogern.

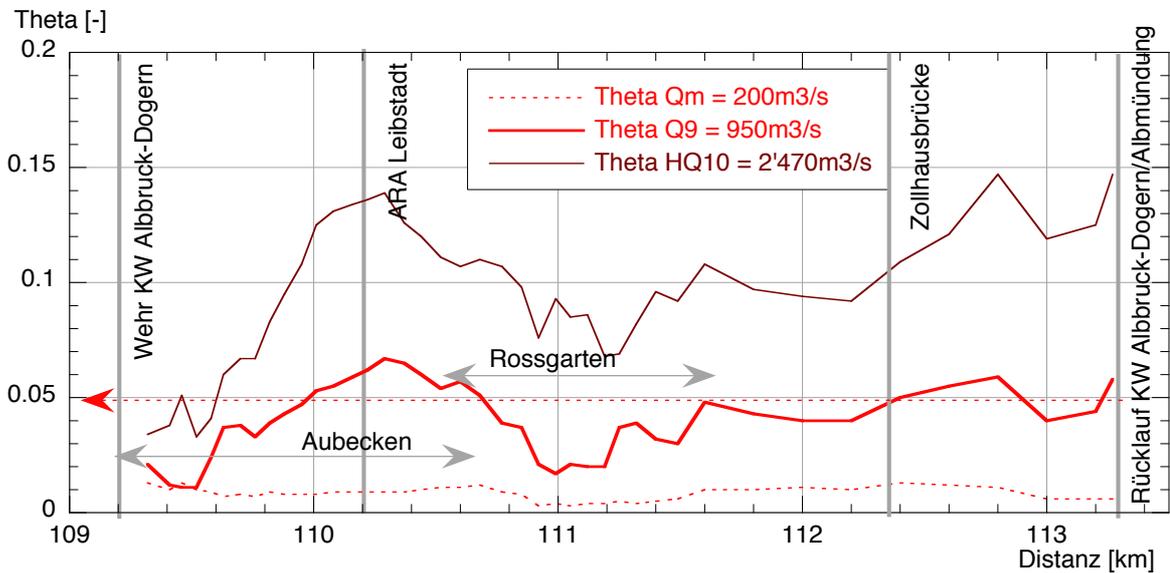
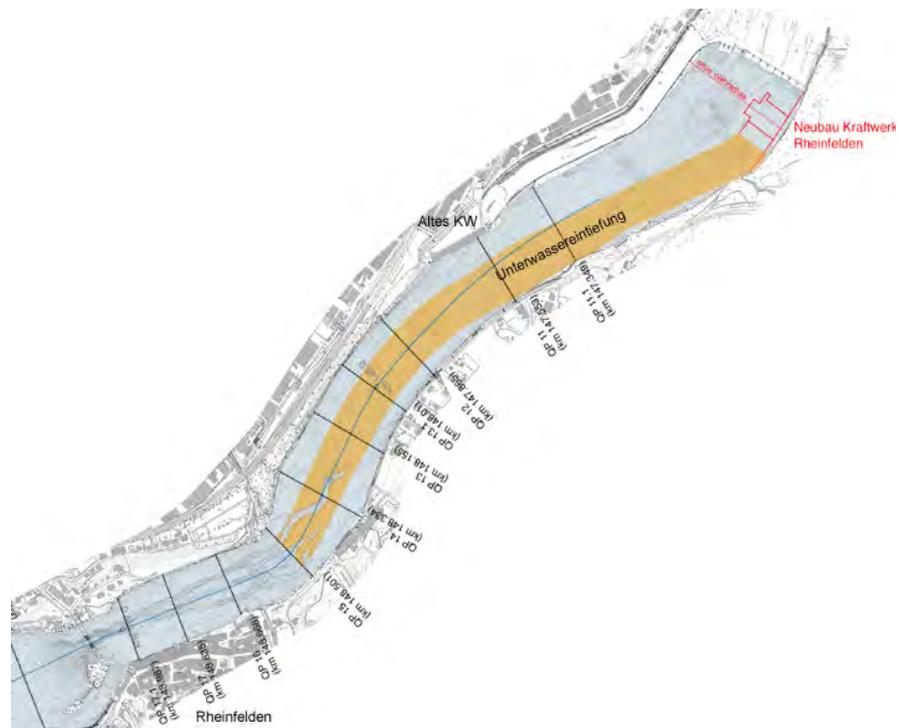


Bild 6.12 Längenprofil der dimensionslosen Schubspannung bei verschiedenen Abflüssen in der Restwasserstrecke des Kraftwerks Albruck-Dogern.

- Kraftwerk Rheinfelden

Das alte Ausleitkraftwerk mit dem 750m langen Oberwasserkanal und die Wehranlage wurden durch einen Neubau ersetzt. Das neue Wehr steht rund 100m weiter rheinabwärts des alten Wehrstandortes und staut den Rhein gegenüber der alten Wehranlage um 1.4m höher auf das neue Stauziel von 270.5m ü.M. ein. Im Unterwasser wurde im anstehenden Fels ("Gwild") eine 100m breite und bis zu 6m tiefe Rinne ausgehoben (Bild 6.13).



*Bild 6.13  
Lage des alten und  
neuen Kraftwerks  
Rheinfelden mit der  
ausgehobenen  
Unterwasserrinne (gelbe  
Fläche).*

Nachfolgend sind die hydraulischen und geschiebemechanischen Berechnungen, die im Rahmen der Neukonzessionierung des Kraftwerks Ryburg-Schwörstadt durchgeführt wurden, dokumentiert.

Bild 6.14 zeigt das Längenprofil der mittleren Sohlenlage der Vermessungen 1995 (aus Höhenlinienplänen) und 2003. Der Vergleich zeigt, dass sich die Sohle in dieser Zeit kaum verändert hat. Neben der fehlenden Geschiebezufuhr und dem grossen Erosionswiderstand der grobkörnigen Sohle ist dies auf einen Felsaufschluss bei Riedmatt zurückzuführen, der als Fixpunkt im Längenprofil wirkt.

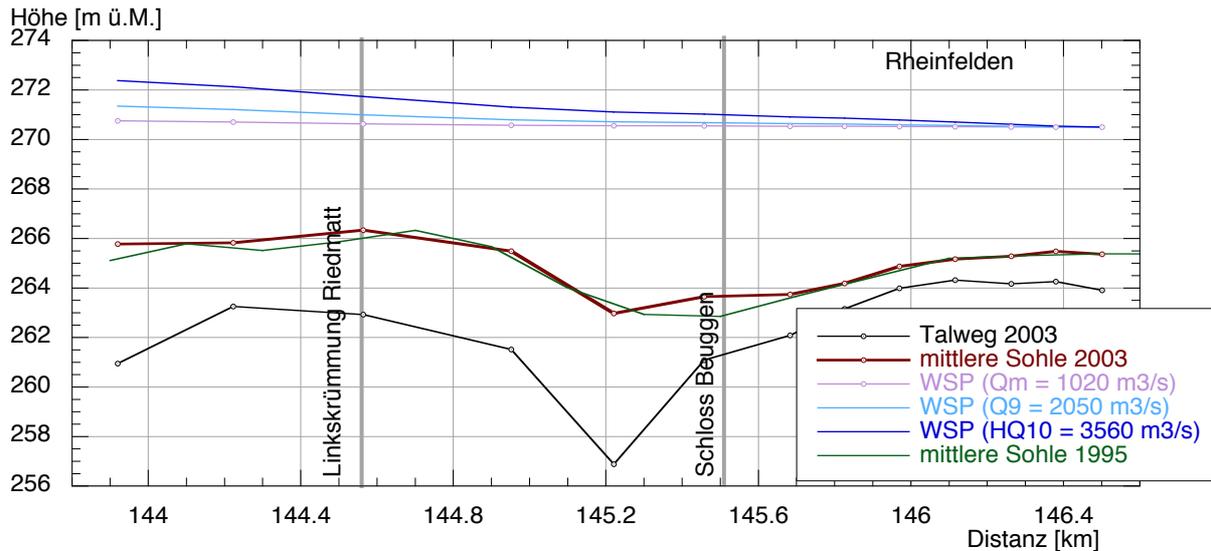


Bild 6.14 Längenprofil von Talweg, mittlerer Sohle und Wasserspiegel bei verschiedenen Abflüssen unter Berücksichtigung des geplanten Höherstaus auf 270.5 m ü.M.

Bild 6.15 zeigt die dimensionslosen Schubspannungen  $\Theta$  für einen massgebenden Korn-durchmesser von  $d_m = 1.8\text{cm}^9$  bei verschiedenen Abflüssen. Die ausgezogenen Linien beziehen sich auf den Höherstau gemäss Ausbauprojekt. Vor dem Kraftwerkneubau konnte regelmässig Geschiebe durch die ganze Stauhaltung transportiert werden ( $\Theta$  bei  $Q_9 > 0.05$ ). Im Projektzustand (Stauziel 270.50 m ü.M.) liegt die dimensionslose Schubspannung Theta in der tieferen Stauhaltung bei  $Q_9$  im Bereich des kritischen Wertes von 0.05. Damit dürfte trotz des Höherstaus ein mehr oder weniger regelmässiger Geschiebetransport durch die Stauhaltung möglich sein.

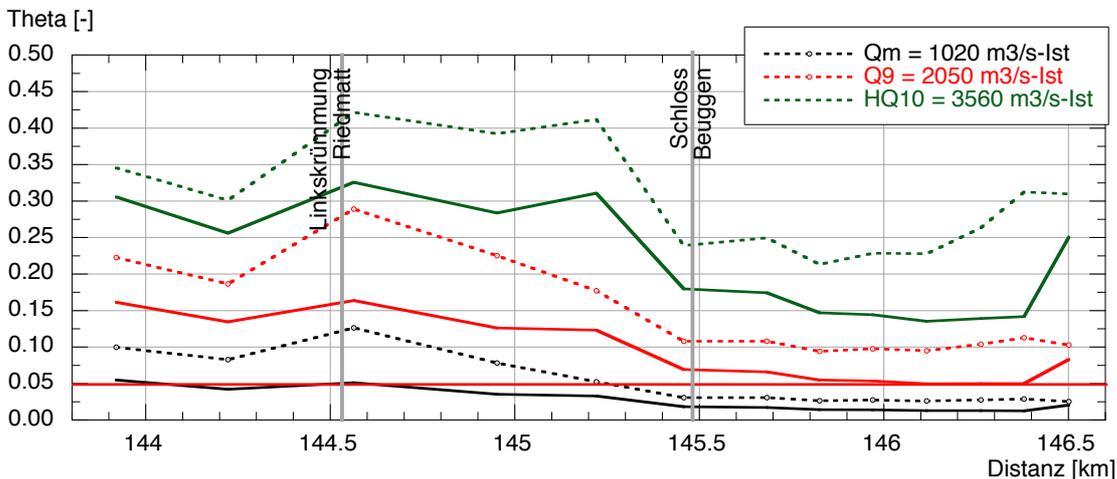


Bild 6.15 Dimensionslose Schubspannungen Theta für verschiedene Abflüsse ( $d_m = 1.8\text{cm}$ ). Gestrichelte Linien: Zustand vor Neubau, ausgezogene Linien: mit Höherstau nach Neubau.

<sup>9</sup> Die Berechnungen erfolgten im Rahmen der UVB-Untersuchungen zur Konzessionserneuerung des KW Ryburg-Schwörstadt. Es wurde berücksichtigt, dass sich der massgebende Korndurchmesser von Geschiebe, das beim Kraftwerk Reckingen geschüttet wird, durch den Abrieb verkleinert wird.

## 6.6.2 Aktuelle Verhältnisse

In Bild 6.23 ist der aktuelle Geschiebehaushalt in der Situation dargestellt. Demnach entsprechen das Geschiebetransportvermögen und die Geschiebefracht nur im Abschnitt zwischen dem Ausfluss aus dem Bodensee und dem Stauwurzelbereich des Kraftwerks Rheinau einem einigermaßen naturnahen Zustand<sup>10</sup>. Im Staubereich und der Restwasserstrecke des Kraftwerks Rheinau ist das Transportvermögen eingeschränkt. Ein Geschiebetransport durch das Wehr ist aufgrund seiner Konstruktion nicht möglich. Zwischen der Wasserrückgabe und der Thurmündung entspricht das Transportvermögen dem natürlichen Zustand (frei fließende Strecke). Ein beschränkter Geschiebeeintrag erfolgt durch Erosionsprozesse am Zürcher Ufer rheinaufwärts von Ellikon (Bild 6.16).



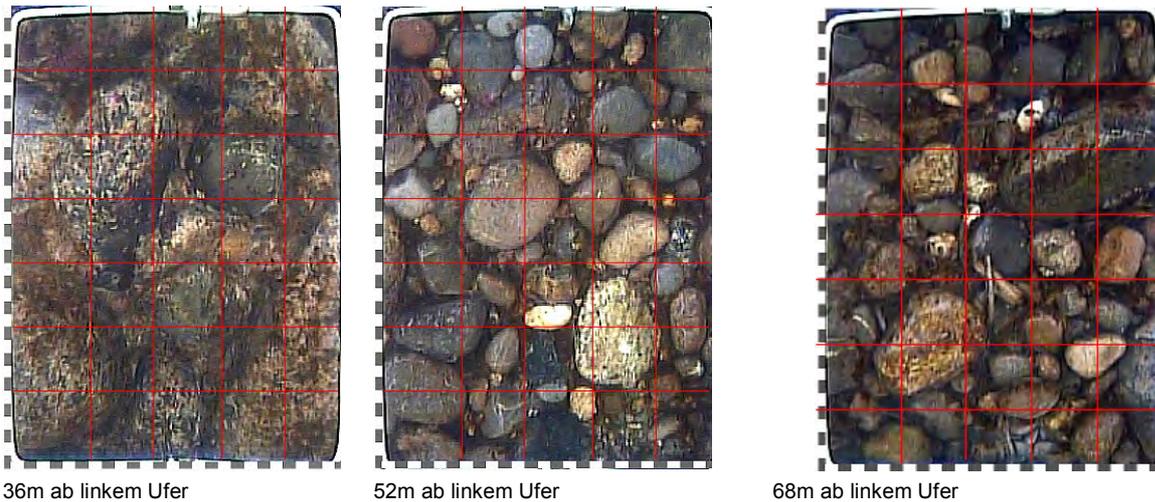
*Bild 6.16 Erosionen des Zürcher Ufers oberhalb von Ellikon in Abschnitten, wo der Uferschutz nicht mehr erneuert wird (links), führen zu einer Reaktivierung der ursprünglichen Geschiebequellen (rechts).*

Aufgrund der ungenügenden Transportkapazität im Staubereich des Kraftwerks Eglisau lagert sich sämtliches Geschiebe aus der Thur und der Töss im Mündungsbereich ab.

Im oberen Abschnitt der Stauhaltung Reckingen ist eine beschränkte Geschiebetransportkapazität vorhanden (Bild 6.17), im tieferen Staubereich kann höchstens bei sehr grossen Hochwasserabflüssen Geschiebe transportiert werden. Die ursprüngliche Geschiebefracht ist stark reduziert, da kein Thur- und Tössgeschiebe zugeführt wird und nur noch ein Teil des Glatteschiebes in den Rhein gelangt.

---

<sup>10</sup> Der Geschiebeeintrag in diese Strecke erfolgt hauptsächlich durch Ufererosionen. Gegenüber dem ursprünglichen Zustand sind die Ufer heute teilweise (aber nicht durchgehend) verbaut, wodurch sich die Geschiebefrachten reduzieren. In der GH-Studie 2000 wurde dieser Abschnitt genauer betrachtet und die Reduktion auf rund 50% geschätzt.



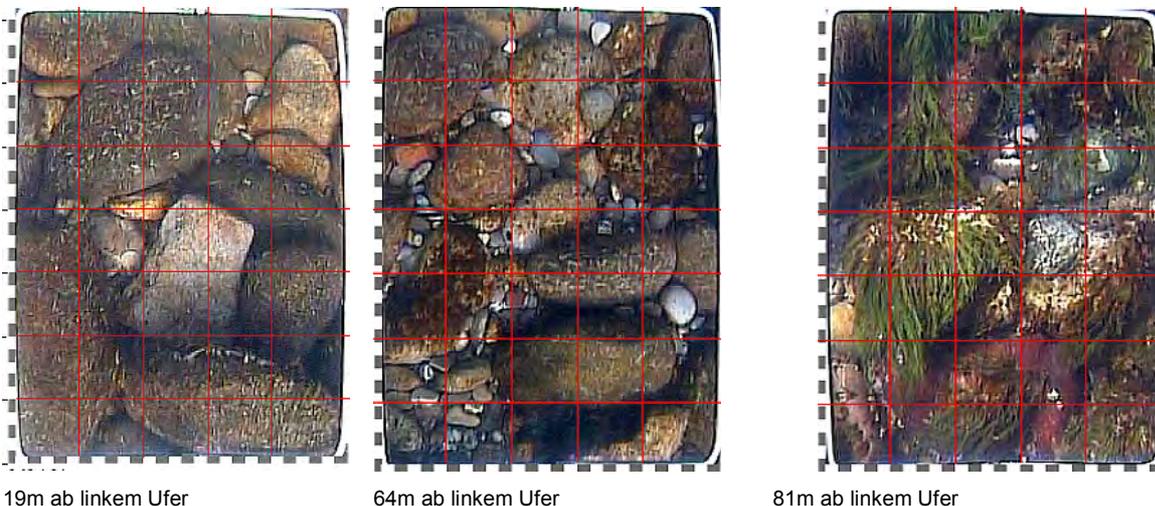
36m ab linkem Ufer

52m ab linkem Ufer

68m ab linkem Ufer

*Bild 6.17 Unterwasserfotos in der Stauhaltung des Kraftwerks Reckingen (km 82.3). In der linken Gerinnhälfte ist das grobkörnige Sohlenmaterial ersichtlich (Foto links), auf der rechten Gleithangseite ist die Sohle mit Glattgeschiebe überdeckt. Rasterweite 5cm.*

Zwischen den Kraftwerken Reckingen und Laufenburg ist die Geschiebetransportkapazität entweder unbeeinflusst (frei fließende Strecke) oder beschränkt (Stauhaltungen, Restwasserstrecke). Bis zur Wutachmündung ist der Rhein weitgehend geschiebelos<sup>11</sup> und rheinabwärts davon ist die Geschiebefracht gegenüber dem ursprünglichen Zustand stark reduziert. Die Sohle ist entsprechend grobkörnig (Bild 6.18) und in Ufernähe oft mit Feinsedimenten bedeckt (Bilder 6.19 und 6.20).



19m ab linkem Ufer

64m ab linkem Ufer

81m ab linkem Ufer

*Bild 6.18 Unterwasserfotos in der frei fließenden Strecke bei Zurzach, oberhalb der Rheinheimer Insel (km 94.5). Im grobkörnigen Sohlenmaterial sind einzelne Geschiebekörner eingelagert. Rasterweite 5cm.*

<sup>11</sup> Ein geringfügiger Geschiebeeintrag erfolgt aus der rechtsufrigen Schüttung im Unterwasser des Kraftwerks Reckingen, die im Anschluss an das Hochwasser 1999 aus Aushubmaterial aus der Sohle erstellt wurde.



*Bild 6.19*  
*Schmale grobkörnige Kiesbank mit starker*  
*Kolmation entlang dem Gleithang rheinaufwärts*  
*der Insel Rietheim (km 97).*

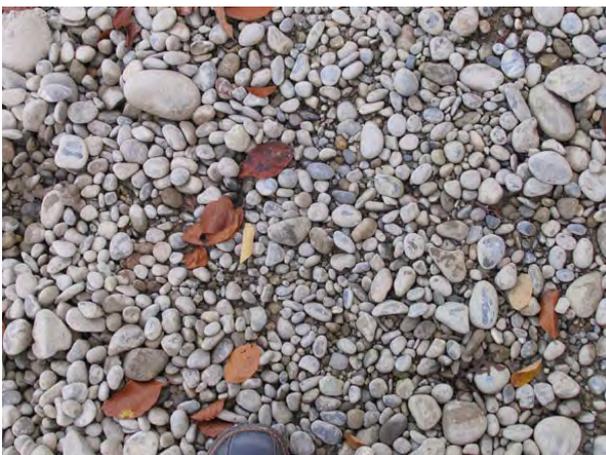


*Bild 6.20*  
*Steiles Ufer am Gleithang mit sandbedeckter Sohle*  
*rheinaufwärts der Insel Rietheim (km 97.7).*

Aufgrund der Sohlenbaggerungen ist der Geschiebetransport in der Restwasserstrecke des Kraftwerks Albruck-Dogern sowie in der Stauhaltung und dem Unterwasser des Kraftwerks Säckingen auf grössere Hochwasser beschränkt.

Das wenige Geschiebe, das heute noch bis in die Stauhaltung des Kraftwerks Ryburg-Schwörstadt eingetragen wird, lagert sich im tieferen Staubereich ab und wird nur bei grossen Hochwasserabflüssen (ab etwa HQ10) bis ins Unterwasser transportiert und an strömungsgünstigen Stellen abgelagert (Bilder 6.21 und 6.22).

Da das Geschiebe aus der Ergolz im Rückstaubereich regelmässig gebaggert wird, ist die Geschiebefracht rheinabwärts des Kraftwerks Ryburg-Schwörstadt trotz abschnittsweise vorhandener beschränkter Geschiebetransportkapazität weitgehend unterbunden.



*Bild 6.21*  
*Geschiebeablagerungen im Unterwasser des*  
*Kraftwerks Ryburg-Schwörstadt (km 144.1) nach*  
*dem Hochwasser vom August 2005 ( $Q_{max} =$*   
 *$3'464m^3/s$ ).*



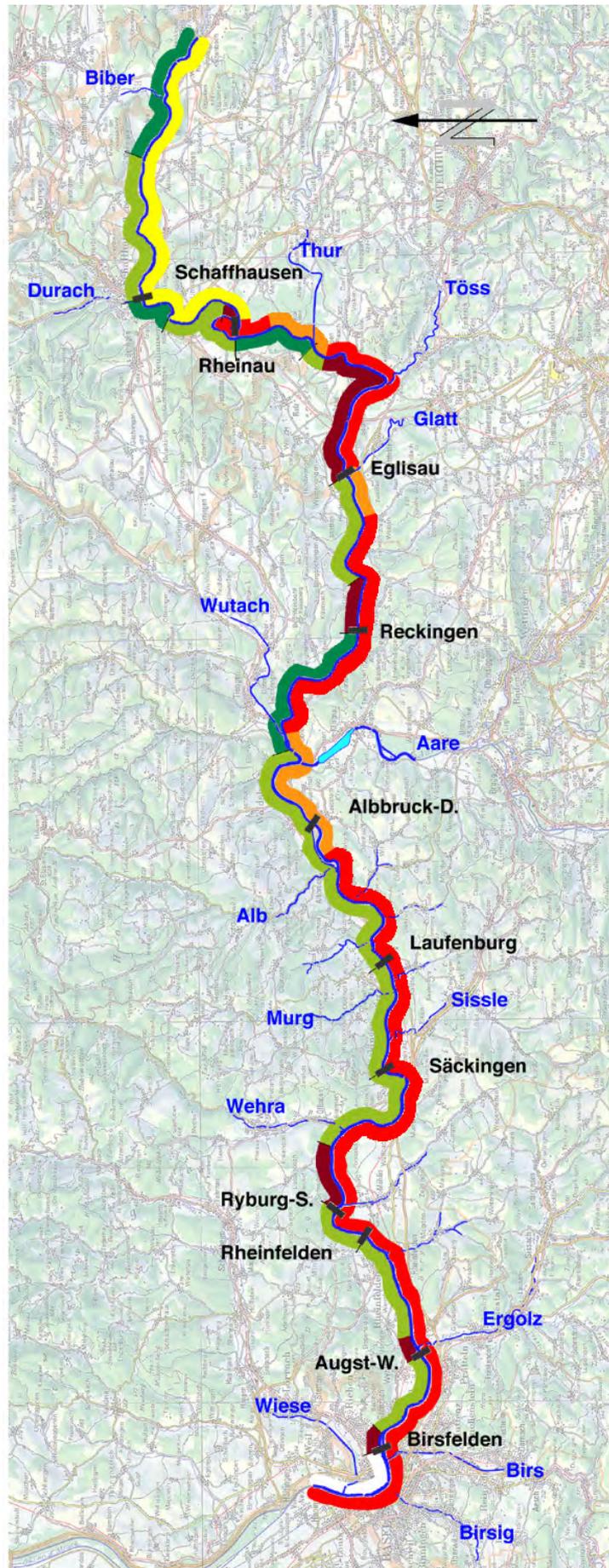
*Bild 6.22*  
*Geschiebeablagerungen im Strömungsschatten der*  
*Insel Rheinfeldern (km 149.1) nach dem Hochwasser*  
*vom August 2005 ( $Q_{max} = 3'464m^3/s$ ).*

**Legende**

1 : 400'000

-  Stauwehr
- Aktuelle Geschiebetransportkapazität**
  -  nicht beeinflusst (Freie Fliessstrecke)
  -  beschränkt (Einfluss Stauhaltungen)
  -  kein Transport bei HQ10 (Einfluss Stauhaltungen)

- Geschiebefracht gegenüber 1900**
  -  vermindert (um bis 50 % gegenüber 1900)
  -  stark reduziert (um über 50 % gegenüber 1900)
  -  unterbunden (um 95 % gegenüber 1900)



*Bild 6.23  
 Aktueller Geschiebehaushalt des Hochrheins in der Situation. Rechts vom Rhein (in Fliessrichtung) ist die Geschiebetransportkapazität qualitativ dargestellt, links vom Rhein die Veränderung der Geschiebefracht gegenüber den Verhältnissen um 1900.*

### 6.6.3 Stauhaltung Kembs

Vom Betreiber des Kraftwerks Kembs (Electricité de France, EDF) liegen hydraulische und geschiebemechanische Untersuchungen vor (Grundlage [19], vgl. Anhang 7). Die Berechnungen zeigen, dass je nach Abfluss ein gewisser Geschiebetransport durch die Stauhaltung möglich ist. Es wurde jedoch von sehr grobkörnigem Birsgeschiebe ausgegangen ( $d_m = 4.7\text{cm}$ ,  $d_{90} = 9.3\text{cm}$ ), was eher dem Sohlenmaterial der Birs entspricht. Proben, die während der Erarbeitung der Geschiebehaushaltstudie entnommen wurden (Grundlage [1]), weisen wesentlich kleinere Korndurchmesser auf ( $d_m = 2.4\text{cm}$ ,  $d_{90} = 5.2\text{cm}$ ).

## 6.7 Zusammenfassende Beschreibung des Geschiebehaushaltes

Der Hochrhein beginnt am geschiebe- und schwebstofflosen Ausfluss aus dem Bodensee bei Stein am Rhein. Im rund 40km langen Abschnitt bis zur Thurmündung münden nur kleine Bäche in den Rhein, die bezüglich dem Geschiebe- und Schwebstoffeintrag sowohl im ursprünglichen als auch im heutigen Zustand von untergeordneter Bedeutung sind. Im ursprünglichen Zustand erfolgte der Sedimenteintrag in diesen Abschnitt hauptsächlich durch Uferabbrüche im Bereich von Prallhängen (Mäandermigration). Heute sind die Ufer mit Ausnahme des Zürcher Abschnittes im Bereich Ellikon fast durchgehend verbaut und diese ursprünglich dominante Geschiebequelle damit unterbunden. Das Geschiebe kann mehr oder weniger regelmässig durch die Stauhaltung des Kraftwerks Schaffhausen transportiert werden und lagert sich in der Stauhaltung des Kraftwerks Rheinau ab (kein Geschiebetransport aufgrund der Wehrausbildung). Wegen nur untergeordneten Schwebstoffeinträgen finden sich trotz den geringen Geschiebeeinträgen locker gelagerte, nicht kolmatierte Kiesbänke.

Das Geschiebe aus der Thur und der Töss, der ehemals wichtigsten Lieferanten, wird vollumfänglich in der Stauhaltung des Kraftwerks Eglisau abgelagert. Das (wenige) Geschiebe aus der Glatt, die im Unterwasser des Kraftwerks Eglisau in den Rhein mündet, lagert sich in der Stauhaltung des Kraftwerks Reckingen ab.

Durch den Geschieberückhalt in den Stauhaltungen der Kraftwerke Eglisau und Reckingen ist die anschliessende Flie遳strecke bis zur Wutachmündung weitgehend geschiebelos. Dieser Abschnitt zeichnet sich durch eine grobkörnige, kolmatierte Sohle mit einer ausgeprägten Deckschicht aus. Die wenigen vorhandenen Kiesbänke bestehen grösstenteils aus grobkörnigem Material, das als Laichsubstrat nicht geeignet ist. Der wiederholt festgestellte starke Kolmatierungsgrad zeigt, dass das Material nicht regelmässig umgelagert wird. In den in den letzten Jahren umgesetzten Aufwertungsmassnahmen an der Wutach in Tiengen und an der Mündung wird Geschiebe abgelagert und so der Geschiebeaustag in den Rhein vorübergehend reduziert. Mit den in der Baubewilligung des Kraftwerks Eglisau formulierten Auflagen wird der Geschiebehaushalt in der Flie遳strecke teilweise reaktiviert.

Geschiebeablagerungen, die vor dem Bau des Wehrkraftwerks im Unterwasser des Wehrs Albruck-Dogern zu finden waren, zeigen, dass ein gewisser Geschiebetransport durch die Stauhaltung bis in die Restwasserstrecke dieses Kraftwerks möglich war. Da sich mit dem Bau des Wehrkraftwerkes die hydraulischen Verhältnisse nicht verändert haben (Stauziel wurde beibehalten), kann auch heute Geschiebe durch die Stauhaltung transportiert werden. Die um 1985 erfolgte massive Sohlenbaggerung in der Restwasserstrecke (Rossgarten) wirkt als temporäre Geschiebefalle, wo sich bei kleineren Hochwasserereignissen Geschiebe

ablageren kann und bei grossen, nicht regelmässig auftretenden Hochwasserabflüssen wieder ausgewaschen wird. Die Baggerlöcher sind heute teilweise aufgefüllt (v.a. Auswirkungen des Hochwassers 1999), die ursprüngliche Sohlenlage, wie sie vor den Baggerungen bestand, ist jedoch noch nicht erreicht. Bis die Baggerlöcher wieder aufgefüllt sind, ist eine regelmässige Weitergabe des Geschiebes nicht gewährleistet.

Neben dem Rücklauf des Kraftwerks Albbruck-Dogern mündet die Alb als letzter aktiver Geschiebezubringer bis zur Birmündung in den Rhein. Der Transport der gegenüber dem ursprünglichen Zustand massiv reduzierten Geschiebefracht wird durch die Kraftwerkskette, bestehend aus den Kraftwerken Laufenburg, Säckingen, Ryburg-Schwörstadt, Rheinfelden, Augst-Wyhlen, Birsfelden und Kembs, beeinflusst. Einerseits ist ein regelmässiger Geschiebetransport nicht in allen Stauhaltungen möglich und andererseits werden die Mündungsbereiche der Zuflüsse eingestaut und so der Geschiebeeintrag unterbunden.

## 6.8 Defizite, Aufwertungspotenzial

In Bild 6.25 sind die Längenprofile der mittleren Fliessgeschwindigkeiten bei Mittelwasserabfluss ( $Q_m$ ) und der dimensionslosen Schubspannungen bei  $Q_9$  dargestellt. Ebenfalls sind in qualitativer Weise die Reduktion der Geschiebefracht gegenüber dem ursprünglichen Zustand um 1898 (vor dem einsetzenden Kraftwerkbau) und die Schwebstofffracht dargestellt. Die für den Geschiebehaushalt massgebenden Defizite lassen sich wie folgt einteilen:

- **Hydraulik und Geschiebetransportvermögen:**  
Je mehr die mittleren Fliessgeschwindigkeiten und die Schubspannungen von den Verhältnissen in den Abschnitten, die nicht von den Kraftwerken beeinflusst werden, abweichen, desto grösser sind die Defizite. Das hydraulische Defizit kann unter der Anforderung des Fortbestandes der bestehenden Kraftwerke nicht behoben werden und wird daher als Randbedingung für die Definition des Aufwertungspotenzials berücksichtigt. Entsprechend bleibt das Geschiebetransportvermögen gegenüber dem unbeeinflussten Zustand reduziert oder unterbunden.
- **Reduktion der Geschiebefracht gegenüber dem ursprünglichen Zustand und Schwebstofffracht:**  
Geschiebe, das in Abschnitten mit reduziertem Geschiebetransportvermögen gelangt (Stauhaltungen), lagert sich dort ab und führt zu einem reduzierten (oder unterbundenen) Geschiebeaustrag in die unterliegende Strecke. Feinsedimente können bei ausreichenden Fliessgeschwindigkeiten durch solche Abschnitte transportiert werden. In Abschnitten mit geringer Feinsedimentführung (Bodensee – Thurmündung) verlaufen Kolmationsprozesse sehr langsam und Kiesbänke stehen über mehrere Jahre oder Jahrzehnte als Laichhabitat zur Verfügung, ohne dass sie umgelagert werden müssen. In Abschnitten, in die vorwiegend Feinsedimente eingetragen werden, sind Kiesbänke meist kolmatiert und als Laichsubstrat nicht geeignet.

Bezüglich der Defizite lässt sich der Hochrhein gemäss Tabelle 6.2 charakterisieren. Im obersten Abschnitt zwischen Bodensee und der Rüdlinger Brücke (ca. 2.5km rheinabwärts der Thurmündung) besteht mit Ausnahme der Restwasserstrecke des Kraftwerks Rheinau ein geringes bis mittleres Defizit aufgrund der natürlicherweise reduzierten Geschiebefracht.

Kolmationsprozesse sind aufgrund der kleinen Schwebstofffrachten von untergeordneter Bedeutung, wodurch trotz der (natürlicherweise) kleinen Geschiebefracht ausgedehnte, locker gelagerte Kiesbänke bestehen. Rheinabwärts der Rüdlinger Brücke besteht ein durchgehend grosses Defizit, da einerseits die wichtigsten Geschiebeeinträge in der Stauhaltung des Kraftwerks Eglisau, resp. im Klingnauer Stausee zurückgehalten werden und so Abschnitte mit ausreichender Geschiebetransportkapazität weitgehend geschiebelos sind und andererseits in verschiedenen Stauhaltungen ein Geschiebetransport nicht oder nur bei grossen, selten auftretenden Hochwasserabflüssen möglich ist.

*Tabelle 6.2 Defizite bezüglich des Geschiebehaushalts in den einzelnen Abschnitten und auslösende Faktoren. GF: Reduktion Geschiebefracht gegenüber ursprünglichem Zustand, TK: Reduktion der Geschiebetransportkapazität, TR: verstärkte Kolmation wegen Trübung.*

Abschnitt	Defizit		
	gering	mittel	gross
Bodensee – tiefere Stauhaltung KW Rheinau	GF		
Tiefere Stauhaltung – Rückgabe KW Rheinau			TK, GF
Rückgabe KW Rheinau – Rüdlinger Brücke	GF	GF	
Rüdlinger Brücke – Unterwasser KW Reckingen			TK, GF
Unterwasser KW Reckingen – tiefere Stauhaltung KW Albrück-Dogern			GF, TR
Tiefere Stauhaltung – Rückgabe KW Albrück-Dogern			GF, (TK), TR
Rückgabe KW Albrück-Dogern – KW Laufenburg			GF, TR
Unterwasser KW Laufenburg – tiefere Stauhaltung KW Ryburg-Schwörstadt			GF, TK, TR
Unterwasser KW Ryburg-Schwörstadt – KW Augst-Wyhlen			GF, (TK), TR
KW Augst-Wyhlen – KW Birsfelden			GF, (TK), TR

Das Aufwertungspotenzial kann anhand der bestehenden Fließverhältnisse (nicht beeinflussbar<sup>12</sup>) und dem Geschiebetransportvermögen definiert werden. Aufwertungspotenzial besteht in Abschnitten mit natürlichen oder naturnahen Fließverhältnissen, ausreichendem Transportvermögen und stark reduzierten Geschiebefrachten. Je länger solche Abschnitte sind oder wenn lange Abschnitte nur auf kurzen Teilstrecken unterbrochen sind, desto grösser ist das Aufwertungspotenzial. Zudem führen gekrümmte oder strukturierte Gewässerabschnitte zu grösserer Strömungsvielfalt und daher potenziell mehr Geschiebe-

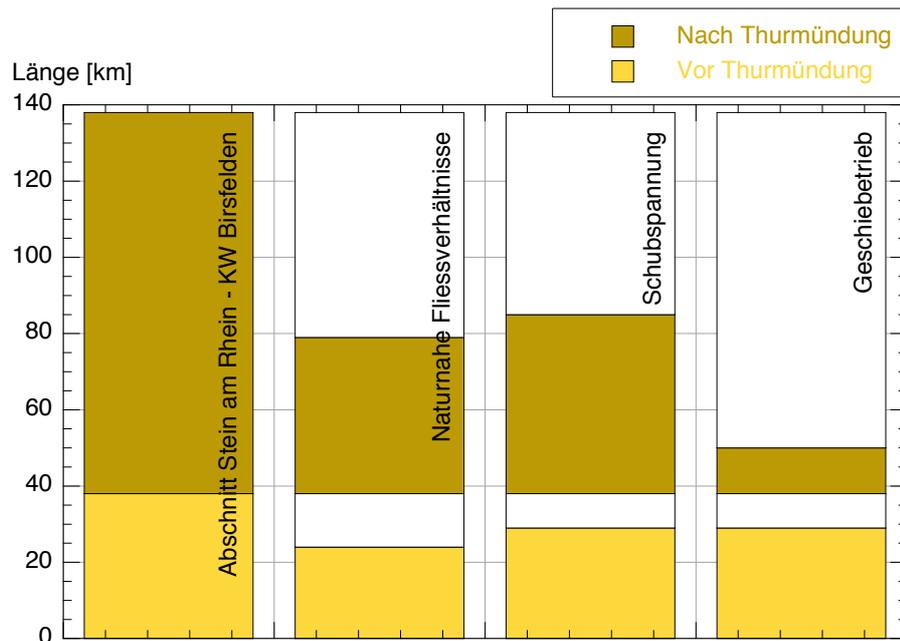
<sup>12</sup> Die Fließverhältnisse können mit Stauabsenkungen beeinflusst werden. Da es sich dabei um eine temporäre, zeitlich eng beschränkte Massnahme für den Transport von Geschiebe durch die Stauhaltung, die nur bei erhöhten Abflüssen an wenigen Tagen pro Jahr durchgeführt wird, ändert sich an den normalerweise vorherrschenden Fließverhältnissen nichts.

ablagerungsflächen. Sie weisen damit ein grösseres Aufwertungspotenzial auf, als gestreckte Rheinabschnitte ohne Ufer- und Sohlenstrukturen.

Die natürlichen oder naturnahen mittleren Fließgeschwindigkeiten lassen sich aus den frei fließenden Strecken ableiten und betragen bei Mittelwasserabfluss im obersten, flachen Abschnitt bis zum Rheinfall etwa 1 – 1.3m/s und rheinabwärts des Rheinfalls 1 – 2m/s (in Bild 6.25 eingetragen).

Bild 6.24 zeigt schematisch für den Hochrheinabschnitt zwischen Stein am Rhein und dem Kraftwerk Birsfelden, unterteilt in die Strecken vor und nach der Thurmündung, die Streckenanteile mit naturnahen Fließverhältnissen, mit für regelmässige Geschiebeumlagerungen ausreichenden Schubspannungen und mit noch vorhandenem Geschiebetrieb (Zusammenfassung von Bild 6.25). Demnach bestehen im rund 38km langen Abschnitt rheinaufwärts der Thurmündung auf rund 24km Länge naturnahe Fließverhältnisse und auf rund 29km Länge ausreichende Schubspannungen. In den Strecken mit ausreichenden Schubspannungen wird noch Geschiebe transportiert. Zwischen der Thurmündung und dem Kraftwerk Birsfelden (Länge rund 100km) bestehen noch auf 41km naturnahe Fließverhältnisse und auf 47km ausreichende Schubspannungen. Geschiebe wird noch auf einer rund 12km langen Strecke transportiert (Wutachmündung bis Restwasserstrecke KW Albrbruck-Dogern).

*Bild 6.24  
Streckenanteile zwischen Stein am Rhein und dem Kraftwerk Birsfelden mit naturnahen Fließverhältnissen, für den Geschiebetransport ausreichenden Schubspannungen und mit bestehendem Geschiebetrieb. Unterteilung in Hochrhein vor und nach der Thurmündung.*



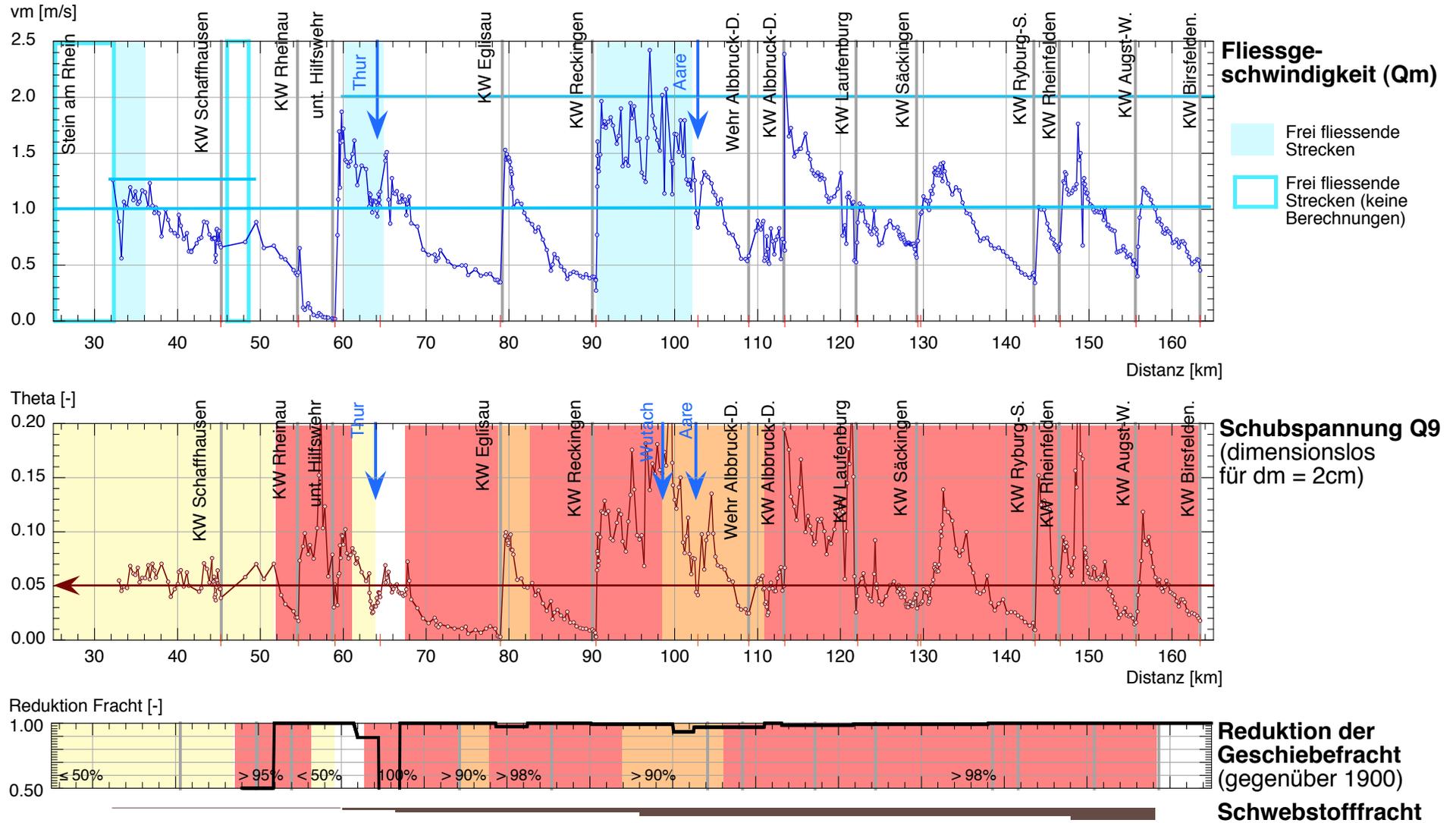


Bild 6.25 L#ngenprofile von berechneter mittlerer Flie遡geschwindigkeit bei Mittelwasserabfluss ( $Q_m$ ) und dimensionsloser Schubspannung bei  $Q_9$  ( $\Theta$ ), Reduktion der urspr#nglichen Geschiebefracht (ohne Eintrag aus Ufererosionen) und qualitativer Beschreibung der Schwebstofffracht.

Das anhand der Fliessgeschwindigkeiten und Transportvermögen unter Berücksichtigung der morphologischen Strukturen definierte Aufwertungspotenzial ist in Bild 6.26 in der Situation dargestellt und in Tabelle 6.3 beschrieben. Zusammenfassend kann das Aufwertungspotenzial wie folgt beschrieben werden:

- Im 27km langen Abschnitt zwischen dem Bodensee und der Stauhaltung des Kraftwerks Rheinau bestehen bereits heute ein naturnaher Geschiebehalt und naturnahe Fliessverhältnisse. Das Aufwertungspotenzial wird deshalb als mittel bezeichnet
- Im anschliessenden Abschnitt bis zur Thurmündung (ca. 13km) mit natürlichen Fliessverhältnissen ist die im ursprünglichen Zustand eher kleine Geschiebefracht auf kleine Einträge aus Erosionen am Zürcher Ufer reduziert. Wegen den natürlicherweise kleinen Geschiebefrachten und der nahe liegenden Stauwurzel des Kraftwerks Eglisau wird das Aufwertungspotenzial als mittel bezeichnet.
- Der anschliessende, 22.5km lange Abschnitt ist geprägt durch die beiden Stauhaltungen der Kraftwerke Eglisau und Reckingen. Mit Ausnahme eines ca. 3km langen Abschnittes im Unterwasser des Kraftwerks Eglisau sind die Fliessverhältnisse gestört und der Geschiebetransport unterbunden. Unter der Vorgabe, dass die Kraftwerke weiterhin betrieben werden, ist das Aufwertungspotenzial in den Stauhaltungen vernachlässigbar und im Unterwasser des Kraftwerks Eglisau aufgrund der isolierten und strukturarmen Strecke klein.
- Ab dem Kraftwerk Reckingen folgt der 31km lange Abschnitt mit der frei fliessenden Strecke Rekingen – Koblenz, der Stauhaltung und der Restwasserstrecke des Kraftwerks Albruck-Dogern sowie der Stauhaltung des Kraftwerks Laufenburg. Die Fliessverhältnisse sind mit Ausnahme der tieferen Stauhaltungen und der Restwasserstrecke natürlich bis naturnah. Bei grösseren Abflüssen ist ein Geschiebetransport durch die beiden Stauhaltungen möglich. Es besteht ein durchgehendes mittleres (tiefere Stauhaltung), grosses (Restwasserstrecke Kraftwerk Albruck-Dogern), resp. sehr grosses Aufwertungspotenzial (übrige Strecken).
- Der 41.5km lange Abschnitt zwischen den Kraftwerken Laufenburg und Birsfelden zeichnet sich durch die Abfolge der Stauhaltungen mit stark beeinträchtigten Strömungsverhältnissen und Transportvermögen und damit vernachlässigbarem Aufwertungspotenzial aus. Zwischen diesen Strecken bestehen noch kürzere Abschnitte mit naturnahen Fliessverhältnissen mit mittlerem bis grossem Aufwertungspotenzial (4 Teilstrecken von insgesamt 16km Länge).

**Legende**

1 : 400'000

— Stauwehr

**Aufwertungspotenzial**

sehr gross

gross

mittel

klein/vernachlässigbar

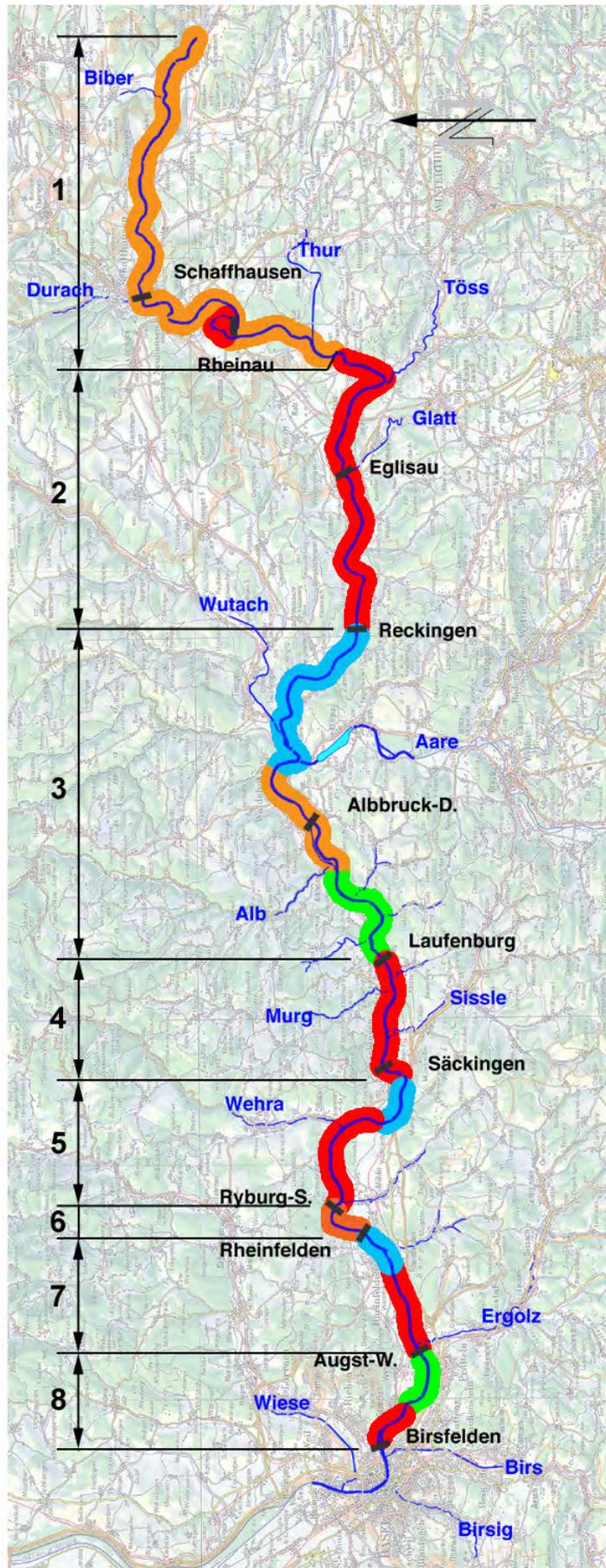


Bild 6.26  
 Aufwertungspotenzial bezüglich  
 Geschiebehaushalt unter Berücksichtigung  
 der bestehenden Kraftwerke. Abschnittnummerierung  
 gemäss Tabelle 6.3.

Tabelle 6.3 Aufwertungspotenzial in den einzelnen Abschnitten.

Abschnitt		Länge [km]	Aufwertungs- potenzial	Bemerkung
Nr.				
1	Bodensee – tiefere Stauhaltung KW Rheinau	27	mittel	Naturnaher Geschiebehauhalt besteht, langsame Kolmationsentwicklung (keine Trübung).
	Tiefere Stauhaltung – Rückgabe KW Rheinau	7	vernachlässigbar	Gestörte Fliessverhältnisse und Transportvermögen in Stauhaltung. Sanierung Restwasserstrecke möglich (separates Projekt).
	Rückgabe KW Rheinau – Rüdlinger Brücke	8	mittel	Im natürlichen Zustand kleine Geschiebefrachten, heute reduziert, langsame Kolmationsentwicklung (keine Trübung). Erhöhung des Geschiebeeintrags führt zu verstärkter Verlandung der Stauwurzel Kraftwerk Eglisau.
2	Rüdlinger Brücke – KW Eglisau	11	vernachlässigbar	Gestörte Fliessverhältnisse und Transportvermögen in Stauhaltung.
	Unterwasser KW Eglisau	3	klein	Geschiebezufuhr stark reduziert (nur Glatte Geschiebe), jedoch nur kurzer, isolierter Abschnitt mit gestrecktem Verlauf und wenigen Strukturen.
	Unterwasser KW Eglisau – KW Reckingen	8.5	vernachlässigbar	Gestörte Fliessverhältnisse und Transportvermögen in Stauhaltung.
3	Unterwasser KW Reckingen – tiefere Stauhaltung KW Albruck-Dogern	16.5	sehr gross	Natürliche Fliessverhältnisse, Geschiebezufuhr bis Wutach unterbunden, nach Wutach stark reduziert.
	Tiefere Stauhaltung KW Albruck Dogern		mittel	Gestörte Fliessverhältnisse und Transportvermögen in Stauhaltung.
	Restwasserstrecke Albruck-Dogern	5.5	mittel	Eingeschränkte Fliessverhältnisse, Geschiebezufuhr stark reduziert, Transportvermögen gestört.
	Rückgabe KW Albruck-Dogern – KW Laufenburg	9	gross	Natürliche Fliessverhältnisse, Geschiebezufuhr weitgehend unterbunden. Mäandrierender Verlauf mit (teilweise noch vorhandenen natürlichen Sohlenformen)
4	KW Laufenburg – Unterwasser KW Säckingen	8.5	klein, vernachlässigbar	Gestörte Fliessverhältnisse und Transportvermögen, verstärkt durch Sohlenabsenkungen im UW der Kraftwerke Laufenburg (ca. 3km) und Säckingen (ca. 2km). Fliessverhältnisse können nicht verbessert werden.

5	Unterwasser KW Säckingen – tiefere Stauhaltung KW Ryburg-Schwörstadt	4.5	sehr gross	Naturnahe Fliessverhältnisse, Geschiebezufuhr weitgehend unterbunden. Mäandrierender Verlauf mit entsprechenden Sohlenformen.
	Tiefere Stauhaltung KW Ryburg-Schwörstadt	8.5	vernachlässigbar	Gestörte Fliessverhältnisse und Transportvermögen in Stauhaltung.
6	Stauhaltung KW Rheinfelden	3.2	mittel	Gestörte Fliessverhältnisse, verstärkt seit Neubau.
7	Unterwasser KW Rheinfelden	5.5	sehr gross	Trotz neuer Unterwasserrinne naturnahe Fliessverhältnisse und ausreichendes Transportvermögen. Ausgeprägte Strukturen (Insel, Uferbuchten), pendelnder Lauf.
	Tiefere Stauhaltung KW Augst-Wyhlen	3.5	vernachlässigbar	Gestörte Fliessverhältnisse und Transportvermögen in Stauhaltung.
8	Unterwasser KW Augst-Wyhlen	2.8	gross	Naturnahe Fliessverhältnisse und ausreichendes Transportvermögen. Eher gestreckter Verlauf und wenig Uferstrukturen.
	Tiefere Stauhaltung KW Birsfelden	4.9	vernachlässigbar	Gestörte Fliessverhältnisse und Transportvermögen in Stauhaltung.

## 7 Anzustrebende Geschiebefracht

### 7.1 Methodik

Für die Sanierung des Geschiebehaushalts ist die Geschiebeführung soweit zu erhöhen, dass sich in den naturnahen Flussabschnitten eine gewässertypische Morphologie entwickeln kann und die einheimischen Tiere und Pflanzen, deren Lebensräume, der Grundwasserhaushalt und der Hochwasserschutz nicht wesentlich beeinträchtigt werden.

Damit diese Forderung erfüllt werden kann, sind folgende Bedingungen einzuhalten:

- Es müssen sich eine ähnliche Morphologie und vergleichbare Strukturen wie im natürlichen Zustand entwickeln können.
- Bänke und Strukturen müssen sich bei den regelmässig auftretenden Hochwasserereignissen selbständig erneuern (morphologische Dynamik).

Ausgehend von einer naturnahen Morphologie und übertragen auf den Geschiebehaushalt bedeutet dies, dass die oberste Schicht der Kiesbänke jährlich erneuert werden muss. Da die kieslaichenden Fischarten, speziell die Äschen als Indikatorart für den Zustand des Geschiebehaushalts, in der Regel eine einige Zentimeter bis wenige Dezimeter tiefe Laichgrube schlagen, wird eine locker gelagerte Kiesschicht mit einer mittleren Mächtigkeit von 30cm als ausreichend erachtet, um den Erfolg der Fortpflanzung dieser Arten sicherzustellen.

Zur Ermittlung der erforderlichen Geschiebefracht wurde das in der Vollzugshilfe zur Sanierung des Geschiebehaushalts (Grundlage [39]) beschriebene Verfahren angewandt.

Demnach kann eine *Richtgrösse* für die anzustrebende Geschiebeführung mit folgenden Bearbeitungsschritten abgeleitet werden:

1. Kartieren aller Kiesbänke eines naturnahen Gewässerabschnitts. Dabei ist auch der benetzte Teil unter Wasser zu berücksichtigen. Dies kann anhand von Karten (z.B. Hochrheinpläne), einer Interpretation der Strömungsverhältnisse und Begehungen erfolgen.
2. Ermitteln des zu erneuernden Bankvolumens aus der durchschnittlichen Kiesbankfläche und der Schichtstärke von 0.3m.
3. Das ermittelte durchschnittliche Kiesvolumen ist aufgrund folgender Kriterien anzupassen:

	Beschrieb	Faktor
<b>3.1 Übergeordnete Morphologie:</b> <i>(berücksichtigt, ob sich eine Bank aus dem mobilisierten Geschiebe der oberliegenden Bank bildet oder dafür zusätzlich Geschiebe erforderlich ist)</i>	Mäandrierende Strecke (Bänke nur entlang Gleithängen, also wechselseitig mit grösserem Abstand dazwischen):	1 – 1.5
	Strecke mit alternierenden Bänken (Bänke wechselseitig unmittelbar nacheinander):	1.5 – 2.0
	Verzweigte Strecken (Bänke teilweise nebeneinander, je nach Gerinnebreite):	≥ 2
	Durch Multiplikation mit dem Faktor wird die erforderliche Geschiebeführung entsprechend erhöht.	
<b>3.2 Geschiebetransportkapazität:</b> <i>(berücksichtigt, wie viel Geschiebe in einer Strecke bei Hochwasser durchtransportiert wird, resp. den Anteil des bankbildenden Geschiebes)</i>	In Gewässerstrecken mit hoher Transportkapazität (z.B. Fließstrecken mit grossem Gefälle) ist die Fracht nach oben anzupassen.	Bis 2
<b>3.3 Wiederkehrperiode:</b> <i>(berücksichtigt Kolmationsentwicklung)</i>	In Abhängigkeit der Trübung und der damit verbundenen Entwicklung der inneren Kolmation kann die Wiederkehrperiode für die Erneuerung der Bänke angepasst werden:  Niedere Trübung: Hohe Trübung:	0.2 1
<b>3.4 Renaturierungspotenzial, Verhältnismässigkeit:</b> <i>(berücksichtigt Kosten-Nutzen Aspekte)</i>	Bei Gewässern, wo das Renaturierungspotenzial so stark eingeschränkt ist, dass sich in keinem Abschnitt eine mit dem unbeeinflussten Zustand vergleichbare Morphologie entwickeln kann, kann die Geschiebefracht reduziert werden. Nach einer allfälligen Renaturierung des Gewässers ist die Geschiebeführung zu erhöhen.  Ebenfalls reduziert werden kann die Fracht aus Gründen der Verhältnismässigkeit (z.B. wenn eine nur kurze Strecke von allfälligen und aufwändigen Massnahmen zur Reaktivierung des Geschiebehaushalts profitiert).	<1

## 7.2 Abschnittweise Bestimmung der anzustrebenden Geschiebefracht im Hochrhein

Die in Kapitel 7.1 beschriebene Methodik wurde beispielhaft für die Abschnitte

- Unterwasser KW Eglisau und
- Fliessstrecke zwischen Unterwasser Kraftwerk Reckingen und Koblenzer Laufen beschrieben. Die Anwendung auf weitere Strecken ist in Anhang 3 dokumentiert.

Die Bankflächen wurden mit Hilfe der Hochrheinpläne abgegrenzt. Dabei wurde auf die vorhandenen Sohlenstrukturen, die aus den Höhenlinienplänen ersichtlich sind, Bezug genommen. Die in Anhang 3 abgebildeten Bankflächen umfassen diejenigen Strukturen, die bei einem mittleren Märzabfluss Fliesstiefen von weniger als 2.3m aufweisen (Anforderung Laichplatz Äsche). Mit der Wahl der in Kapitel 7.1 aufgeführten Faktoren wird in der Fliessstrecke Reckingen – Koblenzer Laufen der mäandrierende Verlauf (Faktor Morphologie: 1.5) und der Umstand, dass die Trübung durch den schwebstofffreien Ausfluss aus dem Bodensee abgemindert wird (Faktor Wiederkehrperiode: 0.8), berücksichtigt. Im Unterwasser des Kraftwerks Eglisau wird nur eine kurze Fliessstrecke aufgewertet und damit ist auch das ökologische Potenzial hier deutlich reduziert. Zudem werden Kiesschüttungen rasch abgetragen und in die tiefere Stauhaltung des Kraftwerks Reckingen verlagert, wo deren Einfluss gering ist (Faktor Potenzial: 0.25).

Im Gegensatz dazu weist die lange Fliessstrecke zwischen dem KW Reckingen und dem Koblenzer Laufen ein grosses ökologisches Entwicklungspotenzial auf und beherbergt eine „Äschenpopulation von nationaler Bedeutung“ (Grundlage [36]).

Dementsprechend ergeben sich die in Tabelle 7.1 aufgeführten Geschiebefrachten von  $500\text{m}^3/\text{a}$  im Unterwasser des Kraftwerks Eglisau (entspricht in etwa der Geschiebezufuhr aus der Glatt) und  $7'000\text{m}^3$  in der Fliessstrecke zwischen dem Kraftwerk Reckingen und dem Koblenzer Laufen (als Schüttung zuzugeben).

Für die übrigen untersuchten Strecken ergeben sich die Richtwerte für die erforderlichen Geschiebefrachten gemäss Tabelle 7.2.

**Tabelle 7.1** Ermittlung der aus morphologischer Sicht erforderlichen Geschiebefracht im Unterwasser des Kraftwerks Eglisau und in der Flieisstrecke zwischen dem Kraftwerk Reckingen und den Koblenzer Laufen (F: Faktor, KBx: Kiesbanknummerierung gemäss Plan in Anhang 3).

	UW KW Eglisau	Flieisstrecke Reckingen – Koblenzer Laufen										
		KB1	KB2	KB3	KB4	KB5	KB6	KB7	KB8	KB9	KB10	KB11
Durchschnittliche Bankfläche [m <sup>2</sup> ]	8'300	14'200	6'400	17'600	9'300	41'500	14'300	19'300	20'100	21'700	43'400	7'400
Durchschnittliches Volumen oberste Schicht [m <sup>3</sup> ]	2'500	4'300	1'900	5'300	2'800	12'500	4'300	5'800	6'000	6'500	13'000	2'200
Übergeordnete Morphologie	F 1.0	F 1.5										
Geschiebetransportkapazität	F 1.0	F 1.0										
Wiederkehrperiode	F 0.8	F 0.8										
Potenzial	F 0.25	F 1.0										
Geschiebefracht einzeln [m <sup>3</sup> /a]	675	5'100	2'300	6'300	3'400	15'000	5'200	6'900	7'200	7'800	15'600	2'700
Geschiebefracht Mittel [m <sup>3</sup> /a]	500	7'000										

**Tabelle 7.2** Richtwerte für die aus morphologischer Sicht erforderlichen Geschiebefrachten in den untersuchten Rheinabschnitten.

Abschnitt	Ellikon	UW Eglisau	Reckingen - Rietheim	Koblenz	Stau Laufenburg	Stau Ryburg-S.	Rhein-felden	Stau Augst-Wylen	Stau Birs-felden
Geschiebefracht Mittel [m <sup>3</sup> /a]	1'300	500	7'000	8'500	2'100	2'700	4'600	1'200	2'700

## 8 Erfahrungen mit Kiesschüttungen

### 8.1 Schüttung Ellikon

#### 8.1.1 Auslöser, Ziel der Schüttung

Im Rahmen der letzten Kiesentnahme am Thurspitz (2006) wurde abgeklärt, ob ein Teil des Baggergutes in Form von Kiesbänken entlang dem Schweizer Ufer zwischen dem Rückgabebauwerk des Kraftwerks Rheinau und Ellikon geschüttet werden kann. In der Folge wurden aufgrund von morphologischen Überlegungen und der bestehenden Zufahrtsmöglichkeiten drei Standorte für Kiesbänke evaluiert. Nach der amtsinternen Vernehmlassung wurden schliesslich zwei Kiesbänke geschüttet (Kiesbank Rheinau, ca. 500m rheinabwärts des Rückgabebauwerks, Kiesbank Wolfsgrueb, km 60.5).

Ziel der Schüttungen war es, das Laichplatzangebot und den Anteil an Flachwasserzonen zu vergrössern. Zudem mussten die Kiesschüttungen so ausgelegt werden, dass sie auch bei grossen Hochwasserabflüssen nicht oder nur teilweise abgetragen werden.

Das Schüttvolumen für die beiden Kiesbänke betrug insgesamt 6'500m<sup>3</sup>.

#### 8.1.2 Resultate, Entwicklung

In den Bildern 8.1 – 8.4 ist der Zustand der Schüttungen im April 2011 dokumentiert. Es ist festzustellen, dass bei der Kiesbank Rheinau die ursprüngliche geometrische Form aufgelöst und die Kiesbank Wolfsgruben noch weitgehend erhalten ist. Bei beiden Schüttungen ist der Kies noch immer locker gelagert.



*Bild 8.1 Kiesbank Rheinau am 5. April 2011, 4.5 Jahre nach der Schüttung. Blick gegen Fließrichtung ( $Q = 236\text{m}^3/\text{s}$ ).*



*Bild 8.2 Detail Kiesbank Rheinau mit feinkörnigem, locker gelagertem Substrat (Thurgeschiebe).*



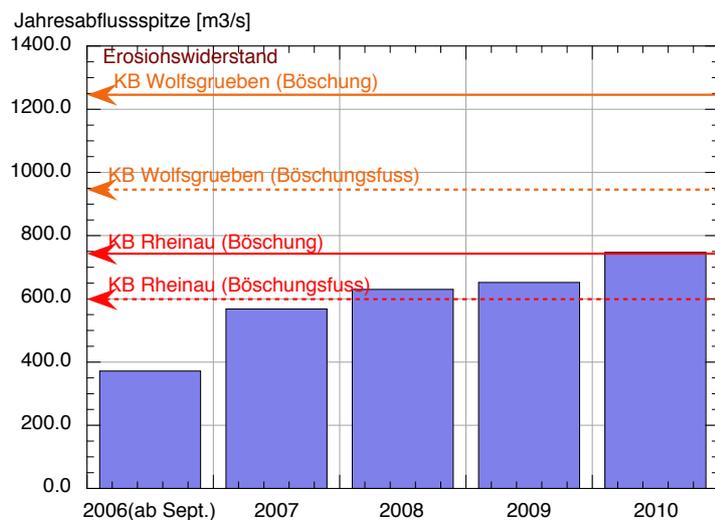
Bild 8.3 Kiesbank Wolfsgrube am 5. April 2011, 4.5 Jahre nach der Schüttung. Blick gegen Fließrichtung ( $Q = 236\text{m}^3/\text{s}$ ).



Bild 8.4 Kiesbank Wolfsgrube, gleicher Standort, Blick gegen Fließrichtung.

Seit der Schüttung im September 2006 wurden die in Bild 8.5 dargestellten Jahresabflussspitzen erreicht. Ebenfalls eingetragen sind die im Rahmen der Projektierung berechneten Grenzabflüsse für die Erosion des Böschungsfusses (führt zu lokalen Erosionen und Abflachung der Böschung) und der Kiesbankböschung (führt zu teilweiser Erosion der Kiesbank). Dazu wurde das in Kapitel 2.6 erläuterte Verfahren angewandt.

Bild 8.5  
Gemessene jährliche Abflussspitzen seit der Schüttung der Kiesbänke. Die roten und orangen Pfeile bezeichnen die berechneten Grenzabflüsse für die Erosion des Böschungsfusses (gestrichelt), resp. der Kiesbankböschung (ausgezogen).



### 8.1.2 Beurteilung

Der im Frühjahr 2011 angetroffene Zustand der beiden geschütteten Kiesbänke stimmt gut mit den Stabilitätsberechnungen überein. Bei der oberen, leicht aufgelösten Kiesbank (Rheinau) lagen die Jahresabflussspitzen drei Mal über dem Grenzabfluss für die Erosion des Böschungsfusses und ein Mal im Bereich des Grenzabflusses für die Kiesbankböschung.

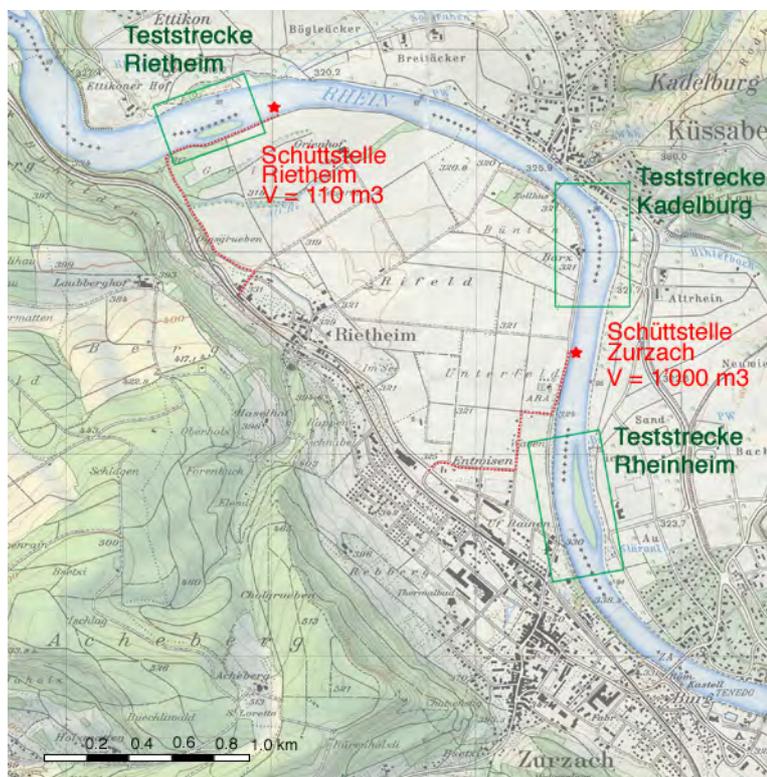
Bei der unteren Kiesbank Wolfsgruben, die noch weitgehend die eingebaute Form aufweist, wurden die Grenzabflüsse für die Erosion seit der Schüttung der Bank nie erreicht.

## 8.2 Schüttung Zurzach

### 8.2.1 Auslöser, Ziel der Schüttung

Im Rahmen eines Pilotprojektes zur Untersuchung des Einflusses von Kiesschüttungen auf den Bruterfolg von kieslaichenden Fischarten wurden im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) und des Regierungspräsidiums Freiburg (RPF) bei Zurzach und der Insel Riethem rund 1'100m<sup>3</sup> Kies geschüttet (Grundlage [12]).

Die Wahl der beiden Standorte erfolgte aufgrund der Zufahrtsmöglichkeiten und der Lage bezüglich der Teststrecken, die für die Untersuchungen der Auswirkungen von Kiesschüttungen auf die Gewässerökologie ausgewählt wurden (Bild 8.6).



**Bild 8.6**  
Lage und Zufahrtsstrecken zu den Schüttstellen Zurzach und Riethem sowie Lage der Teststrecken für die morphologischen und ökologischen Untersuchungen.

Bei Zurzach wurde eine Kiesbank mit einem Volumen von 1'000m<sup>3</sup> geschüttet mit dem Ziel, dass die Kiesbank bei Hochwasserabfluss zunehmend erodiert werden sollte und sich das Schüttmaterial umlagert und in den anschliessenden linksufrigen Flachwasserzonen im Bereich der Barzmühle (Teststrecke Kadelburg) abgelagert. Die Schüttmenge von 1'000m<sup>3</sup> stellte eine untere Grenze für einen möglichen Erfolgsnachweis des Pilotprojekts dar. Da das Schüttmaterial von der Schüttstelle zuerst bis in die Teststrecke Kadelburg verlagert werden musste (fluvialer Transport), waren für die Erfolgskontrolle (Aufnahme Folgezustand) vorgängige Hochwasserabflüsse erforderlich.

Bei der Schüttstelle Rietheim wurde das Substrat direkt an potenziellen Laichstellen eingebracht. Das Material sollte sich bei häufig auftretenden Hochwasserereignissen kaum umlagern.

Die Disposition der Schüttungen erlaubte folgende Beobachtungen:

- Zwischen Reckingen und Zurzach erfolgten keine Kiesschüttungen. Dieser Abschnitt diente als Referenz zu den rheinabwärts der Schüttstellen liegenden Teststrecken Kadelburg und Rietheim.
- Die Kiesschüttung Zurzach ermöglichte die Beobachtung der Geschiebeumlagerungsprozesse und die damit zusammenhängenden Auswirkungen auf den Lebensraum. Das Material konnte auf einer grösseren Distanz zur Wirkung kommen und die Umlagerung entsprach am besten den natürlichen Verhältnissen.
- Bei der Kiesschüttung bei Rietheim konnten die Verhältnisse im Ausgangszustand direkt mit den Verhältnissen mit dem eingebrachten Geschiebe verglichen werden. Die Erfolgskontrolle war unabhängig von einer vorgängigen Umlagerung des Materials.

### 8.2.2 Schüttmaterial

Für die Schüttungen wurde eine Mischung aus verschiedenen Kiesfraktionen aus dem Kieswerk Bechtel & Szilagyı GmbH, D-Klettgau, verwendet. Das Mischverhältnis der erhältlichen Kornfraktionen (8/16, 16/32, 32/50) wurde so gewählt, dass die Kornverteilung des Schüttmaterials möglichst gut der Kornverteilung des Thurgeschiebes entsprach (Bild 8.7). Auf die Zugabe von Sandfraktionen wurde verzichtet.

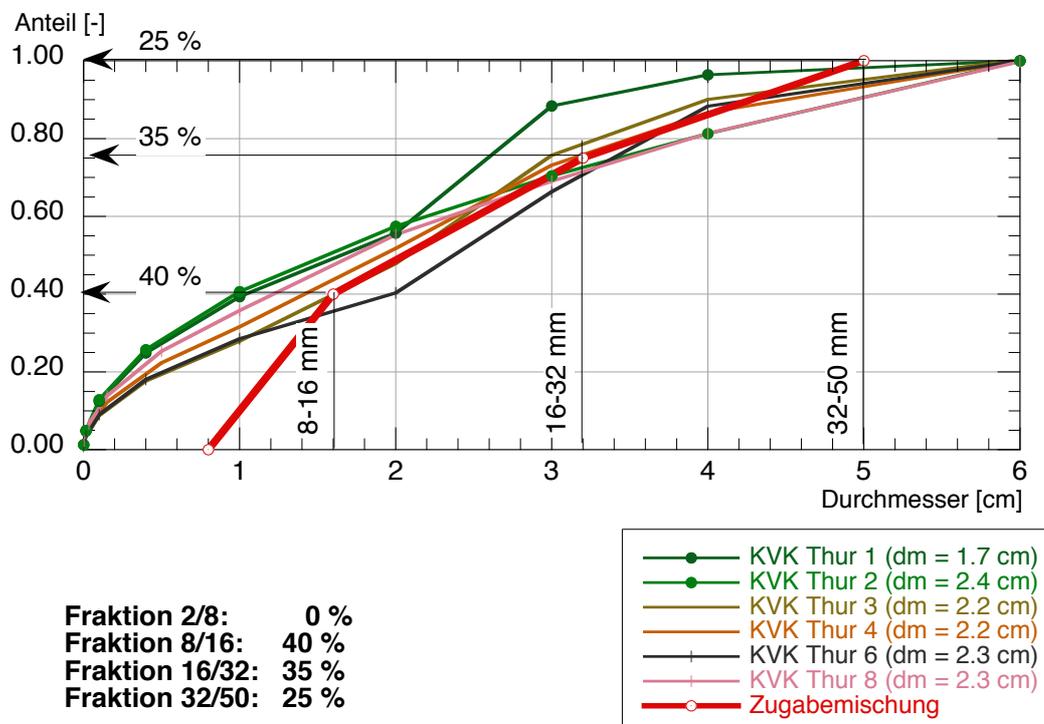


Bild 8.7 Kornverteilungskurven (KVK) von verschiedenen Proben des Thurgeschiebes sowie des verwendeten Schüttmaterials, das aus den vorhandenen Kiesfraktionen zusammengesetzt wurde.

### 8.2.3 Schüttstelle Zurzach

Das Material wurde rund 150m rheinabwärts der ARA Zurzach ab dem Lastwagen direkt über die steile Uferböschung gekippt und mit einem Bagger zu einer rund 40 m langen und 10m breiten Kiesbank verteilt (Bild 8.8). Die Abmessungen der Kiesbank wurden so gewählt, dass die Fahrwege für den Bagger minimal waren. Die Oberfläche der Kiesbank lag mit 319.0m ü.M. rund 1 m über dem Niederwasserspiegel bei  $Q = 300\text{m}^3/\text{s}$ .

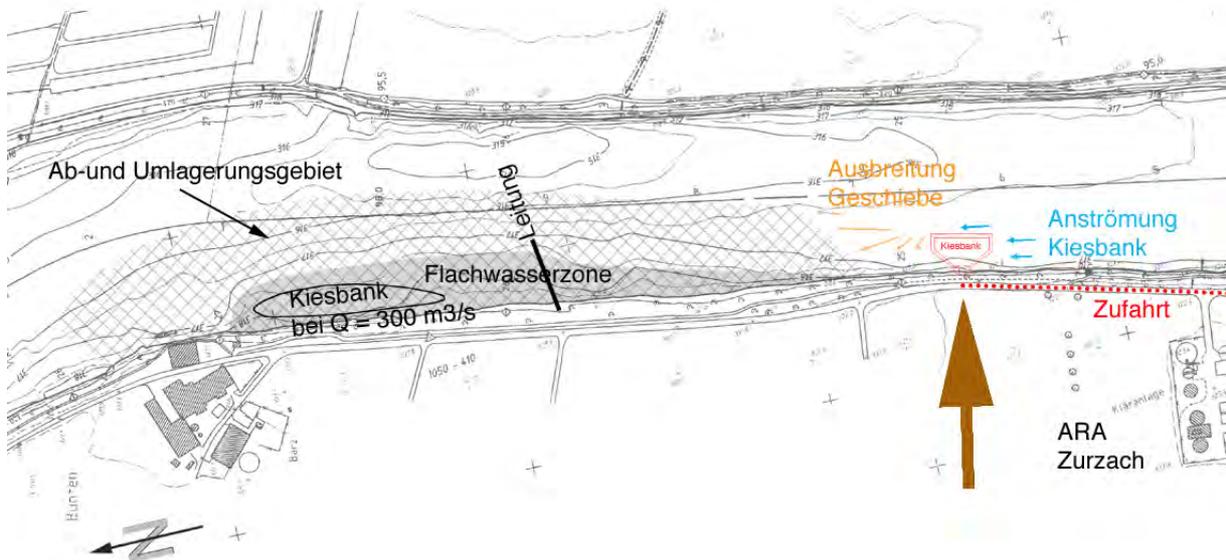


Bild 8.8 Lage der Schüttstelle Zurzach (brauner Pfeil) und des Ab- und Umlagerungsgebietes des Schüttmaterials. Massstab 1 : 5'000.

### 8.2.4 Schüttstelle Riethem

Das Schüttmaterial wurde über das Ufer gekippt und mit einem Bagger zu den Schüttstellen transportiert und auf den vorgesehenen Flächen zu drei Kiesbänken ausgebracht (Bild 8.9). Pro Kiesbank wurde  $35\text{m}^3$  Material geschüttet.

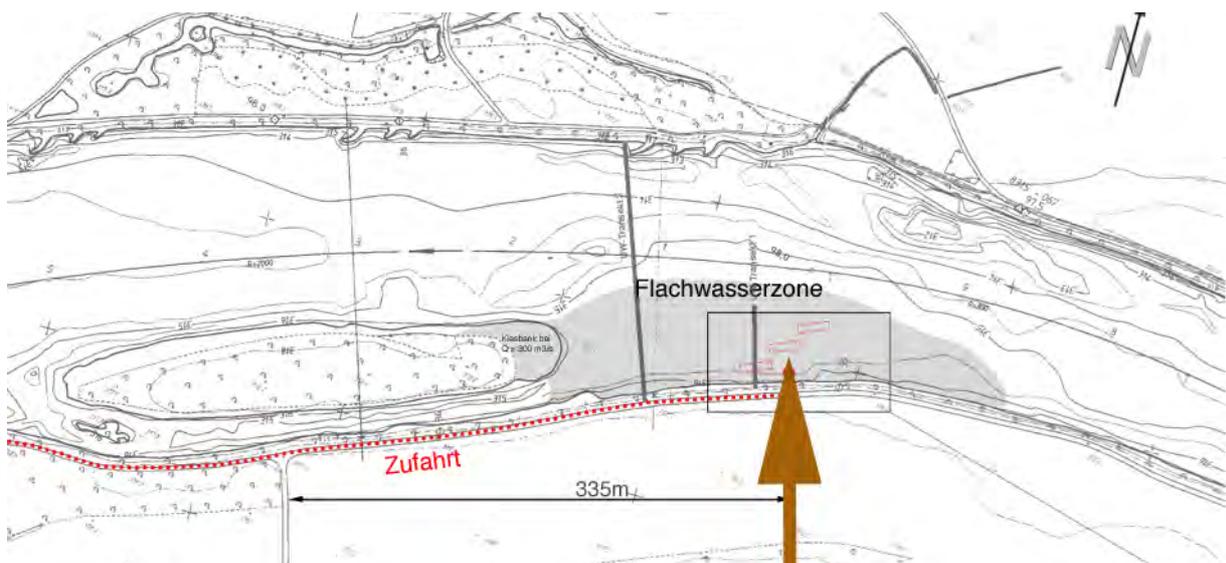


Bild 8.9 Lage der Schüttstelle Riethem im Bereich der bestehenden Flachwasserzone mit geringer Strömungsbeanspruchung. Massstab 1:5'000.

### 8.2.5 Resultate, Entwicklung

In der Periode zwischen der Schüttung Anfangs Oktober 2004 und den Feldaufnahmen im Frühjahr 2005 traten im Rhein keine grossen Hochwasser auf. Der grösste Abfluss in dieser Periode betrug  $653\text{m}^3/\text{s}$  (gemessen an der LHG-Station Rekingen) und liegt im Bereich eines  $Q_{55}$  (Abfluss der durchschnittlich an 55 Tagen pro Jahr erreicht oder überschritten wird).

Die Kiesbank bei der Schüttstelle Zurzach wurde schon während dem Einbau und in der Zeit danach leicht abgetragen, wobei sich eine Verformung mit einer in Fließrichtung langgezogenen, schwach überströmten Kieszunge ausbildete (Bild 8.10). In dieser Zeit betrug der grösste Abfluss rund  $450\text{m}^3/\text{s}$ . Während dem erhöhten Abfluss im Februar 2005 (mit Spitze am 13. Februar,  $Q = 653\text{m}^3/\text{s}$ ) wurde die Kiesbank weitgehend abgetragen, wobei sich eine 200m lange und 20-25m breite Geschiebefahne bildete, welche die grobkörnige Sohle überdeckte (Bilder 8.11 und 8.12)<sup>13</sup>.

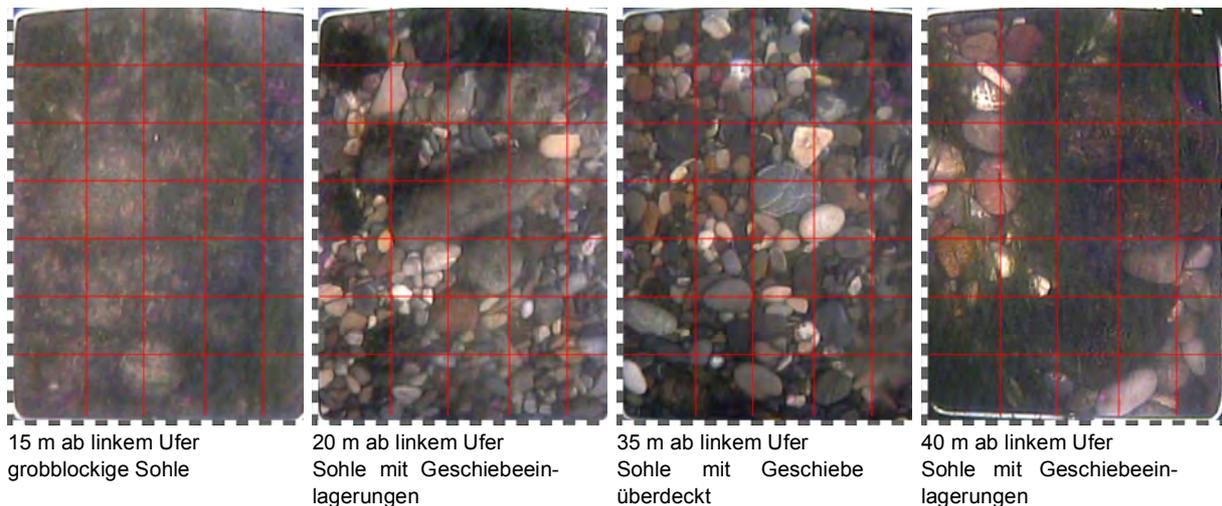


Bild 8.10 Kiesbank bei der Schüttstelle Zurzach unmittelbar nach dem Einbau (links) und 1 Woche später (rechts, Geschiebezone gelb umrandet). Abfluss =  $450\text{m}^3/\text{s}$ .



Bild 8.11 Ausbreitung des Geschiebes in Form einer rund 200 m langen und 20 m breiten Geschiebefahne, die die grobkörnige Sohle überdeckt. Die roten Striche bezeichnen die Lage der Unterwasseraufnahmen zur Bestimmung der Ausdehnung. Abfluss =  $653\text{m}^3/\text{s}$ .

<sup>13</sup> Die Abmessungen der Geschiebefahne wurden anhand von Unterwasseraufnahmen ermittelt.



*Bild 8.12 Ausgewählte Bilder der Unterwasseraufnahmen des Transekts UT4 (Lage gemäss Bild 8.11).*

Die drei Kiesbänke bei der Schüttstelle Riethem verformten sich leicht und passten sich an die Strömungsverhältnisse an. Alle drei Kiesbänke blieben am Ort der Schüttung.

Im August 2005 ereignete sich ein Hochwasser, das mit einer Spitze von  $1'249\text{m}^3/\text{s}$  etwa einem  $\text{HQ}_3$  entspricht. Während dem Hochwasser wurde die Geschiebefahne, die sich im Vorjahr auf der grobkörnigen Sohle gebildet hatte, vollständig abgetragen und im Bereich der Flachwasserzone bei der Teststrecke Kadelburg abgelagert. Im Bereich von strömungsberuhigten Zonen (z.B. im Hinterwasserkolk der Leitung, vgl. Bilder 8.8 und 8.11) bildeten sich grössere Geschiebeebänke (Bild 8.13) und auf den bereits bei der Aufnahme des Ausgangszustandes bestehenden grobkörnigen Kiesbänken lagerte sich eine meist geringmächtige Schicht von Schüttmaterial ab (Bild 8.14).

Bei der Schüttstelle Riethem bewirkte das Hochwasser, dass die drei geschütteten Kiesbänke umgelagert wurden und sich eine einzige, langgezogene Geschiebefahne bildete, die die grobkörnige Sohle der Flachwasserzone mit einer Mächtigkeit von 15 – 20 cm überdeckte (Bild 8.15).



*Bild 8.13 Ablagerungen von Schüttmaterial direkt unterhalb (links) und im Kolkbereich der Leitung (rechts).*



*Bild 8.14 Geringmächtige Ablagerungen von Schüttmaterial auf der grobkörnigen Kiesbank im Bereich der Barzmühle (links benetzt, rechts trocken, Aufnahme datum 25.1.2006). Länge des Doppelmeters 24 cm.*



*Bild 8.15 Während dem Hochwasser vom August 2005 hat sich aus den drei geschütteten Kiesbänken eine langgezogene Kiesbank gebildet, die die grobkörnige Sohle der Flachwasserzone teilweise überdeckte.*

### 8.2.6 Beurteilung

Die beobachteten Umlagerungsprozesse wurden anhand der in Kapitel 2.6 erläuterten Stabilitätsbeurteilung nachgerechnet. Die berechneten dimensionslosen Schubspannungen (Theta, Tabelle 8.1) stimmen gut mit den beobachteten Umlagerungsprozessen überein (bei der ersten grösseren Umlagerungen betrug die Abflussspitze  $653\text{m}^3/\text{s}$  und Theta lag mit 0.059 über dem bezüglich Transport kritischen Grenzwert von 0.05).

*Tabelle 8.1 Berechnete hydraulische Kennwerte bei der Schüttstelle Zurzach. Die mit (\*) bezeichneten Grössen beziehen sich auf den rheinseitigen Böschungsfuss der Schüttung.*

Abfluss [m <sup>3</sup> /s]	Sohle (*) [m ü.M.]	WSP [m ü.M.]	H (*) [m]	Energieliniengefälle [%]	Fliessgeschwindigkeit [m/s]	Theta (dm = 2 cm) [-]
300	317.20	318.67	1.47	0.67	1.27	0.030
450	„	319.17	1.97	0.75	1.54	0.045
653	„	319.68	2.48	0.79	1.83	0.059
1249	„	320.99	3.79	0.88	2.44	0.101

Aus Sicht der Fischökologie ist die Versuchsschüttung Zurzach erfolgreich verlaufen. Trotz geringer Schüttmenge konnten beim biologischen Indikator „Fortpflanzungserfolg lithophiler Fischarten“ deutlich positive Effekte festgestellt werden. So hat die Anzahl Äschenlarven – je nach Probestrecke – um 20 – 60% zugenommen (Bild 8.16), bei den weniger durch Hitzesommer 2003 und Frühlingshochwasser 2005 betroffenen Barben konnten nach der Kiesschüttung bis zu viermal mehr Jungfische festgestellt werden als in der Referenzstrecke.

Das Monitoring der Benthosfauna zeigte keine namhaften Veränderungen der Besiedlungsdichte zwischen dem Ausgangszustand vor (durchschnittlich 19'000 Individuen/m<sup>2</sup> Teststrecken Kadelburg, bzw. 24'000 Ind./m<sup>2</sup> Teststrecken Riethem) und dem Folgezustand nach der Kiesschüttung (durchschnittlich 18'000 Individuen/m<sup>2</sup> Teststrecken Kadelburg, bzw. 25'000 Ind./m<sup>2</sup> Teststrecken Riethem). Auch die Artenzusammensetzung wies keine grösseren Veränderungen auf, das Makrozoobenthos wurde von Zuckmücken- und Köcherfliegenlarven dominiert und wurde als typisch für diese Standorte beurteilt. Ein direkter Zusammenhang zwischen Kiesschüttungen und Benthoszönose konnte bei der gewählten Versuchsanlage nicht nachgewiesen werden und würde allenfalls grösserflächige Schüttungen und ein Monitoring über einen längeren Zeitraum erforderlich machen.

Eine zusammenfassende Beschreibung der Untersuchungen befindet sich in Anhang 4.

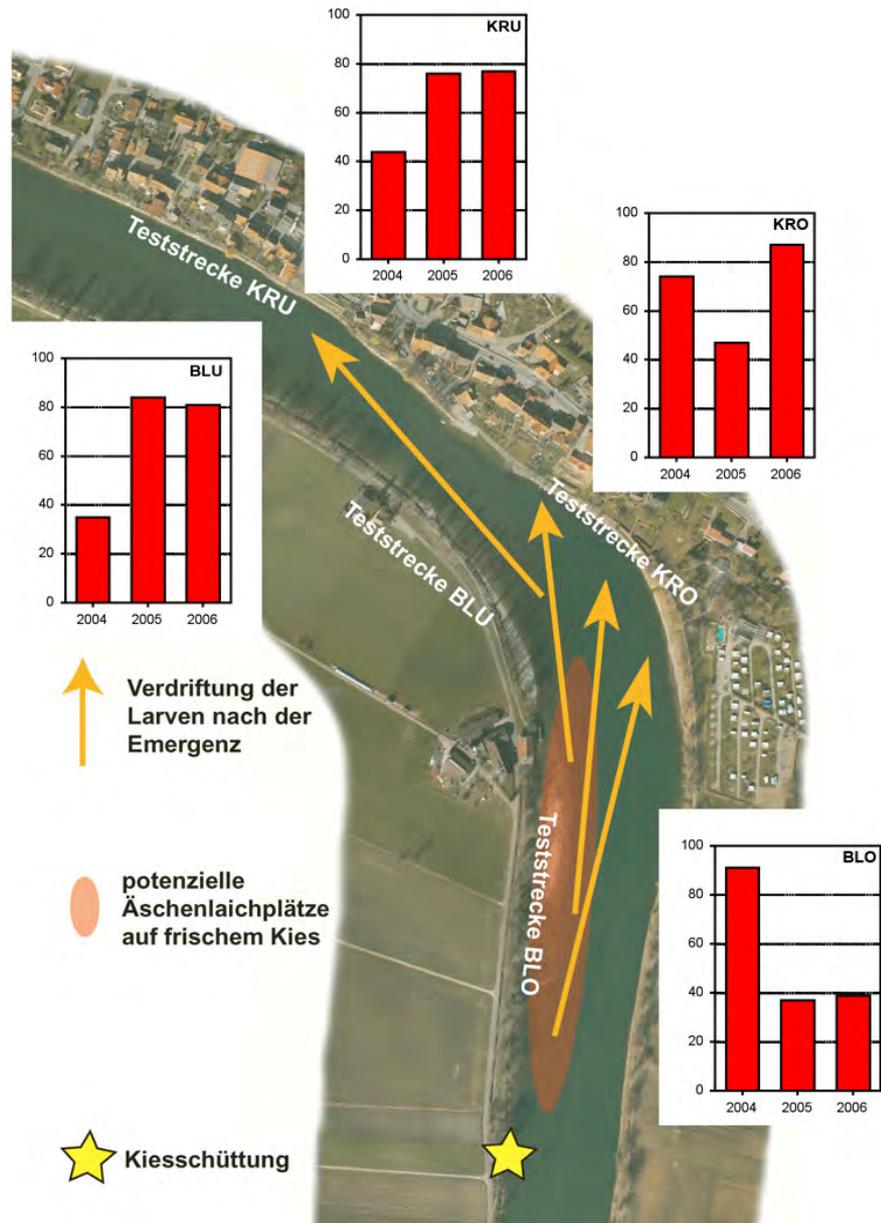


Bild 8.16  
 Resultate der Erfolgskontrolle der Kiesschüttung Zurchach anhand der Erhebungen der Äschenlarven vor (2004) bis 2 Jahre nach der Schüttung (2005-06) in vier Teststrecken.

### 8.3 Schüttung Restwasserstrecke KW Albruck-Dogern (RADAG)

#### 8.3.1 Auslöser, Ziel der Schüttung

Im Zusammenhang mit dem Bau des Wehrkraftwerks wurde die Sohle im Unterwasser abgetieft und ein Grossteil des ausgehobenen Materials als Geschiebezugabe im Altrhein vorgesehen.

Dazu wurde ein Konzept für die Kieszugabe im Altrhein erstellt (Grundlage [17]). Gemäss diesem Konzept wurde mit einem Aushubvolumen von 20'500m<sup>3</sup> gerechnet. Weiter sah es vor, ein Volumen von ca. 8'000m<sup>3</sup> für Strukturierungsmassnahmen zu verwenden und den Rest von ca. 12'500m<sup>3</sup> in Form von Kiesbänken oder Zwischenlagern mit periodischer Zugabe in den Altrhein zu schütten. Die diesbezügliche Disposition ist aus Bild 8.17 ersichtlich. Angaben zu Korngrössenverteilungen des Schüttmaterials sowie Stabilitätsberechnungen sind im Konzept nicht enthalten.

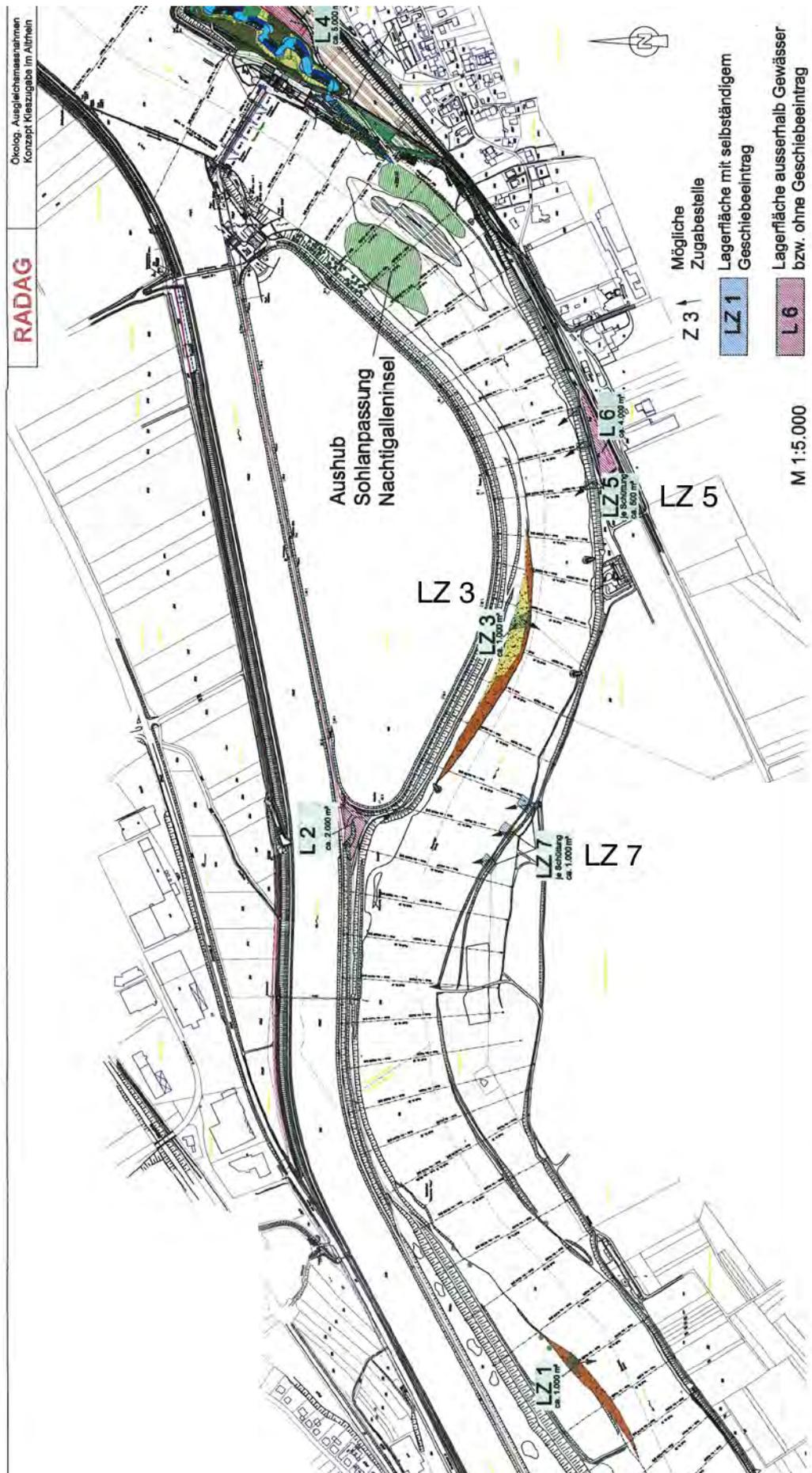


Bild 8.17  
Lage der im Konzept vorgesehenen Lagerflächen und Zugabestellen.  
LZ: Lagerfläche mit selbständigem Geschiebeeintrag  
L: Lagerfläche ausserhalb Gewässer, resp. ohne Geschiebeeintrag.

### 8.3.2 Resultate, Entwicklung

Das Konzept wurde in der Bauphase in Absprache mit der Begleitkommission optimiert und die periodischen Schüttungen erfolgen auf Weisung der Behörden.

Eine Begehung im April 2011 zeigte, dass sich bei der Stelle LZ 5 ein Schüttkegel gebildet hatte, der zur Zeit der Begehung im benetzten Bereich aus grobkörnigen, kolmatierten Komponenten bestand (Bilder 8.18 und 8.19). Das darüber liegende Material kann erst nachrutschen und der aquatischen Fauna zur Verfügung gestellt werden, wenn der untere Teil erodiert wird. Aufgrund der Körnigkeit kann davon ausgegangen werden, dass dazu grössere Abflüsse erforderlich sind und somit kein regelmässiger Geschiebenachschub erwartet werden kann (der in den Bildern 8.18 und 8.19 zu sehende aufkommende Bewuchs weist ebenfalls auf eine hohe Stabilität hin).



8.18  
*Kegelförmiger Schüttkörper bei LZ 5 mit aufkommendem Bewuchs. Blick gegen Fliessrichtung.*



Bild 8.19  
*Detail des grobkörnigen, kolmatierten Schüttmaterials im Bereich der Wasserlinie.*

Aufgrund der direkten Anströmung (Prallhangbereich) wären die Stellen LZ 5 und LZ 7 für eine Geschiebebeschickung ausgesprochen geeignet. Bei den ausgeführten Schüttungen entlang von Gleithängen (LZ 1 und LZ 3) ist davon auszugehen, dass sie stabil bleiben. Dies zeigt auch Bild 8.20 mit der Schüttung LZ 3 aus grobkörnigem Material das neben Sandbänken, die natürlicherweise in diesem Bereich abgelagert werden, liegt.

*Bild 8.20*

*Schüttung LZ 3 aus grobkörnigem Material, das neben Sandablagerungen liegt (rechts im Bild).*



### 8.3.3 Beurteilung

Eine Geschiebealimentierung ist nur aus den Schüttstellen, die im Bereich von Prallhängen angeordnet sind, zu erwarten. Die Kornzusammensetzung des verwendeten Schüttmaterials weist einen hohen Erosionswiderstand auf und kann nur bei grossen Abflüssen mobilisiert werden. Die Massnahmen können zukünftig durch Schüttungen von feineren Geschiebefractionen optimiert werden.

Zudem bleibt der Effekt der Geschiebefalle, der mit den umfangreichen Baggerungen im Rossgarten (ca. 1985, vgl. Kap. 6.5) entstand, bestehen.

## 8.4 Schüttung Mumpf

### 8.4.1 Auslöser, Ziel der Schüttung

Die Schüttung im Bereich des Campingplatzes Mumpf soll zukünftig mit Geschiebe aus dem Geschiebesammler der Sissle bei Sisseln erfolgen. Im Rahmen der letzten Leerung des Sammlers im Herbst 2010 wurde eine Uferbucht mit Flachuferzone als vorgezogene Umweltmassnahme zur Neukonzessionierung des Kraftwerks Ryburg-Schwörstadt errichtet (Bild 8.21). Das Geschiebe aus dem Sisslesammler wurde dabei im Bereich der Uferbucht und rheinabwärts davon flächig auf der Sohle verteilt. Ziel der Schüttung ist die Schaffung von Laichstätten für Kieslaicher.

*Bild 8.21*

*Flachwasserzone mit Kies-schüttung im Bereich der neuen Uferbucht (Umweltmassnahme Nr. 7). Blick in Fliessrichtung. Abfluss  $570\text{m}^3/\text{s}$  (20. Mai 2011).*



### 8.4.2 Resultate, Entwicklung

Da die Schüttung erst im Herbst 2010 erfolgte und seither keine Abflüsse auftraten, die zu einer Veränderung der Schüttung führten, liegen noch keine Erfahrung über die zukünftige Entwicklung vor.

## 8.5 Schüttungen an der Aare

### 8.5.1 Auslöser, Ziel der Schüttung

Ende der 90er Jahre beschlossen die Kantone Bern und Solothurn, den Geschiebehaushalt der Aare zwischen Flumenthal und Murgenthal zu reaktivieren. Die Kernstücke der Massnahmen bilden zwei Kiesbankschüttungen bei Deitingen und vor Aarwangen. Die Kiesbänke werden an geeigneten Stellen in die Aare geschüttet und so dimensioniert, dass sie bei Hochwasserabfluss zunehmend erodiert werden. Die Erosionsleistung ist bei maximaler Kiesbankbreite am grössten und nimmt mit fortschreitender Erosion ab.

Mit der Kiesschüttung Deitingen kann der Geschiebehaushalt des knapp 2km langen Aareabschnitts bis Wangen a.A. und mit der Kiesschüttung Aarwangen derjenige des 10km langen Abschnitts bis Murgenthal reaktiviert werden. Beide Kiesbänke wurden als Halbinseln geschüttet. Damit konnten die Ufer geschont und zusätzlich beruhigte Lebensräume geschaffen werden.

Bei der Kiesschüttung Deitingen wird eine durchschnittliche Geschiebefracht von 1'000m<sup>3</sup>/a und bei der Kiesschüttung Aarwangen eine Fracht von 2'000m<sup>3</sup>/a angestrebt. Die kleinere Fracht bei Deitingen basiert auf der kurzen Gewässerstrecke, die von der Massnahme profitiert. Die durchschnittliche Fracht von 2'000m<sup>3</sup>/a bei Aarwangen ist verglichen mit der natürlichen Fracht von 15'000m<sup>3</sup>/a bescheiden. Das veränderte Fließregime (Juragewässerkorrektur, Stauhaltung und Unterwasserbaggerung KW Wynau) sowie die hohen Kosten für die künstliche Geschiebezugabe rechtfertigen den Pilotversuch mit eher tiefen Frachten.

Mit der morphologischen und fischbiologischen Erfolgskontrolle wurde untersucht, wie das Geschiebe weiter transportiert und umgelagert wird und wie sich die neuen Bänke auf die Reproduktion ausgewählter kieslaichender Fische auswirken (Grundlage [3, 25]).

### 8.5.2 Resultate, Entwicklung

Die Kiesbank Deitingen (Bild 8.22) wurde im Januar 2005 geschüttet. Die Kiesbank, die sich entlang dem rechten Prallhang bei der A1-Raststätte befindet, wurde mit Kies aus dem Geschiebesammler bei der Emmemündung geschüttet. Das Schüttvolumen betrug 12'000m<sup>3</sup>. Für den erodierbaren äusseren Teil der Bank wurde der Kies bei 6cm ausgesiebt. Die Kiesbank wurde ab einem Abfluss von 350m<sup>3</sup>/s überströmt.

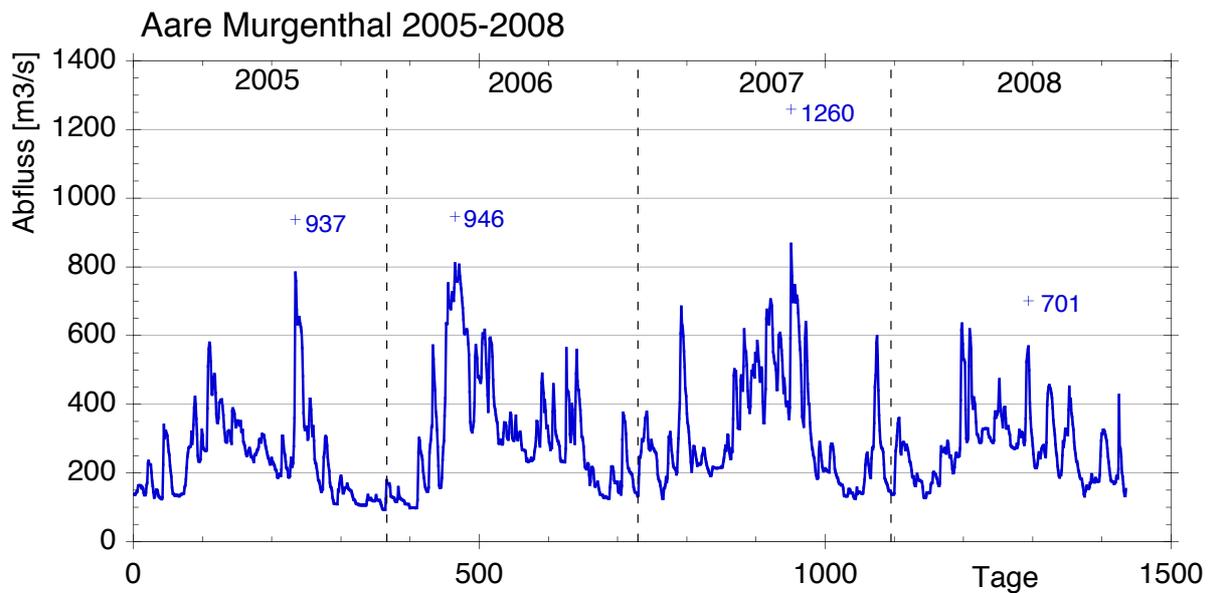


*Bild 8.22 Kiesschüttung Deitingen am 18.3.2005. Blick flussaufwärts.*

Die Erosion der Kiesbank erfolgte entlang der Aussenböschung sowie an der Oberfläche. Zwischen März 2005 und Mai 2006 wurden  $1'700\text{m}^3$  und bis zum Mai 2008 weitere  $700\text{m}^3$  Kies erodiert, womit bis in den Winter 09/10 eine durchschnittliche Geschiebefracht von knapp  $500\text{m}^3/\text{a}$  resultiert.

Die trotz ausserordentlichen Hochwasserperioden (Bild 8.23) geringe Erosion der Kiesbank ist auf das kleine Gefälle und die eher grobe Zusammensetzung des Schüttmaterials zurückzuführen.

Das erodierte Material wurde etwa 1km flussabwärts transportiert, wo die Sohle in einem Profil um bis zu 60cm auflandete. Die Ablagerungen konzentrieren sich auf eine flache Bank mit einer Länge von 150m. Bisher wurde kein Geschiebe weiter flussabwärts transportiert.



*Bild 8.23 Abflussganglinie eidgenössische Messstation Aare Murgenthal 2005 – 2008, Tagesmittelabflüsse und Jahresmaxima.*

Die Kiesbank Aarwangen (Bild 8.24) wurde im November 2005 geschüttet. Die Kiesbank befindet sich entlang dem Prallhang einer ausgeprägten Linkskrümmung unmittelbar flussaufwärts der Kiesgrube Risi. Für die Schüttung wurden verschiedene ausgesiebte Fraktionen der Kiesgrube mit einem Maximaldurchmesser von 5cm verwendet. Das Schüttvolumen betrug knapp 11'000m<sup>3</sup>. Die Kiesbank wurde ab einem Abfluss von 500m<sup>3</sup>/s überströmt.



*Bild 8.24 Kiesbank Risi vor Aarwangen am 17.11.2005. Blick flussaufwärts.*

Die Erosion der Kiesbank erfolgte entlang der Aussenböschung. Während der Nassperiode im Frühling 2006, wo die Abflüsse während 4 Wochen über 600m<sup>3</sup>/s lagen, wurden rund 8'500m<sup>3</sup> erodiert und die Kiesbank weitgehend abgetragen. Bis ins Jahr 2008 wurden noch

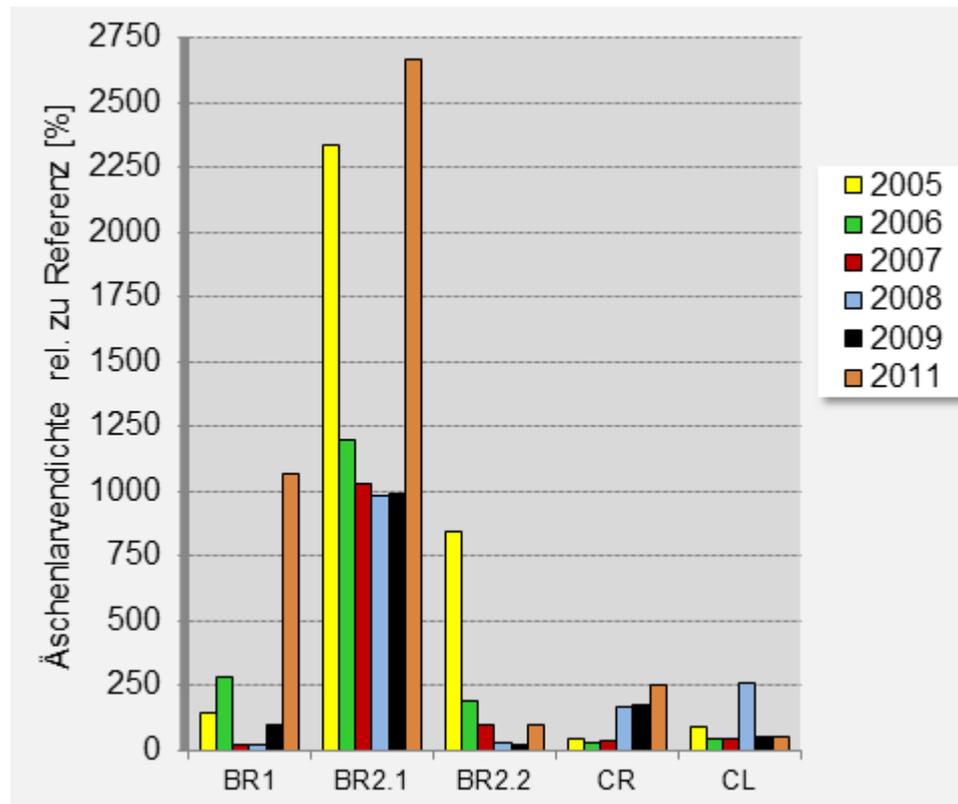
wenige 100m<sup>3</sup> erodiert. Bis in den Winter 09/10 resultiert eine durchschnittliche Geschiebefracht von 2'200m<sup>3</sup>/a.

Die rasche und nahezu vollständige Erosion der Kiesbank ist auf die grosse Schleppkraft bei grossen Abflüssen (grosses Gefälle, ausgeprägte Krümmung) und die eher feine Zusammensetzung des Schüttmaterials ohne Feinanteile zurückzuführen.

### 8.5.3 Erfolgskontrolle Fischfauna

Mit jährlichen Erhebungen der Äschenlarven ober- und unterhalb der Schüttstellen (April/Mai), sowie Elektroabfischungen der Bachforellenbrütlinge (April) und der Jungfischfauna im Uferbereich (August) wurde überprüft, ob die Kiesschüttungen die erwünschte Wirkung auf den Fortpflanzungserfolg der kieslaichenden Fische zeigen (Grundlage [22]). Die Resultate zeigen, dass bei der Kiesbank Deitingen sofort nach der Schüttung Laichplätze entstanden sind und benutzt wurden (Bild 8.25). Die Larvendichten im Vergleich zu einer unbeeinflussten Referenzstrecke beim KW Flumenthal waren direkt bei und unterhalb der Schüttstelle sehr hoch. Mit zunehmender Distanz zur Schüttung waren die Larvendichten dagegen nur in einzelnen Jahren deutlich höher als in der Referenzstrecke.

*Bild 8.25  
Alljährliche Dichte  
der Äschenlarven  
bei der Kiesschüt-  
tung Deitingen  
oberhalb und in  
unterschiedlichen  
Distanzen zur  
Schüttstelle 2005 –  
2011.*



Bei der Schüttung Risi oberhalb von Aarwangen war bei der Kiesbank derselbe Effekt zu beobachten. Weiter entfernt, in der Fließsstrecke Wolfwil-Wynau, rund 5km unterhalb des Kraftwerks Wynau, zeigten sich in den ersten Jahren nur geringe Auswirkungen der Kieszugabe (Bild 8.26). Erst nach einigen Jahren und mehreren Hochwassern war genügend Laichsubstrat in die Fließsstrecke transportiert worden, so dass die erwünschte Wirkung

anhand einer deutlichen bis massiven Zunahme der Äschenlarvendichte festgestellt werden konnte.

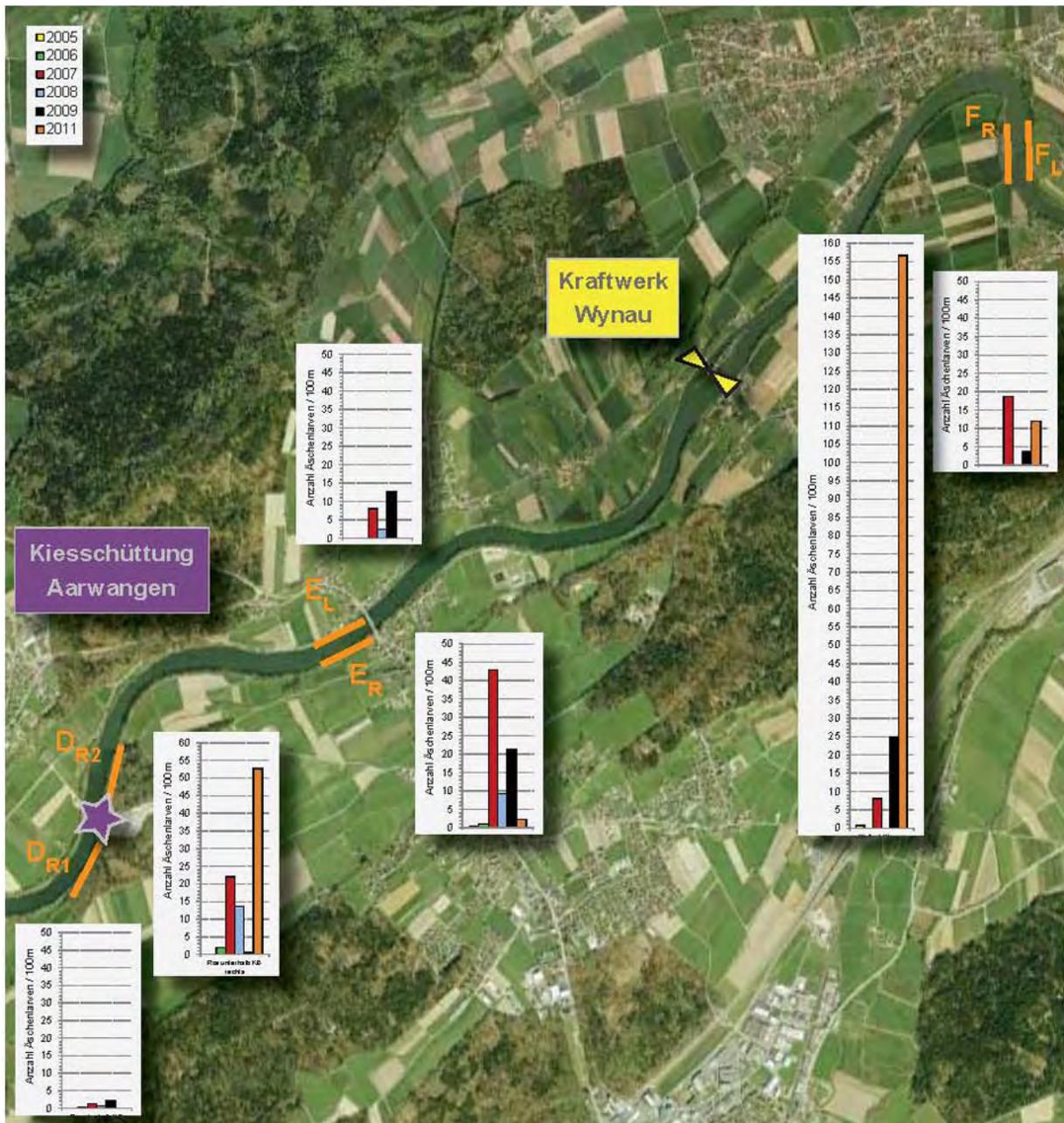


Bild 8.26 Dichte der Äschenlarven bei der Kiesschüttung Risi/Aarwangen oberhalb und in unterschiedlichen Distanzen zur Schüttstelle 2005 – 2011.

### 8.5.4 Beurteilung

Die langjährige Erfolgskontrolle mit Indikatoren zur Fischfauna (Äschenlarven, Bachforellenbrütlinge, Jungfische von Barben, Groppen und Alet) mit Erstaufnahmen 1998 und anschließenden jährlichen Aufnahmen ab 2001 bis 2011 zeigt, dass sich der Fortpflanzungserfolg kieslaichender Arten stark verbessert hat. Die räumlich differenzierten Aufnahmen zeigen zudem deutlich, dass einerseits im Bereich der Schüttungen direkt neue

Laichplätze entstanden sind, andererseits mit der Verlagerung der geschütteten Kiesmengen in Abhängigkeit von den Abflussbedingungen auch untenliegende Strecken vermehrt als Laichplätze genutzt werden. Dies konnte sehr eindrücklich für die Flussabschnitte Deitingen-Wangen a.A. und Wolfwil-Wynau gezeigt werden (Grundlage [31]).

## 9 Massnahmen zur Verbesserung des Geschiebehaushaltes

### 9.1 Ziele und Randbedingungen

Das Ziel der Massnahmen ist die Reaktivierung des Geschiebehaushaltes in den Rheinabschnitten, die noch natürliche oder naturnahe Fliessverhältnisse und somit ein entsprechendes Aufwertungspotenzial aufweisen. Die Reaktivierung soll mit verhältnismässigem Aufwand erfolgen. Die Höhe der angestrebten Geschiebefracht richtet sich nach dem Vorgehen in Kapitel 7, wobei eine Erfolgskontrolle die Wirksamkeit der Massnahmen aufzeigen soll. Bei fehlendem Erfolg sind die Massnahmen anzupassen.

Bei den Massnahmen sind folgende generelle Randbedingungen zu berücksichtigen:

- Der Betrieb der Kraftwerke muss weiterhin gewährleistet sein, es werden keine Stilllegungen vorgesehen.
- Geringfügige Produktionseinbussen infolge einer vorübergehenden Anhebung des Unterwasserspiegels (Rückstau durch Kiesschüttungen) werden in Kauf genommen.
- Der Hochwasserschutz darf gegenüber dem heutigen Zustand nicht verschlechtert werden oder es sind begleitende Massnahmen zu treffen. Im Rahmen von Detailplanungen sind die entsprechenden Nachweise zu erbringen und ein Überwachungsprogramm auszuarbeiten.
- Rheinnahe Infrastrukturanlagen wie Strassen, Bahn, Werkleitungen usw. sowie private Grundstücke dürfen nicht gefährdet werden (z.B. durch Ufererosion).
- Nach Möglichkeit keine LKW-Fahrten durch Quartierstrassen.

Im Speziellen sind folgende Randbedingungen zu berücksichtigen:

- Stauabsenkungen beim Kraftwerk Eglisau werden gemäss der Baubewilligung vom 22. Dezember 2011 nicht mehr weiter verfolgt. Da damit auch in Zukunft kein oder nur wenig Geschiebe in die Stauhaltung des Kraftwerks Reckingen transportiert wird, werden auch bei diesem Kraftwerk keine Stauabsenkungen vorgeschlagen.
- Die Sanierung der Restwasserstrecke Kraftwerk Rheinau mit Zwischenstau gemäss GSchG, Art. 80 wird bereits als separates Projekt bearbeitet. Im Rahmen des Masterplans werden bezüglich hydraulischen Verbesserungsmöglichkeiten keine Aussagen gemacht. Es wird davon ausgegangen, dass der Zwischenstau mittelfristig aufgehoben und die Fliessverhältnisse verbessert werden.

## 9.2 Grundsätzliche Möglichkeiten

### 9.2.1 Stauabsenkung bei Hochwasser

Mit Stauabsenkungen bei Hochwasserabfluss kann das Transportvermögen bei geschiebeführenden Abflüssen vergrößert und erreicht werden, dass das Geschiebe durch die Stauhaltung ins Unterwasser transportiert wird. Die Geschiebeumlagerungen führen zu keiner Verbesserung der Verhältnisse in der Stauhaltung selbst. Die Umlagerungsprozesse von Geschiebe und Feinsedimenten ist in Kapitel 2.4 beschrieben.

Da sich in der tieferen Stauhaltung in gewissem Umfang Sohlenauflandungen bilden, bevor das Geschiebe während Stauabsenkungen durch die Stauhaltung ins Unterwasser transportiert werden kann, sind Stauabsenkungen nur dann sinnvoll, wenn ein genügend grosser Geschiebeeintrag in die Stauhaltung besteht. Zur Zeit ist diese Voraussetzung nur beim Kraftwerk Eglisau erfüllt, wo, wie in Kapitel 6.4.2 erwähnt, keine Stauabsenkungen erfolgen werden.

Die bisherigen Untersuchungen bei den Kraftwerken am Hochrhein gingen davon aus, dass der Stauspiegel beim Abfluss  $Q_9$  um ein bestimmtes Mass abgesenkt wird (vgl. Kapitel 3.2). In weitergehenden Untersuchungen könnten die Umlagerungsprozesse für folgende Fälle untersucht werden:

- Absenkungen erst ab grösseren Hochwasserabflüssen (z.B.  $HQ_2$  –  $HQ_5$ , evtl. noch grösser).
- Absenkungen in der Hochwasserperiode (d.h. dann wenn Geschiebe umgelagert wird), Kompensation durch Höherstau in der Winterperiode.
- Absenkungen bei mehreren Kraftwerken im Rahmen von eigentlichen "Spülaktionen" bei erhöhten Bodenseeausflüssen und Kombination mit "Spülabfluss" in der Aare (Erhöhung Ausfluss aus Wehr Nidau-Port).

Der Vorteil der Stauabsenkung ist die natürliche Weitergabe des Geschiebes ins Unterwasser des Kraftwerks. Nachteile sind der Produktionsverlust infolge der Stauabsenkungen, der Aufwand für die Planung und Ausführung von baulichen Anpassungen bei Schiffanlegestellen, Bootsplätzen, Uferverbauungen usw. sowie die zeitliche Verzögerung des Geschiebeaustrags aus der Stauhaltung. Weiter können sich der Austrag von Feinsedimenten, das Trockenfallen von Flachwasserzonen, die Beeinflussung des Grundwassers, die Destabilisierung von Uferböschungen aufgrund der wechselnden geohydraulischen Verhältnisse sowie betriebliche Komplikationen bei den Kraftwerken als nachteilig erweisen. Diese Punkte sind vor der Einführung von temporären Stauabsenkungen fallweise abzuklären.

### 9.2.2 Geschiebezugaben

Mit Geschiebezugaben kann der Geschiebehaushalt rasch verbessert werden. Die Zugabestellen sollen sich möglichst nahe am oberen Ende von Abschnitten mit Aufwertungspotenzial befinden. Die Zugabe muss an Stellen mit günstigen Strömungsbedingungen erfolgen. Bei regelmässigen Zugaben muss eine Zufahrt bestehen oder gebaut werden. Die Zufahrten sollten wenn möglich nicht über Quartierstrassen erfolgen.

Der Vorteil von Geschiebezugaben ist die Möglichkeit der raschen Umsetzung und die gezielte Zugabe in Abschnitte mit Aufwertungspotenzial. Nachteilig ist das zusätzliche Aufkommen von LKW-Verkehr und die Umweltbelastung durch den Transport des Geschiebes zu den Zugabestellen sowie allenfalls die Planung und der Bau von Zufahrten.

### 9.2.3 Ufererosionen

Durch den Rückbau oder den Verzicht auf Instandstellungsarbeiten an Uferverbauungen können Erosionen gefördert werden. Ufererosionen sind an Prallhängen im Bereich von kiesigem Untergrund (Terrassenschotter) zu erwarten. Sollen die Ufererosionen über lange Zeit zu einer markanten Verbesserung des Geschiebehaushaltes beitragen, so müssen grosse Erosionsvolumina, resp. ausgedehnte Erosionsufer bereitgestellt, resp. das betroffene Land erworben werden können. Es sind folgende Randbedingungen zu berücksichtigen:

- Mögliche Standorte für Ufererosionen befinden sich im Bereich von Prallhängen entlang von Schotterterrassen.
- Es dürfen keine privaten Grundstücke und wichtige Infrastruktur (Strassen, Leitungen usw.) durch Erosionsprozesse gefährdet werden.
- Müssen die Ausdehnungen von Ufererosionen bei einem reaktivierten Prallhang begrenzt werden, ist das Ufer früher oder später wieder zu verbauen. Je nach Art der Verbauung und Zugänglichkeit ist mit einem erheblichen Aufwand zu rechnen.
- Oft verlaufen Uferwege entlang von potenziellen Erosionsufern, die im Vorfeld einer Prallhangreaktivierung umgelegt werden müssen.

Ufererosionen über längere Abschnitte sind nur am Zürcher Ufer rheinaufwärts Ellikon bekannt. Der Geschiebeeintrag aus dieser Quelle ist bis heute gering und für die Bilanzierung vernachlässigbar (Grobabschätzung:  $L \times H \times d = 100 \times 10 \times 0.05 = 50\text{m}^3/\text{a}$ , davon  $2/3$  Geschiebe und  $1/3$  Feinsedimente, d.h. Geschiebeeintrag ca.  $30\text{m}^3/\text{a}$ , resp.  $0.3\text{m}^3/\text{a/m}$ ).

### 9.2.4 Geschiebebewirtschaftung in den Zuflüssen

Aufgrund des Einstaus durch Kraftwerke ergeben sich in verschiedenen Zuflüssen Rückstaueffekte, die dazu führen, dass sich das zugeführte Geschiebe im Stauwurzelbereich ablagert. Die wichtigsten eingestauten Zuflüsse sind die Thur, die Töss, die Sissle, die Ergolz und in beschränktem Ausmass die Birs. Die aus Hochwasserschutzgründen periodisch erfolgenden Geschiebeentnahmen sind in der Massnahmenplanung zu berücksichtigen.

### 9.2.5 Geschiebereaktivierung in den Zuflüssen

Mit einer Reaktivierung des Geschiebehaushalts der Zuflüsse besteht grundsätzlich die Möglichkeit, die Geschiebefracht im Vorfluter zu erhöhen. Geschiebehaushaltsstudien, die an der Thur, der Töss und der Aare durchgeführt wurden, zeigen, dass mit Massnahmen an

diesen wichtigsten Geschiebezubringern der Eintrag in den Rhein auch langfristig nicht erhöht werden kann (Grundlagen [3], [5] und [6]).

Ob mit geeigneten Massnahmen an den Zuflüssen, die für den Geschiebehaushalt relevant sind und deren Mündungsstrecken nicht eingestaut sind, der Geschiebeeintrag in den Rhein erheblich erhöht werden kann, müsste in separaten Geschiebehaushaltstudien untersucht werden.

### 9.3 Fokussierung auf bestehendes Aufwertungspotenzial

Die Massnahmen sollen so umgesetzt werden, dass die Abschnitte mit grossem Aufwertungspotenzial möglichst rasch von einem reaktivierten Geschiebehaushalt profitieren. Zudem sollen Massnahmen prioritär dort umgesetzt werden, wo lange Gewässerabschnitte aufgewertet werden können.

Demnach wird empfohlen, in erster Priorität Massnahmen zur Aufwertung der 31km langen Rheinstrecke zwischen den Kraftwerken Reckingen und Laufenburg vorzusehen.

Mit Massnahmen im Unterwasser der Kraftwerke Ryburg-Schwörstadt bis Augst-Wyhlen kann der Geschiebehaushalt in vier Teilstrecken mit einer Länge von insgesamt 16km aufgewertet werden (inkl. Stauhaltung Rheinfeldern mit mittlerem Aufwertungspotenzial). Diese Massnahmen werden ebenfalls prioritär beurteilt.

Im obersten Abschnitt zwischen dem Rheinfall und der Thurmmündung (mit natürlicherweise kleinen Geschiebefrachten) führen Massnahmen zu einer Aufwertung der 15km langen Rheinstrecke mit mittlerem Aufwertungspotenzial (Massnahmen 2. und 3. Priorität).

Die für die Umsetzung geltenden gesetzlichen Fristen sind in Kapitel 1.4 aufgeführt.

In Kapitel 9.4 sind Massnahmenvorschläge ausgearbeitet, welche es ermöglichen, alle Hochrheinabschnitte mit Aufwertungspotenzial mit Geschiebe zu beschicken.

### 9.4 Massnahmenübersicht

Im zu bearbeitenden Perimeter zwischen Rheinfall und Basel werden die in Tabelle 9.1 aufgeführten und in Plan 1 eingezeichneten Massnahmen zur Reaktivierung des Geschiebehaushaltes vorgeschlagen. Mit geeigneten Kombinationen dieser Massnahmen ist es möglich, den Geschiebehaushalt in den relevanten Strecken auf verschiedene Weise (mit und ohne temporäre Stauabsenkungen) zu reaktivieren (vgl. Kapitel 9.6).

Die Prioritäten 1-3 verstehen sich als Hilfsmittel zur Planung und sind eine Kombination von sachlicher Wichtigkeit und zeitlicher Dringlichkeit. Die Priorisierung soll einen Hinweis geben, welche Massnahmen wichtig und/oder dringlich (Priorität 1) sind und demzufolge zuerst zur Umsetzung kommen sollten. Massnahmen mit Priorität 2 sind von mittlerer Wertigkeit und zu berücksichtigen, wenn sich eine gute Gelegenheit zur Umsetzung ergibt. Die Massnahmen mit Priorität 3 sind entweder wenig ergiebig (Zulassen von Erosion) oder zeitlich noch nicht reif (temporäre Stauabsenkungen). Es wird erst später in einem öffentlichen Prozess darüber entschieden, welche Massnahmen politisch machbar sind und in welcher Reihenfolge sie tatsächlich umgesetzt werden.

Die Spalte Umsetzung gibt für die baulichen Massnahmen die voraussichtliche Zeitspanne für die Vorbereitungsarbeiten an (Verstärkungen Zufahrten, Einholen fischereirechtliche

Bewilligungen, Feldaufnahmen zur Dokumentation des Ausgangszustandes usw.), die erforderlich ist, bis mit der Umsetzung begonnen werden kann. Bei den betrieblichen Massnahmen (Stauabsenkungen) ist ein Zeithorizont angegeben, der in etwa verstreichen dürfte, bis sich bei Umsetzung der oberliegenden Massnahmen im Stauwurzelbereich ein grösseres Geschiebedepot gebildet hat. Dieses wird dann bei den ersten Stauabsenkungen in die tiefere Stauhaltung verlagert und ermöglicht so den anschliessenden regelmässigen Geschiebetransport durch die Stauhaltung (vgl. Kapitel 9.2.1).

Die Kosten-Nutzen-Analyse bezieht sich auf die Grobkostenschätzung (Kapitel 9.7 und Anhang 8). Dazu wurde davon ausgegangen, dass die einmaligen Kosten in 20 Jahren amortisiert sind; sie wurden zu den jährlichen Kosten dazugerechnet. Diese Kosten (jährliche Kosten plus  $1/20$  der einmaligen Kosten) wurden dem Geschiebevolumen [ $m^3$ ] und der Länge der beeinflussbaren Strecke [km] gegenübergestellt [Fr./ $m^3$ /km].

Die Prioritäten richten sich in erster Linie nach dem Aufwertungspotenzial und wurden anlässlich der Präsentation in Zusammenarbeit mit der PGG festgelegt. Auf eine zeitliche Eingrenzung der einzelnen Prioritätsstufen wurde verzichtet, da der zeitliche Rahmen bereits in der Spalte "Umsetzung" vorgegeben ist.

Tabelle 9.1 Massnahmenübersicht und Bewertung (gelb: bauliche Massnahmen, Massnahmenblätter in Anhang 5, blau betriebliche Massnahmen, grün: bereits umgesetzte oder verordnete Massnahmen).

Nr.	Beschrieb	Aufzuwertende Strecke		Umsetzung Jahre	Abklärungsbedarf	Vorinvestitionen	Kosten/ Nutzen [Fr./m³/km]	Priorität
		Abschnitt	Länge					
1	Zulassen von Erosionen am rechten Ufer bei Altenburg, km 50.1 – km 51.0, vgl. Anhang 5	Stauwurzelbereich KW Rheinau	3km	2 - 5	GW, LB	mittel	37.4	3
2	Zulassen von Erosionen am linken Ufer bei Marthalen, km 54 – km 53.1, vgl. Anhang 5	Stauwurzelbereich KW Rheinau	0.7km	2 - 5	GW, LB	mittel	161.2	3
3	Weitergabe von Geschiebeablagerungen in der tiefen Stauhaltung in die Restwasserstrecke (nur bei einer Sanierung mit Aufhebung der Hilfswehre/Zwischenstau sinnvoll) oder rheinabwärts der Wasserrückgabe. Aufgrund der Wehrausbildung ist eine Weitergabe mit temporären Stauabsenkungen nicht möglich und ein Wehrrumbau nicht oder höchstens im Zusammenhang mit dem Bau eines Dotierkraftwerks verhältnismässig.	Rückgabe KW Rheinau bis Rüd- linger Brücke (evtl. Restwasserstrecke KW Rheinau)	8km	Bei Bedarf	Das Geschiebemanagement muss im laufenden Verfahren "Sanierung der Restwasserstrecke" gemäss GSchG Art. 80, bzw. in der UVP zur Neukonzessionierung 2036 behandelt werden.			
4	Zulassen von Erosionen am rechten Ufer rheinabwärts von Balm, km 61 – km 62.3, vgl. Anhang 5	Erosionsstelle bis Rüdlinger Brücke	5.8km	2 - 5	GW, LB	mittel	19.8	2
5	Zulassen von Erosionen am rechten Ufer rheinabwärts von Ellikon, km 64.6 – km 64, vgl. Anhang 5	Erosionsstelle bis Rüdlinger Brücke	3km	2 - 5	GW, insbes. Uferfiltratpump- werk Eggholz, LB	mittel	37.8	2
<p><b>Abkürzungen</b> GW: Grundwasser, LB: Landbedarf, -erwerb</p>								

Nr.	Beschrieb	Aufzuwertende Strecke		Umsetzung Jahre	Abklärungsbedarf	Vorinvestitionen	Kosten/ Nutzen [Fr./m <sup>3</sup> /km]	Priorität
		Abschnitt	Länge					
6	<p>Geschiebezugabe im Unterwasser KW Reckingen, linkes Ufer rheinaufwärts der Chrützlibachmündung (km 91.4) , vgl. Anhang 5. Das Zugabematerial weist eine dem Thurgeschiebe ähnliche Kornverteilung auf und wird in Form einer langgezogenen Kiesbank geschüttet. Die Grösse des Schüttvolumens wird so gewählt, dass zusammen mit den Massnahmen 7 und 8 die jährliche Geschiebefracht gemäss Kapitel 7.2 erreicht wird.</p> <p>Der Zugabeort entspricht der Zugabestelle 4, welche durch die KW Eglisau-Glattfelden AG betrieben wird (Auflage zur Baubewilligung mit Initialschüttung 2013 von 500m<sup>3</sup> und jährlichen Nachschüttungen von 500m<sup>3</sup>).</p>	Chrützlibachmündung bis Restwasserstrecke Albrück-Dogern (Rossgarten), resp. in Kombination mit Massnahme 13 bis KW Laufenburg	18.8km	1 - 2	ZF	klein	4.3	1
7	<p>Geschiebezugabe im Unterwasser KW Reckingen, rechtes Ufer zwischen Reckingen und Rheinheim (km 91.7). Das Zugabematerial weist eine dem Thurgeschiebe ähnliche Kornverteilung auf und wird in Form einer langgezogenen Kiesbank geschüttet. Die Grösse des Schüttvolumens wird so gewählt, dass zusammen mit den Massnahmen 6 und 8 die jährliche Geschiebefracht gemäss Kapitel 7.2 erreicht wird.</p> <p>Der Zugabeort liegt im Zugabeperimeter 5, welcher durch die KW Eglisau-Glattfelden AG betrieben wird (Auflage zur Baubewilligung mit Initialschüttung 2013 von 2'000m<sup>3</sup> und jährlichen Nachschüttungen von 1'000m<sup>3</sup>).</p>	Reckingen/Rheinheim bis Restwasserstrecke Albrück-Dogern (Rossgarten), resp. in Kombination mit Massnahme 12 bis KW Laufenburg	18.5km	1 - 2	ZF	klein	4.5	1
<p><b>Abkürzungen</b>            GW: Grundwasser, LB: Landbedarf, -erwerb, ZF: Zufahrt</p>								

Nr.	Beschrieb	Aufzuwertende Strecke		Umsetzung Jahre	Abklärungsbedarf	Vorinvestitionen	Kosten/ Nutzen [Fr./m³/km]	Priorität
		Abschnitt	Länge					
8	<p>Geschiebezugabe im oberen Abschnitt der Flieisstrecke Rekingen - Koblenz, linkes Ufer im Bereich der ARA Zurzach (km 95.5) , vgl. Anhang 5. Das Zugabematerial weist eine dem Thurgeschiebe ähnliche Kornverteilung auf und wird in Form einer langgezogenen Kiesbank geschüttet. Die Grösse des Schüttvolumens wird so gewählt, dass zusammen mit den Massnahmen 6 und 7 die jährliche Geschiebefracht gemäss Kapitel 7.2 erreicht wird.</p> <p>Der Zugabeort entspricht der Zugabestelle 6, welche durch die KW Eglisau-Glattfelden AG betrieben wird (Auflage zur Baubewilligung mit Initialschüttung 2013 von 2'500m³ und jährlichen Nachschüttungen von 1'200m³).</p>	Zurzach bis Restwasserstrecke Albbruck-Dogern (Rossgarten), resp. in Kombination mit Massnahme 12 bis KW Laufenburg	14.7km	1 - 2	ZF	klein	5.6	1
9	<p>Geschiebezugabe im unteren Abschnitt der Flieisstrecke Rekingen - Koblenz, rechtes Ufer, ca. 1km vor Koblenzer Laufen (km 97.8) , vgl. Anhang 5. Das Zugabematerial weist eine dem Thurgeschiebe ähnliche Kornverteilung auf und wird in Form einer langgezogenen Kiesbank geschüttet. Die Grösse des Schüttvolumens wird so gewählt, dass zusammen mit den Massnahmen 7 und 8 die jährliche Geschiebefracht gemäss Kapitel 7.2 erreicht wird.</p> <p>Der Zugabeort liegt im Zugabeperimeter 8, welcher durch die KW Eglisau-Glattfelden AG betrieben wird (Auflage zur Baubewilligung mit Initialschüttung 2013 von 2'500m³ und jährlichen Nachschüttungen von 1'000m³).</p>	Ettikon bis Restwasserstrecke Albbruck-Dogern (Rossgarten), resp. in Kombination mit Massnahme 13 bis KW Laufenburg	12.4km	1 - 2	ZF	klein	6.8	1
10	Zulassen von Erosionen am rechten Ufer bei Ettikon, km 98.9 – km 98.5, vgl. Anhang 5	“	11.7km	2 - 5	LB, NS	mittel	10.0	2
<p><b>Abkürzungen</b>            GW: Grundwasser, LB: Landbedarf, -erwerb, NS: Naturschutzgebiet</p>								

Nr.	Beschrieb	Aufzuwertende Strecke		Umsetzung Jahre	Abklärungsbedarf	Vorinvestitionen	Kosten/ Nutzen [Fr./m <sup>3</sup> /km]	Priorität
		Abschnitt	Länge					
11	Zulassen von Erosionen am rechten Ufer rheinaufwärts der Wutachmündung, km 99.9 – km 100.4	“	9.8km	2 - 5	LB	mittel	11.6	2
12	Geschiebezugabe Chrüzächer im Bereich Aaremündung (km 103.1), vgl. Anhang 5. Das Zugabematerial weist eine dem Thurgeschiebe ähnliche Kornverteilung auf und wird in Form einer langgezogenen Kiesbank geschüttet.	Chrüzächer bis Restwasserstrecke Albruck-Dogern (Rossgarten), resp. in Kombination mit Massnahme 12 bis KW Laufenburg	7.1km	1 - 2	ZF	klein	11.4	2
13	Auffüllen der Baggerlöcher mit grobkörnigem Material in der Restwasserstrecke Albruck-Dogern. Die Baggerlöcher befinden sich im Gleithangbereich am linken Ufer zwischen km 110.8 und km 111.5. Die Baggerlöcher sind nicht vollständig, sondern soweit aufzufüllen, dass ein regelmässiger Geschiebetransport gewährleistet werden kann (Auffüllvolumen ca. 40'000m <sup>3</sup> , grobkörniges Material).	Verlängerung der aufwertbaren Strecken der Massnahmen 6 – 12 um jeweils 11km.	+11km	1 - 2	ZF, NS	klein	0.3	1
14	Geschiebezugabe Restwasserstrecke Albruck-Dogern im Bereich Rossgarten (km 110.5), vgl. Anhang 5. Das Zugabematerial weist eine dem Thurgeschiebe ähnliche Kornverteilung auf und wird im Prallhangbereich in Form einer langgezogenen Kiesbank geschüttet. Nur sinnvoll, wenn Massnahme 13 umgesetzt wird.	Bereich Restwasserstrecke Albruck-Dogern (Rossgarten), resp. in Kombination mit Massnahme 13 bis KW Laufenburg	0.3km* 10.7km	1 - 2	ZF, NS	klein	7.5	1
<b>Abkürzungen</b> GW: Grundwasser, LB: Landbedarf, -erwerb, ZF: Zufahrt, NS: Naturschutzgebiet			* 0.3km: ohne Umsetzung Massanahme 14					

Nr.	Beschrieb	Aufzuwertende Strecke		Umsetzung Jahre	Abklärungsbedarf	Vorinvestitionen	Kosten/ Nutzen [Fr./m³/km]	Priorität
		Abschnitt	Länge					
15	Geschiebezugabe Restwasserstrecke Albruck-Dogern im Bereich Zollbrücke (km 112.1), vgl. Anhang 5. Das Zugabematerial weist eine dem Thurgeschiebe ähnliche Kornverteilung auf und wird im Gleithangbereich in Form einer langgezogenen Kiesbank geschüttet. Übergangslösung bis zur Umsetzung von Massnahme 13. Nach Umsetzung von Massnahme 13 als Alternative zu Massnahmen 14.	Restwasserstrecke Albruck-Dogern (Zollbrücke) bis KW Laufenburg	9.1km	1 - 2	ZF, NS	klein	8.80	1
16	Geschiebe aus den Massnahmen 6 – 13 wird (voraussichtlich mittelfristig) in die Stauhaltung des Kraftwerks Säckingen eingetragen und dort wegen dem beschränkten Transportvermögen teilweise, resp. temporär (bis zu nachfolgenden grösseren Hochwasserereignissen) abgelagert. Soll es zur Verhinderung von Einstauverlusten entnommen werden, kann es im Unterwasser des Kraftwerks wieder in den Rhein geschüttet werden. Mögliche Schüttstellen: Massnahme 18, 19 oder 20. Allenfalls muss ein Teil des Materials zwischengelagert werden. Ob sich tatsächlich nur so geringmächtige Ablagerungen bilden, wie es die TUM berechnet hat, muss mit einem geeigneten Monitoring aufgezeigt werden.	Unterwasser KW Säckingen bis Stauwurzel KW Ryburg-S.	5.5km	Bei Bedarf, Zeithorizont 10 – 20 Jahre	NW	klein	Ohne Projekt nicht abschätzbar	2
17	Temporäre Stauabsenkungen Kraftwerk Säckingen. Ob der Hochwasserschutz beeinträchtigt wird, oder die Ablagerungen bei grossen Hochwasserabflüssen ohnehin weiter in die tiefere Stauhaltung verlagert werden, kann nur mit entsprechenden Simulationsrechnungen vorausgesagt werden. Alternative zu Massnahme 16.	Unterwasser KW Säckingen bis Stauwurzel KW Ryburg-S.	5.5km	Zeithorizont 10 – 20 Jahre	GW, HS, AS, AK	Sehr gross	48.2	2
<b>Abkürzungen</b> GW: Grundwasser, HS: Hangstabilität, AS: Anpassungen an Anlagen im Stauraum (Bootsplätze, Schiffstege, Uferschutz usw.), AK: Anpassungen an der Kraftwerkanalge, NW: Notwendigkeit								

Nr.	Beschrieb	Aufzuwertende Strecke		Umsetzung Jahre	Abklärungsbedarf	Vorinvestitionen	Kosten/ Nutzen [Fr./m³/km]	Priorität
		Abschnitt	Länge					
18	Bereits praktizierte Zugabe des Geschiebes aus dem Sammler an der Sissle in Sisseln. Eine kantonale Dauerbewilligung liegt bis ins Jahr 2017 vor.	Unterer Teil des Stauwurzelbereichs Kraftwerk Ryburg-Schwörstadt (Teilabschnitt mit Aufwertungspotenzial)	3.8km	erfolgt	Massnahme ist bereits umgesetzt (darum keine weitere Bewertung)			
19	Geschiebezugabe im Unterwasser des Kraftwerks Säcking (km 131.0). Das Zugabematerial weist eine dem Thurgeschiebe ähnliche Kornverteilung auf und wird im linksufrigen Prallhang in Form einer langgezogenen Kiesbank geschüttet. Die Zugabestelle befindet sich am unteren Ende der Sohlenabsenkung im Unterwasser des Kraftwerks Säcking.	Stauwurzelbereich Kraftwerk Ryburg-Schwörstadt (gesamter Abschnitt mit Aufwertungspotenzial)	5.5km	1 - 2	ZF	mittel	14.8	1
20	Geschiebezugabe auf Höhe Mumpf über die steile rechte Uferböschung (km 132.5). Das Zugabematerial weist eine dem Thurgeschiebe ähnliche Kornverteilung auf und wird im Gleithang in Form einer langgezogenen Kiesbank geschüttet. Die Schüttstelle kann in Kombination oder als Alternative zu Massnahme 19 betrieben werden.	Unterer Stauwurzelbereich Kraftwerk Ryburg-Schwörstadt (gesamter Abschnitt mit Aufwertungspotenzial)	3.8km	1 - 2	ZF	klein	21.1	1
21	Lokale Förderung des Geschiebetriebs in Kombination mit Uferstrukturierung / Kiesrückhalt (festgelegte Umweltmassnahmen M1/M9 Konzessionsvorgaben KW Ryburg-Schwörstadt). Die Massnahmen werden am rechten Gleithangufer zwischen Bad Säcking und Wallbach durchgeführt. Vorgesehene Zugabemenge: 10'000m³ innerhalb von 10 Jahren.	Stauwurzelbereich KW Ryburg-Schwörstadt	Wird im Rahmen der Neukonzessionierung umgesetzt					
	<b>Abkürzungen</b> ZF: Zufahrtmöglichkeit							

Nr.	Beschrieb	Aufzuwertende Strecke		Umsetzung Jahre	Abklärungsbedarf	Vorinvestitionen	Kosten/ Nutzen [Fr./m³/km]	Priorität
		Abschnitt	Länge					
22	Förderung der Ufererosion zwischen km 136.84 und km 138.93 durch abschnittsweises Entfernen des bestehenden Uferschutzes am linken Ufer.	Lokale Wirkung	Wird im Rahmen der Neukonzessionierung umgesetzt					
23	Temporäre Stauabsenkungen Kraftwerk Ryburg-Schwörstadt. Bis anhin wurden relativ häufige Absenkungen untersucht (Stau bei Q <sub>9</sub> abgesenkt). Um aus Hochwasserschutzgründen unzulässige Sohlenanhebungen im Stauwurzelbereich zu verhindern, können Stauabsenkungen auch auf weniger häufig auftretende Hochwasser beschränkt werden. Ob der Hochwasserschutz beeinträchtigt wird, oder die Ablagerungen bei grossen Hochwasserabflüssen ohnehin weiter in die tiefere Stauhaltung verlagert werden, kann nur mit entsprechenden Simulationsrechnungen vorausgesagt werden.	Stauhaltung und Unterwasser KW Rheinfelden	7.5km	Zeithorizont 20 – 30 Jahre	GW, HS, AS, AK	Sehr gross	56.7	3
24	Geschiebezugabe im Unterwasser des Kraftwerks Rheinfelden (km 147.7). Das Zugabematerial weist eine dem Thurgeschiebe ähnliche Kornverteilung auf und wird im Bereich des unteren Endes des Umgehungsgewässers flächig auf die Sohle geschüttet. Aufgrund der schlechten Zufahrtsmöglichkeit muss das Material per Lastkahn zugeführt und vor Ort verklappt werden.	Stauwurzelbereich Kraftwerk Augst-Wyhlen (gesamter Abschnitt mit Aufwertungspotenzial, insbesondere bei den Strukturen im Bereich der Insel Rheinfelden)	4.4km	1 - 2	ZF	keine	18.2	1
25	Zugabe des Geschiebes aus der eingestauten Mündungsstrecke der Ergolz.	Stauwurzelbereich Kraftwerk Birsfelden	2.5km	Bei Bedarf	ZF	mittel	-	2
<b>Abkürzungen</b> GW: Grundwasser, HS: Hangstabilität, AS: Anpassungen an Anlagen im Stauraum (Bootsplätze, Schiffstege, Uferschutz usw.), AK: Anpassungen an der Kraftwerkanlage,								

Nr.	Beschrieb	Aufzuwertende Strecke		Umsetzung Jahre	Abklärungsbedarf	Vorinvestitionen	Kosten/ Nutzen [Fr./m³/km]	Priorität
		Abschnitt	Länge					
26	Temporäre Stauabsenkungen Kraftwerk Augst-Wyhlen. Bis anhin wurden relativ häufige Absenkungen untersucht (Stau bei Q <sub>9</sub> abgesenkt). Um aus Hochwasserschutzgründen unzulässige Sohlenanhebungen im Stauwurzelbereich zu verhindern, können Stauabsenkungen auch auf weniger häufig auftretende Hochwasser beschränkt werden. Ob der Hochwasserschutz beeinträchtigt wird, oder die Ablagerungen bei grossen Hochwasserabflüssen ohnehin weiter in die tiefere Stauhaltung verlagert werden, kann nur mit entsprechenden Simulationsrechnungen vorausgesagt werden.	Stauwurzelbereich Kraftwerk Birsfelden	2.5km	Zeithorizont 20 – 30 Jahre	GW, HS, AS, AK	Sehr gross	170.4	3
27	Temporäre Stauabsenkungen Kraftwerk Birsfelden. Bis anhin wurden relativ häufige Absenkungen untersucht (Stau bei Q <sub>9</sub> abgesenkt). Um aus Hochwasserschutzgründen unzulässige Sohlenanhebungen im Stauwurzelbereich zu verhindern, können Stauabsenkungen auch auf weniger häufig auftretende Hochwasser beschränkt werden. Ob der Hochwasserschutz beeinträchtigt wird, oder die Ablagerungen bei grossen Hochwasserabflüssen ohnehin weiter in die tiefere Stauhaltung verlagert werden, kann nur mit entsprechenden Simulationsrechnungen vorausgesagt werden.	Stauwurzelbereich Kraftwerk Kembs	Ca. 5km	Zeithorizont 20 – 30 Jahre	GW, HS, AS, AK	Sehr gross	95.8	3
<b>Abkürzungen</b> GW: Grundwasser, HS: Hangstabilität, AS: Anpassungen an Anlagen im Stauraum (Bootsplätze, Schiffstege, Uferschutz usw.), AK: Anpassungen an der Kraftwerkanlage,								

Nr.	Beschrieb	Aufzuwertende Strecke		Umsetzung Jahre	Abklärungsbedarf	Vorinvestitionen	Kosten/ Nutzen [Fr./m <sup>3</sup> /km]	Priorität
		Abschnitt	Länge					
28	<p>Geschiebeweitergabe Birs. Das Geschiebe aus der Birs lagert sich im Mündungsbereich ab, führt zu einer Verlandung der Schifffahrtsrinne und wurde bis anhin periodisch entnommen. Gemäss Aussagen des kantonalen Tiefbauamtes haben sich seit der Birsrenaturierung keine Ablagerungen mehr eingestellt. Sollte sich die neue Situation ändern und erneut Baggerungen erforderlich werden, kann der Kies per Lastkahn zu hydraulisch günstigen Stellen, resp. bis zum Wehr Kembs gefahren und dort ins Unterwasser geschüttet werden. Eine temporäre Stauabsenkung bei Hochwasser dürfte nicht praktikabel sein, da dadurch die Fahrrinntiefe abgesenkt würde.</p> <p>Eine andere Möglichkeit ist der Transport per Lastkahn bis in den Bereich rheinaufwärts der Insel Rheinfelden und die dortige Verklappung.</p>	Ausserhalb Projektperimeter, keine weitere Betrachtung.						

## 9.5 Anmerkungen zu einzelnen Massnahmen:

### Reaktivierung Prallhänge

Gemäss Angaben des Regierungspräsidiums Freiburg ist im Bereich Lottstetten (rheinaufwärts der Thurmündung) ein Projekt mit einer Versuchsstrecke über mehrere 100m angelaufen, auf der der Blockwurf aufgelöst und die vorhandenen Blöcke z. T. zur Ufersicherung in Form von Kurzbuhnen umgelagert wird werden sollen. Damit kann im Steiluferbereich (km 60,8 - 61,5) eine kontrollierte Ufererosion ermöglicht werden (z. B. Steilhang bei der Kläranlage Lottstetten). Im übrigen Bereich (km 61,5 - 63,4) kann auf Ufersicherungen evtl. ganz verzichtet werden.

### Kiesbeschaffung

Die Beschaffungsmöglichkeiten werden in einem späteren Schritt erarbeitet. Für die Fließstrecke Rekingen – Koblenz bietet sich das Geschiebe aus der Thur an. Dabei ist zu beachten, dass die Entnahme an der Thurmündung erfolgt, sobald die Sohle eine Interventionshöhe erreicht. Je nach Umfang der Entnahmen betragen die Eingriffsintervalle mehrere Jahre und das Entnahmevermögen ist entsprechend gross (d.h. mehrere Jahresfrachten, Grössenordnung 50'000 - 100'000m<sup>3</sup>) und kann nicht auf einmal in die frei fließende Strecke geschüttet werden. Es bestehen folgende Varianten:

1. Entnahme an Thurmündung und Zwischendeponie. Jährliche Schüttungen mit Material ab Zwischendeponie -> grosser Deponieplatz erforderlich.
2. Entnahme an Thurmündung und Verkauf. Erlös wird für Zukauf von Kies aus Kiesgruben in der Umgebung der Schüttstelle verwendet.
3. Kombination der Varianten 1 und 2.

### Auswirkung der Zugaben in die Fließstrecke Rekingen - Koblenz

Im Rahmen der Untersuchungen zur Neukonzessionierung des Kraftwerks Albruck-Dogern wurde der Einfluss einer erhöhten Geschiebeführung auf die Erhöhung des Hochwasserspiegels berechnet. Die berechneten Erhöhungen von bis zu 50cm bei einem HQ<sub>100</sub> im Bereich der Aarenmündung müssen aus folgenden Gründen relativiert werden und werden sich so kaum einstellen:

1. Der Einfluss auf den Hochwasserspiegel wurde anhand von rein hydraulischen 2d-Berechnungen bestimmt (Grundlage [15]). Dazu wurden neben der vermessenen Gerinnegeometrie vier Verlandungskörper definiert (2 Körper am rechtsufrigen Gleithang, 1 Körper am linken Ufer sowie die Umhüllende) und im Modell fix eingebaut. Der gewählte Berechnungsansatz kann Geschiebeumlagerungen während einem Hochwasser nicht berücksichtigen und ist deshalb ohne weitergehende Betrachtungen (z.B. Schubspannungen) nicht für Prognosen bezüglich Auswirkungen auf den Hochwasserspiegel geeignet.
2. Der Verlandungskörper, der die grösste Anhebung des Hochwasserspiegels verursacht (Umhüllende, Mächtigkeit 1m) weist ein Volumen von über 100'000m<sup>3</sup> auf. Wenn sich ein solches Volumen überhaupt abgelagert, braucht es mit der vorgeschlagenen Zugabe-

menge in die heute weitgehend geschiebelose Flie遝sstrecke dafür mehrere Jahrzehnte. Mit einem geeigneten Monitoring könnten unzulässige Auflandungen frühzeitig erkannt und Gegenmassnahmen getroffen werden.

3. In den Berechnungen sind Stauabsenkungen unter die untere Konzessionsgrenze nicht berücksichtigt.

#### Stauabsenkungen bei den Kraftwerken

Periodische Stauabsenkungen sind frühestens dann sinnvoll, wenn Geschiebe in grösseren Mengen in die Stauhaltung eingetragen wird. Dieser Zeitpunkt ist mit einem entsprechenden Monitoring zu bestimmen.

Die von der TUM durchgeführten Berechnungen für die Stauhaltung Säckingen mit den erfolgten Sohlenausbaggerungen im Stauwurzelbereich zeigen, dass sich auch ohne Stauabsenkungen keine kontinuierlich zunehmende Verlandung ergibt. Allerdings wurden die Berechnungen unter Annahme von feinkörnigem Geschiebe durchgeführt. Ob grobkörnigeres Geschiebe (analog Thurgeschiebe) zu mächtigeren und stabileren Ablagerungen führen kann, muss mit weitergehenden Berechnungen oder mit einem Monitoring (vgl. Kapitel 10.6) aufgezeigt werden.

Wie in Kapitel 9.2.1 angedeutet, könnten Stauabsenkungen auch auf sehr grosse Hochwasser (z.B.  $\geq HQ_5 - HQ_{10}$ ) beschränkt werden, um die ökologischen Auswirkungen zu vermindern (Ausspülen von Feinsedimenten, Trockenfallen von Flachwasserzonen usw.). Dadurch erfolgt jedoch kein regelmässiger Geschiebeeintrag ins Unterwasser.

## 9.6 Wirkung der Massnahmen

Bild 9.1 zeigt ein Längenprofil des Rheins mit den abschnittsweise hergeleiteten Richtgrössen für die erforderliche Geschiebefracht (Kapitel 7.2) und den Geschiebefrachten, die mit den vorgeschlagenen Massnahmen erzielt werden können. Dabei wurden folgende Szenarien betrachtet:

- Szenario 1  
Die Massnahmen umfassen die Reaktivierung von Erosionsufern und die Geschiebezugaben an den Schüttstellen gemäss Plan 1. Es werden die jährlichen Zugabemengen gemäss Tabelle 9.2 angenommen (vgl. auch Anhang 5). Temporäre Stauabsenkungen werden in diesem Szenario nicht berücksichtigt.
- Szenario 2  
Wie Szenario 1 und Behebung der Geschiebefalle in der Restwasserstrecke des Kraftwerks Albruck-Dogern.
- Szenario 3  
Wie Szenario 2, jedoch mit Berücksichtigung von temporären Stauabsenkungen.
- Szenario 4  
Wie Szenario 3, jedoch mit reduzierten Schüttmengen gemäss Tabelle 9.2. Die Reduktion ist so gewählt, dass sich mit Szenario 2 vergleichbare Geschiebefrachten ergeben.

Tabelle 9.2 Zugabestellen und in den Szenarien berücksichtigte Zugabemengen.

Massnahme	Zugabeort	Zugabemenge [m <sup>3</sup> ]			
		Szenario1	Szenario 2	Szenario 3	Szenario 4
6	Rekingen	1'000	1'000	1'000	1'000
7	Reckingen	3'000	3'000	3'000	3'000
8	Zurzach	2'500	2'500	2'500	2'500
9	Küssaberg	2'000	2'000	2'000	2'000
12	Leuggern	1'000	1'000	1'000	1'000
14	Schwaderloch	4'500	4'500	4'500	4'500
15	Schwaderloch	4'000	4'000	4'000	4'000
19	UW Säckingen	3'000	3'000	3'000	0
24	UW Rheinfelden	4'000	4'000	4'000	0
25	UW Augst	3'000	3'000	3'000	0

Zum Vergleich ist in Bild 9.1 jeweils die Geschiebefracht, die sich aus den Einträgen aus der Thur, der Töss, der Glatt und der Ergolz ergeben würde, wenn der Geschiebetrieb nicht durch die Kraftwerke behindert würde, eingezeichnet. Mit Szenario 1 (Geschiebezugaben und Reaktivierung von Erosionsufern mit günstigem Kosten-Nutzenverhältnis) könnte eine Fracht erreicht werden, die mindestens im Bereich der Richtgrössen für die erforderliche Geschiebefracht liegt. Im unteren Abschnitt der frei fliessenden Strecke mit dem grossen Aufwertungspotenzial wird eine Fracht erreicht, die in der Grösse dem natürlichen Geschiebeaufkommen entspricht (Geschiebeeinträge von Thur, Töss, Glatt und Wutach, unter Berücksichtigung des Abriebs). Werden die Baggerlöcher in der Restwasserstrecke des Kraftwerks Albruck-Dogern aufgefüllt (Szenario 2), erhöht sich die Fracht bis zum Kraftwerk Laufenburg auf das Niveau der natürlichen Geschiebeeinträge der oberliegenden Zuflüsse (Aare ausgenommen). Im anschliessenden Abschnitt sind die Frachten identisch mit Szenario 1. Wird der Geschiebetransport durch temporäre Stauabsenkungen in den Stauhaltungen gewährleistet (Szenario 3), ergeben sich Geschiebefrachten, die ab dem Unterwasser des Kraftwerks Säckingen höher liegen, als die Geschiebeeinträge aus Thur, Töss, Glatt und Wutach unter Berücksichtigung des Abriebs. Wird auf die Schüttungen von insgesamt 10'000m<sup>3</sup>/Jahr in den unteren Stauhaltungen verzichtet (Szenario 4), ergeben sich Geschiebefrachten, die über den Richtgrössen für die erforderlichen Frachten und auf dem Niveau der Geschiebeeinträge aus Thur, Töss, Glatt und Wutach unter Berücksichtigung des Abriebs liegen.

Die Abschnitte mit farbig hinterlegtem Hintergrund in Bild 9.1 bedeuten:

- orange: Transportvermögen stark reduziert oder unterbunden und
- gelb: Transportvermögen eingeschränkt (Einfluss Stauhaltung).

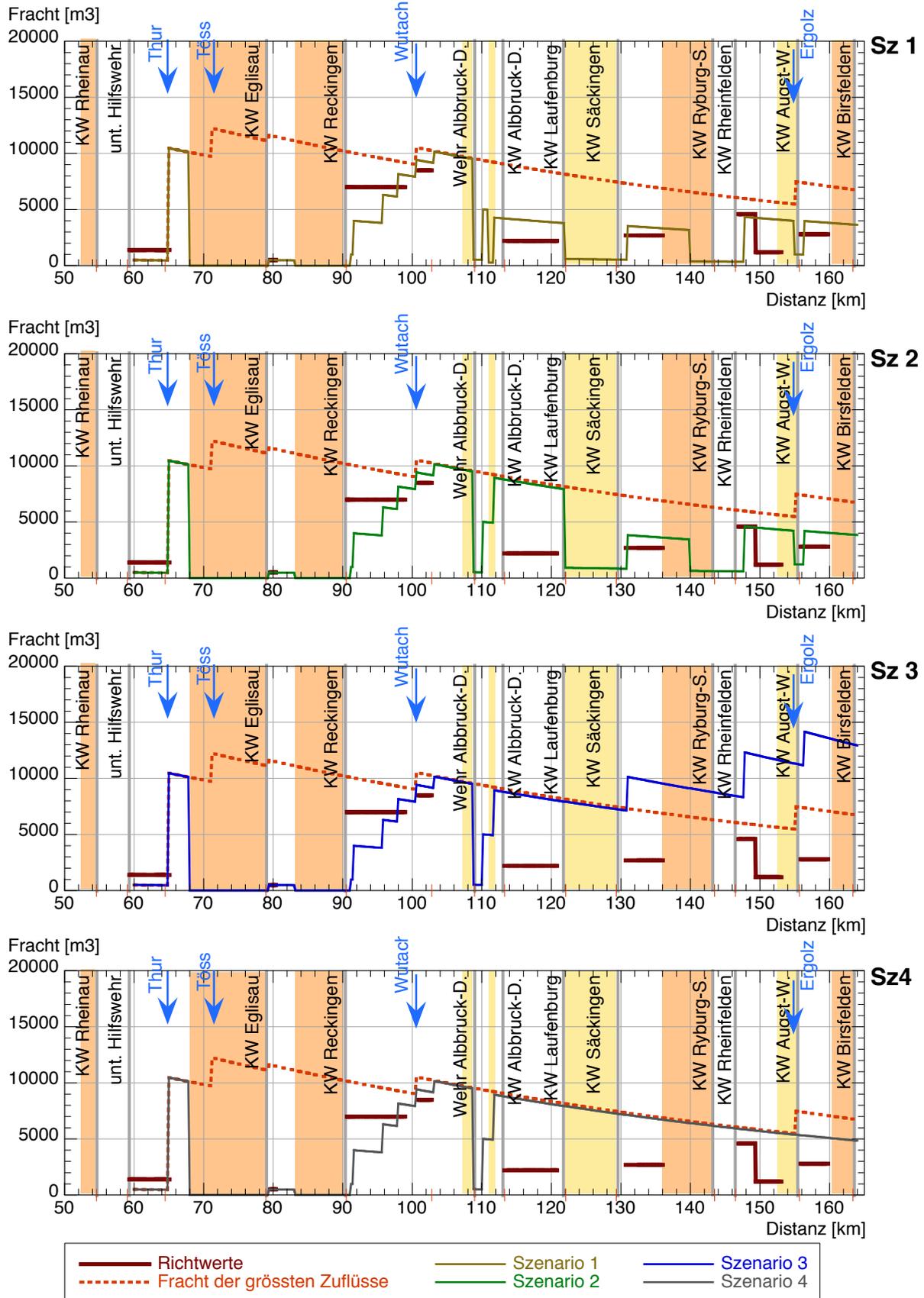


Bild 9.1 Längenprofil der Geschiebefrachten aus den grösseren Zuflüssen unter der Annahme eines ungehinderten Geschiebetransports im Vergleich zu den Frachten aus verschiedenen Massnahmenkombinationen (Szenarien) und den Richtwerten (Kap. 7.2) für die erforderliche Fracht. Orange und gelbe Balken: vgl. Text oben.

Bild 9.1 zeigt, dass mit den Massnahmen aus den Szenarien 1 und 2, die alle ein günstiges Kosten-Nutzenverhältnis aufweisen, der Geschiebehaushalt in allen relevanten Strecken aufgewertet werden kann. Im wertvollen Abschnitt zwischen den Kraftwerken Reckingen und Laufenburg wird auf einer Strecke von rund 20km eine Geschiebefracht erreicht, die dem natürlichen Geschiebeeintrag aus Thur, Töss, Glatt und Wutach entspricht. Eine Verlängerung dieser Strecke ist durch eine Anpassung der Schüttmengen ohne Mehrkosten möglich (Erhöhung der Schüttmengen bei den Massnahmen 6 und 7, Reduktion der Schüttmengen bei den unterliegenden Zugabestellen).

Mit temporären Stauabsenkungen ist gegenüber Szenario 2 (Geschiebezugaben, Reaktivierung Ufererosionen, Auffüllen Baggerlöcher in der Restwasserstrecke des Kraftwerks Albruck-Dogern) eine Erhöhung der Geschiebeführung zwischen dem Kraftwerk Laufenburg und Basel möglich. Davon profitieren würden hauptsächlich die Stauwurzelbereiche der Kraftwerke Ryburg-Schwörstadt, Augst-Wyhlen und Birsfelden mit grossem bis sehr grossem Aufwertungspotenzial (vgl. Kapitel 6.8 und Plan 1). Gegenüber Szenario 2 erhöht sich die Geschiebefracht mit Szenario 4 in diesen Abschnitten um 3'500 m<sup>3</sup>/Jahr (Stauwurzel Ryburg-Schwörstadt), resp. 1'400 m<sup>3</sup>/Jahr (Stauwurzel Augst-Wyhlen und Birsfelden). Zu beachten ist, dass bezüglich dem Geschiebetransportverhalten in der Stauhaltung Säckingen noch Unsicherheiten bestehen und die in Bild 9.1, Sz 2, dargestellte Geschiebefracht allenfalls zu klein ist (vgl. Kapitel 9.5). In diesem Fall wäre in der Stauwurzel des Kraftwerks Ryburg-Schwörstadt die Geschiebefrachtdifferenz zwischen den Szenarien 2 und 4 kleiner als die oben angegebenen 3'500 m<sup>3</sup>/Jahr.

In Bild 9.2 sind die Verhältnisse nach der Umsetzung des Massnahmenkonzeptes aus der Baubewilligung für das Kraftwerk Eglisau dargestellt. Gegenüber den vorgeschlagenen Massnahmen des Masterplanes ergeben sich rheinaufwärts der Thurmundung und im Unterwasser des Kraftwerks Eglisau deutlich höhere Frachten. Dafür sind die Frachten in der freien Fließstrecke Reckingen – Koblenz, hauptsächlich im oberen, 4km langen Abschnitt, tiefer.

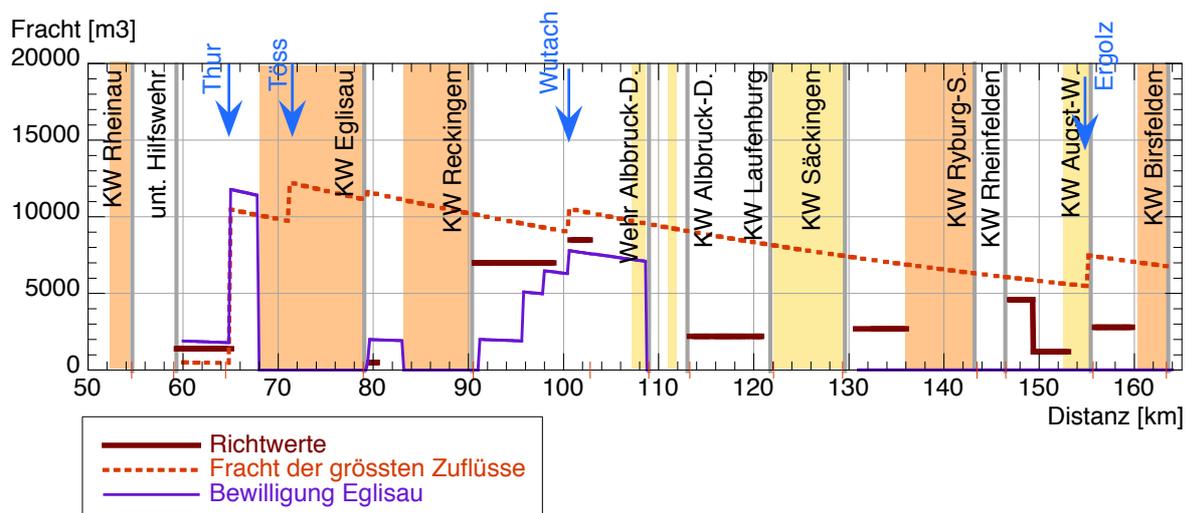


Bild 9.2 Längenprofil der Geschiebefrachten aus den grösseren Zuflüssen unter der Annahme eines ungehinderten Geschiebetransports im Vergleich zu den Richtwerten (Kap. 7.2) für die erforderliche Fracht und zu den Frachten, die sich nach Umsetzung der Auflagen zur Baubewilligung des Kraftwerks Eglisau ergeben. Orange: Transportvermögen stark reduziert oder unterbunden; gelb: Transportvermögen eingeschränkt (Einfluss Stauhaltung).

## 9.7 Grobe Kostenschätzung

### 9.7.1 Vorbemerkung

Die grobe Kostenschätzung basiert auf teilweise stark vereinfachenden Annahmen und umfasst die zur Zeit voraussehbaren baulichen Aufwendungen sowie die Produktionsverluste. Aufwendungen für Planungen, Überwachungsprogramme, Abgeltung von Rechten und Pflichten, Landerwerb usw. sind nicht enthalten. In Übereinstimmung mit dem Bearbeitungsstand stellen die Kosten Grössenordnungen dar. Sie erlaubt aber schon in der vorliegenden Bearbeitungstiefe eine Beurteilung der in Kapitel 9.6 definierten Szenarien.

### 9.7.2 Annahmen

Bei der Kostenschätzung für die Massnahmen gemäss Kapitel 9.4 wurde unterschieden zwischen einmaligen und jährlichen Kosten. In den einmaligen Kosten sind folgende Positionen enthalten

- der Rückbau des Uferschutzes bei der Reaktivierung von Prallhängen,
- das Erstellen von neuen, resp. Verstärken von bestehenden Zufahrten für Geschiebezugaben,
- das Auffüllen der Baggerlöcher in der Restwasserstrecke des Kraftwerks Albruck-Dogern sowie
- die Anpassungen an Schiffanlegestellen, Bootsplätzen in den Stauhaltungen mit temporären Stauabsenkungen.

Die jährlichen Kosten umfassen

- das Liefern und Einbringen von Schüttmaterial (Geschiebezugaben) sowie
- die Produktionsverluste bei den temporären Stauabsenkungen unter den Annahmen, dass die Kraftwerke ausser Betrieb gesetzt, resp. im Teillastbetrieb gefahren werden.

Für den Rückbau des Uferschutzes (Reaktivierung von Prallhängen) wurden Laufmeterpreise eingesetzt, die unter Berücksichtigung der Bauabläufe aus Einheitspreisen von vergleichbaren Projekten hergeleitet wurden.

Für die Erstellung oder Verstärkung der Zufahrten zu den Zugabestellen wurden Richtpreise, die im Zusammenhang mit den geplanten Schüttungen beim Kraftwerk Eglisau abgeschätzt wurden, eingesetzt.

Für das Liefern und Einbringen des Schüttkieses wurde ein Einheitspreis von Fr. 80.-/m<sup>3</sup> eingesetzt.

Für die Vorbereitung der Stauhaltung für temporäre Stauabsenkungen wurden die Bootsplätze und Schiffanlegestellen ab Google Earth gezählt und für die Anpassung je Fr. 15'000.- eingesetzt. Mit diesem Vorgehen resultieren tiefere Kosten, als sie im Rahmen der Neukonzessionierung für das Kraftwerk Ryburg-Schwörstadt abgeschätzt wurden (Grundlage [14], Fachbericht C.5).

Die Abschätzung der Produktionseinbussen basiert auf den Untersuchungen zur Neukonzessionierung des Kraftwerks Ryburg-Schwörstadt (Grundlage [14], Fachbericht C.5). Die dort ausgewiesene Einbusse bei Abschalten des Kraftwerks während der Absenkung von rund 6% der Jahresproduktion wurde auf die anderen Kraftwerke übertragen.

Bei der Kostenschätzung unter Annahme eines Teillastbetriebes während den temporären Stauabsenkungen wurden das Mass der Absenkung gemäss Kapitel 3.5.2 eingesetzt, resp. Für das Kraftwerk Säckingen ein Wert von 2m angenommen und der aktuelle Ausbauabfluss berücksichtigt<sup>14</sup>. Die entsprechenden Werte sind in Anhang 8 aufgeführt. Für den Strompreis wurde Fr. 0.07/kWh eingesetzt (entspricht dem Mittelwert des Jahrespreises der Periode 2009 – 2012, vgl. Anhang 8). Bei Teillastbetrieb während den temporären Absenkungen ergeben sich Einbussen von rund 2% der Jahresproduktion.

### 9.7.3 Kostenvergleich, Beurteilung

Die geschätzten Kosten für die einmaligen und jährlichen Kosten sind nachfolgend zusammengestellt. Es zeigt sich, dass sowohl die einmaligen als auch die jährlichen Kosten bei den Szenarien mit temporären Stauabsenkungen (Szenarien 3 und 4) deutlich höher liegen, als in den Szenarien ohne temporäre Stauabsenkungen. Dabei ist folgendes zu beachten:

- Die erforderlichen Vorinvestitionen für temporäre Stauabsenkungen erscheinen in Anbetracht der Unsicherheiten bezüglich des Umsetzungserfolgs, der ökologischen Auswirkungen und Uferinstabilitäten sehr hoch.
- Mit den Szenarien ohne Stauabsenkungen resultieren kleinere Geschiebefrachten, als mit den Szenarien mit Stauabsenkungen. Die Unterschiede könnten mit grösseren Zugaberaten kompensiert werden, was zu einer Erhöhung der jährlichen Kosten in den Szenarien 1 und 2 führt. Auch bei einer Verdoppelung der Zugaberate (führt zu einer Verdoppelung der jährlichen Kosten) sind die Varianten ohne Stauabsenkung kostengünstiger als jene mit Stauabsenkung. Die Unsicherheiten bezüglich des Umsetzungserfolgs hingegen sind deutlich kleiner.
- Sollte sich zeigen, dass beim Kraftwerk Säckingen auch ohne Stauabsenkungen ein regelmässiger Geschiebetransport durch die Stauhaltung möglich ist, könnte auf die Zugaben im Unterwasser des Kraftwerks verzichtet werden (Massnahmen 19 – 21). Die Auswirkungen auf die einmaligen und jährlichen Kosten sind in Anhang 8 zusammengestellt und in den nachfolgenden Kostentabellen mit grauer Schrift aufgeführt.

---

<sup>14</sup> Die Berechnungen der TUM deuten darauf hin, dass sich auch ohne Stauabsenkungen keine nennenswerten Ablagerungen bilden und so keine Stauabsenkungen erforderlich sind. Allerdings wird von einer feinkörnigen Geschiebemischung mit einem Sandanteil von 20% und einem Feingeschiebeanteil ( $d \leq 1.2\text{cm}$ ) von 60% ausgegangen.

**Einmalige Kosten [Fr.]**

	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3	Szenario 4
Schätzung gem. Anhang 8	3'400'000	5'830'000	14'305'000	14'035'000
Unvorhergesehenes 20%	680'000	1'166'000	2'861'000	2'807'000
Total, gerundet	4'100'000	7'000'000	17'200'000	16'800'000
Total, ohne Stauabsenkung Säckingen gem. Anhang 8	3'900'000	6'900'000	16'000'000	15'900'000

**Jährliche Kosten [Fr.] (KW bei Stauabsenkung ausser Betrieb)**

	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3	Szenario 4
Schätzung gem. Anhang 8	2'000'000	2'000'000	11'580'000	11'020'000
Unvorhergesehenes 20%	400'000	400'000	2'316'000	2'204'000
Total, gerundet	2'400'000	2'400'000	13'900'000	13'200'000
Total, ohne Stauabsenkung Säckingen gem. Anhang 8	2'100'000	2'100'000	11'100'000	10'700'000

**Jährliche Kosten [Fr.] (KW bei Stauabsenkung in Betrieb, ausser KW Ryburg-S.)**

	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3	Szenario 4
Schätzung gem. Anhang 8	2'000'000	2'000'000	7'184'000	6'624'000
Unvorhergesehenes 20%	400'000	400'000	1'437'000	1'325'000
Total, gerundet	2'400'000	2'400'000	8'600'000	7'900'000
Total, ohne Stauabsenkung Säckingen gem. Anhang 8	2'100'000	2'100'000	7'500'000	7'100'000

## 10 Monitoringkonzept

### 10.1 Empfohlenes Vorgehen

Es wird aus Gründen der Vergleichbarkeit vorgeschlagen, für das Monitoring die gleiche Methodik wie bei den Schüttungen 2004 (Hochrhein) und bei den Schüttungen an der Aare anzuwenden. Demnach sollen in noch zu bestimmenden Teststrecken die Veränderungen von morphologischen und ökologischen Parametern überwacht und der Zusammenhang zwischen den morphologischen und ökologischen Grössen aufgezeigt werden.

Die Teststrecken sind so zu wählen, dass sie einerseits im Wirkungsbereich der Zugaben liegen und andererseits Referenzstrecken ausserhalb des Wirkungsbereiches erfassen. Bevor mit den Zugaben begonnen wird, muss der Ausgangszustand erfasst werden.

Mit Querprofilaufnahmen in bezüglich Hochwassersicherheit sensiblen Abschnitten soll die Entwicklung der Sohle überwacht und die Auswirkungen auf den Hochwasserspiegel anhand

der Analyse von bestehenden Pegeln (sofern vorhanden) sowie hydraulischen und geschiebemechanischen Berechnungen beurteilt werden.

## 10.2 Morphologie

Die morphologischen Untersuchungen umfassen Geschiebe- und Substratanalysen sowie die Erhebung der Kolmation an ausgewählten Stellen in den Teststrecken.

### Substratanalysen

Für die Bestimmung der Kornverteilung des Substrats werden Linienproben entnommen, nach dem Verfahren von Fehr in Volumengewichtsanalysen umgerechnet (VAW, 1987) und gemäss Tabelle 10.1 klassiert.

Beim Sohlenmaterial werden breite und schmale Kornverteilungen unterschieden (Unterklassen X.1 und X.2). Breite (bimodale) Kornverteilungen sind gut abgestuft und enthalten auch feinere Fraktionen. Häufig sind mittlere Fraktionen zwischen 6 und 12 cm eher untervertreten. Dies ist beispielsweise dann der Fall, wenn in den Zwischenräumen einer groben Deckschicht Geschiebe abgelagert wird. Breite Kornverteilungen weisen daher auf einen gewissen Geschiebetrieb hin. Demgegenüber betreffen schmale Kornverteilungen meist deutlich bis stark abgeplästerte Deckschichten mit wenig bis keinen Geschiebeanteilen.

Im Hauptstrombereich wird die Kornzusammensetzung anhand von Unterwasseraufnahmen dokumentiert.

Klasse	Bezeichnung	Unterklasse	$d_{90}$ [cm]	$\sigma = (d_{90}/d_{35})^{1/2}$ [-]
1	Feingeschiebe	-	< 5	-
2	Geschiebe	-	$5 \leq d_{90} < 7$	-
3.1	Feines Sohlenmaterial	breit	$7 \leq d_{90} < 10$	> 2.5
3.2		schmal		< 2.5
4.1	Mittleres Sohlenmaterial	breit	$10 \leq d_{90} < 15$	> 2.5
4.2		schmal		< 2.5
5.1	Grobes Sohlenmaterial	breit	$15 \leq d_{90}$	> 2.5
5.2		schmal		< 2.5

*Tabelle 10.1 Klassifizierung von Kornverteilungen aufgrund des Korndurchmessers  $d_{90}$ <sup>15</sup> sowie des Verhältnisses  $\sigma = (d_{90}/d_{35})^{1/2}$ . Der Korndurchmesser  $d_{90}$  bestimmt die Einteilung in Geschiebe und Sohlenmaterial und der Parameter  $\sigma$  unterscheidet breite und schmale Kornverteilungen.*

### Innere Kolmation

Die innere Kolmation beschreibt die Einlagerung von Feinsedimenten in den Porenraum der Gewässersohle. Der Kolmationsgrad ist ein Indiz für die Häufigkeit der Umlagerung der

<sup>15</sup> dx: Korndurchmesser des x-prozentigen Siebdurchgangs.

Deckschicht. Sie beeinflusst den Lebensraum des Benthos (Insektenlarven, etc.) sowie die natürliche Reproduktion der kieslaichenden Fische.

Im Jahr 2002 wurde im Auftrag der EAWAG eine Studie zur Kolmation verfasst (Grundlage 41). Darin wurde ein Verfahren zur Erkennung und Klassifizierung der inneren Kolmation entwickelt. Dabei wird der Kolmationsgrad in 5 Bewertungsklassen eingeteilt.

Im Gegensatz zu der inneren Kolmation beschreibt die äussere Kolmation die Überdeckung der Gewässersohle mit Feinsedimenten.

### 10.3 Monitoring kieslaichender Fischarten

Die mit dem Geschiebetrieb erreichte Erneuerung und periodische Umwälzung der Gewässersohle kommt nebst terrestrischen Pionierarten, welche sich auf neu gebildeten Kiesbänken ansiedeln, vor allem der aquatischen Tierwelt zu gute. Die Auswirkungen dieser zusätzlichen Geschiebefrachten sollen mit einem fischbiologischen Monitoring dokumentiert werden. Auf Fliessgewässer spezialisierte Fischarten, sogenannte «Kieslaicher» wie Äsche (*Thymallus thymallus*), Bachforelle (*Salmo trutta fario*), Barbe (*Barbus barbus*) und Schneider (*Alburnoides bipunctatus*) benötigen lockeres Geröll und kiesigen Grund für ihre Fortpflanzung. Die natürliche Fortpflanzung dieser Kieslaicher kann daher als Indikator für die Erfolgskontrolle dienen. Da die Fischbestandesgrösse von Jahr zu Jahr beträchtlich variieren kann und sich eine Geschiebereaktivierung unter Umständen erst mit zeitlicher Verzögerung auswirkt (vgl. Beispiel Aare-Aarwangen), sind Erhebungen über mehrere Jahre notwendig, um schlüssige Aussagen zu einer Reaktivierung des Geschiebehaltens zu erhalten. Mit der Erfassung des Fortpflanzungserfolges verschiedener kieslaichender Fischarten können eventuelle externe Einflüsse auf bestimmte Arten (z.B. Auswirkungen eines Hitzesommers auf den Äschenbestand) „ausgefiltert“ werden. Weiter ist bei allen ökologischen Untersuchungen der Einbezug einer oder mehrerer unbeeinflusster Referenzstrecken notwendig, um nicht vom Geschiebe abhängige Einflussfaktoren zu eliminieren.

#### Fortpflanzungserfolg der Äsche

Anzahl und Dichte der Äschenlarven in einem Flussabschnitt dienen als Indikator für den Fortpflanzungserfolg dieser Leitart. Dieser kann – unter Berücksichtigung weiterer Umweltfaktoren - direkt mit dem Zustand der Flusssohle in Verbindung gebracht werden. Die Methode ist gut ausgearbeitet und konnte in den letzten 15 Jahren bei verschiedenen Projekten an Rhein, Aare, Reuss und Limmat angewendet werden, so dass auch eine beträchtliche Datengrundlage für eine überregionale Einordnung der Resultate vorliegt.

Aufgrund ihres speziellen Verhaltens können frisch geschlüpfte Äschenlarven während mehreren Wochen in Ufernähe beobachtet werden. Der ideale Zeitpunkt für eine solche Erhebung variiert von Jahr zu Jahr, und liegt in „Normaljahren“ innerhalb der ersten 2 Wochen im Mai. Um ausschliesslich den aus natürlicher Fortpflanzung stammenden Nachwuchs zu erfassen, sind die Untersuchungen vor eventuellen Besatzmassnahmen durch die Kantone durchzuführen. Die Untersuchungsstrecken von 200-300m Länge werden stromaufwärts nach potenziellen Standorten für Äschenlarven abgesucht, und deren Anzahl sowie die Anzahl der pro Standort vorkommenden Äschenlarven protokolliert. Für jeden potenziellen Standort, sowie auch für jeden von Äschenlarven besiedelten Standort, werden Substrat und Strukturen (Block, Geröll, Totholz, Hochstauden, Gras, Sand, Wurzeln)

miterfasst. Dank dieser Erfassung der Larvenhabitate kann der Einfluss der Wasserführung auf die Habitatqualität weitgehend eliminiert werden.

### Fortpflanzungserfolg weiterer lithophiler Fischarten

Da der Fortpflanzungserfolg der Äsche von ungünstigen Bedingungen im Frühling beeinflusst werden kann, empfiehlt es sich, auch den Fortpflanzungserfolg weiterer „Kieslaicher“ mit anderer Laichperiode zu beurteilen. Mit der Erhebung der frisch geschlüpften Bachforellenbrütlinge im April können die Verhältnisse im Winter, mit der Erhebung der Vorkommen von Jungfrischen von Barbe, Alet, Schneider und Nase im August-September die Frühlings- und Sommerverhältnisse beurteilt werden. Diese Erhebungen werden mit Elektroabfischungen im Uferbereich nach der Punktsammelmethode (Point-Abundance-Sampling nach Grundlage [38]) durchgeführt. Dabei sollten mindestens 50 Punkte erfasst werden. Dies entspricht einer Uferlänge von mindestens 150 – 200m. Pro Probepunkt sollen nebst der Artzugehörigkeit und der Anzahl Individuen auch die Länge der gefangenen Fische (in Längenklassen von 5cm) geschätzt werden.

Mit dem Standardmass «Fang pro Aufwandeinheit» (CPUE = Catch Per Unit Effort = Fang pro Abfischungspunkt) können die Resultate der verschiedenen Probestrecken miteinander verglichen werden. Dabei sind nebst den Arten auch die ökologischen Gilden zu unterscheiden, um die kieslaichenden Arten als Indikatoren für den Geschiebehaushalt zu vergleichen.

## 10.4 Benthosfauna

Wie die Erfahrungen bei den Versuchschüttungen in der freien Fließstrecke gezeigt haben, sind die Resultate einer Erfolgskontrolle der Benthosfauna nicht sehr aussagekräftig. Einerseits war die Wirbellosenfauna auch beim Zustand vor der Kieszugabe bereits recht typisch ausgeprägt und zeigte mit rund 20'000 Individuen/m<sup>2</sup> recht hohe Dichten. Andererseits ist die Besiedlung des Flussgrundes sehr stark abhängig vom Potenzial des Oberwassers, des Interstitials und der Zuflüsse, so dass eine Veränderung der Zusammensetzung und Menge des Zoobenthos unter Umständen erst nach langer Zeit sichtbar wird. Weiter ist die Erfassung und Analyse des Makrozoobenthos sehr zeitaufwändig und kostenintensiv. Es wird deshalb vorgeschlagen, die Benthosfauna nicht ins Monitoring des Geschiebehaushaltes zu integrieren, sondern weiterhin im Rahmen des koordinierten biologischen Monitoring des Hochrheins in Fünfjahreszyklen grossflächig zu untersuchen (Grundlage [42]).

## 10.5 Terrestrische Organismen

Kiesbänke in grossen Flüssen können gute Standorte für verschiedene Arten der Pionier- und Ruderalgesellschaften von Pflanzen und Tieren bilden. Die Sukzession der Pflanzengesellschaften, die Zusammensetzung der Laufkäfer- oder der Kleinsäugerfauna oder die Brut des Flussregenpfeiffers wären deshalb ebenfalls denkbare Indikatoren für den ökologischen Zustand der Kiesbänke und werden z.B. in Erfolgskontrollen zu Auenrevitalisierungen erfolgreich angewendet.

Anders als in Auengebieten, in denen aufgrund von grossflächigen Umlagerungsprozessen laufend Ruderalstandorte verschwinden und auch wieder neu entstehen, sind die

Massnahmen zur Verbesserung des Geschiebehaushaltes im Hochrhein (auch aus Platzgründen) nicht auf solche grossräumigen Habitatverbesserungen ausgerichtet. Die in Kapitel 9.4 vorgeschlagenen Kieszugaben werden primär für die Verbesserung der Laichbedingungen getätigt. Die Schüttungen sollen deshalb so angelegt werden, dass sie möglichst rasch erodiert und im Flussbett verteilt werden. Daher muss damit gerechnet werden, dass neu erstellte Kiesbänke nach relativ kurzer Zeit wieder verschwinden werden.

Ein Monitoring terrestrischer Pionierorganismen, die aufgrund von Kiesschüttungen wohl nur kurzfristig passende Habitate finden werden, ist deshalb für diese Massnahmen nicht zweckmässig.

## 10.6 Sohlenentwicklung und Auswirkungen auf Hochwasserspiegel

Die Standorte der aufzunehmenden Querprofile liegen in Abschnitten, wo in vorhandenen Gefahrenkarten schon heute eine Gefährdung ausgewiesen ist oder aufgrund von voraussehbaren Geschiebeablagerungen eine Erhöhung der Hochwasserspiegel nicht ausgeschlossen werden kann. Die aus heutiger Sicht sinnvollen Standorte sind (vgl. Plan 1):

- Bereich Zurzach (Flieisstrecke),
- Bereich Riethem und Kadelburg (Flieisstrecke),
- Bereich Koblenz (Flieisstrecke),
- Bereich Full (Stauhaltung Albruck-Dogern),
- Bereich Murg und Sisseln (Stauhaltung Säckingen),
- Bereich Mumpf - Wallbach (Stauhaltung Ryburg-Schwörstadt) und
- Bereich Rheinfeldern (Stauhaltung Augst-Wylen).

## 11 Schlussfolgerungen und weiteres Vorgehen

Der Masterplan zeigt die bestehenden Defizite bezüglich dem Geschiebehaushalt und das Aufwertungspotenzial unter der Randbedingung auf, dass die bestehenden Kraftwerke auch weiterhin betrieben werden.

Ein wichtiger Teil des Masterplans ist der Massnahmenvorschlag, mit dem die bestehenden Defizite auf verschiedene Weisen behoben und der Geschiebehaushalt im Hochrhein saniert werden kann. Der Masterplan enthält keine Angaben dazu, wie und in welchem Zeithorizont die Massnahmen umgesetzt werden können. Einzelne Massnahmen wurden von den Kraftwerken Eglisau und Ryburg-Schwörstadt im Rahmen der Neukonzessionierung geplant und werden demnächst umgesetzt.

Beim Geschiebetransport in grossen Flüssen bestehen noch viele Unsicherheiten und es ist nicht möglich, die Wirkung von Massnahmen genau vorauszusagen. Darum muss die Sanierung des Geschiebehaushaltes ein iterativer Prozess sein. Durch die Umsetzung von ersten Massnahmen aus dem Masterplan und aufgrund des darauf folgenden Monitorings können neue Erkenntnisse gewonnen werden, welche in die Planung und Umsetzung von weiteren Massnahmen einfließen. Der Masterplan bietet die sachlich fundierte Grundlage zur Auswahl der nötigen und machbaren Massnahmen.

Bei zukünftigen Neukonzessionierungen können Massnahmen aus dem Masterplan als Ersatzmassnahmen verfügt werden. Eine weitere Möglichkeit zur Umsetzung von Massnahmen bietet die Sanierung des Geschiebehaushaltes nach dem schweizerischen Gewässerschutzgesetz. Massnahmen, welche im Rahmen dieser Sanierungen umgesetzt werden, können voraussichtlich zum Teil über einen Zuschlag auf dem Strompreis in der Schweiz entschädigt werden.

Die Umsetzung der Massnahmen ist nicht Teil des Masterplanes und muss in einem nächsten Schritt, insbesondere von den Behörden, in einem politischen Prozess mit allen Betroffenen und Interessenvertretern konkretisiert werden.