

Morphologie und Geschiebehaushalt Alpenrhein

Zusammenfassender Bericht über die Untersuchungen zwischen
1985 und 2000



Kiesbank bei Balzers (km 38)

Projekt Nr. A-108

Adresse Auftraggeber

Internationale Regierungskommission
Alpenrhein
Projektgruppe Flussbau
Lämmli brunnenstrasse 54
9001 St. Gallen

Kontaktperson: Leo Kalt

Telefon: +41 (0)71 229 21 00
Fax: +41 (0)71 229 21 35
Mail: leo.kalt@bd-tba.sg.ch

Adresse Auftragnehmer

Hunziker, Zarn & Partner AG
Ingenieurbüro für Fluss- und Wasserbau
Via Flucs 10
7013 Domat/Ems

Kontaktperson: Dr. Benno Zarn

Telefon: +41 (0)81 630 36 18
Fax: +41 (0)81 630 36 19
Mail: bzarn@hzp.ch

Vorbemerkung

Eine erster Bericht über die Morphologie und den Geschiebehaushalt des Alpenrheins, welcher die Untersuchungen zwischen 1991 und 1997 zusammenfasst, erschien im April 1998 auf Initiative der Kantone St. Gallen und Graubünden. Im Rahmen der laufenden Untersuchungen am Alpenrhein wurde dieser erste Bericht mit neuen Erkenntnissen aktualisiert. Der vorliegende Bericht vom November 2001 ersetzt den Bericht vom April 1998.

Zusammenfassung

Mit den am Alpenrhein ausgeführten Korrektionsmassnahmen sollte die Hochwassersicherheit erhöht und ein stabiles Längenprofil erreicht werden. Verschiedene aktuelle Studien über den Alpenrhein zeigen, dass die Abflusskapazität zwar markant zunahm, das Längenprofil aber nicht stabil ist: Der Alpenrhein ist nicht im Gleichgewicht. Auf Strecken, welche sich zwischen 1974 und 1995 eintieften, folgen Strecken mit Auflandungen. Numerische Simulationen zeigen, dass auch in Zukunft mit grösseren Sohlenveränderungen gerechnet werden muss.

Für die Stabilisierung des Flussbettes sind folgende Massnahmen denkbar: (1) Veränderung des Geschiebeeintrages aus den Zuflüssen, (2) Blockrampen, (3) Veränderung der Flussbreite und (4) Kiesentnahmen. All diese Massnahmen können den Geschiebehaushalt grossräumig verändern und damit Erosions- oder Auflandungsprozesse begünstigen oder diesen entgegenwirken. In der Regel laufen diese Prozesse langsam ab und erstrecken sich über lange Zeiträume. Die Wahl der Massnahmen hängt von der angestrebten Sohlenlage sowie von den morphologischen und ökologischen Zielvorstellungen ab. Je nach Zielvorstellung müssen unter Umständen mehrere Massnahmen gleichzeitig ergriffen werden.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Der Alpenrhein heute	2
2.1	Einzugsgebiet	2
2.2	Abflussregime	3
2.3	Morphologie	4
3	Veränderung der Sohlenlage zwischen 1941 und 1995	6
4	Aktueller Geschiebehaushalt	8
4.1	Geschiebefrachten und Sohlenveränderungen	8
4.2	Geschiebeeinträge aus den Zuflüssen	10
4.3	Modellierung	11
5	Entwicklung des Geschiebehaushaltes und der Sohlenlage	13
6	Massnahmen	15
6.1	Allgemeines	15
6.2	Veränderungen des Geschiebeeintrages aus den Zuflüssen	17
6.3	Blockrampen	20
6.4	Veränderung der Flussbettbreite	22
6.5	Kiesentnahmen	28

Anhang

Anhang A

Zusammenstellung von Berichten über den Geschiebehaushalt des Alpenrheins basierend auf numerischen Berechnungen mit dem Programm MORMO

Studien über die Zuflüsse des Alpenrheins

Anhang B

Übersicht über die Korrektionsmassnahmen

1 Einleitung

In den letzten 10 Jahren wurden im Zusammenhang mit der Beurteilung von Kiesentnahmen und Verbauungen sowie des Betriebes von Kraftwerken verschiedene Studien über den Geschiebehaushalt und die morphologische Entwicklung des Alpenrheins durchgeführt. Dabei wurden die Veränderungen der Sohlenlage und die Menge des transportierten Geschiebes erfasst (Diagnose respektive Eichung) und zukünftige Entwicklungen vorausgesagt (Prognose). Solche Kenntnisse sind wichtig, weil vom Geschiebehaushalt und der Sohlenlage die Abflusskapazität, die Stabilität von Verbauungen oder von Brücken, die Dynamik in Auen und die Lage des Grundwasserspiegels abhängen.

numerisches Simulationsmodell

Der Geschiebehaushalt und seine Wechselwirkung mit der Morphologie kann heute mit Hilfe von numerischen Simulationen erfasst werden. Für den Alpenrhein wurde ein entsprechendes Modell erstellt, welches auf dem Programm MORMO basiert. Dieses Modell wurde zwischen Reichenau und dem Bodensee für die Periode von 1974 bis 1988 respektive von 1988 bis 1995 geeicht. Aufbauend auf einem geeichten Modell können Prognoserechnungen über die Entwicklung des Geschiebehaushaltes und der Morphologie durchgeführt werden. Mit speziellen Szenarien können auch die Einflüsse von Kraftwerken, Abflussänderungen, Verbauungen, Kiesentnahmen oder variierenden Geschiebeeinträgen auf den Geschiebehaushalt und die Morphologie ermittelt werden.

Im vorliegenden Bericht werden die Erkenntnisse der bisherigen Studien (Anhang A) über den Geschiebehaushalt und die morphologische Entwicklung des Alpenrheins zusammengefasst. Dabei wird der aktuelle Geschiebehaushalt beschrieben, auf die Verbauungsmassnahmen und deren Auswirkungen auf die morphologische Entwicklung eingegangen, die zukünftige Entwicklung dargestellt, der Einfluss der Kiesentnahmen und der Geschiebeeinträge aus den Zuflüssen erläutert, sowie Auswirkungen von möglichen Verbauungsmassnahmen diskutiert.

Die Wirkung von verschiedenen flussbaulichen Massnahmen wird anhand von Beispielen des Alpenrheins diskutiert. Im Sinne einer Einführung werden jeweils die wichtigsten Prozesse erläutert. Bei Flussaufweitungen sind die Ausführungen umfassender, weil diese Massnahme im Zentrum der Diskussionen steht und weil bei deren Realisierung komplexe Prozesse ablaufen.

In diesem Bericht werden die Resultate von zwei Modellversionen¹ beschrieben. Mit dem Modell 1 wurden die Untersuchungen zwischen 1997 und 1998 und mit dem Modell 2 zwischen 1999 und 2000 durchgeführt. Vor 1997 wurden aber noch weitere Modellversionen eingesetzt. Die verschiedenen Modellversionen sind ein Resultat der Erfahrungen, welche mit der numerischen Modellierung gewonnen wurden, respektive dem verbesserten Prozessverständnis sowie von neuen Erkenntnissen in der Grundlagenforschung. Die Modelle vom Alpenrhein unterscheiden sich vor allem bei der Berücksichtigung des Abriebs und der Berechnung der hydraulischen Belastung, der Wahl der Geschiebetransportformel, der Lagerungsdichte, der berücksichtigten Abflüsse, der untersuchten Zeiträume und Streckenabschnitte sowie der Art der Modellierung des Geschiebeeintrages.

Weil die in diesem Bericht aufgeführten Resultate von verschiedenen Modellen stammen, sind sie nicht immer konsistent. Zum Teil wird dieser Umstand berücksichtigt, indem die Resultate als Bandbreiten dargestellt sind. Im vorliegenden Bericht wird auf die numerischen Modelle des Alpenrheins und die Eichungen nur am Rande eingegangen (Kapitel 4), da dies bereits mehrfach ausführlich beschrieben wurde.

2 Der Alpenrhein heute

2.1 Einzugsgebiet

Bei Reichenau vereinigen sich die beiden etwa gleich grossen Flüsse Vorder- und Hinterrhein und bilden den Alpenrhein (Bild 1). Er mündet nach rund 90 km in den Bodensee und entwässert ein Einzugsgebiet von 6123 km² mit einer mittleren Höhe von 1800 m ü.M. Der Gletscheranteil beträgt 1.4%. Die aus morphologischer Sicht wichtigsten Zuflüsse sind - ausser dem Vorder- und dem Hinterrhein - die Plessur, die Landquart und die Ill. Neben diesen Gebirgsflüssen münden verschiedene Wildbäche wie die Maschänser Rüfi, die Tamina oder die Frutz in den Alpenrhein.

¹ Ein Modell umfasst das eigentliche Rechenprogramm, alle für die Hydraulik und den Geschiebetransport relevanten gewässerspezifischen Parameter wie Abfluss, Geometrie, Rauigkeit, Korndurchmesser und -verteilung, Geschiebeeintrag, Sohlenformen, Abriebbeiwert oder Lagerungsdichte sowie die meist empirischen Beziehungen zur Bestimmung der Wasserspiegellagen und des Geschiebetransportes, des Erosionsbeginns oder des Abriebs. Je nach Art der Modelländerung wird nur eine Einstellung verändert (z.B. Rauigkeit) oder es muss der Programmcode angepasst werden (z.B. Einführung einer neuen Geschiebetransportformel).

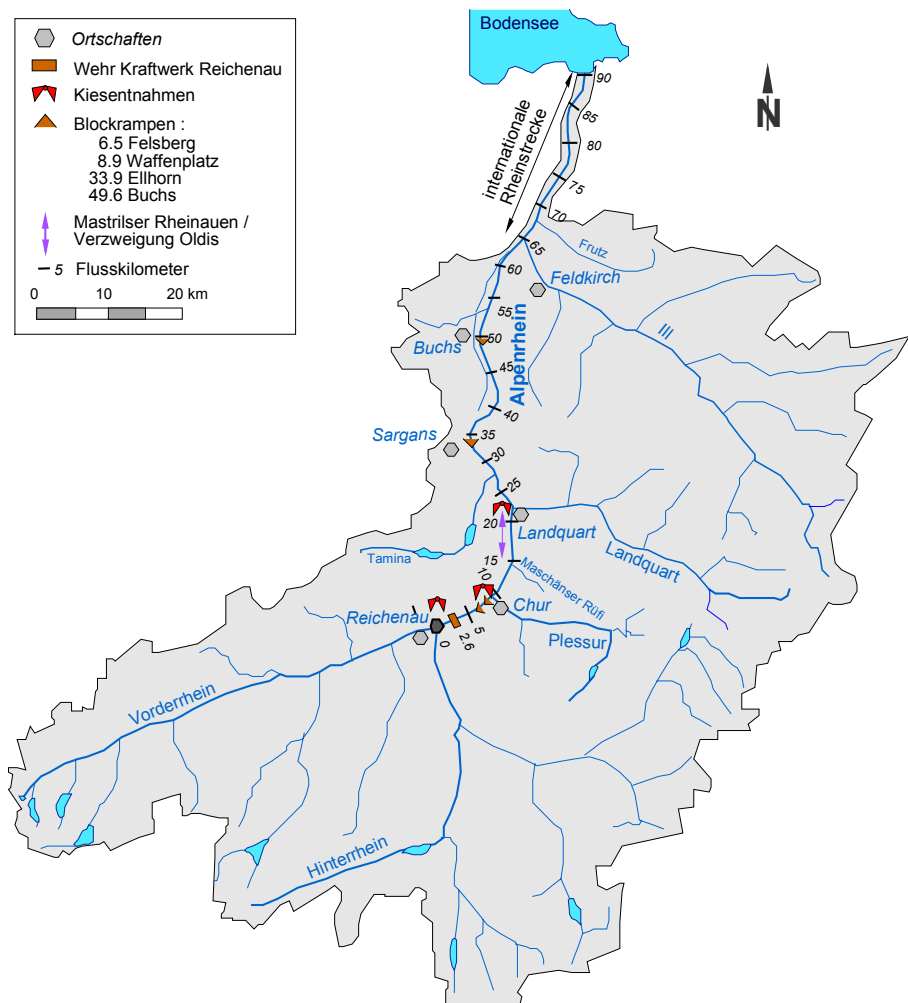


Bild 1: Einzugsgebiet des Alpenrheins und seiner Zuflüsse.

2.2 Abflussregime

Das Abflussgeschehen des Alpenrheins kann nicht einem einzigen Regime zugeordnet werden. Vielmehr entspricht es einer Kombination aus glazialem, nivalem und pluvialen Abflussregime mit ausgeprägtem Abflussmaxima im Juni. Durch den Bau und den Betrieb der zahlreichen Saisonspeicher im Einzugsgebiet des Alpenrheins gab es eine spürbare Verlagerung der Sommerabflüsse in den Winter.

Bei der Mündung in den Bodensee liegt der mittlere Jahresabfluss bei $230 \text{ m}^3/\text{s}$. Das 100-jährliche Hochwasser liegt in diesem Alpenrheinabschnitt bei $3'050 \pm 200 \text{ m}^3/\text{s}$. Die Abflussspitze der Hochwasserereignisse von 1834, 1868 und 1927 lag in diesem Bereich. Ohne Retention der Speicher im Ein-

zugsgebiet wäre auch beim Ereignis von 1987 die Abflussspitze in der Grössenordnung des 100-jährlichen Hochwassers gelegen.

2.3 Morphologie

Die Morphologie des Alpenrheins ist sehr stark von umfassenden Korrekturen und lokalen Verbauungen geprägt. Eine Zusammenstellung ist im Anhang B aufgeführt. Ziel dieser Massnahmen war es, jeweils eine angemessene Hochwassersicherheit zu gewährleisten, indem ein stabiles Flussbett mit einer ausreichenden Abflusskapazität angestrebt wurde.

Längenprofil und Gefälle

Wie bei Alluvionsflüssen üblich, nimmt das Längsgefälle des Alpenrheins mit zunehmender Flie遝distanz von Reichenau bis zur Illmündung ab, aber nicht kontinuierlich (Bild 2a und b). Dies hängt unter anderem mit den vier Blockrampen Felsberg, Waffenplatz (Chur), Ellhorn und Buchs, den unterschiedlichen Flussbettbreiten respektive Querprofilgeometrien und den Zuflüssen zusammen.

Flussbettbreite und Gerinneform

Die Querprofilgeometrie des Alpenrheins ist sehr unterschiedlich. Von Reichenau bis 4 km oberhalb der Illmündung fliesst er mit Ausnahme der Verzweigung Oldis und den Mastrilser Rheinauen in einem einfachen Trapezprofil (Bild 2c) und auf der folgenden Strecke in einem aus Hauptgerinne und Vorländern zusammengesetzten Doppeltrapezprofil mit Mittelwuhren. Der Abstand der Hochwasserschutzdämme ist entsprechend gross. Auch die Breite des eigentlichen Flussbettes, mit welcher die Gerinneform eng verknüpft ist, variiert erheblich. Zwischen Reichenau und der Maschänsler Rüfi sowie flussabwärts der Illmündung ist das Flussbett *eben*. Auf der übrigen Strecke können sich Bänke bilden. Zwischen der Maschänsler Rüfi und der Mündung der Landquart spricht man von einem verzweigten Fluss und auf der folgenden Strecke bis zur Illmündung von *alternierenden Bänken*. Eine Besonderheit ist die rund 700 m lange Flussaufweitung bei Chur.

Strukturvielfalt und Kolkiefen

Bei Flussstrecken mit Bänken ist die Variation von verschiedenen Parametern wie Abflusstiefe, Flie遝geschwindigkeit oder Kornverteilung des Sohlenmaterials deutlich grösser als bei einer ebenen Sohle. Diese Variabilität ist aus ökologischer Sicht erwünscht. Gleichzeitig mit Bänken treten aber auch lokale Vertiefungen im Flussbett auf, sogenannte Kolke, wodurch

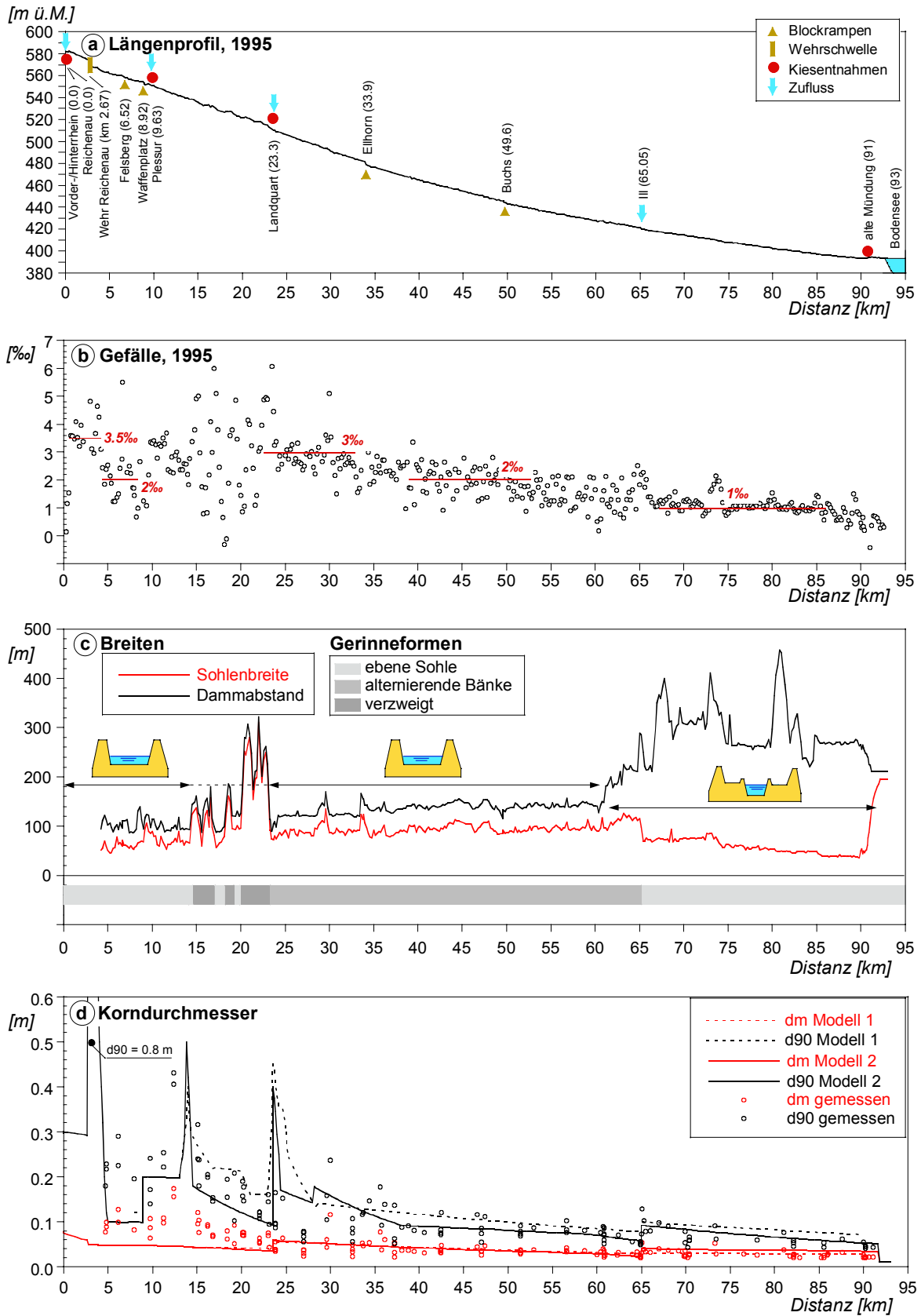


Bild 2: Längenprofil, Gefälle, Flussbettbreite und Abstand der Dämme sowie charakteristische Korndurchmesser des Alpenrheins.

beispielsweise der Uferschutz erheblich belastet werden kann. Beim Alpenrhein können in den Mastrilser Auen respektive im Bereich mit den alternierenden Bänken Kolkiefen von 4 m und mehr beobachtet werden.

Korndurchmesser

Für die Morphologie sind nicht nur die Breiten- und Gefällsverhältnisse von Bedeutung, sondern auch die Kornverteilung des Sohlenmaterials. Diese wird häufig mit den zwei Korndurchmessern d_m und d_{90} beschrieben². Mit diesen beiden Grössen können das transportierte Geschiebe (d_m) und der Widerstand des Flussbettes gegen Eintiefung (d_{90}/d_m) näherungsweise charakterisiert werden (Bild 2d).

Entlang einer Flussstrecke nehmen die Korndurchmesser ab. Gründe dafür sind der Massenverlust infolge der mechanischen Belastung beim Sedimenttransport (Abrieb) und die Tatsache, dass grössere Körner in Ablagerungsstrecken früher liegen bleiben als kleinere (Sortierprozesse). Der Geschiebeintrag der Zuflüsse kann zu einer Vergröberung der Kornverteilung führen.

3 Veränderung der Sohlenlage zwischen 1941 und 1995

Aufgrund der Gefälls- und Breitenverhältnisse dürfte der Alpenrhein vor den Korrekturen praktisch auf seiner ganzen Strecke Geschiebe abgelagert haben und aufgelandet sein, was eine stetige Reduktion der Abflusskapazität und eine Zunahme der Überschwemmungshäufigkeit zur Folge hatte. Mit den ausgeführten Korrektionsmassnahmen und Kiesentnahmen sollten weitere Auflandungen verhindert respektive eine Eintiefung des Flussbettes angestrebt werden.

Die Eintiefung des Flussbettes im 19. Jahrhundert war nicht gleichmässig. Zwischen 1940/41 und 1950 (Differenz Nulllinie / schwarze Kurve in Bild 3) und zwischen 1974 und 1995 (Differenz violette / rote Kurve) waren die Sohlenveränderungen deutlich kleiner als in der Periode von 1950 bis 1974 (Differenz schwarze / rote Kurve). Die Hauptursache für die massiven Eintiefungen zwischen 1950 und 1974 waren die Kiesentnahmen. Zwar wurde seit 1936 Kies aus dem Alpenrhein gewonnen. Aber wie Bild 4 zeigt, fallen die Hauptentnahmemengen in die Periode mit den grössten Eintiefungsraten,

² d_m : mittlerer Korndurchmesser nach Meyer-Peter und Müller; d_{90} : Korndurchmesser, bei welchem 90 Gewichtsprozent kleiner sind als d_{90} .

vor allem in der Strecke zwischen den Mündungen der Landquart und der Ill (km 23.7 bis km 65).

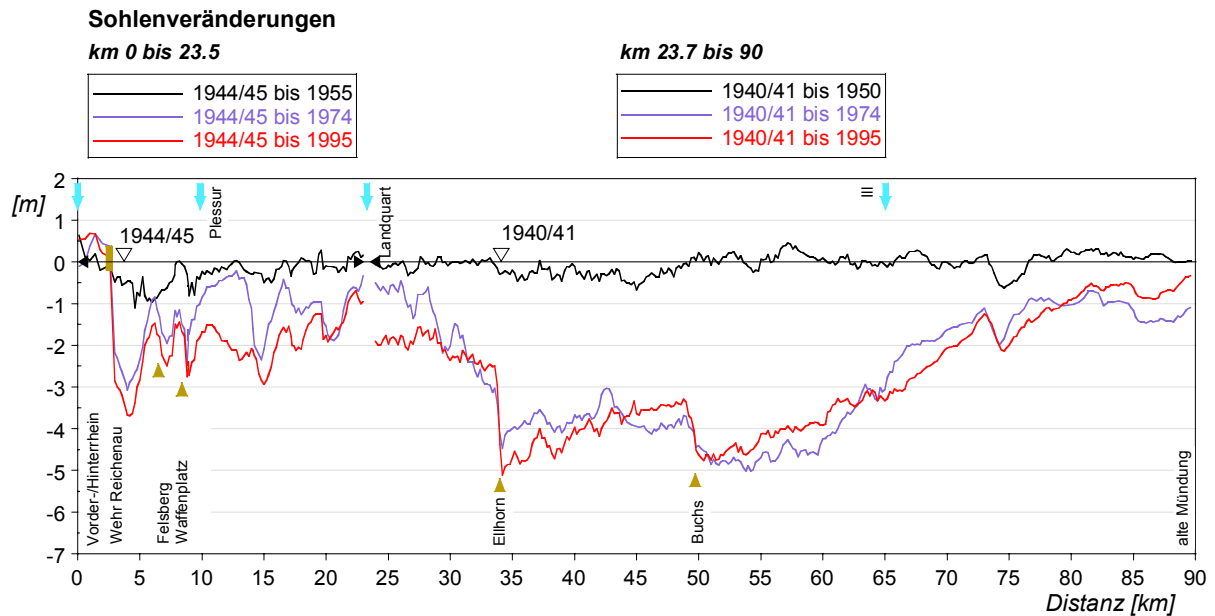


Bild 3: Sohlenveränderungen im Alpenrhein zwischen 1941 und 1995.

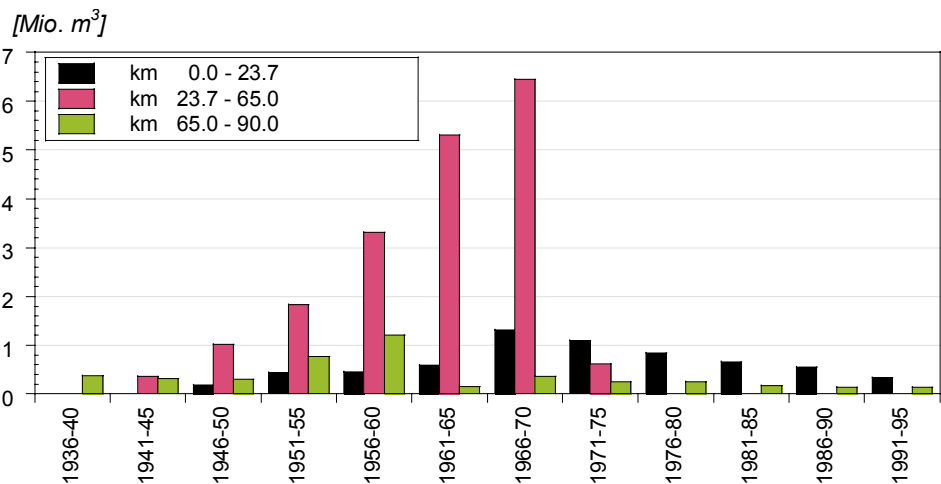


Bild 4: Geschiebeentnahmen im Alpenrhein seit 1936 in verschiedenen Teilstrecken.

Gründe für die umfangreichen Kiesentnahmen zwischen 1950 und 1970 waren der hohe Bedarf der Bauwirtschaft einerseits und eine Überschätzung des Geschiebetransportes im Alpenrhein um einen Faktor grösser als 10 andererseits (siehe Kapitel 4). Man ging früher davon aus, dass unterhalb

der Landquartmündung pro Jahr rund 1.3 Mio. m³ Geschiebe und unterhalb der Illmündung rund 0.35 Mio. m³ Geschiebe transportiert wird.

Zwischen 1936 und 1990 wurden insgesamt 29 Mio. m³ Geschiebe entnommen, was rund vier bis sechs mal mehr ist als die heutigen Geschiebeeinträge aller Zuflüsse in einer vergleichbaren Zeitspanne. Es erstaunt deshalb nicht, dass sich beispielsweise das Flussbett beim Ellhorn (km 33.9) oder bei Buchs (km 50) zwischen 1950 und 1974 um rund 5 m eintiefe (Bild 3).

4 Aktueller Geschiebehaushalt

4.1 Geschiebefrachten und Sohlenveränderungen

Darstellungen

Der Geschiebehaushalt kann mit Hilfe der transportierten Geschiebefrachten und den Sohlenveränderungen erläutert werden. In Bild 5 sind diese Parameter dargestellt. Das obere Bild zeigt die mittleren jährlichen Geschiebefrachten als Bandbreite, welche in der Periode von 1974 bis 1995 transportiert wurden. In den folgenden zwei Bildern werden die in den Perioden von 1974 bis 1988 und von 1988 bis 1995 gemessenen mit den berechneten Sohlenveränderungen verglichen. Dabei handelt es sich um Resultate von zwei verschiedenen Modellen (siehe auch Kapitel 1 und Abschnitt 4.3).

Erosions- und Auflandungsprozesse

Beim Alpenrhein folgen auf Strecken mit Erosionen solche mit Ablagerungen, aber nirgends herrscht Gleichgewicht. Zwischen Reichenau und den Mastrilser Rheinauen tiefte sich das Flussbett ein, wobei vier Fixpunkte die Erosionen begrenzen. Dies sind die Blockrampen bei Felsberg und bei Chur (Waffenplatz), die Verzweigung Oldis sowie die Mastrilser Rheinauen. Der folgende Abschnitt zwischen den Mündungen der Landquart und der Ill wird durch die zwei Blockrampen beim Ellhorn und bei Buchs und der etwa 15 km langen markanten Auflandungszone flussaufwärts der Illmündung geprägt. Der Bau der Blockrampen bewirkte im Oberwasser während einiger Zeit Geschiebeablagerungen, die sich jedoch auf Strecken mit jeweils einer Länge von wenigen Kilometern beschränken. In den übrigen Abschnitten erodiert der Alpenrhein zum Teil massiv. Auf dem letzten Abschnitt zwischen der Illmündung und dem Bodensee tieft sich der Gebirgsfluss bis zum Diepoldsauer Durchstich (km 74.5 bis 79.6) ein, danach schliesst eine Auflandungsstrecke an.

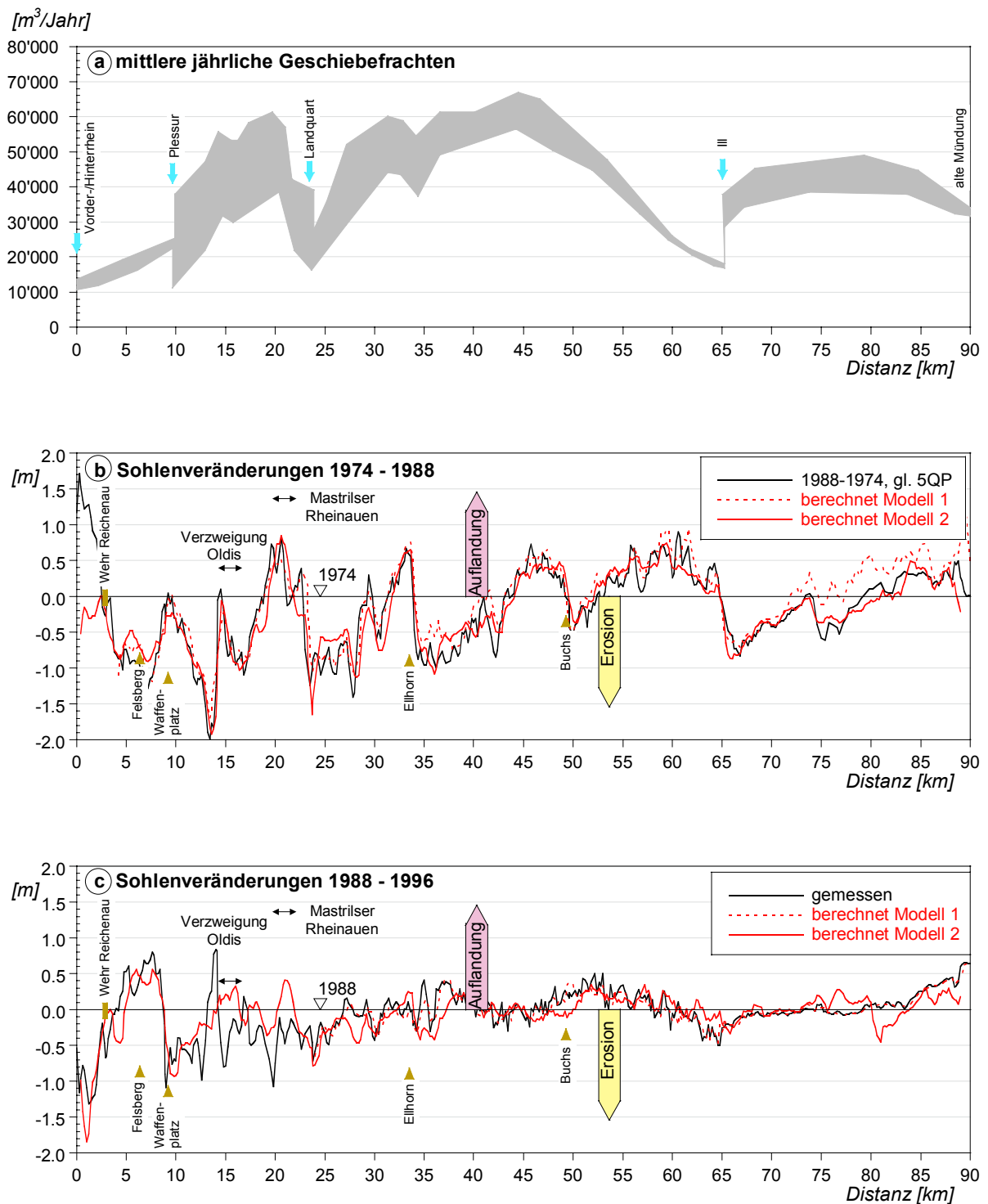


Bild 5: Bandbreite der durchschnittlichen jährlichen Geschiebefrachten, welche im Alpenrhein in der Periode von 1974 bis 1995 transportiert wurden (a), und die gemessenen und berechneten Sohlenveränderungen in der Periode von 1974 bis 1988 (b) und von 1989 bis 1995 (c) für verschiedene Modelle.

*mittlere jährliche
Geschiebefrachten*

Die mittleren jährlichen Geschiebefrachten in Bild 5 (Transportdiagramm) veranschaulichen, wie stark sich Erosionen und Auflandungen auf die Geschiebeführung auswirken. Besonders hervorzuheben ist der generelle Anstieg der Kurve zwischen km 0 und km 45, welcher einer massiven Sohlenerosion entspricht. Nur im Bereich der Mastrilser Rheinauen ist ein starker Abfall festzustellen, der auf die Ablagerungen in den Auen hinweist. Die flussabwärts von km 45 abfallende Kurve korrespondiert mit den Ablagerungen oberhalb der Illmündung. Der Ablagerungstrend zwischen km 45 und km 65 ist auf die Abnahme des Gefälles zurückzuführen, welche teilweise eine Folge der massiven Kiesentnahmen zwischen 1940 und 1972 ist. Oberhalb der Blockrampe Buchs erreicht der Geschiebetransport mit 55'000 bis 65'000 m³ pro Jahr ein Maximum. Davon stammen 55 bis 75% aus der Sohlenerosion des Alpenrheins zwischen km 23 und km 45.

4.2 Geschiebeeinträge aus den Zuflüssen

Mit Hilfe der Eichung des Modells konnte der Geschiebeeintrag aus den Zuflüssen in den Alpenrhein eingegrenzt werden. Über die effektiv eingetragenen Mengen bestehen aber nach wie vor Unsicherheiten (siehe auch folgenden Abschnitt Modellgenauigkeiten). Aus den in Bild 6 dargestellten Geschiebebilanzen bei den Mündungen der Zuflüsse und dem Bodensee sind die angenommenen Eintragsmengen ersichtlich. Im Verlauf der Untersuchungen wurden sie nach unten korrigiert. Mit ein Grund dafür waren verschiedene, aber nicht systematischen Untersuchungen im Einzugsgebiet (Anhang A). Vor allem bei der Plessur dürften die tieferen Werte in Modell 2 eher der Wirklichkeit entsprechen als diejenigen in Modell 1. Bei der Ill dürfte der effektive durchschnittliche Eintrag pro Jahr vermutlich zwischen 20'000 m³ (Modell 1) und 10'000 m³ (Modell 2) liegen.

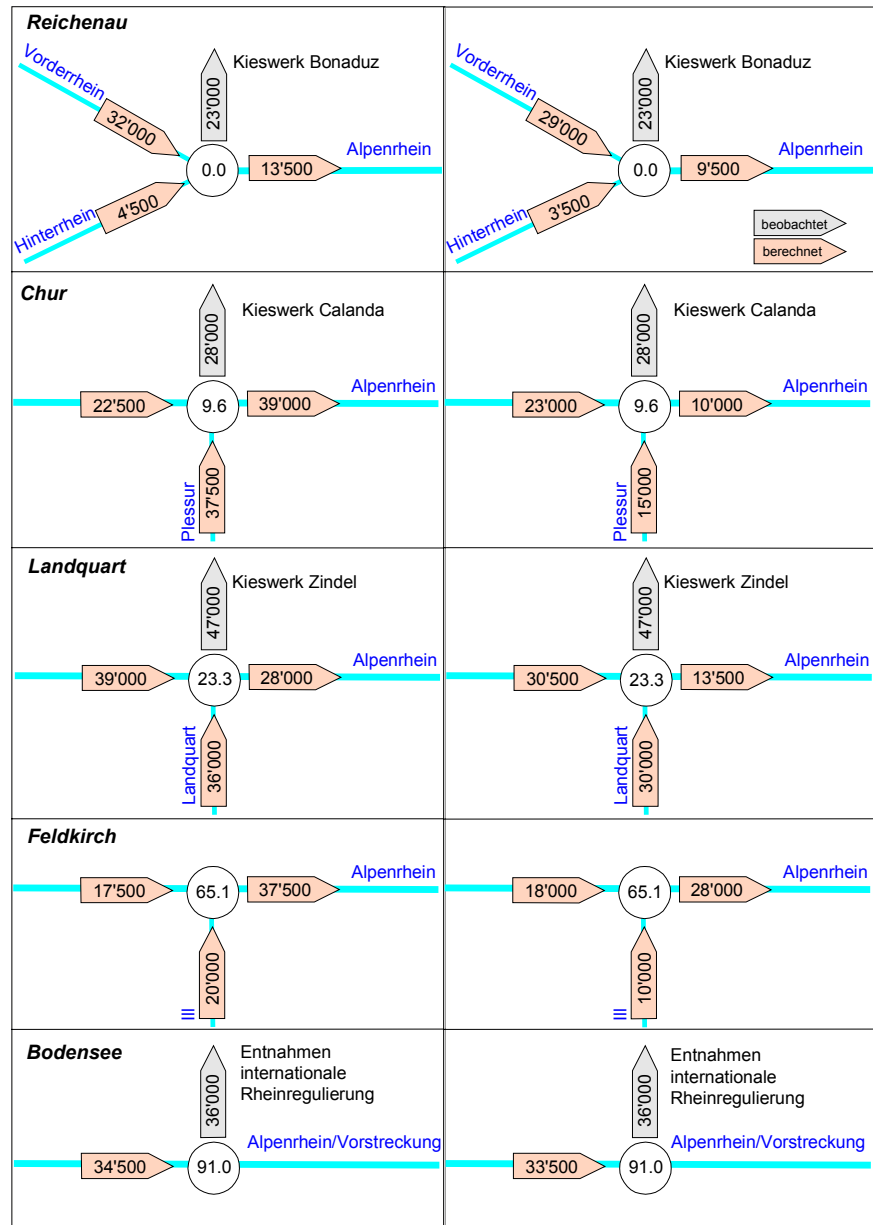


Bild 6: Geschiebebilanzen bei den Mündungen der Zuflüsse und beim Bodensee in m^3 pro Jahr für die Periode von 1974 bis 1995 für das Modell 1 (links) und das Modell 2 (rechts).

4.3 Modellierung

Eichung

Der aktuelle Geschiebehaushalt ist ein Resultat der Eichung des numerischen Modells (Abschnitt 4.1). Während der Eichung werden die gewässer-spezifischen Parameter (Rauigkeitsbeiwerte, Korndurchmesser, Abrieb, aktive Flussbettbreite) solange variiert, bis eine gute Übereinstimmung zwischen berechneten und gemessenen Wasserspiegel- und Sohlenlagen

resultieren. Die Parameter sollten schliesslich aber innerhalb der Bandbreite der beobachteten Werte liegen.

unterschiedliche Modelle

Im Kapitel 1 wurde bereits auf die verschiedenen Modellversionen eingegangen. In dieser Zusammenfassung sind die Resultate der beiden Modellversionen 1 und 2 beschrieben.

Die Sohlenveränderungen der beiden untersuchten Perioden sind sehr unterschiedlich (Bild 5). Dies hängt mit dem Bau der Blockrampen, der unterschiedlichen Länge der Perioden sowie der Tatsache zusammen, dass die Abflüsse in der ersten Periode grösser waren als in der zweiten Periode. Trotzdem kann mit beiden Modellen das unterschiedliche Verhalten der Sohle in den beiden Perioden nachvollzogen werden. In der ersten Periode stimmt das Modell 2 besser mit den Messwerten überein als das Modell 1. In der zweiten Periode ist es gerade umgekehrt. Die relativ geringen Unterschiede bei den Sohlenveränderungen führen aber zu einer vergleichsweise grossen Bandbreite im Geschiebetransport. Ursachen dafür sind die Berechnungsart der hydraulischen Belastung der Sohle und des Geschiebetransportes, die Lagerungsdichte der Sedimente, die modellierten Korndurchmesser und die angenommenen Sedimenteinträge aus den Zuflüssen. Als Illustration dient Bild 2d, welches unter anderem die Unterschiede der modellierten Korndurchmesser d_m und d_{90} der beiden Modelle zeigt. Zum Beispiel konnte für das Erreichen einer möglichst guten Übereinstimmung von gemessener und beobachteter Sohlenlage beim Modell 1 im Gegensatz zum Modell 2 nur eine geringfügige Zunahme des Korndurchmessers d_m bei der Illmündung (km 65) modelliert werden.

Kriterien zu Beurteilung der Modellgenauigkeit

Für die Beurteilung der Güte der Modellierung stehen verschiedene Kriterien zur Verfügung. Dies sind die Vergleiche zwischen:

- den beobachteten und den berechneten Sohlenveränderungen (Bild 5b und c),
- den modellierten und den beobachteten charakteristischen Korndurchmessern (Bild 2d) und
- den „beobachteten“ und berechneten Geschiebefrachten (Bild 6).

Die ersten beiden Kriterien lassen sich relativ einfach überprüfen, weil zahlreiche Messungen zur Verfügung stehen. Das dritte Kriterium kann nur im Bereich der Mündung in den Bodensee überprüft werden, weil dort die Geschiebefrachten bekannt sind. Die berechneten mittleren Jahresfrachten von rund 34'000 m³ stimmen gut mit den Entnahmemengen von 36'000 m³ überein (Bild 6, unten).

Besonders schwierig war die Modellierung der Bündner Strecke mit den Mastrilser Rheinauen und der Verzweigung Oldis sowie des Bereichs der Illmündung mit der folgenden internationalen Rheinstrecke.

Bündner Strecke

In der Bündner Strecke mussten in sämtlichen Modellen für den Korndurchmesser d_m deutlich feinere Werte eingesetzt werden als aus den Sohlenproben resultieren. Eine mögliche Erklärung ist, dass durch das Wehr Reichenau vorwiegend feine Fraktionen transportiert werden und die Kieswerke eher die gröberen Fraktionen entnehmen. Weil aber zwischen Reichenau und den Mastrilser Rheinauen ein grosser Anteil des transportierten Geschiebes aus dem Flussbett erodiert wird, müsste der Korndurchmesser d_m des transportierten Geschiebes vermutlich eher gröber sein als in den Modellen (Bild 2d).

Zusätzlich wird die Modellierung durch die verzweigten Flussabschnitte zwischen der Maschäuser Rüfi und Landquart erschwert, in welchen in der ersten Periode eine Auflandung und in der zweiten Periode eine Eintiefung beobachtet wurde. Die Ursache(n) dafür konnte bis anhin nicht geklärt werden und erschwert Aussagen über die zukünftigen Prozesse. Zudem waren bis vor kurzem auch keine Grundlagen für die Erfassung des Geschiebehaushaltes solcher Flussmorphologien vorhanden.

internationale Rheinstrecke

Im Bereich der Illmündung und der folgenden Strecke reagieren die Modelle sensitiv auf Parameteränderungen, insbesondere beim mittleren Korndurchmesser d_m und der Berechnungsart der hydraulischen Belastung.

5 Entwicklung des Geschiebehaushaltes und der Sohlenlage

Der zukünftige Geschiebehaushalt und die damit zusammenhängende Veränderung der Sohlenlage können mit Hilfe von Simulationen bestimmt werden. Entsprechende Prognoserechnungen mit denselben Randbedingungen bezüglich Geschiebeeinträge und Abflussregime wie in der Periode von 1974 bis 1995 wurde mit den verschiedenen Modellen durchgeführt (Bild 7). Der Vergleich mit Bild 5 zeigt, dass in den selben Flussstrecken wie zwischen 1974 und 1995 mit Auflandungen und Erosionen zu rechnen ist. Allerdings nehmen die Sohlenveränderungen pro Jahr und damit auch die absoluten Werte etwas ab. Deshalb wird im Durchschnitt auch etwas weniger Geschiebe transportiert als in der Periode von 1974 bis 1995. Treten in den nächsten Jahren eher grössere Abflüsse als zwischen 1974

und 1995 auf, ist mit einer Beschleunigung der Prozesse zu rechnen, im Fall von kleineren Abflüssen mit einer Verzögerung.

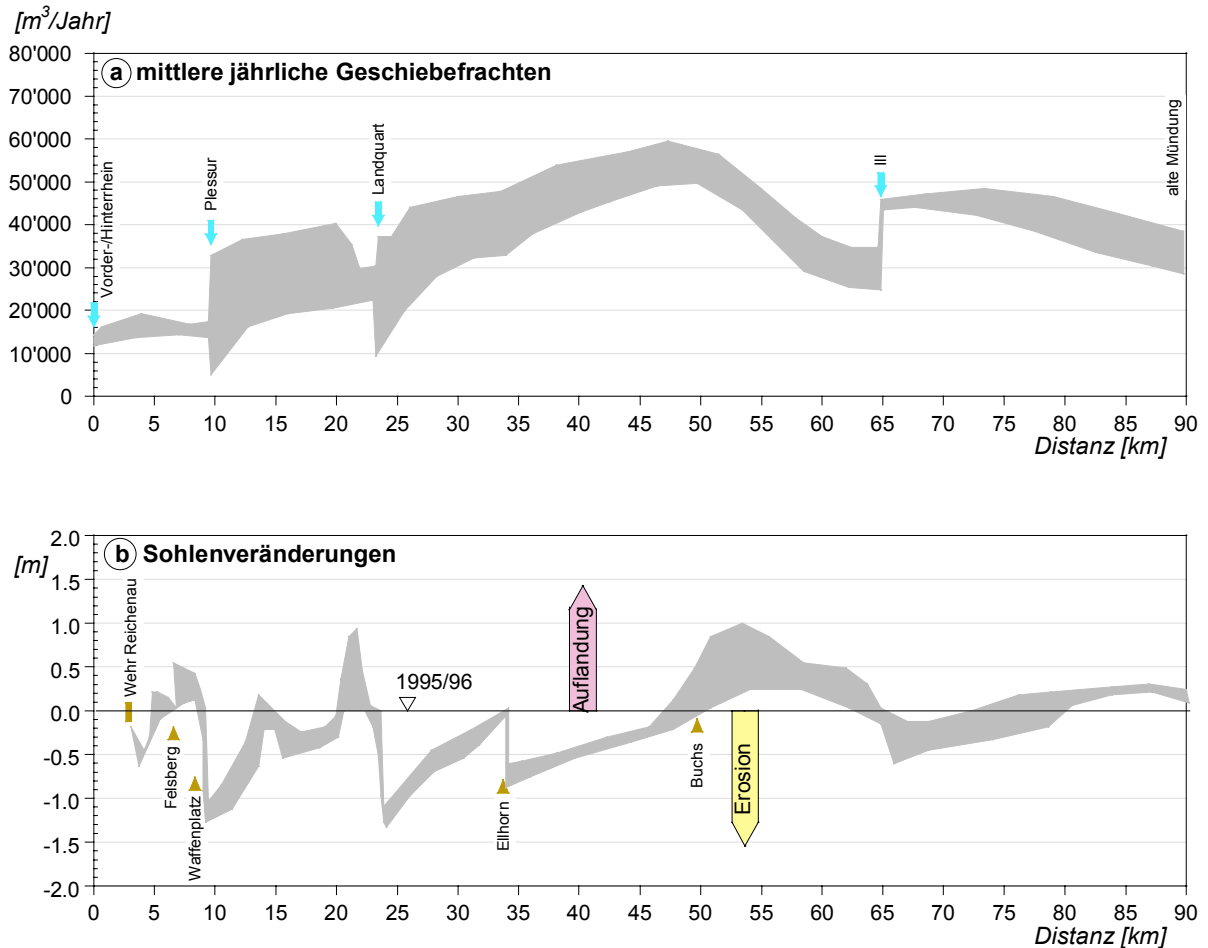


Bild 7: Bandbreiten der durchschnittlichen jährlichen Geschiebefrachten (a) und Sohlenveränderungen (b) in den nächsten 25 Jahren für Bedingungen wie in der Periode von 1974 bis 1995. (Resultate von Simulationen mit verschiedenen Modellen. Wegen der Verwendung von gleitenden Mitteln über 5 Querprofilen sind die Sohlenveränderungen bei den Blockrampen nicht Null.)

Mit beiden Modellen wird das gleiche grossräumige Verhalten prognostiziert. Oberhalb von Buchs und auf einer begrenzten Strecke unterhalb der Illmündung werden mehrheitlich Erosionen vorausgesagt. Eine Ausnahme sind die Mastrilser Rheinauen. Die Blockrampen bilden Fixpunkte. Zwischen Buchs und der Illmündung sowie in der unteren Hälfte der internationalen Rheinstrecke muss mit Auflandungen gerechnet werden. Die Bandbreite der Auflandungen oberhalb der Illmündung ist vergleichsweise gross und hängt in erster Linie mit den unterschiedlich gewählten Geschiebeeinträgen der Bündner Zuflüsse und den modellierten Korndurchmessern in dieser Auflan-

dungsstrecke zusammen. Bei den Geschiebefrachten ist die Bandbreite mit derjenigen der Eichperiode vergleichbar.

6 Massnahmen

6.1 Allgemeines

Gemäss den Ausführungen in den Abschnitten 4 und 5 ist der Alpenrhein nicht im Gleichgewicht. Je nach Strecke tieft sich das Flussbett ein oder landet auf. Inwieweit solche Erosions- oder Auflandungsprozesse unerwünscht sind, hängt von der Zielvorstellung über die zukünftige Morphologie ab, das heisst vom Längen- und Querprofil respektive den Gerinneformen (ebene Sohle, alternierende Bänke, Verzweigungen oder Mäander), welche angestrebt werden sollen. Die ökologischen Verhältnisse im Flussbett werden von diesen Grundrissformen geprägt. Bei der Formulierung der Zielvorstellung sind auch Randbedingungen wie Schutzziele und angestrebte Abflusskapazität, Kies- und Energiegewinnung, Grundwasserverhältnisse sowie Fundamentstiefen von Schutzbauten oder Brücken zu beachten. Und nicht zuletzt müssen Raumbedarf und finanzielle Aufwendungen mitberücksichtigt werden. Erst wenn die Zielvorstellung formuliert ist, können die Auswirkungen von Massnahmen umfassend beurteilt werden.

Zur Veränderung des Geschiebehaushaltes und der Morphologie des Alpenrheins stehen folgende Massnahmen im Vordergrund:

- (1) Veränderung des Geschiebeeintrages aus den Zuflüssen
- (2) Blockrampen³
- (3) Veränderung der Flussbettbreite (Aufweitungen)
- (4) Kiesentnahmen

Die Massnahme (2) kann bei unerwünschten Erosionsprozessen, die Massnahme (4) bei unerwünschten Auflandungsprozessen und die Massnahmen (1) und (3) bei beiden Prozessen eingesetzt werden. Die Gerinneformen (eben, alternierende Bänke, verzweigt oder Mäander) können mit Mass-

³ In neuerer Zeit werden auch Alternativen zu Blockrampe wie Steilstrecken und Grobkornanreicherungen diskutiert, welche gegenüber Blockrampen ökologische Vorteile haben. Ein Beispiel dafür ist die geplante Steilstrecke bei Chur.

nahme (3) am effizientesten verändert werden. Denkbar und je nach Zielvorstellung zwingend sind Kombinationen dieser Massnahmen⁴.

In den letzten Jahren wurden die Auswirkungen von verschiedenen Massnahmen auf den Geschiebehaushalt studiert. Weil sich die Untersuchungen auf Teilstrecken beschränkten, mit unterschiedlichen Modellen durchgeführt wurden und weil jeweils spezifische Fragestellungen im Vordergrund standen, ist eine umfassende Beurteilung kombinierter Massnahmen nicht möglich. Die prinzipiellen Prozesse, welche durch die einzelnen Massnahmen ausgelöst werden, können aber trotzdem diskutiert werden. Diese Prozesse werden für die vier beschriebenen Massnahmen in den folgenden Abschnitten erläutert sowie mit konkreten, bereits berechneten Beispielen illustriert.

Die bisherigen Erfahrungen zeigten, dass die Deckschicht (Abpflasterung) einen grossen Einfluss auf die Erosionsprozesse hat. In den konkreten Beispielen sind Deckschichteffekte näherungsweise berücksichtigt⁵. Bei der allgemeinen Erläuterung der Prozesse wird aber auf dieses Phänomen nicht näher eingegangen.

Alle Beispiele, mit Ausnahme der Aufweitung am Illspitz, stammen aus Untersuchungen zwischen 1997 und 1998, bei welchen die Modellversion 1 eingesetzt wurde. Weil die Modellversionen keinen grundsätzlichen Einfluss auf die Prozesse haben, wurde im Rahmen dieser Zusammenfassung darauf verzichtet, alle Beispiele mit beiden Modellversionen zu simulieren. Aus diesem Grunde können Bandbreiten wie in Bild 5 und 7, welche durch die unterschiedlichen Modellversionen respektive Geschiebeeinträge resultieren, nicht dargestellt werden.

⁴ Auf Laufverlängerungen oder -verkürzungen, wie sie bei der Realisierung der Durchstiche bei Fussach und Diepoldsau durchgeführt wurden, wird nicht näher eingegangen, weil sie kaum realistische Varianten sind.

⁵ Mit dem eingesetzten Zweikornmodell können die Deckschicht- und Sortiereffekte nur näherungsweise modelliert werden. Für eine verbesserte Modellierung dieser Prozesse müsste ein sogenanntes Mehrkornmodell eingesetzt werden, wie es heute an grösseren Flüssen im In- (Aare, Rhone) und Ausland (Donau, Niederrhein, Salzach) die Regel ist.

6.2 Veränderungen des Geschiebeeintrages aus den Zuflüssen

Allgemeines

Das Geschiebeaufkommen in den Zuflüssen des Alpenrheins kann sich langfristig gegenüber der Periode von 1974 bis 1995 ändern. Ausschlaggebend sind zukünftige Verbauungen und Kiesentnahmen im Einzugsgebiet der Zuflüsse. Die Auswirkungen einer Reduktion oder einer Erhöhung der Kiesentnahmen im Alpenrhein, im Mündungsbereich der Zuflüsse Vorder- und Hinterrhein sowie Plessur und Landquart ist für den Geschiebehaushalt des Alpenrheins vergleichbar mit einer Veränderung des Geschiebeaufkommens im Einzugsgebiet der Zuflüsse.

Die Ausdehnung der Auswirkungen unterschiedlicher Geschiebeeinträge hängt von der betrachteten Zeitspanne ab. Bei kurzer Betrachtungsdauer beschränken sich die Auswirkungen in der Regel auf den Nahbereich, bei langer Betrachtungsdauer sind die Auswirkungen grossräumig. Bei einer Verminderung des Geschiebeeintrages nehmen die Erosionsraten zu und die Auflandungsraten ab; bei einer Steigerung des Geschiebeeintrages nehmen die Erosionsraten ab und die Auflandungsraten zu. Eine Veränderung des Geschiebeeintrages kann also sowohl zur Steuerung von Erosionen als auch von Auflandungen dienen. In bestimmten Fällen kann auch eine Trendwende der Prozesse erreicht werden: Strecken, die sich eintiefen, können auflanden und umgekehrt.

Exemplarisch für alle Zuflüsse werden im folgenden zwei unterschiedliche Geschiebeeinträge in den Alpenrhein unterhalb von Landquart und von der Ill diskutiert. Die Auswahl ist rein zufällig. Im ersten Beispiel wird gegenüber den Verhältnissen am Ende der Periode von 1974 bis 1995 ein erhöhter Geschiebeeintrag angenommen, im zweiten Beispiel ein kleinerer Eintrag. Damit die unterschiedlichen Prozesse deutlicher zum Ausdruck kommen, wurden extreme Beispiele gewählt.

Beispiel:

*erhöhter Eintrag in
den Alpenrhein
unterhalb von
Landquart⁶*

Unterhalb von Landquart werden im Durchschnittsjahr höchstens 40'000 m³ Geschiebe pro Jahr transportiert (Fall A in Bild 8). Möglich wäre auch ein höherer Eintrag in den Alpenrhein unterhalb Landquart. Im Maximum dürfte er bei 160'000 m³ liegen (Fall B). Dieser erhöhte Eintrag kann interpretiert werden als eine Veränderung (1) des Geschiebedurchganges durch die Mastrilser Rheinauen, (2) des Geschiebeaufkommens aus der Landquart sowie (3) der Geschiebeentnahmen im Bereich der Landquartmündung.

⁶ Die Berechnungen wurden mit dem Modell 1 durchgeführt.

Bild 8b zeigt, dass im Fall A ($40'000 \text{ m}^3$) in den nächsten 30 Jahren zwischen km 25 und km 46 mit Erosionen zu rechnen ist und auf der folgenden Strecke bis zur Illmündung bei km 65 mit Auflandungen. Im Fall B sind zwischen km 25 und km 65 durchwegs Auflandungen zu erwarten. Flussabwärts von km 55 unterscheiden sich die Sohlenveränderungen aber nicht mehr. Dieses Verhalten hängt damit zusammen, dass im Fall A der Geschiebetransport wegen der Erosionen zwischen km 25 und km 55 zunimmt, im Fall B aber wegen den Ablagerungen abnimmt (Bild 8a). Erosions- und Ablagerungsprozesse respektive das Flussbett als Geschiebespeicher regulieren den Geschiebetransport. Bei längeren Betrachtungsperioden als in diesen Simulationen würden sich die unterschiedlichen Geschiebeeinträge bei Landquart auch auf die Strecke unterhalb der Illmündung auswirken. Zudem kann nicht ausgeschlossen werden, dass bei einem Mehrkornmodell anstelle der verwendeten Zweikornmodelle andere Differenzen resultieren würden.

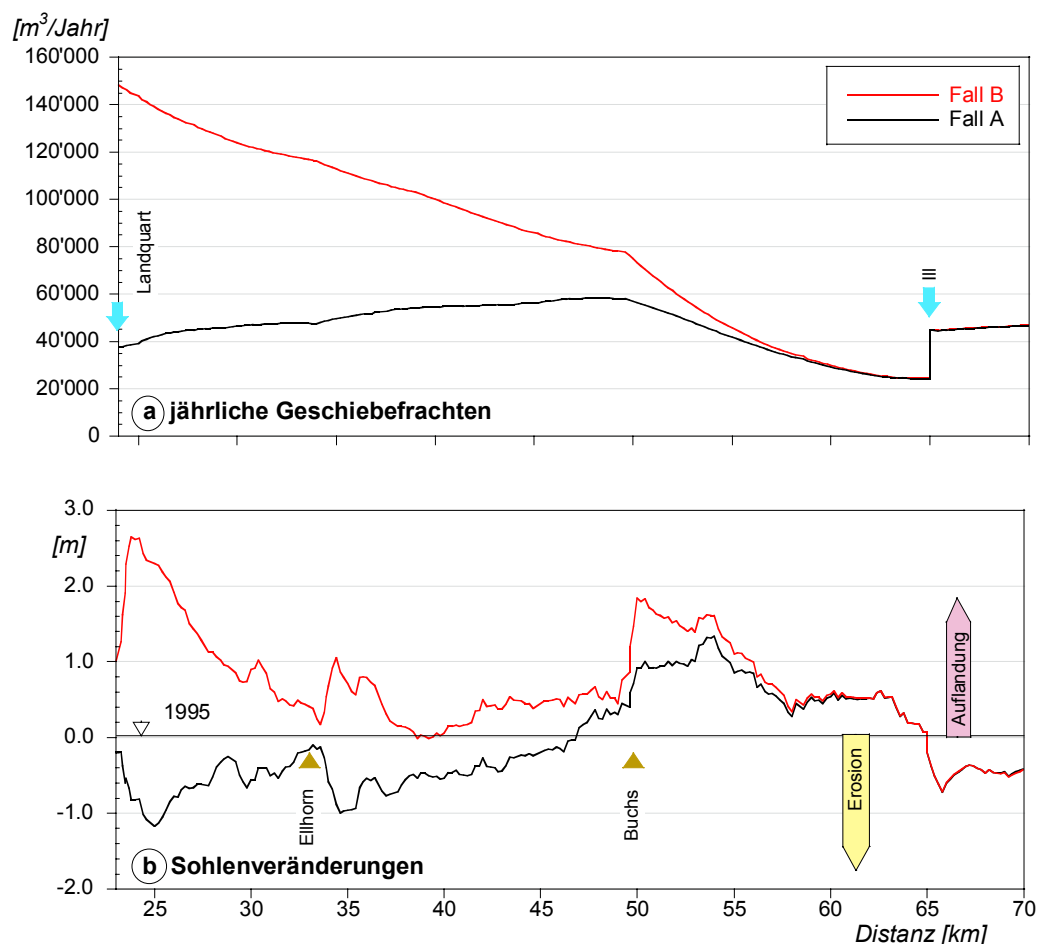


Bild 8: Auswirkungen von unterschiedlichen Geschiebeeinträgen auf den Geschiebetransport und die Sohlenveränderungen zwischen der Mündung der Landquart und der Ill in einer Periode von 30 Jahren (siehe auch Text).

Sinngemäss können diese Resultate auch auf die übrigen Zuflüsse und die angrenzenden Strecken im Alpenrhein übertragen werden.

Beispiel:

kein Eintrag in den Alpenrhein aus der Ill⁷

Im Beispiel mit einem geringeren Geschiebeeintrag aus der Ill als 20'000 m³ pro Jahr (Fall A) wird wiederum ein Extremfall betrachtet, nämlich kein Eintrag (Fall B). Es wird davon ausgegangen, dass sämtliches Geschiebe im Einzugsgebiet der Ill zurückgehalten wird. Aus Bild 9 geht hervor, dass bei einem unterbundenen Eintrag aus der Ill mit grösseren Erosionen zu rechnen ist. Auch die Ausdehnung der Erosionsstrecke nimmt zu. Entsprechend sind die Auflandungen im Fall B geringer als im Fall A.

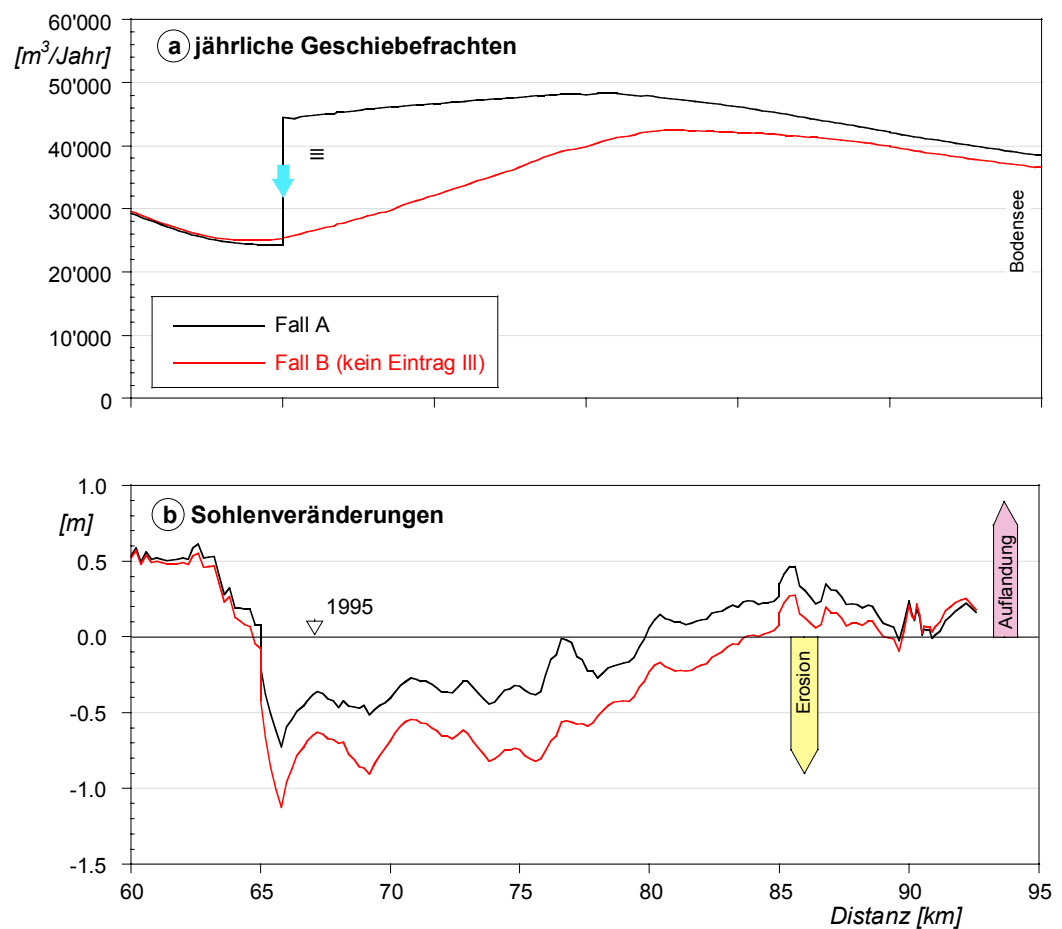


Bild 9: Auswirkungen von unterschiedlichen Geschiebeeinträgen aus der Ill auf den Geschiebetransport und die Sohlenveränderungen zwischen der Mündung der Ill und dem Bodensee in einer Periode von 30 Jahren (siehe auch Fussnote 7).

⁷ Die Berechnungen wurden mit dem Modell 1 durchgeführt. Mit dem Modell 2 würden unterhalb der Illmündung (Bild 9) geringere Erosionen resultieren als mit dem Modell 1.

6.3 Blockrampen

Allgemeines

In einem sich eintiefenden Fluss sind Blockrampen Fixpunkte. Sie können in ihrem Oberwasser Erosionsprozesse begrenzen. Eintiefungen sind aber weiterhin möglich. Im Vergleich zum unverbauten Fluss wird wegen der reduzierten Erosion weniger Geschiebe aus dem Flussbett mobilisiert und in die Strecke unterhalb der Blockrampe eingetragen. Unmittelbar nach dem Bau einer Blockrampe kann, je nach Einbauhöhe, temporär sogar alles Geschiebe flussaufwärts des Bauwerkes abgelagert werden. Die Strecke mit Geschiebeablagerungen ist räumlich begrenzt. Ihre Ausdehnung hängt in erster Linie vom Gefälle des Flussbettes und von der Höhendifferenz zwischen der Überfallkrone der Blockrampe und der aktuellen Sohlenlage ab. Wegen des reduzierten oder temporär gar unterbundenen Geschiebetransportes über die Blockrampe ist im Unterwasser mit einer verstärkten Erosion zu rechnen. Im Einflussbereich flussaufwärts einer Blockrampe stellt sich relativ schnell eine Sohlenlage ein, welche den neuen Verhältnissen angepasst ist.

Beispiel:

Blockrampe Ellhorn

Die Prozesse, welche durch eine Blockrampe induziert werden, sind in Bild 10 am Beispiel der Blockrampe Ellhorn dargestellt. Sie wurde im Jahre 1972 beim Kilometer 33.9 höher eingebaut als die damalige Sohlenlage. In der Periode von 1974 bis 1988 waren deshalb unmittelbar flussaufwärts der Blockrampe auf einer Länge von rund 2 km Auflandungen zu verzeichnen. In der anschliessenden Strecke hingegen tiefte sich das Flussbett ein, und auch flussabwärts der Blockrampe waren Erosionen zu verzeichnen.

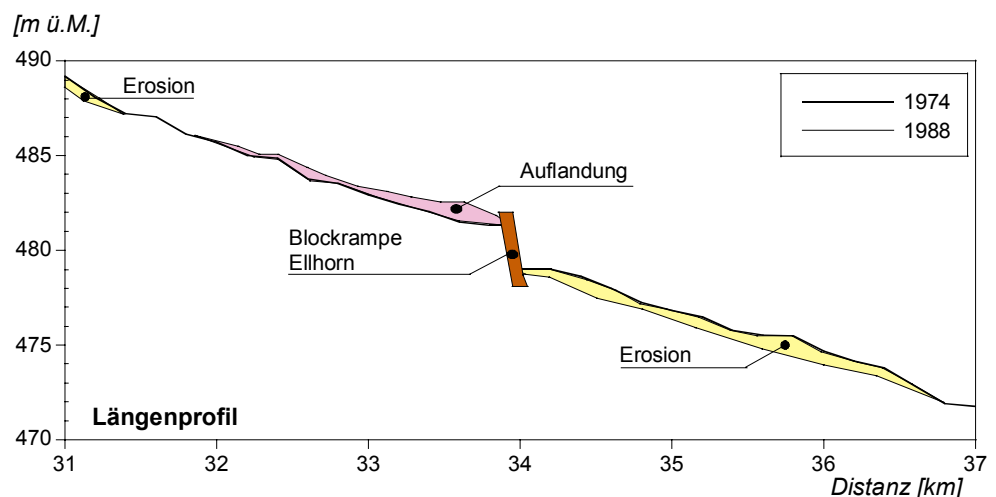


Bild 10: Einfluss der Blockrampe Ellhorn auf das Längensprofil.

Beispiel:

4 Blockrampen zwischen Landquart und dem Ellhorn⁸

Eine Möglichkeit, die Eintiefungstendenzen unterhalb der Landquartmündung bis zum Ellhorn zu begrenzen, ist der Bau von vier zusätzlichen Blockrampen. In einer Simulation über 30 Jahre wurden die Auswirkungen dieser Blockrampen (Fall B, Bild 11) auf den Geschiebehaushalt und die Sohlenveränderungen bestimmt. Die Resultate werden mit der zukünftigen Entwicklung ohne Massnahmen in den nächsten 30 Jahren verglichen (Fall A, Bild 11).

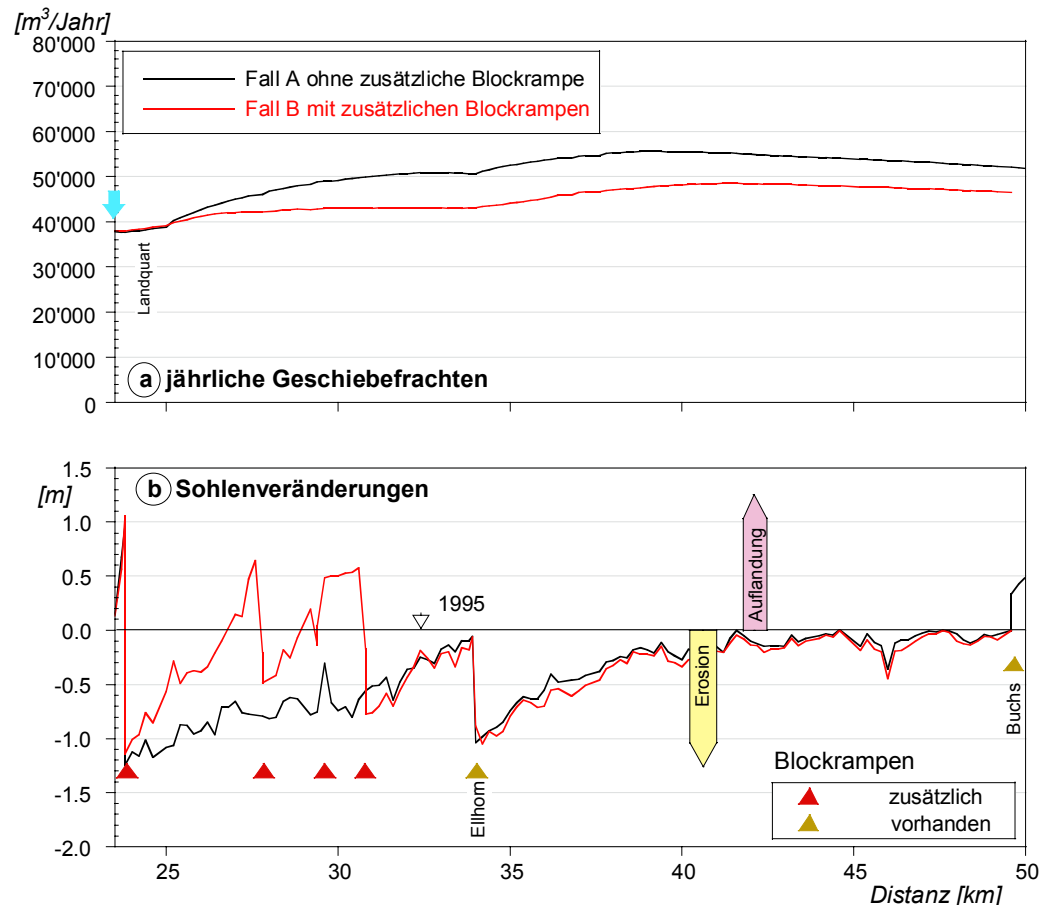


Bild 11: Einfluss von 4 Blockrampen zwischen Landquart und Sargans auf den Geschiebetransport und die Sohlenveränderungen in einer Periode von 30 Jahren.

Weil die Blockrampen in der Simulation höher als die heutige Sohlenlage eingebaut wurden, können oberhalb der Bauwerke Auflandungen beobachtet werden (Bild 11b). Diesen Auflandungen ist der übergeordnete Erosionsprozess überlagert. Aber mit den zusätzlichen Blockrampen liegt das Flussbett immer höher als im Fall A. Einzig am Fuss der ersten und vierten Block-

⁸ Die Berechnungen wurden mit dem Modell 1 durchgeführt.

rampe liegt die Sohle in beiden Fällen etwa auf dem gleichen Niveau. Die dargestellten Sohlenveränderungen stellen noch keinen Gleichgewichtszustand dar. Der Erosionsprozess wird auch nach 30 Jahren noch fortschreiten.

Weil die zusätzlichen Blockrampen die Erosionen reduzieren und begrenzte Auflandungen entstehen, ist der Geschiebedurchgang beim Ellhorn kleiner als ohne diese Massnahmen (Bild 11a). Deshalb ist flussabwärts der Blockrampe Ellhorn mit tendenziell grösseren Erosionen zu rechnen als ohne Massnahmen. Der geringe Unterschied bei den berechneten Sohlenveränderungen hängt mit der Deckschichtbildung und vermutlich auch mit deren Modellierung (Zweikornmodell) zusammen.

6.4 Veränderung der Flussbettbreite

Allgemeines

Mit einer Veränderung der Flussbettbreite kann die Geschiebetransportkapazität (=Transportvermögen) und damit die Entwicklung der Sohlenlage beeinflusst werden. Wird der Alpenrhein beispielsweise zwischen den Mündungen der Landquart und der Ill verbreitert, so kann weniger Geschiebe transportiert werden. Bei einer Einengung nimmt das Geschiebetransportvermögen zu. Diese Zusammenhänge sind auch aus Bild 12a ersichtlich. Im Bereich der internationalen Rheinstrecke hat eine Breitenänderung auch eine neue Aufteilung des Abflusses im Vorland und im Hauptgerinne zur Folge, wodurch das Transportvermögen ebenfalls beeinflusst wird.

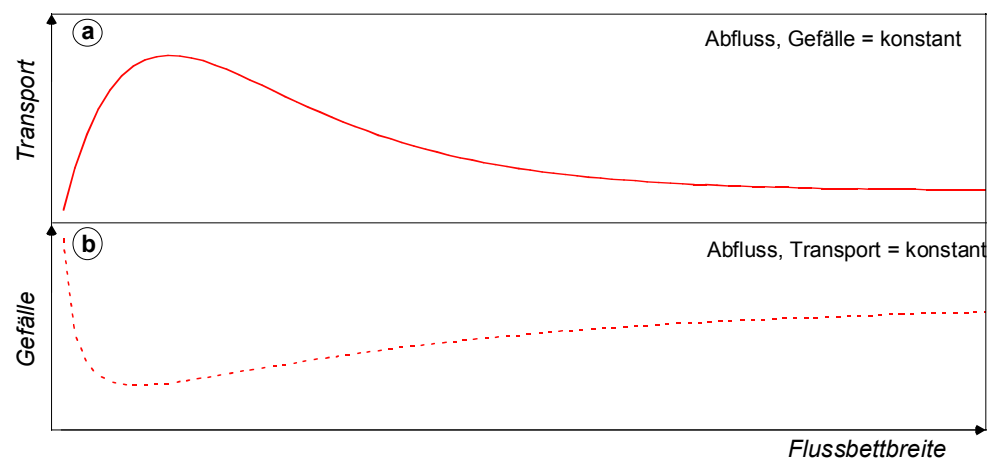


Bild 12: Einfluss der Flussbettbreite auf die Geschiebetransportkapazität (a) und das Gleichgewichtsgefälle (b).

Eine Erhöhung des Transportvermögens bewirkt grössere Erosions- und kleinere Auflandungsraten; eine Abnahme des Transportvermögens kleinere Erosions- respektive grössere Auflandungsraten. Es ist auch möglich, dass mit einer Breitenänderung ein Erosions- respektive Auflandungsprozess gestoppt oder gar der eine Prozess in den anderen überführt werden kann. Inwieweit solche Prozesse mit Breitenveränderungen beeinflusst werden können, hängt von den lokalen Verhältnissen ab. Um substantielle Änderungen im Geschiebehaushalt zu erreichen, sind häufig Breitenänderungen in der Grössenordnung der heutigen Gerinnebreite notwendig.

Die Veränderung des Transportvermögens als Folge einer Umgestaltung der Flussbettbreite wird längerfristig mit einer Anpassung des Gefälles kompensiert. Bei einer Einengung nimmt das Gefälle ab, bei einer Aufweitung zu (Bild 12b). Dies hängt damit zusammen, dass ein Fluss ein Transportvermögen anstrebt, welches dem Geschiebeeintrag entspricht. Am Beispiel der Flussaufweitung, welche in Bild 13 dargestellt ist, können diese Prozesse erklärt werden:

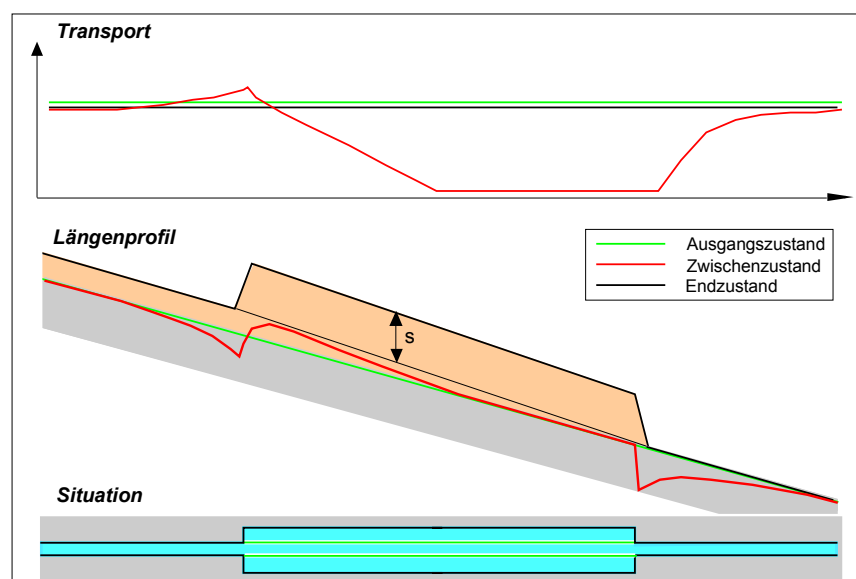


Bild 13: Auswirkungen einer Flussaufweitung auf den Geschiebetransport und das Längensprofil.

Am Anfang setzt flussaufwärts der Aufweitung eine Erosion ein. In der Aufweitung wird Geschiebe abgelagert. Im Extremfall bleiben dort alle Sedimente liegen. Unterhalb der aufgeweiteten Strecke wird Geschiebe aus der Sohle mobilisiert und der Fluss tiefte sich temporär ein (rote Linie in Bild 13, Zwischenzustand). Diese Prozesse schreiten fort, bis sich die Sohlenlage in der Aufweitung den neuen Breitenverhältnissen angepasst hat und die eingetragene Geschiebemenge durch die Aufweitung durchtransportiert

werden kann. In der Aufweitung selbst und flussaufwärts davon stellt sich schliesslich wegen des steileren Gefälles in der Aufweitung eine höhere Sohlenlage ein. Am grössten sind die Auflandungen aber in der Aufweitung, weil sich aus hydraulischen Gründen der sogenannte vertikale Versatz s einstellt.

Die Sohlenveränderungen in einer Aufweitung und den angrenzenden Strecken können von übergeordneten Erosions- oder Auflandungsprozessen überlagert sein und dadurch verstärkt werden. Die Erosionen unterhalb und oberhalb der Aufweitung sind temporäre Erscheinungen. Das Ausmass kann aber beträchtlich sein und hängt unter anderem von den Abmessungen der Aufweitung und den umgesetzten Geschiebefrachten ab. Die temporären Erosionen flussabwärts einer Aufweitung können minimiert werden, wenn die Auflandung in der Aufweitung künstlich vorweggenommen und nicht dem Fluss überlassen wird. Dies kann beispielsweise erreicht werden, indem kiesiges Material aus den Ufern in den Fluss gestossen wird. Je nach Abmessungen einer Aufweitung sind dafür erhebliche Geschiebemengen erforderlich. Bei einer Aufweitung des Alpenrheins von 100 auf 200 m auf einer Länge von 1 km und einem vertikalen Versatz von 1 m sind es 200'000 m³, was mehreren Jahresfrachten entspricht.

Die Flussbettbreite prägt die Morphologie entscheidend. Je breiter ein Flussbett ist, desto eher bilden sich Kiesbänke, Kolke und Furten. Dadurch nimmt die Vielfalt bezüglich Abflusstiefe, Fliessgeschwindigkeit oder Kornverteilung des Sohlenmaterials zu. Zu beachten gilt es allerdings, dass die Kolke beträchtliche Ausmasse annehmen können und diese in Aufweitungen durchaus tiefer als die ursprüngliche Sohlenlage liegen können.

Die in den folgenden Abschnitten beschriebenen zwei Beispiele zeigen die Auswirkungen von Flussaufweitungen in einer Erosionsstrecke und in einer Auflandungsstrecke auf den Geschiebehaushalt. Es handelt sich um Aufweitungen flussabwärts der Landquart (Erosionsstrecke) und flussaufwärts der Ill (Auflandungsstrecke).

Beispiel Erosionsstrecke:

Aufweitung zwischen Landquart und Ellhorn⁹

Die Erosionen unterhalb der Landquartmündung können auch mit einer Aufweitung des Flussbettes begrenzt werden. Im Beispiel (Bild 14) wurde das Flussbett zwischen km 24.5 und km 27.0 innerhalb von 15 Jahren etappenweise von 90 auf maximal 230 m verbreitert. Weiter wurde angenommen, dass während den ersten 13 Jahren aus der Aufweitung zusätzlich

⁹ Die Berechnungen wurden mit dem Modell 1 durchgeführt.

340'000 m³ Geschiebe aus der Seitenerosion eingetragen und während den ersten 15 Jahren die Kiesentnahmen an der Landquartmündung eingestellt werden. Mit Fall A wird das Szenarium ohne Aufweitung und mit Fall B das Szenarium mit Aufweitung und zusätzlichem Geschiebeeintrag bezeichnet.

Im Bereich der Aufweitung sind nach einer simulierten Zeitspanne von 15 Jahren markante Auflandungen zu verzeichnen und flussabwärts der Aufweitungen geringe Erosionen. Dies hängt mit der Bildung des vertikalen Versatzes s_v , dem zusätzlichen Geschiebeeintrag aus der Aufweitung und der Einstellung der Kiesentnahmen in den ersten 15 Jahren zusammen. Entsprechend hoch sind die transportierten Geschiebefrachten (Bild 14a).

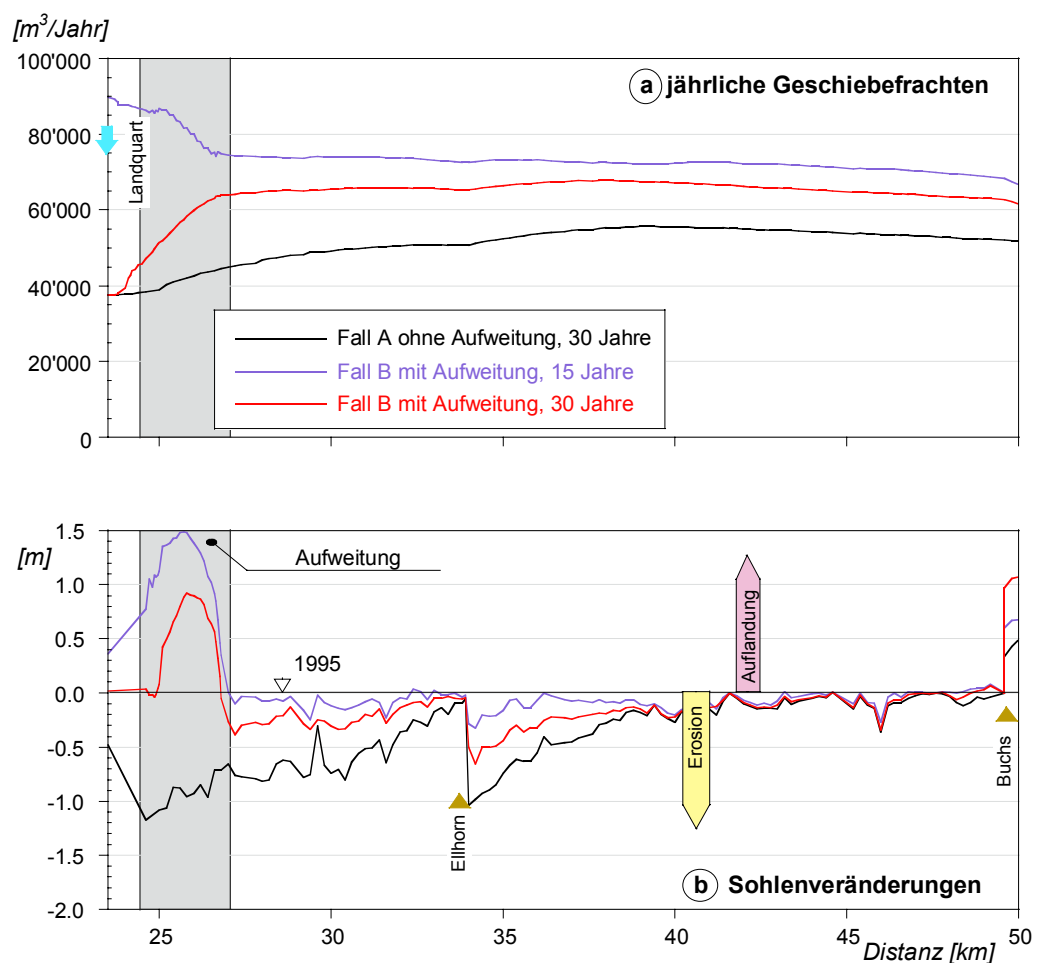


Bild 14: Einfluss einer 2.5 km langen Aufweitung unterhalb Landquart auf den Geschiebetransport und die Sohlenveränderungen in einer Periode von 30 Jahren.

Werden nach 15 Jahren die Kiesentnahmen wieder aufgenommen, ist der Geschiebeeintrag in den Alpenrhein unterhalb Landquart und damit in die Aufweitung kleiner als das Transportvermögen in der Aufweitung. Deshalb wird dort in der zweiten Hälfte der Simulation Geschiebe aufgenommen und

die Sohle tieft sich gegenüber dem Höchststand nach 15 Jahren wieder ein, liegt aber nach 30 Jahren immer noch höher als die Ausgangslage und als im Fall ohne Aufweitung. Flussaufwärts der Aufweitung ist die Sohle nach 30 Jahren praktisch identisch mit der Ausgangslage. Flussabwärts der Aufweitung sind in den zweiten 15 Jahren vermehrt Erosionen zu beobachten.

Unterhalb der Schwelle Ellhorn wird die Erosion mit der Aufweitung (Fall B) gegenüber dem Referenzfall A deutlich reduziert, weil im Fall B deutlich mehr Geschiebe in die Strecke unterhalb vom Ellhorn eingetragen wird. Der Grund dafür ist, dass im gewählten Aufweitungsszenario durch die Seitenerosion zusätzlich grosse Geschiebemengen eingetragen werden, und dass wegen dem grossen Transportvermögen (Erosionsstrecke!) in der Aufweitung nur begrenzte Auflandungen zu erwarten sind. Es bildet sich lediglich der vertikale Versatz s. Mit einem steileren Gefälle ist nicht zu rechnen.

Beispiel Auflandungsstrecke:

Aufweitung beim Illspitz¹⁰

Im Beispiel Aufweitung Illspitz wurde eine Verbreiterung des Alpenrheins von heute rund 115 m auf maximal 250 m auf einer 3 km langen Auflandungsstrecke oberhalb der Illmündung untersucht. In den Berechnungen über 23 Jahre wurden unter anderem folgende zwei Szenarien modelliert:

- plötzliche Verbreiterung ohne zusätzlichen Geschiebeeintrag (Fall B)
- sukzessive Verbreiterung über 23 Jahre mit einem zusätzlichen Geschiebeeintrag von 380'000 m³ aus der Seitenerosion (Fall C).

Die Resultate dieser Berechnungen werden mit dem Szenario keine Aufweitung (Fall A) verglichen (Bild 15).

Am oberen Ende der Aufweitung ist der vertikale Versatz deutlich erkennbar (Bild 15 unten). Weil sich in der vergleichsweise langen Aufweitung ein steileres Gefälle ausbildet, stellt sich auch flussaufwärts der Aufweitung eine höhere Sohlenlage ein. Am unteren Ende der Aufweitung ist der vertikale Versatz weniger deutlich erkennbar. Dies hängt mit der Erosionsstrecke unterhalb der Illmündung, den bereits heute unterschiedlichen Bettbreiten unter- und oberhalb der Illmündung und der Abflusszunahme durch die Ill zusammen.

Die Ablagerungen in der Aufweitung und flussaufwärts davon führen zu einer Verstärkung der Erosionstendenz unterhalb der Illmündung. Mit dem

¹⁰ Die Berechnungen wurden mit dem Modell 2 durchgeführt. Mit dem Modell 1 würden oberhalb der Illmündung (Bild 15) höhere und unterhalb tiefere Sohlenlagen resultieren als mit dem Modell 2.

zusätzlichen Geschiebeeintrag in der verbreiterten Strecke (Fall C) wird die Ausdehnung und die Tiefe der Erosion im Vergleich zur plötzlichen Verbreiterung (Fall B) begrenzt. Dadurch stellt sich auch in der Aufweitung eine leicht höhere Sohlenlage ein. Im Fall C kann die zusätzliche Erosion gegenüber dem Referenzfall A jedoch nicht verhindert werden, weil die Aufweitung zu einer Rückwärtsauflandung und damit zu einem Geschiebedefizit flussabwärts der Illmündung führt.

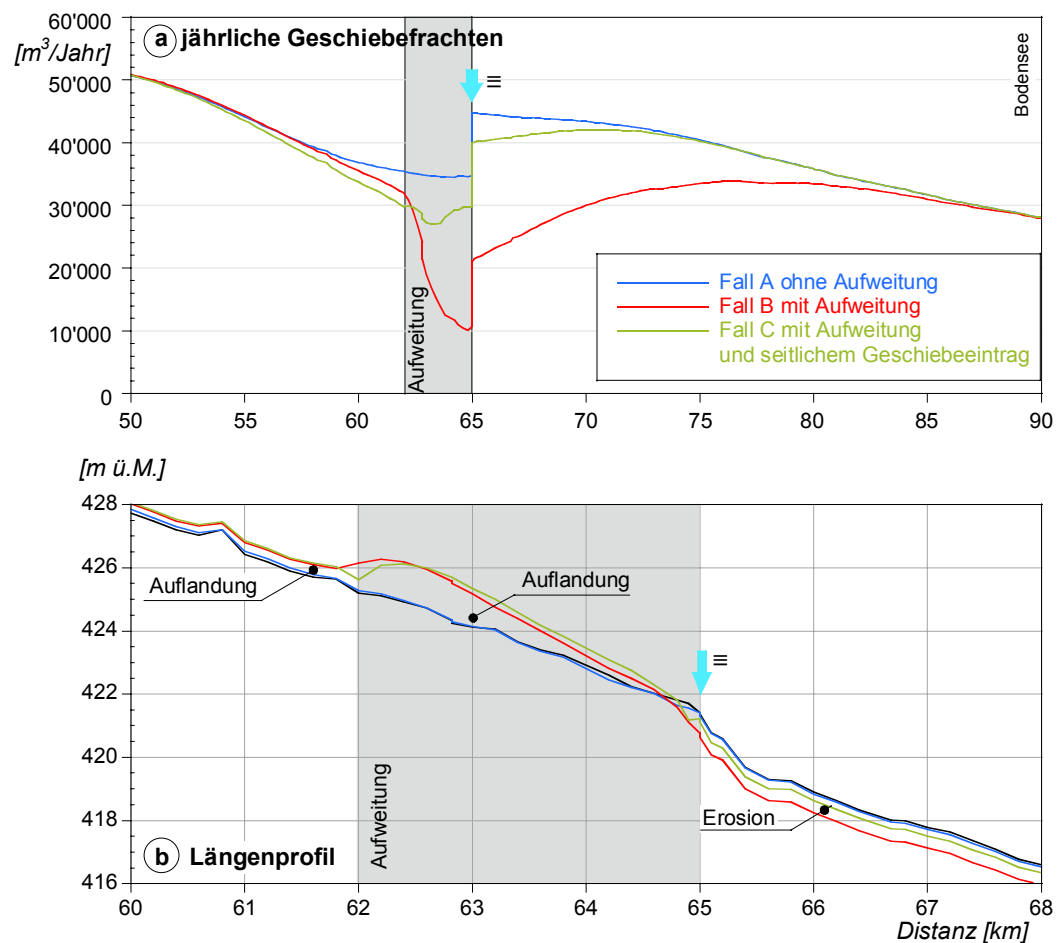


Bild 15: Einfluss einer rund 3 km langen Aufweitung beim Illspitz auf den Geschiebetransport und die Sohlenveränderungen in einer Periode von 23 Jahren (siehe auch Fussnote 10).

Vergleich der zwei Beispiele mit den Aufweitungen

Die beiden Beispiele zeigen deutlich, dass sich Aufweitungen in Erosions- und Auflandungsstrecken unterschiedlich auf den Geschiebehaushalt auswirken. Im ersten Beispiel mit der Aufweitung in der Erosionsstrecke bildet sich nur der vertikale Versatz, flussaufwärts der Aufweitung gibt es keine höhere Sohlenlage und flussabwärts wird die Erosion wegen des erhöhten Geschiebetransportes reduziert. Im zweiten Beispiel mit der Aufweitung in

der Auflandungsstrecke bildet sich der vertikale Versatz, die Gefällszunahme in der Aufweitung führt zu einer höheren Sohlenlage flussaufwärts und der reduzierte Geschiebetransport in der folgenden Strecke zu einer verstärkten Erosion.

6.5 Kiesentnahmen

Wie die Ausführungen im Kapitel 3 zeigen, können Kiesentnahmen im Sinne einer Geschiebebewirtschaftung ein sehr effizientes Mittel für die Begrenzung von Auflandungen oder für eine Eintiefung der Sohlenlage sein. Aus flussbaulichen Überlegungen soll eine Geschiebebewirtschaftung in Ablagerungsstrecken erfolgen und dadurch der Geschiebedurchgang auf eine Menge reduziert werden, welche der Transportkapazität der folgenden Strecke entspricht. Wird übermässig Kies entnommen, so kann sich das Flussbett nicht nur im Bereich der Entnahmestelle eintiefen, sondern auch in den angrenzenden Strecken.

6.6 Folgerungen

Die Speicherwirkung des Flussbettes ist im Verhältnis zum Geschiebetransport sehr gross. Eine parallele Anhebung oder Eintiefung des Flussbettes um 1 cm zwischen Reichenau und dem Bodensee entspricht einem Geschiebevolumen von rund 80'000 m³, was ungefähr den Geschiebeeinträgen aller Zuflüsse beim Modell 2 entspricht. Wegen dieser Speicherwirkung verlaufen die Auflandungs- und Erosionsprozesse vergleichsweise langsam. Die aufgeführten Beispiele zeigen aber auch, dass es besonders schwierig ist, Eintiefungen rückgängig zu machen. Soll den aufgezeigten Prozessen nicht nur punktuell, sondern grossräumig entgegengewirkt werden, so sind umfangreiche Massnahmen notwendig.

Domat/Ems und Aarau, 11. November 2001

Hunziker, Zarn & Partner AG
Ingenieurbüro für Fluss- und Wasserbau

Dr. Benno Zarn und Dr. Roni Hunziker

Anhang A

Zusammenstellung von Berichten über den Geschiebehaushalt des Alpenrheins basierend auf numerischen Berechnungen mit MORMO

- [1] Rheinkraftwerke CH/FL; Bericht über die Auswirkungen der geplanten fünf Staustufen auf den Geschiebe- und Schwebstoffhaushalt des Alpenrheins; im Auftrag der Holinger AG, VAW-Bericht Nr. 4004/I und II, Juli 1991
VAW
- [2] Kraftwerk Ems-Mastrils; Stellungnahme zur Auswirkung einer Wasserausleitung auf Geschiebehaushalt und Auendynamik; im Auftrag der Straub AG, Chur, VAW-Bericht Nr. 4016/2, Oktober 1991
VAW
- [3] Geschiebehaushalt Alpenrhein; Einfluss der Kiesentnahmen zwischen Reichenau und Landquart in der Periode von 1974 bis 1988 auf die Entwicklung der Flussmorphologie und des Geschiebehaushaltes; im Auftrag des Tiefbauamtes des Kantons Graubünden, VAW-Bericht Nr. 3993/II, Band 1 und 2, November 1993
VAW
- [4] Geschiebehaushalt Alpenrhein; Der Geschiebehaushalt des Alpenrheins zwischen Domat/Ems und dem Bodensee - Neue Erkenntnisse und Prognosen über die Sohlenveränderungen und den Geschiebetransport; im Auftrag des Tiefbauamtes des Kantons Graubünden und des Studienkonsortiums Rheinkraftwerke Schweiz-Liechtenstein, VAW-Bericht Nr. 3993/I, März 1995
VAW
- In dieser Arbeit werden die Ergebnisse bezüglich Geschiebetransport und Morphologie von [1] und [3] zusammengefasst. Sie bildete auch die Grundlage für die VAW-Mitteilung Nr. 139 Geschiebehaushalt Alpenrhein.
- [5] Alpenrhein Tardisbrücke-Ellhorn; Gutachten zur Auswirkung verschiedener flussbaulicher Konzepte auf die Sohlenentwicklung; im Auftrag des Kantons Graubünden und des Baudepartements des Kantons St. Gallen, Januar 1997
Jäggi/Hunziker
- [6] Alpenrhein Landquart bis Bodensee; Bericht über die hydraulischen und morphologischen Untersuchungen am Alpenrhein zwischen Landquart und dem Bodensee; im Auftrag der Internationalen Rheinregulierung und des Rheinunternehmens des Kantons St. Gallen, Mai 1997
Hunziker

- [7] Untersuchung des Einflusses der Kiesentnahmen zwischen 1951 und 1978 auf die Sohlenlage des Alpenrhein zwischen Landquart und dem Bodensee; im Auftrag des Rheinunternehmens des Kantons St. Gallen, Oktober 1998.
Hunziker&Zarn AG
- [8] Prüfung des Wehrreglementes des Kraftwerkes, Studie über den Einfluss von Kraftwerkbetrieb und Kiesentnahmen auf den Geschiebehaushalt und die Sohlenveränderungen im Alpenrhein zwischen Reichenau und der Maschäuser Rüfi, im Auftrag des Kantons Graubünden, Dezember 1998.
VAW
- [9] Sohlensicherungsmaßnahmen Alpenrhein; Studie über den Einfluss der Kiesentnahmen bei der Plessurmündung auf den Geschiebehaushalt und die Sohlenveränderungen zwischen Chur und Haldenstein, im Auftrag des Tiefbauamtes des Kantons Graubünden, VAW-Bericht Nr. 4117-57, August 1999
VAW
- [10] Alpenrhein bei Trimmis; Auswirkungen der geplanten Flussraumaufweitung zwischen km 15.1 und km 16.7 auf den Geschiebehaushalt; Arbeitspapier 3; im Auftrag von PD Dr. M. Jäggi, Ebmatingen, März 1999
Hunziker&Zarn
- [11] Machbarkeitsstudie Revitalisierung Alpenrhein Abschnitt Illspitz; Internationale Regierungskommission Alpenrhein, April 2000.
*Rudhard+Gasser,
Hunziker&Zarn AG,
ARGE Limnologie,
TK Consult AG,
Revital*

Studien über die Zuflüsse des Alpenrheins

- [12] Die Geschiebe- und Schwebstofffracht der Ill an der Mündung, September 1985.
Vorarlberger Illwerke
- [13] Tamina; Bericht über die Auswirkungen der Kraftwerke Sarganser Land AG auf die Geschiebeablagerungen in der Tamina in Bad Ragaz und die Möglichkeit eines Schwallbetriebs als Mittel zum Abschwemmen von Ablagerungen; im Auftrag der Gemeinde Bad Ragaz und des Amtes für Umweltschutz des Kantons St. Gallen, VAW-Bericht Nr. 4060, August 1993.
VAW
- [14] Landquart; Bericht über die numerische Simulation der Sohlenentwicklung zwischen km 4.5 und 16.8 zwischen der Klus und Fideris-Station unter besonderer Berücksichtigung des Einflusses der Kiesentnahmen an Schraubach und Furnerbach, im Auftrag des Tiefbauamtes des Kantons Graubünden, April 1997.
Jäggi/Hunziker

Anhang B

Chronologische Übersicht über die Rheinkorrekturen, Verbauungen und die Staatsverträge

In der folgenden Uebersicht sind die wichtigsten Eingriffe in den Alpenrhein, sowie die Staatsverträge, auf denen sie teilweise basieren, in chronologischer Reihenfolge stichwortartig zusammengefasst. Auf die Beschreibung der verschiedenen Lösungsvarianten und die Gründe, welche für die Realisierung einzelner Projekte ausschlaggebend waren, wird verzichtet. Darüber wird beispielsweise in Meyer-Peter und Lichtenhahn (1963), Lichtenhahn (1972), Bergmeister (1989), Ackermann et al. (1990) oder Bergmeister und Kalt (1992) ausführlich berichtet.

11. Jh. Erste Bemühungen den Alpenrhein im St. Galler Rheintal in ein Bett zu zwängen (Lichtenhahn, 1972).
18. Jh. Im 18. Jh herrschte in der Eidgenossenschaft die Auffassung, dass jede Gemeinde auf ihrem Gebiet für die Wuhrbauten zuständig sei. Zahlreiche Überschwemmungen in der ersten Hälfte des 18. Jahrhunderts führten dazu, dass sich die "eidgenössische Obrigkeit" ernsthaft mit dem Alpenrhein beschäftigte (Warth, 1992).
- 1765 Ein erstes grösseres Deichprojekt wurde zwischen Monstein und Blatten in Angriff genommen (Warth, 1992).
- 1770 Erlass einer Wuhrorndung (Warth, 1992).
- 1790 Wuhrvertrag zwischen der Herrschaft Werdenberg und dem Fürstentum Liechtenstein (Warth, 1992).
- 1792 Verwahrungsplan und zwei Durchstichprojekte am sog. Eselsschwanz von Baraga, welche nie ausgeführt wurden (Warth, 1992).
- 1827 Erstes Abkommen zwischen Oesterreich und der Schweiz betreffend Wuhrprovisorium zwischen der Illmündung und dem Bodensee (Warth, 1992).
- 1837 Erster Vertrag zwischen der Schweiz und dem Fürstentum Liechtenstein betreffend Wuhrprovisorium (Warth, 1992). Weitere Verträge mit Liechtenstein und dem Kanton Graubünden folgten in den Jahren 1837, 1839 und 1843.

-
- Mitte 19. Jh.* Beginn der Korrektion zwischen Reichenau und Landquart mit angestrebter Flussbettbreite von 90 m (Lichtenhahn, 1972). Bis auf die Strecke zwischen der Maschänsler Rüfi und der Landquartmündung, in welcher nur rechtsufrig ein Schutzdamm vorhanden ist, wurde die Korrektion vollständig ausgeführt.
- Mitte 19. Jh.* Beginn der Korrektion zwischen der Landquart- und der Illmündung mit angestrebter Flussbettbreite von 120 m (Lichtenhahn, 1972). Ursprünglich variierte die Flussbettbreite zwischen 150 und 600 m (Eidg. Oberbauinspektorat, 1950).
- 1871 Präliminar-Uebereinkommen zwischen Oesterreich und der Schweiz zur gleichzeitigen Ausführung des Diepoldsauer und des Fussacher Durchstichs (Rohner, 1992).
- 1892 Staatsvertrag zur Internationalen Rheinregulierung mit dem Bau des Diepoldsauer und Fussacher Durchstichs und Ausbau der Zwischenstrecken bis zur Illmündung und zur Bildung der Internationalen Rheinregulierungskommission (Koenig, 1992).
- 1895-1900 Erstellung des Fussacher Durchstichs (km 85 bis km 90), welchem ein Doppeltrapezprofil mit einer Breite des Hauptgerinnes von 110 m und beidseitigen Vorländern von je 75 m zugrunde gelegt wurden (Lichtenhahn, 1972). Mit dem Fussacher Durchstich wurde der Flusslauf um etwa 7 km verkürzt (Meyer-Peter und Lichtenhahn, 1963; Waibel, 1992).
- 1909-1923 Erstellung des Diepoldsauer Durchstichs, welchem das gleiche Normalprofil wie dem Fussacher Durchstich zugrunde gelegt wurde (Lichtenhahn, 1972). Mit diesem Durchstich wurde der Flusslauf um weitere 3 km verkürzt (Meyer-Peter und Lichtenhahn, 1963; Waibel, 1992).
- 1924 Staatsvertrag betreffend die Vorstreckung der Bauwerke des Fussacher Durchstiches auf dem sich neu bildenden Delta in der Hard-Fussacher Bucht (Waibel, 1992).
- 1927 Die Hochwasserkatastrophe von 1927 war der Anlass zu einer Erhöhung der Dämme um etwa 1 m bei Buchs (Lichtenhahn, 1972).
- 1936 Die Internationale Rheinregulierungskommission (IRRK) wird durch die neue Organisation Gemeinsame Rheinkommission (GRK) ersetzt (Meyer-Peter und Lichtenhahn, 1963).

-
- ca. 1940 Ab ca. 1940 wurde dem Alpenrhein zur Bekämpfung der Geschiebeablagerungen Kies entnommen. Je eine Baggeranlage bei Buchs und Salez wurde subventioniert. Mit dem steigenden Bedarf nach Kies wurden am Alpenrhein immer mehr Kieswerke erstellt (Lichtenhahn, 1972).
- 1943/44 Die Schweiz beginnt mit dem Umbau des Diepoldsauer Durchstiches (Waibel, 1992).
- 1946/47 Oesterreich beginnt mit dem Umbau der Zwischenstrecke und mit Bauarbeiten bei der Mündung (Waibel, 1992).
- 1950 Ab 1950 wurden die Kiesentnahmen infolge des gesteigerten Kiesbedarfs intensiviert. Zwischen dem Ellhorn und der Illmündung wurden dem Rhein bis 1972 insgesamt rund 17 Mio. m³ Kies entnommen, wobei Ende der sechziger Jahre die grössten jährlichen Entnahmen von bis zu 1.6 Mio. m³ Kies stattfanden.
- 1954 Staatsvertrag zur Durchführung der Korrektur gemäss Umbauprojekt IIIb, gemäss welchem das Hauptgerinne von 110 m auf 90 m bei der Illmündung und bis zur Mündung zunehmend um 40 auf 70 m eingeengt werden soll. Gleichzeitig sollen die Mittelwuhre erhöht werden, was eine Steigerung der Abflusskapazität im Hauptgerinne auf 1200 m³/s zur Folge habe. Mit der Erhöhung, Verstärkung und Zurücksetzung der Hochwasserschutzdämme sollte eine Abflusskapazität von 3100 m³/s erreicht werden (Frick, 1992; Waibel, 1992; Meyer-Peter und Lichtenhahn, 1963). Zudem wurde in diesem Staatsvertrag die " ... Vorstreckung der Rheinregulierungswerke des Fussacher Durchstiches auf dem Schuttkegel im Bodensee ..." verankert (Waibel, 1992).
- 1962 Anlässlich des Baus der Nationalstrasse A13 wurde die Blockrampe bei Felsberg (km 6.52) erstellt, welche 1963 saniert und 1988 neu gebaut wurde (Lichtenhahn, 1972).
- 1962 Bau des Kraftwerkes Reichenau AG (Wehr bei km 2.6).
- 1969/70 Der Umbau der internationalen Rheinstrecke nach dem Projekt IIIb ist bis auf wenige Abschlussarbeiten beendet (Waibel, 1992).
- 1970 Nach dem Einsturz der Brücke Buchs-Schaan im Jahre 1970 wurden am Alpenrhein sämtliche Kiesentnahmen innerhalb von zwei Jahren mit Ausnahme der Bereiche beim Zusammenfluss des Vorder- mit dem Hinterrhein (Kieswerk Bonaduz AG), bei der Mündung der Plessur (Kieswerk Calanda AG) und bei der Mündung der Landquart (Kieswerk Zindel AG) eingestellt.

- Bei diesen drei Kieswerken wurde eine starke Beschränkung der Entnahmemengen verfügt.
- 1970/71 Bau der Blockrampe bei Buchs (km 49.60), welche 1984 beim rechten Ufer und 1985 beim linken Ufer saniert wurde.
- 1971/72 Abschluss der Bauarbeiten in der internationalen Rheinstrecke gemäss Umbauprojekt IIIb (Waibel, 1992).
- 1972 Bau der Blockrampe beim Ellhorn (km 33.93), welche in den Jahren 1975/76 sowie 1987 saniert wurde.
- 1972 Das Projekt zur Rheinvorstreckung wurde vorgelegt, welches auf den Staatsverträgen von 1924 und 1954 basiert. Von der ursprünglichen Mündung bei km 90 wird auf dem wachsenden Delta der Flusslauf sukzessive verlängert, bis die Schwebstoffablagerung in den tieferen Seezonen erfolgen kann. Mit dieser Massnahme wird die Verlandung der umliegenden Buchten verzögert. Das Projekt sieht vor, dass die Hochwasserschutzdämme bis etwa km 95 vorgezogen werden. Bei km 90 muss jedoch der Kies dem Rhein entnommen werden, da die Schleppkraft in der Vorstreckung nicht ausreicht, es weiter zu transportieren (36'000 m³/Jahr in der Periode von 1974-1995; Waibel, 1992).
- 1987 Die natürliche Blockrampe bei der Maschänsener Rüfi (km 14.07) wurde nach dem Hochwasser von 1987 mit Blöcken ergänzt. Weiter mussten an verschiedenen Orten lokale Schäden an den Uferverbauungen repariert werden, welche durch das Hochwasser verursacht wurden.
- 1986/1987 Rheinverlegung bei Domat/Ems infolge des Ausbaus der Nationalstrasse A13.
- 1989/90 Bau einer Blockrampe beim Waffenplatz Chur (km 8.92).
- 1993 Bau eines Blockteppichs zum Schutz eines Dükers bei Felsberg (km 7.22).
- 1994/1995 Im Rahmen der Erneuerungen der Wuhre zwischen km 7.22 und km 7.95 wird das Flussbett lokal verbreitert (Aufweitung Chur).

Literaturverzeichnis Anhang B

Ackermann, O.; Kessler, N.; Reich, H.J.; Strickler, H. (1990): Werdenberger Jahrbuch 1990; Historisch-Heimatkundliche Vereinigung des Bezirks Werdenberg, 3. Jahrgang.

Bergmeister, U. (1989): Die Rheinregulierung von der Illmündung bis zum Bodensee; Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik, Heft 1, 23-28.

Bergmeister, U.; Kalt, L. (1992): Der Alpenrhein und seine Regulierung (Hrsg.); Internationale Rheinregulierung, Rorschach, BuchsDruck und Verlag, Buchs.

Eidgenössisches Oberbauinspektorat (1950): Rechnerische Untersuchung der Geschiebeverhältnisse im St. Gallischen Rhein, Bern (unveröffentlicht).

Frick, S. (1992): Zwischenstaatliche Beziehungen betreffend die Rheinregulierung nach 1892 bis zum Staatsvertrag von 1954; in: Bergmeister, U.; Kalt, L. (Hrsg.): Der Alpenrhein und seine Regulierung, Internationale Rheinregulierung, BuchsDruck und Verlag, Buchs.

Koenig, F. (1992): Der Staatsvertrag Schweiz-Österreich von 1892; in: Bergmeister, U.; Kalt, L. (Hrsg.): Der Alpenrhein und seine Regulierung, Internationale Rheinregulierung, BuchsDruck und Verlag, Buchs.

Lichtenhahn, C. (1972): Flussbauliche Probleme am Rhein zwischen Reichenau und dem Bodensee im Wandel der Zeit; Wasser- und Energiewirtschaft, 64. Jahrgang, Nr. 10/11, 341-353.

Meyer-Peter, E.; Lichtenhahn, C. (1963): Altes und Neues über den Flussbau; Eidg. Departement des Innern, Veröffentlichung des Eidg. Amtes für Strassen- und Flussbau, Eidg. Drucksachen und Materialzentrale, Bern, 59 Seiten.

Rohner, H. (1992): Baragas Plan von 1972 und Korrektionsvarianten im Vorfeld des Staatsvertrages von 1892; in: Bergmeister, U.; Kalt, L. (Hrsg.): Der Alpenrhein und seine Regulierung, Internationale Rheinregulierung, BuchsDruck und Verlag, Buchs.

Waibel, F. (1992): Die Werke der Internationalen Rheinregulierung; in: Bergmeister, U.; Kalt, L. (Hrsg.): Der Alpenrhein und seine Regulierung, Internationale Rheinregulierung, BuchsDruck und Verlag, Buchs.

Warth, W. (1992): Die Schweiz, der Kanton St. Gallen, die Rheintalgemeinden und die Rheinkorrektion vor 1848; in: Bergmeister, U.; Kalt, L. (Hrsg.): Der Alpenrhein und seine Regulierung, Internationale Rheinregulierung, BuchsDruck und Verlag, Buchs.