

Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria
Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
Band: 91 (1999)
Heft: 7-8

Artikel: Der Alpenrhein : ein Kieslieferant?
Autor: Zarn, Benno
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-940066>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 10.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Der Alpenrhein – ein Kieslieferant?

■ Benno Zarn

Zusammenfassung

Zwischen Reichenau, wo der Vorder- und der Hinterrhein zusammenfliessen, und dem Bodensee wird der 90 km lange Rhein auch Alpenrhein genannt. Er und seine Zuflüsse wie beispielsweise die Plessur, die Landquart oder die Ill entwässern ein 6123 km² grosses Einzugsgebiet. Wie die meisten unserer Alluvionsflüsse wurde auch der Alpenrhein im letzten und in diesem Jahrhundert durchgehend korrigiert.

Seit 1950 sind entlang des Alpenrheins durchschnittliche Sohleneintiefungen von 2,4 m mit Maximalwerten bis 5 m gemessen worden. Hauptursache für die Eintiefungen waren die enormen Kiesentnahmen: 30 Mio m³ in den letzten 60 Jahren. Davon entfallen 22 Mio m³ auf die 50er und 60er Jahre. Nach dem Einsturz einer Brücke bei Schaan im Jahr 1970 wurden die Kiesentnahmen eingestellt respektive deutlich reduziert.

Die enormen Kiesentnahmen sind auf den damals stark angestiegenen Baustoffbedarf zurückzuführen. Aus heutiger Sicht dürfte die Bewilligung der Entnahmemengen in diesem Umfang mit der Überschätzung der Geschiebefrachten im Rhein um teilweise mehr als eine Grössenordnung zurückzuführen sein. Man ging früher davon aus, dass unterhalb der Landquartmündung pro Jahr 1,4 Mio m³ Geschiebe und unterhalb der Illmündung 0,37 Mio m³ Geschiebe transportiert werden. Die durchschnittlichen Entnahmemengen lagen etwa in derselben Grössenordnung wie die damals angenommenen Geschiebefrachten.

Der Geschiebetransport im Alpenrhein wurde früher überschätzt, weil von einem zu hohen Abrieb ausgegangen und angenommen wurde, dass der Alpenrhein bezüglich Geschiebetransport quasi in einem Gleichgewichtszustand sei. Dank Laboruntersuchungen und numerischen Simulationen hat man heute ein besseres Prozessverständnis und ein differenzierteres Bild über den Geschiebehaushalt des Alpenrheins. Er ist nicht im Gleichgewicht, und der Geschiebetransport schwankt wegen der Geschiebeeinträge der Zuflüsse, der Kiesentnahmen sowie der Ablagerungs- und Erosionsprozesse. Im Maximum dürften rund 70000 m³ pro Jahr transportiert werden. Davon stammt ein erheblicher Anteil aus der Sohlenerosion.

1. Einleitung

Viele unserer Alluvionsflüsse wurden vor 100 und mehr Jahren umfassend korrigiert. Primäres Korrektionsziel war ein angemessener Hochwasserschutz. Damit die angestrebte Abflusskapazität auch langfristig gewährleistet werden konnte, musste eine stabile Sohlenlage respektive ein ausgeglichener Geschiebehaushalt angestrebt werden. Zur Zeit der grossen Flusskorrekturen standen als Massnahmen Flusseinigungen und Laufverkürzungen im Vordergrund. Seit etwa Mitte dieses Jahrhunderts, als die Nachfrage nach Baustoffen stark zunahm, wird der Geschiebehaushalt durch Kiesentnahmen beeinflusst. Seit kurzem werden Flüsse, welche sich eintiefen, auch mit Kieszugaben reguliert.

Möglichst gute Kenntnisse über den Geschiebehaushalt unserer Fließgewässer sind eine wichtige Grundlage für die flussbauliche und die ökologische Massnahmenplanung. Beispielsweise hängen vom Geschiebehaushalt direkt oder indirekt die Sohlenlage, die Abflusskapazität, die Stabilität von Verbauungen oder von Brücken, die Dynamik in Auen und die Lage des Grundwasserspiegels ab. Diese Zusammenhänge sind schon seit längerem bekannt. Es erstaunt deshalb nicht, dass mit den grossen Flusskorrekturen ein ausgeglichener Geschiebehaushalt respektive ein stabiles Längenprofil erreicht werden sollte. Dieses Ziel wurde aber häufig verfehlt, weil die theoretischen Erkenntnisse über den Geschiebetransport damals unzureichend waren. Wichtige Grundlagen wur-

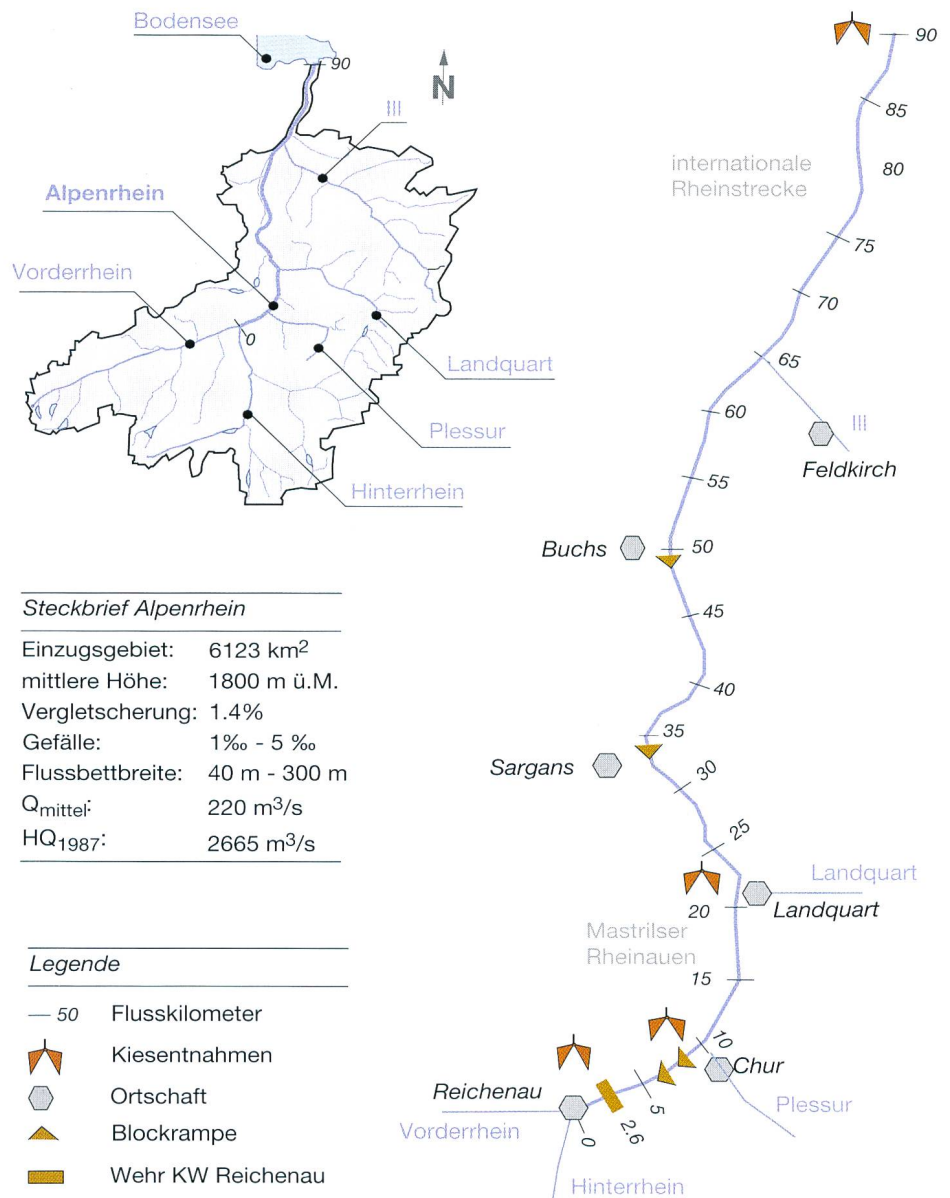


Bild 1. Übersicht über den Alpenrhein und sein Einzugsgebiet.

den erst in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts erarbeitet. Wie das folgende Beispiel des Alpenrheins zeigt, müssen Simulationsprogramme eingesetzt werden, um den Geschiebehauhalt eines Flusses zutreffend erfassen zu können.

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 Maschanser Rüfi, die Tamina oder die Frutz in den Alpenrhein.

Das Abflussgeschehen des Alpenrheins kann nicht einem einzigen Regimetyp zugeordnet werden. Vielmehr entspricht es einer Kombination aus glazialen, nivalem und pluvialen Abflussregime mit ausgeprägtem Abflussmaximum im Juni. Durch den Bau und den Betrieb der zahlreichen Saisonspeicher im Einzugsgebiet des Alpenrheins ergab

sich eine spürbare Verlagerung der Sommerabflüsse in den Winter.

Bei der Mündung in den Bodensee liegt der mittlere Jahresabfluss bei 230 m³/s. Für das hundertjährige Hochwasser werden Werte zwischen 2550 m³/s und 3100 m³/s angegeben. Die Jährlichkeit der Hochwasserereignisse vom August 1954 und vom Juli 1987, als mit etwa 2665 m³/s der grösste je registrierte Abfluss auftrat, liegt in diesem Bereich.

Die Morphologie des Alpenrheins ist sehr stark von umfassenden Korrekturen und lokalen Verbauungen geprägt (z. B. *Bergmeister* und *Kalt*, 1992).

Ziel der 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 Fließsdistanz von Reichenau bis zur Illmündung ab, aber nicht kontinuierlich (Bild 2a und b). Dies hängt unter anderem mit den vier Blockrampen Felsberg (km 6,5), Waffenplatz Chur (km 8,9), Ellhorn (km 33,9) und Buchs (km 49,6), den unterschiedlichen Flussbettbreiten respektive Querprofilgeometrien und den Zuflüssen zusammen.

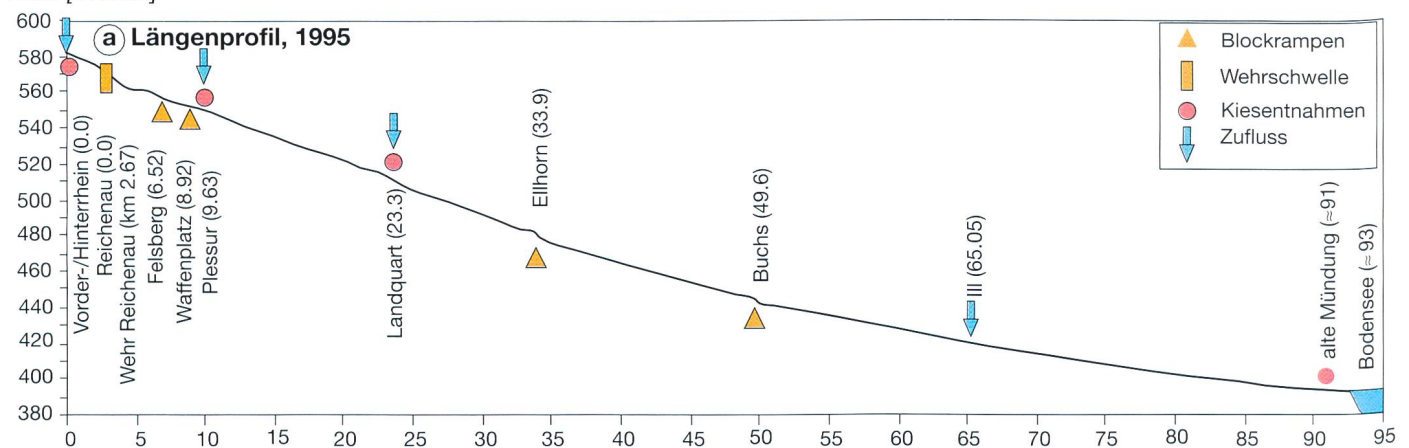
Flussbettbreite und Gerinneform

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 Maschanser Rüfi (km 14,1) sowie flussabwärts der Illmündung ist das Flussbett eben. Auf der übrigen Strecke können sich Bänke bilden. Zwischen der Maschanser 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.

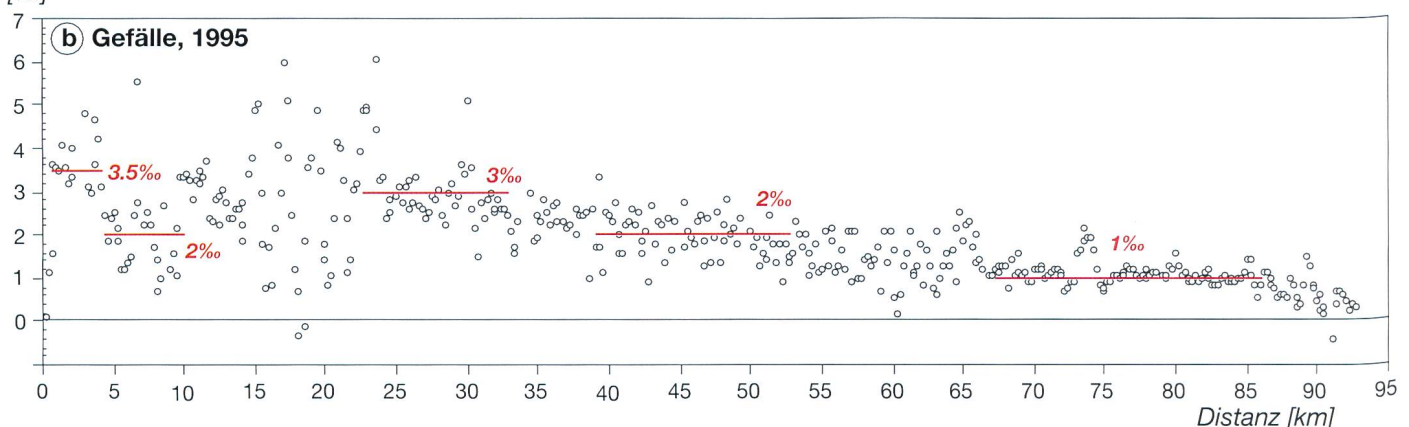
Morphologische Vielfalt und Kolkiefen

Bei Flussstrecken mit Bänken ist die Variation von verschiedenen Parametern wie Abflusstiefe, Fließgeschwindigkeit oder Kornverteilung des Sohlenmaterials deutlich grösser als bei einer ebenen Sohle. Diese Variabilität ist aus ökologischer Sicht erwünscht. Gleichzeitig mit

Kote [m ü.M.]



[‰]



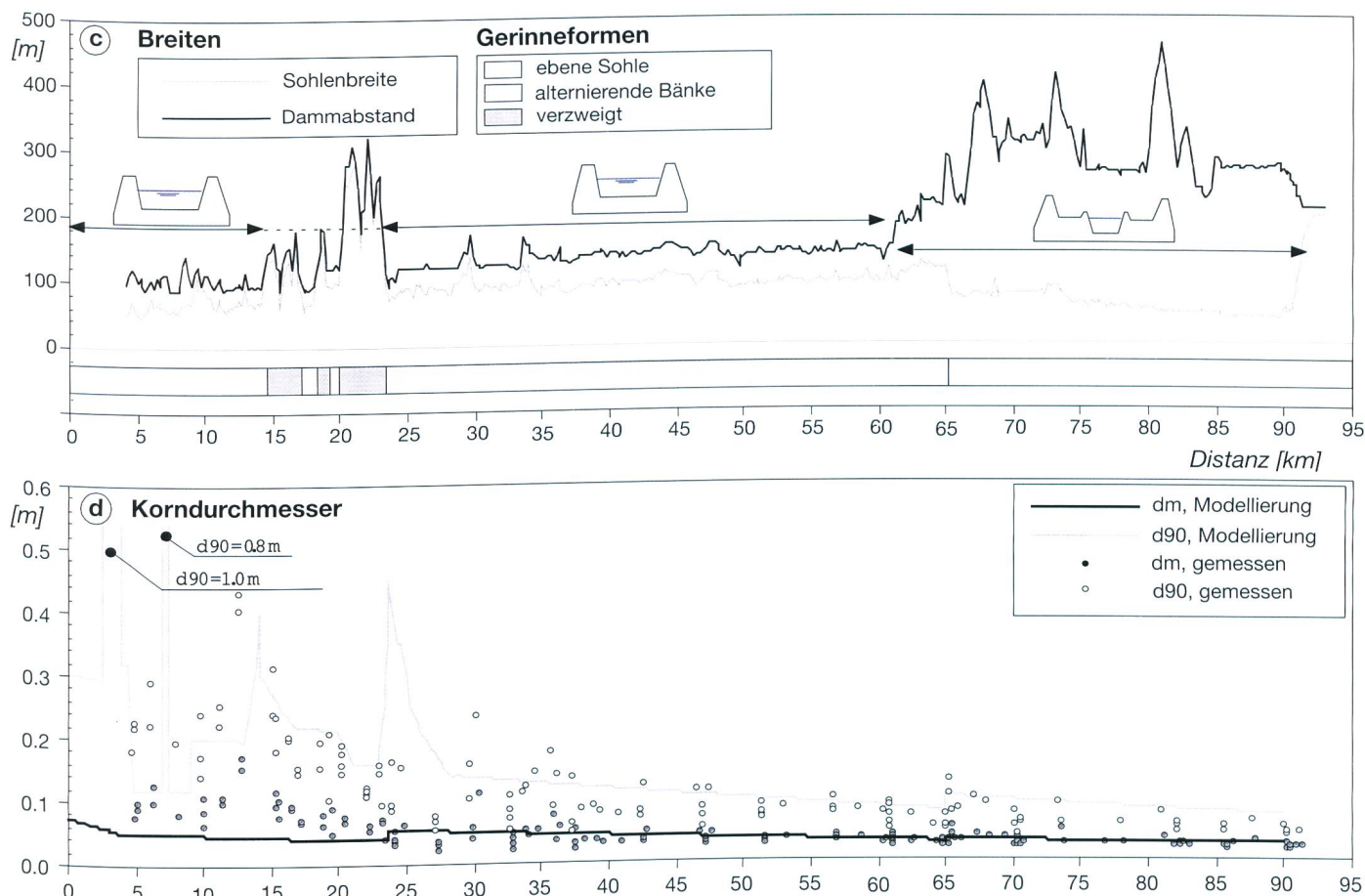


Bild 2. Längenprofil, Gefälle, Flussbettbreite und Abstand der Dämme sowie charakteristische Korndurchmesser des Alpenrheins.

Bänken treten aber auch lokale Vertiefungen im Flussbett auf, sogenannte Kolke, wodurch beispielsweise der Uferschutz erheblich belastet werden kann. Beim Alpenrhein können in den Mastrilser Auen respektive im Bereich mit den alternierenden Bänken Kolk-tiefen 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 dm und $d90$ beschrieben. Mit diesen beiden Grössen können das transportierte Geschiebe und der Widerstand des Flussbettes gegen Eintiefung 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 Geschiebeeintrag der Zuflüsse kann zu einer Vergrößerung der Kornverteilung führen.

2.2 Aktueller Geschiebehaushalt

In den letzten 10 Jahren wurden im Zusammenhang mit der Beurteilung von Kies-

entnahmen und Verbauungen sowie des Betriebes von Kraftwerken verschiedene Studien¹ 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).

Der Geschiebehaushalt und seine Wechselwirkung mit der Morphologie kann heute mit Hilfe von numerischen Simulationen erfasst werden. Für den Alpenrhein wurde ein entsprechendes Modell entwickelt, 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 ge-eicht. Aufbauend auf einem geeichten Modell können Prognoserechnungen über die Entwicklung des Geschiebehaushaltes und der Morphologie durchgeführt werden.

Der aktuelle Geschiebehaushalt ist ein Resultat der Eichung des numerischen Modells des Alpenrheins (Zarn et al., 1995; Hunziker & Zarn, 1998). In Bild 3 sind die

¹Die Studien wurden von der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich und von Hunziker & Zarn AG, Ingenieurbüro für Fluss und Wasserbau in Aarau, erarbeitet.

Hauptresultate dargestellt. Das obere Bild zeigt die mittleren jährlichen Geschiebefrachten, welche in der Periode von 1974 bis 1995 transportiert wurden, und im unteren Bild werden die in dieser Periode gemessenen Sohlenveränderungen mit den berechneten verglichen. 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 Auflandungs- und Erosionsstrecken sowie die zwei Blockrampen beim Ellhorn und bei Buchs geprägt.

Der Bau der Blockrampen bewirkte im Oberwasser während einiger Zeit Geschiebeablagerungen, die sich jedoch auf Strecken mit jeweils einer Länge von wenigen Kilometern beschränkten. In den übrigen Abschnitten erodiert der Rhein zum Teil massiv. Auf dem letzten Abschnitt zwischen der Illmündung und dem Bodensee tieft sich der Rhein bis zum Diepoldsauer Durchstich (km 74,5 bis km 79,6) ein, danach schliesst eine Auflandungsstrecke an.

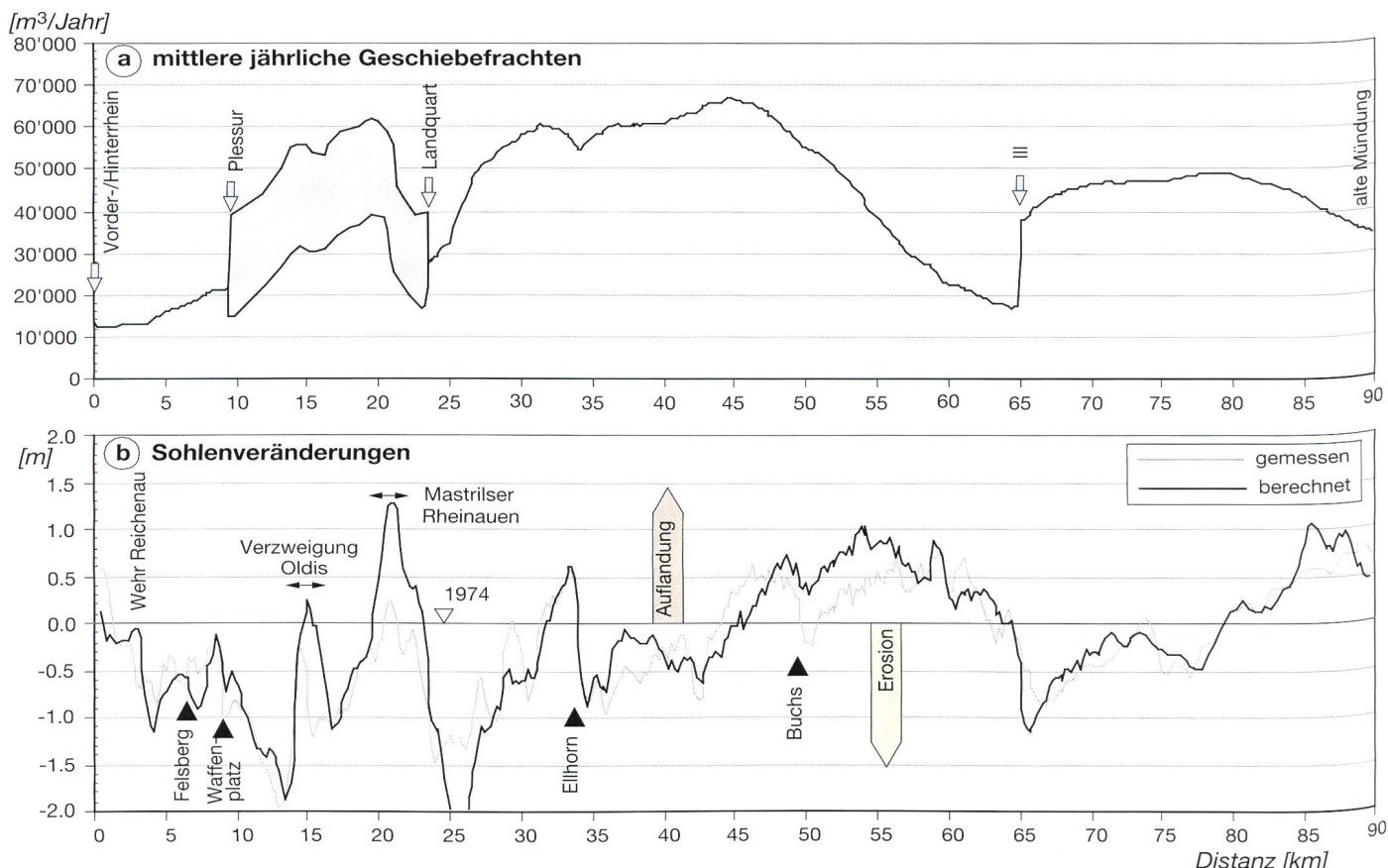


Bild 3. Durchschnittliche jährliche Geschiebefrachten (a), welche im Alpenrhein in der Periode von 1974 bis 1995 transportiert wurden, und die entsprechenden gemessenen und berechneten Sohlenveränderungen (b).

Die mittleren jährlichen Geschiebefrachten in Bild 3 (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 40, welcher einer massiven Sohlenerosion entspricht. Nur im Bereich der Mastilser Rheinauen ist ein Abfall festzustellen, der auf die Ablagerungen in den Auen hinweist. Die flussabwärts von km 40 abfallende Kurve korrespondiert mit den Ablagerungen oberhalb der Illmündung. Der Ablagerungstrend zwischen km 45 und km 60 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 fast 70000 m^3 pro Jahr ein Maximum. Davon stammen rund 60 % aus der Sohlenerosion des Rheins oberhalb km 40. Für die Beurteilung der Güte der Modellierung stehen verschiedene Kriterien zur Verfügung. Sie resultieren aus den Vergleichen zwischen:

- den beobachteten und den berechneten Sohlenveränderungen (Bild 3),
- den modellierten und beobachteten charakteristischen Korndurchmessern (Bild 2) und
- den beobachteten und berechneten Geschiebefrachten (Bild 4).

Die ersten beiden Kriterien lassen sich relativ einfach überprüfen, weil ausreichend Messungen zur Verfügung stehen. Die systematische Abweichung zwischen modellierten und beobachteten mittleren Korndurchmessern oberhalb km 20 hängt damit zusammen, dass in diesem Bereich relativ feines Geschiebe über eine ausgeprägte Deckschicht transportiert wird. Das dritte Kriterium kann einzig im Bereich der Mündung in den Bodensee überprüft werden, weil nur dort die Geschiebefrachten bekannt sind. Die berechneten mittleren Jahresfrachten von 34500 m^3 stimmen gut mit den Entnahmemengen von 36000 m^3 überein (Bild 4, unten). Bezüglich der Geschiebeeinträge sind die in Bild 4 angegebenen Werte für die Landquart und die Plessur am unsichersten. Dies hängt mit der Modellierung der Mastilser Rheinauen und der Verzweigung Oldis zusammen. Bis vor kurzem waren die Grundlagen für die Erfassung des Geschiebehaushaltes in solchen verzweigten Flussabschnitten nicht vorhanden und wurden deshalb vereinfacht modelliert. Zudem war in diesen Bereichen die Eichung auf die Periode von 1974 bis 1988 beschränkt. In den Bildern 3 und 4 ist der Geschiebetransport der betroffenen Flussstrecken darum als Bandbreite (schraffierte Fläche respektive Zahlen in Klammern) dargestellt. Das numerische Modell des Alpenrheins wird laufend den neusten Kenntnissen angepasst.

Zum Beispiel wird zurzeit die Modellierung der Mastilser Rheinauen verbessert, indem die Geschiebetransportkapazität mit einem neuen Ansatz berechnet wird. Dieser wurde speziell für geschiebeführende verzweigte Flüsse entwickelt (Zarn, 1997).

3. Kiesentnahmen und Sohlenveränderungen nach 1940

Aufgrund der Gefällsverhältnisse 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 Korrektionsmassnahmen² sollten weitere Auflandungen verhindert werden. Mitte der 30er Jahre

²Die bedeutendsten Korrektionsmassnahmen waren die fast durchgehende Regulierung zwischen Reichenau und der Illmündung, mit welcher Mitte des 19. Jahrhunderts begonnen wurde, die Durchstiche bei Fussach (1895–1900) und Diepoldsau (1909–1923), mit welchen die Mündung in den Bodensee verlegt und der Flusslauf um fast 10 km verkürzt wurde, die Umgestaltung der internationalen Rheinestrecke (Projekt IIIb, ≈1945 bis ≈1970) sowie die Rheinvorstreckung in den Bodensee, an welcher immer noch gebaut wird.

wurde erstmals mit Kiesentnahmen den Geschiebeablagerungen entgegengewirkt. Trotzdem waren auf verschiedenen Abschnitten des Alpenrheins, insbesondere zwischen Buchs (km 50) und dem Bodensee, weiterhin Auflandungen zu verzeichnen, wie beispielsweise die in Bild 5 dargestellten Sohlenveränderungen zwischen 1940 und 1950 zeigen. Rund 20 Jahre nach den ersten Kiesentnahmen in der internationalen Rheinstrecke wurden deshalb zwei Baggeranlagen bei Buchs und bei Salez gebaut, deren Betrieb vorerst subventioniert wurde. Bei Buchs ging der Auflandungstrend in einen Erosionstrend über. Mit der Intensivierung der Entnahmen Ende der 50er Jahre – hauptsächlich eine Folge des gesteigerten Kiesbedarfs – wurde der Erosionstrend massiv verstärkt (Göldi, 1990).

Das Flussbett des Alpenrheins liegt heute mit Ausnahme des Staubereichs des Kraftwerkes Reichenau deutlich tiefer als 1940. Die Eintiefung beträgt im Durchschnitt 2,5 m und erreicht beim Ellhorn und bei Buchs

Maximalwerte von bis zu 5 m. Der grösste Teil dieser Eintiefung – er ist in Bild 5 grau eingefärbt – fand während der Periode von 1951/55 bis 1974 statt. Diese Fläche entspricht einem Volumen von 21 Mio m³.

Zwischen 1936 und 1996 wurden dem Alpenrhein insgesamt 29,7 Mio m³ Kies entnommen, 6,4 Mio zwischen Reichenau und der Landquartmündung (km 0 bis km 23,7), 18,9 Mio zwischen der Landquart- und der Illmündung sowie 4,4 Mio zwischen der Illmündung und dem Bodensee (Bild 6). Im Durchschnitt wurden rund 0,5 Mio m³ Kies pro Jahr aus dem Alpenrhein gebaggert, wobei der Maximalwert bei rund 2 Mio m³ pro Jahr liegt. Zwischen 1951/55 und 1974 betrugen die Kiesentnahmen 24 Mio m³ und liegen damit in der Grössenordnung der Sohleneintiefung in der gleichen Zeitspanne.

Nach dem Einsturz der Brücke zwischen Buchs und Schaan im Jahre 1970 wurden am Alpenrhein innerhalb von zwei Jahren sämtliche Kiesentnahmen mit Ausnahme der Bereiche beim Zusammenfluss von Vorder- und Hinterrhein sowie bei den Mündungen der Plessur und der Landquart eingestellt. Bei den drei Kieswerken, welche heute noch in Betrieb sind, wurde eine starke Beschränkung der Entnahmemengen verfügt. Bei der Mündung in den Bodensee werden weiterhin die antransportierten Geschiebemengen entnommen.

Diese Gegenüberstellung von Erosionsvolumen und Kiesentnahmen zeigt, dass zwischen dem Eintiefungsprozess und den Kiesentnahmen ein enger Zusammenhang bestehen dürfte, insbesondere weil sich die Zeitspannen mit den grössten Kiesentnahmen und den grössten Sohleneintiefungen sowie die entsprechenden Volumina decken. Zudem wurde im Abschnitt 2.2 dargestellt, dass der Alpenrhein heute weniger als 0,1 Mio m³ Geschiebe pro Jahr transportiert. Die durchschnittlichen Kiesentnahmen von 0,5 Mio m³ liegen also ein Mehrfaches über dem heutigen Transportniveau. Mit den Kiesentnahmen wurde die Sohle des Alpenrheins abgetieft, insbesondere in der Periode von 1950 bis 1970. Heute stellt sich die Frage, weshalb früher Kiesentnahmen in diesem Ausmass bewilligt wurden. Die Antwort dazu liegt in den damaligen Vorstellungen über den Geschiebehaushalt des Alpenrheins (Abschnitt 4).

4. Vorstellungen über den Geschiebehaushalt bis 1990

1963 fassten Meyer-Peter und Lichtenhahn verschiedene Arbeiten über die Berechnung des Geschiebetransportes im Alpenrhein zusammen. In Bild 7 sind die damaligen Vorstellungen über den Geschiebehaushalt des

Alpenrheins als Transportdiagramm dargestellt. Für zwei Musterstrecken³, eine bei km 53,3 und eine bei km 71,0, wurden mit der Streifenmethode für das massgebende Profil durchschnittliche Jahresfrachten für die mittlere Dauerkurve der Periode von 1931 bis 1941 bestimmt, nämlich 389 400 m³ für die obere und 262 000 m³ für die untere Musterstrecke⁴. Diese Jahresfrachten wurden anschliessend auf die übrigen Strecken extrapoliert, wobei die sogenannte J-Formel verwendet wurde, welche auf dem Fliessgesetz von Strickler (1923), dem Abriebgesetz von Sternberg (1875) und dem Transportgesetz von Meyer-Peter und Müller (1948) beruht. Bei dieser Extrapolation resultierten die in Bild 7 dargestellten Jahresfrachten, 1,4 Mio m³ unterhalb der Landquartmündung und 0,37 Mio m³ unterhalb der Illmündung (respektive 1,25 und 0,33 Mio m³ bei einem Raumgewicht von 20 kN/m³). Diese Geschiebefrachten nehmen wegen des Abriebs von der Landquart- bis zur Illmündung und von der Illmündung bis zum Bodensee ab. Bis Ende der 80er Jahre war man mehrheitlich von der Richtigkeit dieser relativ hohen Jahresgeschiebefrachten überzeugt. Erst anschliessend an die Untersuchungen von Lichtenhahn (1982) und Jäggi (1985) kamen Zweifel auf (Zarn et al., 1995).

Die von Meyer-Peter und seinen Mitarbeitern bestimmten Geschiebefrachten weichen erheblich von den heutigen Vorstellungen ab. Die Gründe für diese Abweichungen liegen einerseits in der Art und Weise, wie der Geschiebetransport in den Musterstrecken bestimmt wurde, und andererseits bei der Extrapolation dieser Frachten auf die angrenzenden Strecken des Alpenrheins.

Unterschiede in der Musterstrecke

In Bild 7 sind zusätzlich die mit dem numerischen Modell des Alpenrheins für die Periode von 1974 bis 1988 berechneten Geschiebefrachten in den beiden Musterstrecken dargestellt. Die Differenzen zu den Resultaten von Meyer-Peter und Lichtenhahn (1963) können auf die angewandte Methodik zurückgeführt werden. Bevor aber detaillierter darauf eingegangen wird, soll der Einfluss verschiedener Parameter diskutiert werden, welche bei der Berechnung der Geschiebe-

³ Die Begriffe Musterstrecke, massgebendes Profil und Streifenmethode sind in Meyer-Peter et al. (1935) definiert und sind beispielsweise auch in Zarn et al. (1995) beschrieben.

⁴ Meyer-Peter und seine Mitarbeiter gingen von einem Raumgewicht von 18 kN/m³ aus. In den neueren Untersuchungen wurde jeweils ein Raumgewicht von 20 kN/m³ angenommen.

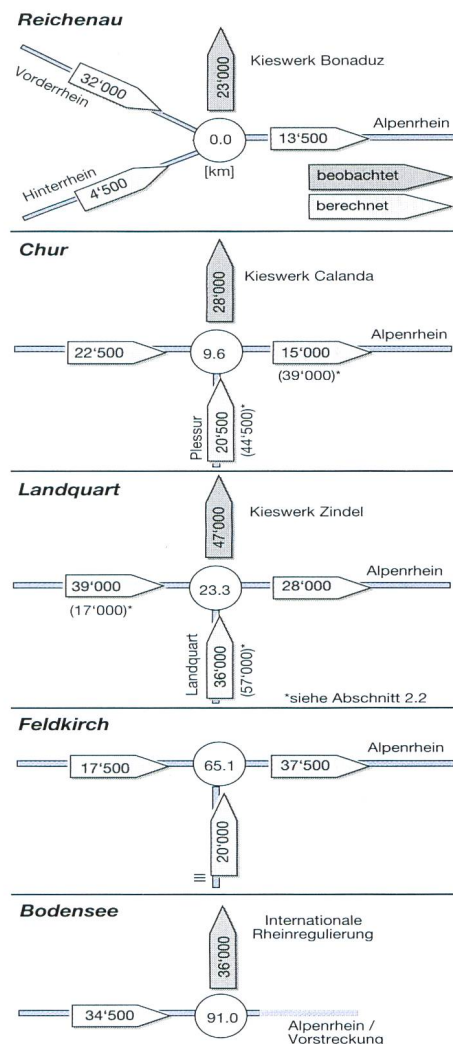


Bild 4. Geschiebebilanzen bei den Mündungen der Zuflüsse und beim Bodensee in m³ pro Jahr für die Periode von 1974 bis 1995.

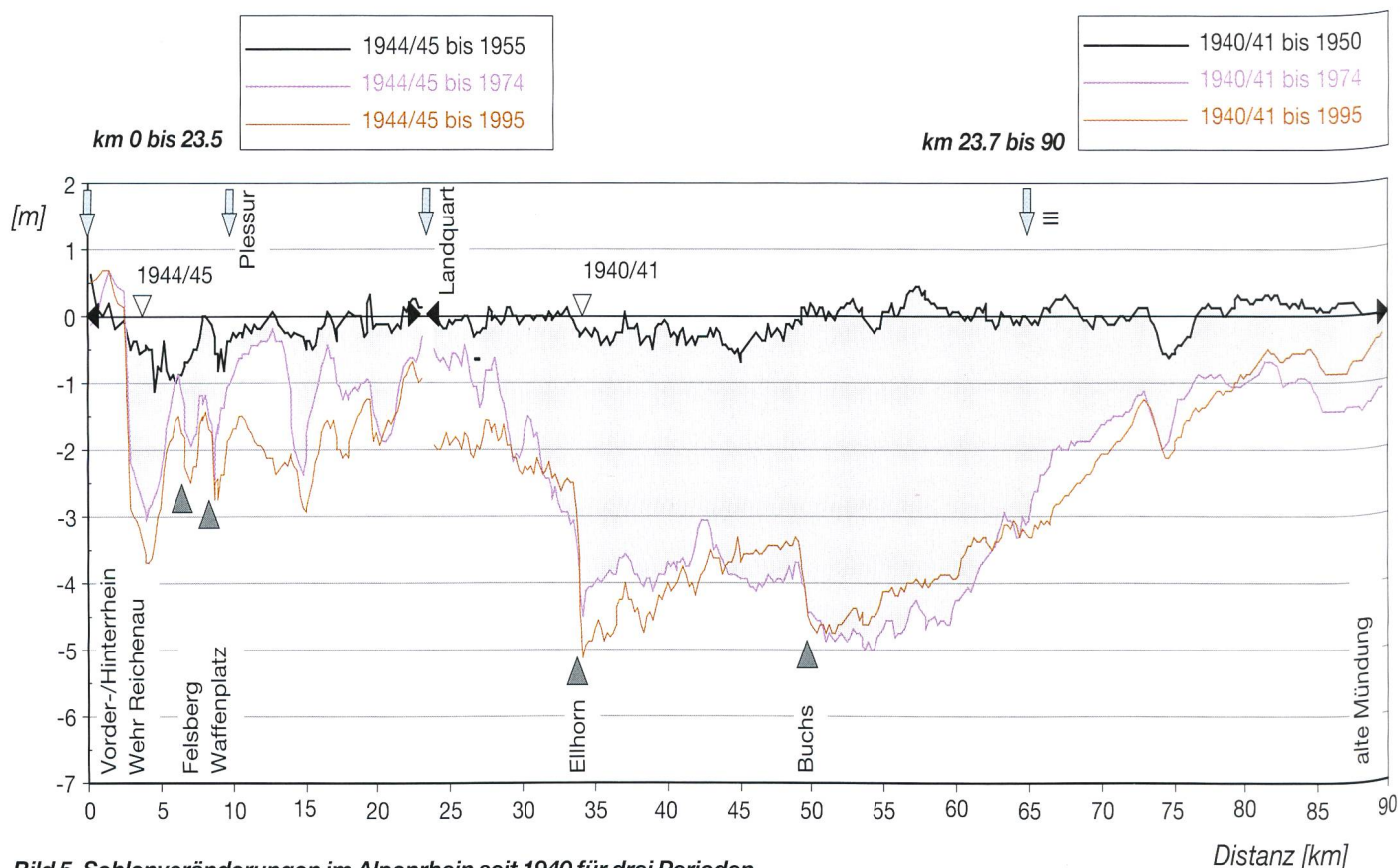


Bild 5. Sohlenveränderungen im Alpenrhein seit 1940 für drei Perioden.

transportkapazität von Bedeutung sind und sich seit den 30er Jahren verändert haben.

Die Absenkung des Flussbettes durch die Kiesentnahmen führte zu einem deutlich schmaleren Flussbett und vermutlich zu etwas feineren Korndurchmessern des transportierten Materials und damit zu einer Zunahme der Geschiebetransportkapazität. Die Gefällsabnahme, welche ebenfalls auf die Absenkung zurückzuführen ist, sowie die Speicherkraftwerke im Einzugsgebiet, welche Sommerabflüsse in den Winter verlagern, verursachten hingegen eine Abnahme der Geschiebetransportkapazität. Die Faktoren in Bild 8 geben das Ausmass der Veränderung an. Interessanterweise heben sie sich gegenseitig nahezu auf. Die veränderten Randbedingungen können also nicht die Ursache für die unterschiedlichen Berechnungsergebnisse sein.

Die Überschätzung der Geschiebefrachten in der Musterstrecke muss also mit der gewählten Methodik zusammenhängen (Bild 8). Mit der Originalformel von Meyer-Peter und Müller (1948) wird nach Hunziker (1995) die Geschiebetransportkapazität um einen Faktor 1,6 überschätzt. Zudem werden mit dem massgebenden Profil der Musterstrecken, in welchen es alternierend Bänke hat, die Kolke zu stark gewichtet (Zarn, 1997). Dadurch wird für zu kleine Abflüsse Geschiebetransport vorausgesagt, wodurch die Jahresfrachten in den Musterstrecken um einen Faktor 4,4 überschätzt werden. Wird die von

Meyer-Peter berechnete Geschiebefracht von 389 400 m³ für die obere Musterstrecke mit den in Bild 8 aufgeführten Faktoren korrigiert – Multiplikation bei positiven und Division bei negativen Werten – bei gleichzeitiger Berücksichtigung des unterschiedlichen Raumgewichtes, so resultieren

$$389\,400 \text{ m}^3/\text{Jahr} \cdot \frac{1,5 \cdot 1,6}{1,4 \cdot 1,6 \cdot 1,6 \cdot 4,4} \cdot \frac{18}{20} = 53\,300 \text{ m}^3/\text{Jahr}$$

was etwa dem mit dem numerischen Modell für die Periode von 1974 bis 1988 berechneten Wert von 57 000 m³ pro Jahr entspricht.

Extrapolation

In Bild 9 sind die mittleren jährlichen Geschiebefrachten (Kurve a), welche mit dem numerischen Modell des Alpenrhins für die Periode von 1974 bis 1988 berechnet wurden, für die Strecke von der Landquartmündung bis zur Illmündung analog zu Bild 3a dargestellt. Die Geschiebefracht für die Musterstrecke bei km 53,3 ist speziell gekennzeichnet. Ausgehend von dieser Jahresfracht wurden analog dem Vorgehen von Meyer-Peter und Lichtenhahn (1963) die Geschiebefrachten extrapoliert.

Für den Abriebbeiwert nach Sternberg (1875) wurde einmal wie bei Meyer-Peter 0,046 km⁻¹ eingesetzt (Kurve b) und einmal wie in der numerischen Berechnung 0,010 km⁻¹ (Kurve c).

Der Unterschied zwischen den Kurven a und b zwischen km 25 und km 45 ver-

deutlicht die Problematik der Extrapolation der Geschiebefrachten mit der J-Formel. Meyer-Peter und seine Mitarbeiter waren sich zwar bewusst, dass die Anwendung der J-Formel respektive die Extrapolation nur bei Gleichgewicht zulässig ist. Sie haben die relativ geringen Unterschiede zwischen dem theoretischen Gleichgewichtslängenprofil und dem effektiven Längenprofil zwar erkannt, waren sich der Bedeutung des Flussbettes als Geschiebespeicher (Jäggi, 1992) aber nicht bewusst.

Damals war man der Auffassung, dass zumindest für die Strecke von der Illmündung bis zum Ellhorn ein Gleichgewicht nahezu erreicht sei und deshalb die J-Formel angewendet werden könne. Wie die Ausführungen im Abschnitt 2.2 zeigen, ist der Alpenrhein aber auch in dieser Strecke von einem Gleichgewicht weit entfernt. Die Extrapolation über das Ellhorn hinaus bis zur Landquartmündung sahen auch Meyer-Peter und Lichtenhahn als gewagt an und zweifelten deshalb die Jahresfrachten von 1,4 Mio m³ unterhalb der Landquartmündung an.

Der Unterschied zwischen den Kurven b und c verdeutlicht den grossen Einfluss des Abriebbeiwertes auf den Geschiebetransport. Die neueren Untersuchungen am Alpenrhein und insbesondere die Arbeit von Mikoš (1993) zeigen, dass ein Abriebbeiwert von 0,046 km⁻¹ viel zu hoch ist und darum eine Extrapolation eine zu hohe Geschiebefracht bei Landquart ergibt. Heute geht man von

einem durchschnittlichen Abriebbeiwert in der Grössenordnung von 0,010 km⁻¹ aus.

5. Schlussfolgerungen und Ausblick

Der Alpenrhein liefert zwar Geschiebe, aber die Mengen sind begrenzt. Sie wurden früher um einen Faktor 10 und mehr überschätzt. Die Bewilligung der enormen Kiesentnahmen in den 50er und 60er Jahren ist zu einem grossen Teil darauf zurückzuführen. Heute stammt ein beachtlicher Teil der Geschiebefrachten aus der Sohlenerosion. Weil tendenziell mit einer Abnahme der Erosionsraten zu rechnen ist, werden auch die transportierten Geschiebefrachten zurückgehen. Das Beispiel Alpenrhein zeigt, dass mit Kiesentnahmen in Alluvionsflüssen der Geschiebehaushalt wirkungsvoll beeinflusst werden kann.

Sowohl der aktuelle Geschiebehaushalt des Alpenrheins als auch die Prognose über dessen Entwicklung zeigen, dass auch in Zukunft mit grösseren Sohlenveränderungen zu rechnen ist. Inwieweit diese Sohlenveränderungen toleriert oder gar erwünscht sind, ist zurzeit Gegenstand umfangreicher Abklärungen. Es gilt als wahrscheinlich, dass mittel- bis langfristig in den Geschiebehaushalt eingegriffen werden muss. Dazu sind folgende Massnahmen denkbar: Veränderung des Geschiebeeintrages aus den Zuflüssen, Blockrampen, Veränderung der Flussbettbreite und Kiesentnahmen.

Kiesentnahmen können ein sehr effizientes Mittel gegen unerwünschte Auflandungen oder zur Abtiefung eines Flussbettes sein. Damit nicht über das Ziel hinausgeschossen wird, müssen vorgängig der Geschiebehaushalt bestimmt und die Anforderungen an den zukünftigen Flusslauf festgelegt werden. Die Entscheidungskriterien sind unter anderem von der angestrebten Morphologie abhängig. Für die Bestimmung des Geschiebehaushaltes in Alluvionsflüssen ist der Einsatz von numerischen Modellen anzustreben. In jedem Fall sind die Auswirkungen von Kiesentnahmen mittels regelmässiger Beobachtung der Sohlenentwicklung zu überprüfen.

Dank Die Untersuchungen, auf welche sich der vorliegende Beitrag abstützt, wurden von den Kantonen Graubünden und St. Gallen, dem Studienkonsortium Rheinkraftwerke Schweiz-Liechtenstein sowie der Internationalen Rheinregulierung finanziert. Die Arbeiten wurden zum Teil an der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich durchgeführt.

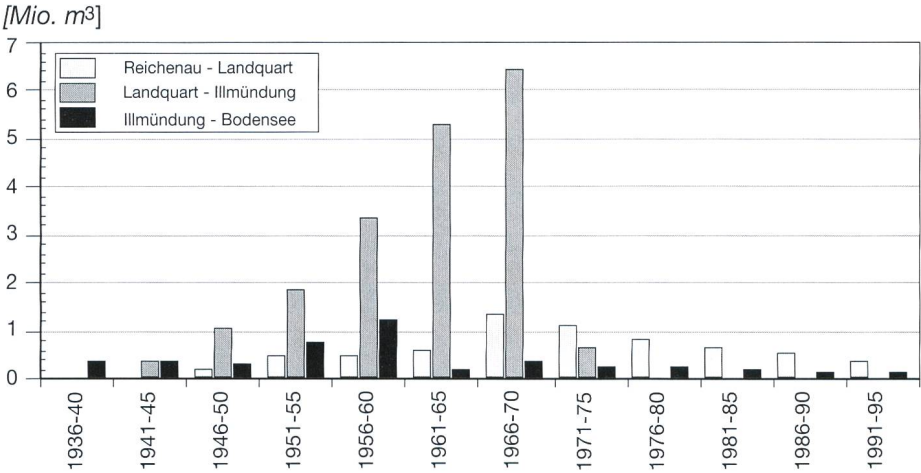


Bild 6. Kiesentnahmen aus dem Alpenrhein seit 1936 in drei Teilstrecken.

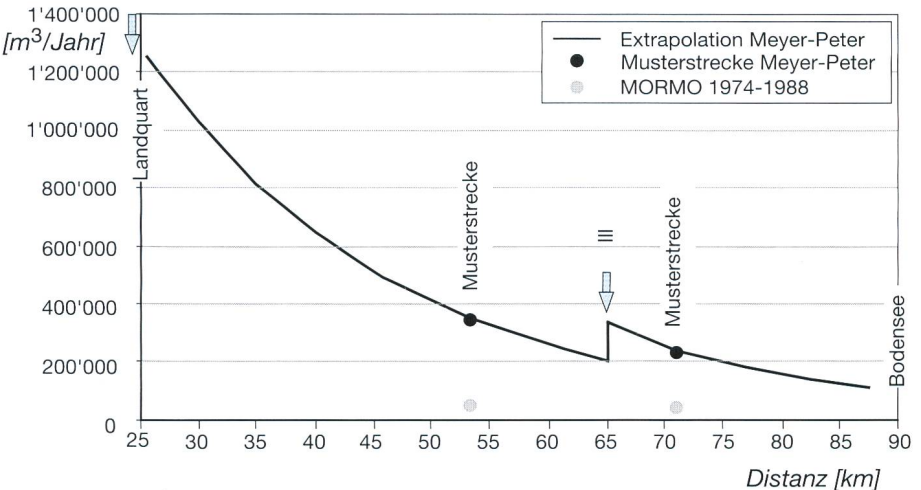


Bild 7. Durchschnittliche jährliche Geschiebefrachten im Alpenrhein zwischen der Landquartmündung und dem Bodensee nach Meyer-Peter und Lichtenhahn (1963, Raumgewicht 20 kN/m³).

Prozess/Randbedingung	Meyer-Peter/ Lichtenhahn	MORMO	Faktor
Eintiefung			
Breite	120 m	100 m	+ 1.5
Korndurchmesser	2.78 mm	2.66 mm	+ 1.6
Gefälle	1.7‰	1.6‰	- 1.4
Abfluss (Verlagerung von Sommerabflüssen ins Winterhalbjahr)			- 1.6
Methodik			
Transportformel	$\phi = 8 (\theta - \theta_{cr})^{1.5}$	$\phi = 5 (\theta - \theta_{cr})^{1.5}$	- 1.6
Methode	charakteristisches Querprofil mit Streifenmethode	Mittelwerts- hydraulik	- 4.4

Bild 8. Einfluss verschiedener Randbedingungen und der Methodik auf die berechneten Geschiebefrachten in der Musterstrecke bei km 53,3.

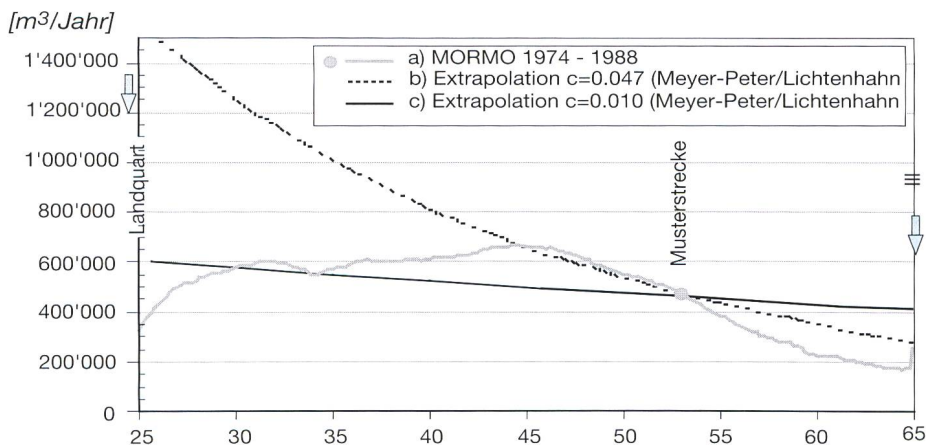


Bild 9. Vergleich der mit dem numerischen Modell berechneten Geschiebefrachten zwischen den Mündungen der Landquart und der Ill und der Extrapolation mit der J-Formel mit verschiedenen Abriebbeiwerten (Raumgewicht 20 kN/m³).

Referenzen

Bergmeister, U.; Kalt, L. (1992): Der Alpenrhein und seine Regulierung (Hg.); Internationale Rheinregulierung, Buchs Druck und Verlag, Buchs.
 Göldi, Ch. (1990): Die Rheinkorrektion von 1927 bis heute; in: Ackermann, O.; Kessler, N.; Reich, H.J.; Strickler, H. (Hg.): Werdenberger Jahrbuch 1990; Historisch-Heimatkundliche Vereinigung des Bezirks Werdenberg, 3. Jahrgang, 93–101.
 Hunziker & Zarn (1998): Morphologie und Geschiebehaushalt des Alpenrheins, Zusammenfassender Bericht der Untersuchungen zwischen 1991 und 1997 im Auftrag der Kantone St. Gallen und Graubünden, 22 Seiten (unveröffentlicht).
 Hunziker, R.P. (1995): Fraktionsweiser Geschiebetransport; Mitteilung Nr. 138 der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich.

Jäggi, M. (1985): Die flussbauliche Bedeutung alternierender Bänke; wasser, energie, luft; 77. Jahrgang, Heft 1/2, 14–18.
 Jäggi, M. (1992): Sedimenthaushalt und Stabilität von Flussbauten; Mitteilung Nr. 119 der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich, 105 Seiten.
 Lichtenhahn, C. (1982): Jährliche Geschiebefracht in der internationalen Rheinstrecke von km 65 bis km 90 und Längenprofil bei verminderter Geschiebefracht bei km 65, Bern (unveröffentlicht).
 Meyer-Peter, E.; Favre, H.; Müller, R. (1935): Beitrag zur Berechnung der Geschiebeführung und der Normalprofilbreite von Gebirgsflüssen; Schweizerische Bauzeitung, Band 105, Nr. 9 u. 10, 2. März, 95–100 und 109–113.
 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.

Meyer-Peter, E.; Müller, R. (1948): Formulas for Bed-Load Transport; IAHSR, Stockholm 7.–9. 6. 1948, 1–26.

Mikoš, M. (1993): Fluvial Abrasion of Gravel Sediments; Mitteilung Nr. 123 der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich.

Sternberg, H. (1875): Untersuchungen über Längs- und Querprofile geschiebeführender Flüsse; Zeitschrift für Bauwesen, Wien, Vol. 25, 483–506.
 Strickler, A. (1923): Beiträge zur Frage der Geschwindigkeitsformel und der Rauheitszahlen für Ströme, Kanäle und geschlossene Leitungen; Mitteilung Nr. 16 des Amtes für Wasserwirtschaft; Eidg. Departement des Innern, Bern.

Zarn, B. (1997): Einfluss der Flussbettbreite auf die Wechselwirkung zwischen Abfluss, Morphologie und Geschiebetransportkapazität; Mitteilung Nr. 154 der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich, 240 Seiten.
 Zarn, B.; Oplatka, M.; Pelland, St.; Mikoš, M.; Hunziker, R.; Jäggi, M. (1995): Geschiebehaushalt Alpenrhein; Neue Erkenntnisse und Prognosen über die Sohlenveränderungen und den Geschiebetransport; Mitteilung Nr. 139 der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich, 187 Seiten.

Adresse des Verfassers: Dr. Benno Zarn, Hunziker und Zarn, Ingenieurbüro für Fluss- und Wasserbau, Schachenallee 29, CH-5000 Aarau.

Energiepolitische Weichenstellungen des Bundesrates

■ Energieforum Schweiz

Der Bundesrat hat die seit langem erwarteten Entscheidungen zur Elektrizitätsmarktöffnung und Kernenergie gefällt.

Zuhanden des Parlamentes verabschiedete er die Botschaft zum Elektrizitätsmarktgesetz (EMG). Die Liberalisierung soll gestaffelt erfolgen und der Strommarkt sechs Jahre nach Inkrafttreten des Gesetzes vollumfänglich geöffnet sein. In einer ersten Phase sollen die Grosskonsumenten mit einem Jahresverbrauch von mehr als 20 Gigawattstunden ihren Strom bei einem Produzenten ihrer Wahl kaufen können. Das sind in der Schweiz rund 110 Unternehmungen. Zu Beginn beträgt die Marktöffnungsquote 21 %, verglichen mit 29 % im EU-Raum. Zusätzlich sollen auch die Verteilwerke Zugang zum Markt haben,

und zwar im Umfang der Bezugsmengen für berechnete Kunden sowie im Umfang von 10 % ihres Jahresabsatzes an feste Kunden. Nach drei Jahren soll der Schwellenwert für Grossverbraucher auf 10 Gigawattstunden gesenkt und gleichzeitig der Jahresabsatz der Verteilwerke auf 20 % erhöht werden. Dies entspricht einer Marktöffnungsquote von 34 %. Auf Beginn des siebten Jahres soll der Elektrizitätsmarkt vollständig geöffnet sein.

Um den geregelten Netzzugang, den sogenannten «Regulated Third Party Access», zu gewährleisten, verlangt der Gesetz-

entwurf von der Elektrizitätswirtschaft die Errichtung einer nationalen Netzgesellschaft innerhalb von drei Jahren.

Der Gesetzesentwurf enthält keine Bestimmungen bezüglich nicht amortisierbarer Investitionen (NAI). Der Bundesrat lehnt eine Abgeltung der NAI im Bereich der Kernenergie ab. Die auf Einzelfälle beschränkte, restriktive Entschädigung bei Wasserkraftwerken soll in dem sich in der parlamentarischen Beratung befindlichen Förderabgabebeschluss (FAB) geregelt werden.