

Zeitschrift: Berichte der St. Gallischen Naturwissenschaftlichen Gesellschaft
Herausgeber: St. Gallische Naturwissenschaftliche Gesellschaft
Band: - (2005)

Artikel: Zur Hydrologie des Flusssystems Rhein
Autor: Vischer, Daniel
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-832660>

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: 30.01.2026

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

Zur Hydrologie des Flusssystems Rhein

Daniel Vischer (Wallisellen)

1 DAS FLUSSSYSTEM

Hier wird der Rhein von seiner Quelle beim Tomasee, 3 km südlich des Oberalppasses, bis zum Rheinfall betrachtet. Die geographischen Bezeichnungen seinem Lauf entlang sind:

- Vorderrhein Quelle–Reichenau GR
- Alpenrhein Reichenau GR–Bodensee
- Bodensee-Obersee
- Seerhein Konstanz–Gottlieben
- Bodensee-Untersee
- Hochrhein Stein am Rhein–Rheinfall

An sich erstreckt sich der Hochrhein von Stein bis Basel. Auch wird beim Alpenrhein aus Schweizer Sicht häufig eine Unterteilung in Bündner Rhein und St. Galler Rhein vorgenommen. Die Anwohner sprechen aber so oder so nur vom Rhein oder Rein (romanisch).

Eine Schlüsselstelle im Flusssystem bildet die auffällige Talverzweigung bei Sargans. Dort hält sich der Rhein gleichsam an den rechten Zweig und fliesst dem Bodensee zu. Er könnte sich aber auch an den linken Zweig halten und sich in den Walensee und den Zürichsee ergießen. Tatsächlich liegt die Wasserscheide wenig westlich von Sargans etwa auf der gleichen Höhe wie die Hochwasserspiegel des 3 km östlich davon ablaufenden Rheins. Freilich hat der Mensch dort durch starke Flussdämme dafür gesorgt, dass der Rhein seinem Bett und damit dem rechten Zweig «treu» bleibt. Wie es zu dieser flussbaulichen Massnahme kam, wird in Kapitel 2 gesagt.

Ein Blick auf eine Schweizer Karte zeigt, dass der Weg des Rheins im linken Zweig entlang der Seez, der Linth, der Limmat und der Aare nach Koblenz bei Waldshut führen würde. Er wäre dann um fast 70 km oder einen Drittel kürzer als der Weg des heutigen Rheins dorthin. In anderen Worten: Der aktuelle Rhein schlägt unterwegs nach Koblenz und Basel einen beträchtlichen Umweg über die Boden-

seeregion ein. Die Ursache liegt in der geologischen Entstehungsgeschichte des Gebiets, die im Kapitel «Geologie» beschrieben wird.

Die gleiche Ursache ist dafür verantwortlich, dass das Einzugsgebiet des Rheins vom Tomasee bis zum Rheinfall extrem «rechtslastig» ist (Abb. 1). Das heisst, der Rhein, einschliesslich des von ihm durchflossenen Bodensees, erhält sein Wasser vor allem von rechts. Dementsprechend münden alle grösseren Zubringer von rechts ein. Es sind dies

- der Hinterrhein
- die Plessur
- die Landquart
- die Ill
- die Dornbirnerach
- die Bregenzerach
- die Argen
- die Schussen und
- die Radolfszeller Aach.

Eine Ausnahme bildet der Rheintalische Binnenkanal, der bei Altenrhein von links in den Obersee fliesst. Die Rechtslastigkeit widerspiegelt sich auch im Einzugsgebiet. Dieses misst bis zum Rheinfall (Station Neuhausen) insgesamt 11 887 km². Davon liegen 9894 km² oder 83% rechts. Die Bodenseefläche von 536 km² ist in der Gesamtzahl eingeschlossen, deshalb wird hier zum rechten Teil auch die rechte Hälfte des Bodensees von 268 km² hinzugezählt.

2 DAS REGIME DES ALPENRHEINS UND DIE STABILITÄT SEINER SOHLENLAGE

2.1 Abflussschwankungen von Jahr zu Jahr

Die mittleren Jahresabflüsse des Vorder- und Hinterrheins sowie des Alpenrheins sind in Tab. 1 zusammen mit Daten über die Einzugsgebiete festgehalten. Im Hinblick auf Kapitel

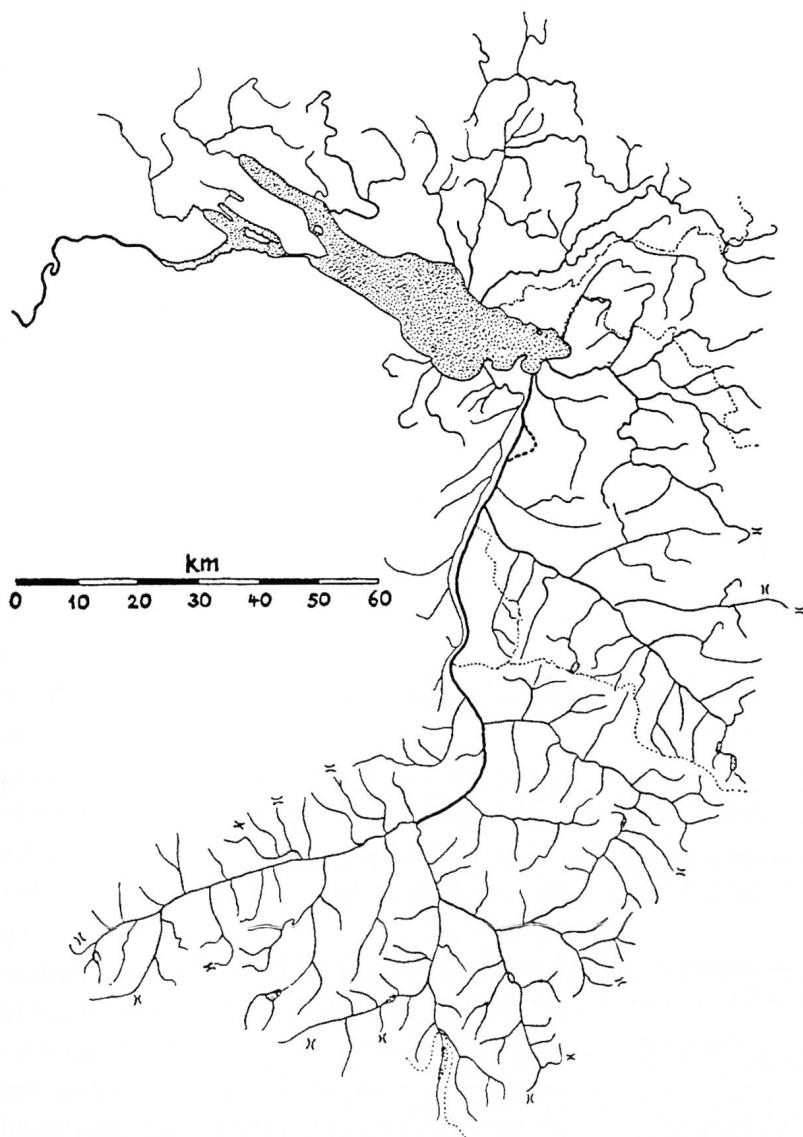


Abb. 1. Der Rhein und seine Zuflüsse: Flusssystem von der Quelle bis zum Rheinfall (aus KIEFER, 1972).

4 werden auch die entsprechenden Werte des Hochrheins bei Neuhausen angegeben. Bezieht man die mittleren Jahresabflüsse auf die Einzugsgebietsflächen, erhält man mittlere Abflussspenden in der Größenordnung von 30 bis 40 l/s km². Das entspricht dem, was auch andere Alpenflüsse abführen. Genaue Vergleiche sind schwierig, weil die Messperioden der Limnigraphenstationen unterschiedlich sind. Greift man unbesehen davon einige Zahlen aus dem neuesten Hydrologischen Jahrbuch der Schweiz, ergeben sich 39 l/s km² für den Alpenrhein in Diepoldsau, 35 l/s km² für die Rhone bei Porte du Scex und 45 l/s km² für den Tessin bei Bellinzona. Die gleichen Zahlen lassen sich na-

türlich auch als Abflusshöhe ausdrücken und lauten dann 1230 mm/a, 1100 mm/a und 1420 mm/a.

Wie gross sind die Abflusschwankungen von Jahr zu Jahr? Die kleinsten Jahresmittel der in Tab. 1 angeführten Stationen des Alpenrheins liegen 22 bis 38% unter dem langjährigen Wert. Die grössten übersteigen ihn um 30 bis 47%. Letztere traten im Jahr 1999 auf; die Ausnahme bildet der Hinterrhein bei Fürstenau, wo das Maximum 1975 gemessen wurde. Diese Abweichungen hängen mit den Niederschlagsschwankungen von Jahr zu Jahr zusammen und zeigen, dass diese im Verhältnis zu anderen Regionen der Erde moderat sind.

2.2 Saisonale Abfluss-schwankungen

Das Abflussregime eines Alpenflusses entspricht gewöhnlich einer Überlagerung des glazialen, des nivalen und des pluvialen Abflusstyps. Doch ist das Einzugsgebiet

des Alpenrheins bis Diepoldsau nur zu 1,4% vergletschert, so dass der glaziale Abflusstyp beim Alpenrhein kaum eine Rolle spielt. Zum Vergleich sei angeführt, dass das Einzugsgebiet der Rhone bis zum Genfersee zehnmal mehr vergletschert ist.

Beim Alpenrhein dominiert in den hohen und mittleren Regionen der nivale Abflusstyp, bei dem das Abflussmaximum je nach Höhenstufe im April, Mai oder Juni auftritt. Und in den tieferen Regionen überwiegt der pluviale Abflusstyp, bei dem diese markante saisonale Schwankung fehlt. Die Überlagerung beider Typen äussert sich bei Diepoldsau in einem ausgeprägten Abflussmaximum im Juni.

Solche Regimebetrachtungen beschränken sich freilich auf die Ganglinie der mittleren monatlichen Abflüsse. Kurzfristigere Schwankungen und insbesondere Hochwasser, die gewöhnlich zwischen Mai und September anfallen, führen situativ zu Abweichungen. Auf diese Hochwasser wird im Kapitel «Flusskorrekturen» eingegangen.

2.3 Anthropogene Einflüsse

Es gibt sowohl bewusste Eingriffe in den Wasserhaushalt des Alpenrheins als auch weniger bewusste. Die ersten stammen von den Wasserkraftwerken, die letzteren von Änderungen bei der Besiedelung und Bewirtschaftung des Einzugsgebiets.

Einige Kraftwerke leiten Wasser über die Wasserscheide. So erfolgen Zuleitungen aus dem Linth-Limmatgebiet zum Speicher Gigerwald und aus dem Inngebiet zu den Speichern Silvretta und Kops. Demgegenüber gibt es eine Ableitung zu Gunsten des Ticinogebiets zum Ritomsee. Die Bilanz zeigt, dass der Alpenrhein dadurch im Jahresdurchschnitt mit rund 8 m³/s angereichert wird, das sind 3,5% seines Abflusses in Diepoldsau (VISCHER, 1993).

Der Speicherbetrieb der Kraftwerke führt zu einer saisonalen Umlagerung von Wasser. Seit 1919 wurden im Einzugsgebiet des Alpenrheins zwei Dutzend Speicherseen von insgesamt 773 Millionen m³ Inhalt gebaut. Rechnet man mit einer Ausnutzung der Speichermöglichkeit von 70% und folglich von 541 Millionen m³, so ergibt das auf ein halbes Jahr bezogen eine Abflussänderung von 34 m³/s. Das bedeutet, dass der Sommerabfluss des Alpenrheins in Die-

poldsau um durchschnittlich 34 m³/s oder 10% vermindert und der Winterabfluss entsprechend um 34 m³/s oder 22% vermehrt wird.

Nun betreiben die Kraftwerke ihre Generatoren nicht mit einer gleichmässigen Leistung, sondern folgen den Schwankungen des Strombedarfs. Das führt dazu, dass sie ihr Triebwasser vor allem in den Werktag-Tagesstunden turbinieren. Daraus resultiert ein periodischer Schwallbetrieb mit bedeutenden Abflussschwankungen zwischen Werktag und Sonntag (Abb. 2) sowie innerhalb eines Werktages.

Im Einzugsgebiet des Alpenrheins hat sich in den letzten 100 Jahren natürlich auch die übrige Wasserwirtschaft sowie die Landnutzung geändert. Hier seien nur einige Stichworte angeführt: Verbauung der Wildbäche, Kanalisierung der Flüsse, Meliorationen mit zum Teil ausgedehnten Entwässerungsanlagen, Grundwasserentnahmen, Abwasserentsorgungen, Versiegelung des Bodens durch Siedlungen und Verkehrswege, starke Aufforstungen. Gesamthaft gesehen waren diese Entwicklungen hydrologisch aber nicht relevant. Das ergab eine Untersuchung der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, die für die ihr zur Verfügung stehende Messreihe von 1910 bis 1987 Folgendes feststellte: Die mittleren jährlichen Abflüsse des Alpenrheins zeigen einen steigenden, aber nicht signifikanten Trend, was die Verfasser auf einen ebensolchen Trend der jährlichen Niederschläge zurückführen. Die saisonalen Abflussänderungen lassen sich durch den Speicherbetrieb der Kraftwerke allein erklären (LUFT und VIESER, 1990).

Tab. 1. Kenndaten der Einzugsgebiete und langjährige Mittelwerte der Abflüsse des Rheins von Ilanz bis zum Rheinfall (gemäss Hydrologischem Jahrbuch der Schweiz, 2002).

Fluss/Station	Einzugsgebiet km ²	mittlere Höhe m ü. M.	Messperiode Jahre	Abfluss m ³ /s
Vorderrhein/Ilanz	776	2020	1962–2002	33,2
Hinterrhein/Fürstenau	1575	2118	1974–2002	41,1
Rhein/Domat-Ems	3229	2020	1962–2002	117
Rhein/Diepoldsau	6119	1800	1984–2002	240
Rhein/Neuhausen	11887	–	1959–2002	374

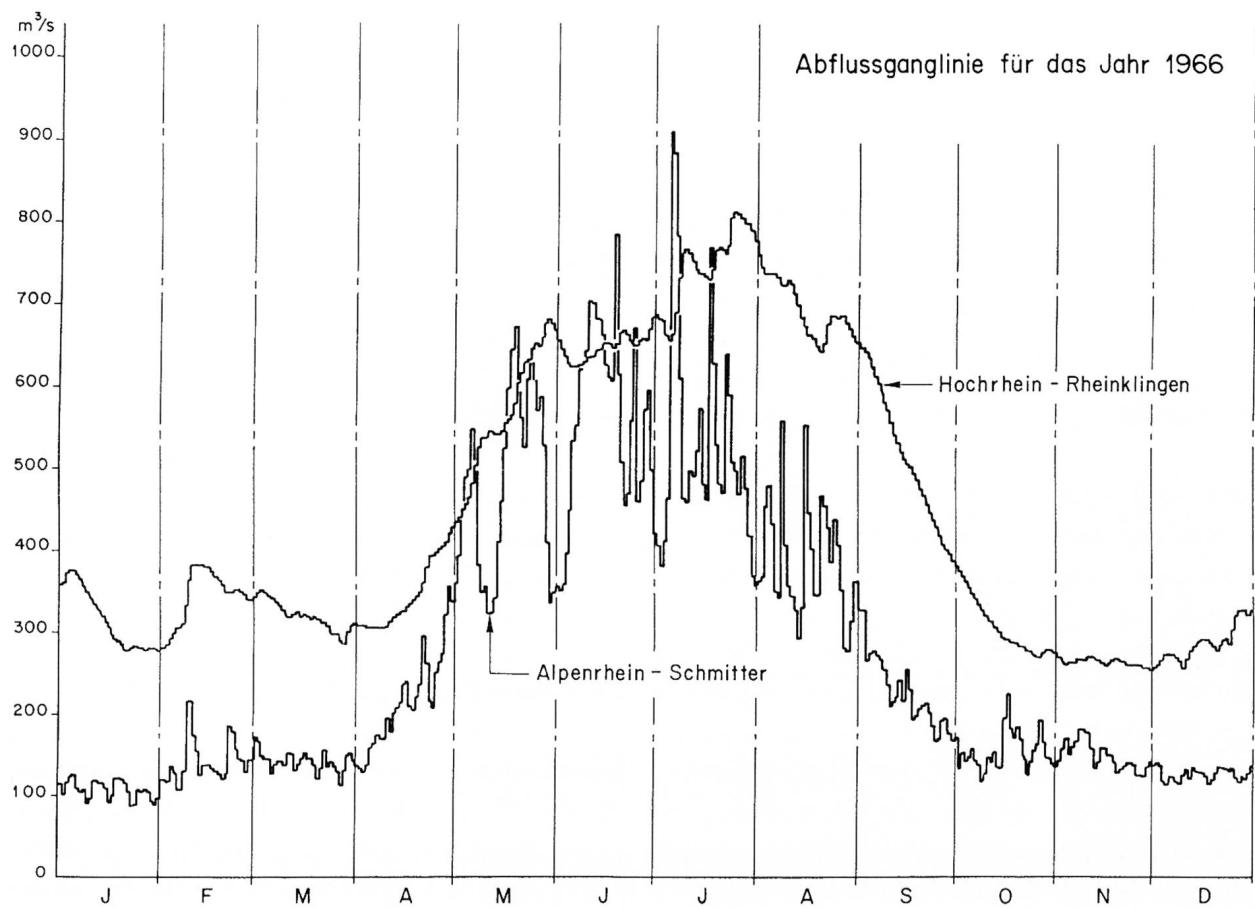


Abb. 2. Ganglinie der Abflüsse des Alpenrheins bei Schmitter und des Hochrheins bei Rheinklingen; gemessene Tagesmittel des Jahres 1966 (aus KHR, 1980).

Neuere und grossräumigere Untersuchungen spiegeln die aktuelle Klimaänderung wider. Das heisst, sie belegen den steigenden Trend der Gesamtniederschläge signifikant und deutlich. Bezogen auf das Einzugsgebiet des Alpenrheins manifestiert sich das in einer Zunahme der Winterniederschläge um rund 10% im 20. Jahrhundert. Die Sommerniederschläge sind in etwa gleich geblieben (BADER und KUNZ, 1998). Da ein Teil der Winterniederschläge als Schnee fällt, der in höheren Lagen erst im Sommer schmilzt, würde man entsprechend sowohl einen winterlichen wie einen sommerlichen Anstieg der Abflüsse erwarten. Ein solcher lässt sich jedoch nicht nachweisen. Wie eine einschlägige Arbeit des Bundesamtes für Wasser und Geologie zeigt, werden die erhöhten Niederschläge offenbar durch die erhöhte Verdunstung kompensiert (EMMENEGGER und SCHÄDLER, 1997). Das 20. Jahrhundert brachte ja nicht nur mehr Niederschläge, sondern auch eine Zunahme der

mittleren Jahrestemperatur von etwa 1,3 Grad C in der Deutschschweiz (OCCC, 2002).

2.4 Längsprofile

Abb. 3 zeigt einige Längsprofile von Flussstrecken oberhalb von Ragaz. Auffällig ist die regelmässige Form beim Vorderrhein und der anschliessenden Rheinstrecke. Sie entspricht einer Exponentialfunktion, wie man sie auch bei andern Flussstrecken beobachten kann. Als Begründung werden in der Literatur verschiedene flussmorphologische Theorien angeführt. Hier soll ein Ansatz aus der Geschiebetheorie skizziert werden:

Das Geschiebe wird unterwegs durch chemische und mechanische Einwirkungen zerkleinert sowie durch Entmischungsvorgänge verringert. Das manifestiert sich augenfällig in der laufenden Abnahme der Korngrössen des Geschiebes. Setzt man diesen «Transportverlust» über einen kleinen Wegschritt proportional zur Geschiebe-

menge, erhält man eine Differentialgleichung, deren Lösung zu einer Exponentialfunktion führt. Bringt man über die Geschiebetheorie noch die Strömungskraft ins Spiel, die das Geschiebe bewegt, so ergibt sich für das Sohlengefälle ebenfalls eine Exponentialfunktion. Dasselbe gilt dann auch für die Sohlenkoten, was dem Längsprofil die erwähnte schöne Form gibt. Freilich fusst dieser Zusammenhang auf mehreren Vereinfachungen, die hier aber nicht näher erläutert werden sollen. Voraussetzung ist auf jeden Fall, dass der Fluss auf seinem eigenen Geschiebe abläuft.

Die regelmässige Form des Längsprofils des Vorderrheins und der anschliessenden Rheinstrecke bis Ragaz deutet also darauf hin, dass dieser Fluss weitgehend auf seinem Geschiebe abläuft. Im Vergleich dazu ist das Längsprofil des Hinterrheins bedeutend unregelmässiger. Durch die geschilderten Zusammenhänge etwas voreingenommen könnte man es zumindest als eine Sequenz von Exponentialkurven deuten, die von Stufen unterbrochen sind. Dort, wo die Exponentialkurven einigermassen passen, läuft der Hinterrhein weitgehend auf seinem Geschiebe ab. Im Gegensatz dazu fliesst er auf

den Stufen mehrheitlich über Fels und auf Residualblöcken, das heisst über starke Hindernisse, die er mit einem steileren Gefälle überwindet. Es sind dies die Schluchtstrecken der Rofla zwischen Sufers und Andeer sowie der Via Mala zwischen Zillis und Thusis. Andere Seitenflüsse des Alpenrheins zeigen ähnliche Sequenzen.

Selbstverständlich lassen sich natürliche Prozesse nur unvollkommen durch Formeln erfassen. Aber es ist trotz allen Abstraktionen faszinierend, wie ein gut bekannter, weil leicht beobachtbarer natürlicher Zerfallsprozess in Form der Geschiebezerkleinerung sich in den Längsprofilen manifestiert. Dass die Verhältnisse im Detail komplizierter sind, lässt das nächste Kapitel erahnen.

2.5 Geschiebe und Schwebstoffe

Vom Geschiebe war ja bereits die Rede. Dabei stand vor allem der Vorderrhein im Brennpunkt. Hier soll nun der Alpenrhein von Reichenau zum Bodensee betrachtet werden. Für diese rund 90 km lange Flussstrecke liegen neuere Untersuchungsergebnisse vor (ZARN und HUNZIKER, 2001).

Grundsätzlich führt ein Fluss in seinem Wasser gelöste und ungelöste Stoffe mit sich. Zu den ungelösten gehören die Schwimm- und die Schwebstoffe sowie das Geschiebe. Dabei ist das Geschiebe in flussmorphologischer Hinsicht am wichtigsten. Denn der Geschiebehaushalt ist für die Stabilität des Flussbetts und für die Bettform massgebend. Freilich gibt es zwischen dem Geschiebe und den Schwebstoffen einen Zusammenhang. Die Geschiebekörper sind derart schwer, dass sie von der Strömung nur sporadisch von der Flusssohle aufgewirbelt werden und dann gleitend, rollend oder springend einen gewissen Weg zurücklegen,

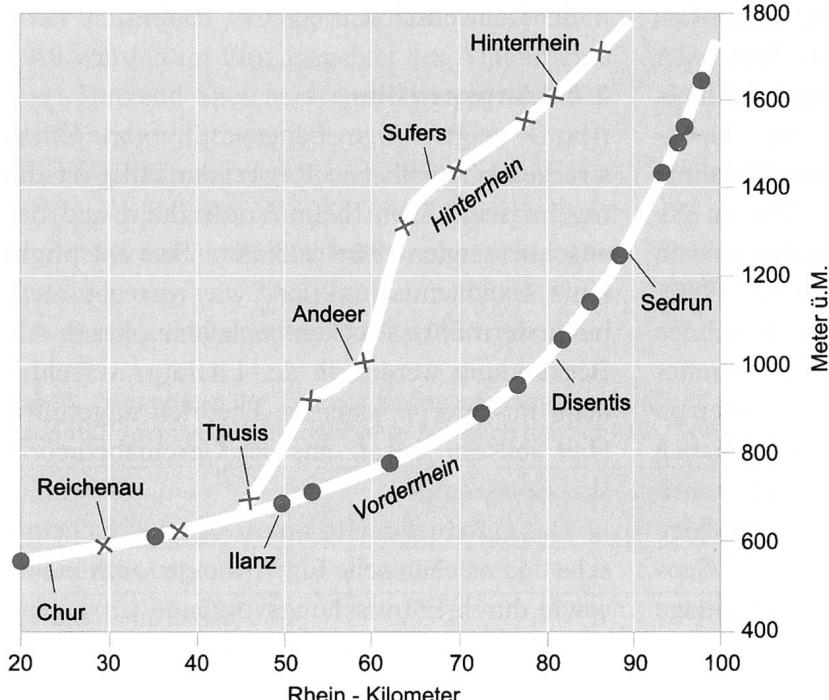


Abb. 3. Längsprofile des Vorder- und Hinterrheins sowie des Alpenrheins bis Chur (aus EHB, 1907).

um dann wieder zu ruhen. Damit ist auch gesagt, dass ihre Bewegung erst bei einer starken Verwirbelung (Turbulenz) einsetzt, das heisst vor allem bei Hochwasser. Ihre mittlere «Reisegeschwindigkeit» ist um Grössenordnungen kleiner als jene des Flusswassers. Anders ist es bei den Schwebstoffen. Diese werden von der Verwirbelung dauernd getragen und haben wie andere Bestandteile des Flusswassers praktisch die gleiche «Reisegeschwindigkeit» wie dieses. Sowohl das Geschiebe wie die Schwebstoffe stammen aber von den im Einzugsgebiet vorhandenen Gesteinsformationen. Ihr Unterschied hängt also nur vom Verwirbelungsgrad der Strömung ab, der natürlich nicht überall derselbe ist. Deshalb können an gewissen Orten Schwebstoffkörner zu Geschiebekörnern werden und umgekehrt. Infolge der Geschiebezerkleinerung geht auch grundsätzlich ein Teil des Geschiebes laufend in Schwebstoffe über.

Hinsichtlich seiner Korngrösse lässt sich das Geschiebe leicht untersuchen. Es genügt, Proben aus dem Flussbett zu nehmen und zu analysieren. Viel schwieriger ist es, die Geschiebeführungen, das heisst die pro Zeiteinheit vom Fluss transportierte Menge zu messen. Gewöhnlich setzt man dafür Fangkästen ein, die man in einem bestimmten Flussquerschnitt eine vorgegebene Zeit lang auf die Flussohle legt. Doch kann man aus der auf diese Weise gesammelten Geschiebemenge schlecht auf die Geschiebeführung schliessen. Denn erstens verläuft die Geschiebeführung örtlich und zeitlich sehr variabel – oft einer vom Winde verwirbelten Blätterwolke gleichend – und zweitens stören die Fangkästen diese Verwirbelung empfindlich. Deshalb verzichtet man heute meist darauf, die Geschiebeführung ähnlich wie die Wasserführung (den Abfluss) pro Sekunde anzugeben. Für Fragen der Stabilität des Flussbetts genügt eine Angabe pro Jahr: die so genannte Geschiebefracht!

Zur Abschätzung der Geschiebefracht bedient man sich numerischer Modelle, mit denen man sowohl die Wasserführung wie die Geschiebeführung für eine längere Flussstrecke und über Jahre simuliert. Dabei führt man

die anfangs gemessene Sohlenlage sowie die Geschiebeentnahmen durch die Kieswerke als Anfangs- und Randbedingung ein. Selbstverständlich trägt man auch den örtlich bekannten Abmessungen der Geschiebekörper und deren Zerkleinerung längs dem Fluss Rechnung. Dann verändert man die Geschiebezufuhr so lange, bis man die am Ende der betrachteten Periode beobachtete Sohlenlage erhält. Aus diesem «Eichungsprozess» gewinnt man den Geschiebehauptsatz des Flusses.

Konkrete Zahlen für die jährlichen Geschiebefrachten des Alpenrheins enthält die angeführte Literatur als Mittelwerte der Periode 1974–1995 (ZARN und HUNZIKER, 2001). Diese Zahlen ergeben sich aus zwei verschieden aufgebauten und geeichten numerischen Modellen und definieren damit eine gewisse Bandbreite, wie sie Abb. 4 wiedergibt. Die kleinste Geschiebefracht von rund 15 000 m³/a führt der Alpenrhein am oberen Ende, also bei Reichenau. Die grösste Geschiebefracht von rund 50 000 bis 60 000 m³/a transportiert er bei Kilometer 50, etwas flussaufwärts von Buchs. Dabei handelt es sich um Durchschnittswerte. Die Schwankungen von Jahr zu Jahr sind beträchtlich. Auch kann ein ausserordentliches Hochwasser Geschiebemassen bewegen, die in der Grössenordnung solcher Jahreswerte liegen.

Wegen der untersten Kiesentnahme an der Mündung trägt der Alpenrhein praktisch kein Geschiebe in den Bodensee ein. Hingegen führt er diesem grosse Mengen von Schwebstoffen zu. Aufgrund von periodischen Deltavermessungen errechnete man die mittlere Jahresfracht für die Periode 1911–1979 auf rund 3 Millionen m³/a (LAMBERT, 1989).

2.6 Dramatische Sohlenänderungen

Die Sohle des Alpenrheins befindet sich nicht in einer Gleichgewichtslage. Es gibt heute Strecken mit Auflandungs- und andere mit Erosionserscheinungen. Selbstverständlich versuchte man seinerzeit mit den verschiedenen Etappen der Alpenrheinkorrektion das Erreichen einer Gleichgewichtslage zu begünstigen. Denn die Anwohner eines Flusses möchten gerne einen

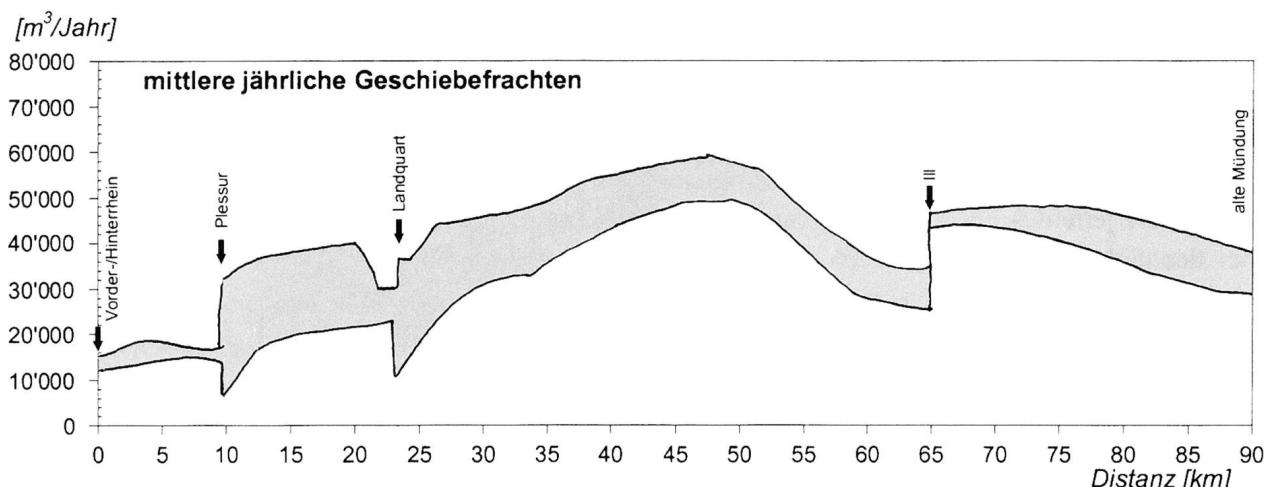


Abb. 4. Mittlere jährliche Geschiebefrachten im Alpenrhein für die Periode 1974–1995. Resultat aus der Simulation mit zwei verschiedenen numerischen Modellen (ZARN und HUNZIKER, 2001).

«Nachbarn», der «im Gleichgewicht» ist. Sohlenhebungen führen ja zu einer Verringerung des Freibords an den Ufern und damit zu einer Erhöhung der Überschwemmungsgefahr. Und Sohleneintiefungen können Ufereinbrüche und Brückeneinstürze bewirken, sowie den Spiegel nutzbarer Grundwasservorkommen absenken. Es ist aber grundsätzlich schwierig, sich mit festen baulichen Massnahmen – das heisst mit der Wahl bestimmter Abflussquerschnitte und Dammhöhen – den Schwankungen eines Abfluss- und Geschieberegimes langfristig anzupassen. Auch gibt es einen systeminhärenten Effekt, der Sohlenhebungen im unteren Teil gleichsam bedingt: die Verlängerung des Alpenrheins! Der geschilderte Schwebstoffeintrag in den Bodensee schüttet dort ein Delta auf, das in den See vorrückt. Von 1900 bis 1960 machte das jährlich im Mittel 23 m aus und damit gesamthaft 1,4 km. Seit 1960 geht dieser Prozess natürlich weiter, das heisst, die Verlängerung des Alpenrheins beträgt heute mehr. Zusammen mit der seit 1972 künstlich vorangetriebenen Vorstreckung macht sie mindestens 5 km aus. Gegenüber dem Zustand um 1900 liegt ein Flussquerschnitt bei Fussach also um 5 km weiter von der Mündung entfernt.

Es ist naheliegend, eine grössere und anhaltende Auflandung mit künstlichen Entnahmen zu mildern oder gar zu kompensieren. Das wird, wie im vorangehenden Kapitel vermerkt, an der

Mündung des Alpenrheins sowie zwischen Reichenau und Landquart ja auch getan. Man hat diese Kiesgewinnung früher aber auch zwischen Landquart und der Mündung betrieben – etwa ab 1940 in zwei subventionierten Baggeranlagen und ab 1950 in immer mehr konzessionierten Kieswerken. Abnehmer des Kieses war die Bauindustrie bis nach Zürich. Dabei basierte die Konzessionerteilung auf der Annahme, dass die mittlere jährliche Geschiebefracht des Alpenrheins unterhalb der Landquartmündung rund 1,3 Millionen m³ erreiche und unterhalb der Illmündung 350 000 m³. Dementsprechend wurden dem Rheinbett beispielsweise zwischen Sargans und der Illmündung von 1940 bis 1972 insgesamt 17 Millionen m³ Kies mit einer jährlichen Spitze von 1,6 Millionen m³ Kies entnommen (ZARN und HUNZIKER, 2001). Tatsächlich war jedoch die anfallende Geschiebefracht – wie aus dem vorangehenden Kapitel ersichtlich – um eine gute Grössenordnung kleiner. Daher bewirkten die Baggerungen eine massive Sohleneintiefung, die bei Sargans und bei Buchs schliesslich rund 5 m ausmachte. Das führte unter anderem 1970 zum Einsturz der Brücke Buchs – Schaan. Die Gegenmassnahme bestand logischerweise in einer Einstellung sämtlicher Kiesentnahmen unterhalb von Landquart – und das innerhalb von zwei Jahren – sowie einer Betriebsbeschränkung für die heute noch bestehenden Kieswerke beim Zusammenfluss des

Vorder- mit dem Hinterrhein in Bonaduz, bei der Mündung der Plessur in Chur und bei der Mündung der Landquart in Landquart.

Seit 1973 verläuft die Entwicklung der Sohlenlage weniger dramatisch, erheischt aber, weil noch fast nirgends ein zumindest einige Jahrzehnte andauerndes Gleichgewicht herrscht, eine Überwachung sowie lokale Eingriffe – etwa in Form von Blockrampen. Im Zeichen der Naturierungsprogramme werden heute zudem Flussbettausweiterungen realisiert und geplant, die selbstverständlich ebenfalls die Geschiebeführung beeinflussen und damit das Längsprofil.

2.7 Fliest der Alpenrhein bald nach Zürich?

In Kapitel 1 war von der auffälligen Talverzweigung bei Sargans die Rede und von der Möglichkeit, dass der Alpenrhein dort nach links statt nach rechts abbiegen könnte. Offenbar hat er das in historischen Zeiten auch sporadisch getan. So bezeugt es jedenfalls ein Chronist für das 1580er Hochwasser (SCHLEGEL, 1992). Auch anfangs des 19. Jahrhunderts machte man sich diesbezüglich zumindest Sorgen (VISCHER, 2003). Vor allem das grosse Rheinhochwasser von 1817, das auch bei Sargans ausuferte, liess die um nur wenige Meter höher gelegene Wasserscheide zwischen Sargans und Mels sichtbar werden. Aber bereits vorher, das heisst 1808, hatte Hans Conrad Escher, der Leiter der Linthkorrektion von 1807–1816, ein Nivellement vom Alpenrhein bei Sargans bis Walenstadt erstellen lassen. Er befürchtete, der Alpenrhein könnte sich infolge von Geschiebeablagerungen bei Sargans ähnlich rasch heben, wie es die Linth bei Ziegelbrücke getan hatte, nämlich in 50 Jahren um rund 3 m. Dann wäre der Alpenrhein wahrscheinlich ganz in Richtung Walensee ausbrochen und hätte mit seinen Wassermassen längs der Linth, dem Zürichsee und der Limmat – und damit auch im Weichbild der Stadt Zürich – eine Katastrophe verursacht.

Angesichts dieser Bedrohung entsandte die Eidgenössische Tagsatzung 1817 eine Kommission ins Rheintal, der neben Escher noch andere

Fachleute angehörten. Ihr Bericht mit Situationsplan und Längsprofilen der Talverzweigung bewog die betroffenen Kantone Graubünden bis Aargau den Flussbauexperten Johann Gottfried Tulla von Karlsruhe kommen zu lassen. Dessen Gutachten von 1819 empfahl eine Korrektion des Alpenrheins von Landquart bis Trübbach, ein Aufschlämmen (Kolmation) der Ebene bei Sargans und die Errichtung eines starken Damms auf der Wasserscheide von Sargans bis Mels. Mangels Einigkeit und Geld wurde davon aber nichts verwirklicht. Später gab es weitere Projekte – auch wehrte sich Zürich noch gegen eine Idee, die einen Flosskanal über die Wasserscheide vorsah, sowie gegen einen von der Bahn um 1860 geplanten Einschnitt. Erst die in den 1860er Jahren begonnene, im Einvernehmen mit Liechtenstein und Österreich durchgeföhrte Alpenrheinkorrektion von Landquart bis zum Bodensee behob die Gefahr. Der Alpenrhein läuft bei Sargans seitdem zwischen Flussdämmen am rechten Talhang.

In den 1990er Jahren schlug ein Ingenieur diesbezüglich eine drastische Änderung vor (SCHLEGEL, 1992). Er plante eine grosszügige Umgestaltung des Alpenrheins unterhalb von Sargans, um Anliegen des Landschaftsschutzes, der Erholung und der Wasserkraftnutzung zu verwirklichen. Die erforderliche Handlungsfreiheit wollte er sich unter anderem durch die Verkleinerung der Hochwassergefahr erkaufen. Deshalb sah er die Ableitung eines Teils der Hochwasser des Alpenrheins vor. Von einer Fassung bei Trübbach sollten bis zu 1000 m³/s Wasser samt dem Geschiebe durch einen 17 km langen Freilaufstollen unter der Alvierkette bis zum 50 m tiefer gelegenen Walensee geführt werden. Doch sagte er über die Weiterleitung der entsprechenden Wassermassen weiter talabwärts nichts Konkretes. Diese Wassermassen würden am dortigen Flusssystem zweifellos ausgedehnte Anpassungen erheischen. Wie das Jahr 1999 zeigte, können die Hochwasser der Linth und des Alpenrheins ja gleichzeitig auftreten. Damals wurde das System Walensee, Linthkanal und Zürichsee durch die Linth allein bis zur Grenze der Belastbarkeit und teilweise

sogar darüber hinaus beansprucht. Dieses System vermöchte also die weit grösseren Zuflüsse aus dem Alpenrhein nicht auch noch zu verkraften. Heute ist es um dieses Projekt, das eine Zeit lang viele Anhänger fand, still geworden (vgl. SCHLEGEL in diesem Werk).

3 DER BODENSEE, EIN STEHENDES, ABER DENNOCH DYNAMISCHES GEWÄSSER

3.1 Abmessungen und Spiegelschwankungen

Der Obersee weist von Bregenz bis Konstanz beziehungsweise bis Ludwigshafen eine Länge von rund 46 und 63 km auf. Seine grösste Breite erreicht er mit rund 12 km im Geviert Romanshorn-Friedrichshafen-Langenargen-Arbon. Die Uferlänge misst 167 km und die Oberfläche bei mittlerem Wasserstand 473 km^2 .

Der Untersee ist wesentlich kleiner und wird zudem von der Reichenau markant unterteilt. Seine Uferlänge erreicht 81 km, seine Oberfläche 63 km^2 (beide Flächenangaben stammen vom Landesvermessungsamt Baden-Württemberg, 2004).

Damit weist der Bodensee also eine Gesamtfläche von 536 km^2 auf, ein Wert, in welchem die Inseln Lindau, Mainau und Reichenau enthalten sind. Zum Vergleich diene, dass der Genfersee eine Oberfläche von 580 km^2 hat und der Neuenburgersee eine solche von rund 220 km^2 .

Die grösste Tiefe des Bodensee-Obersees misst 252 m und findet sich etwa zwischen Uttwil und Fischbach (Abb. 5). Die mittlere

Tiefe beträgt 101 m. Die entsprechenden Werte für den Untersee sind 46 und 13 m. Die Topographie des Seebodens wurde zum letzten Mal 1986–1990 aufgenommen und in Karten 1:5000, 1:25000 und 1:50000 festgehalten (INTERNATIONALE GEWÄSSERSCHUTZKOMMISSION FÜR DEN BODENSEE, 1990).

Nun ist eine Wassertiefe von 252 m sehr beträchtlich. Man denke etwa an einige Meere, wie die Nordsee, die Ostsee oder die Adria, die – abgesehen von einigen örtlichen Senken – seichter sind. Vergleicht man die 252 m aber mit der halben Seelänge von 31 km oder der halben Seebreite bei Uttwil und Fischbach von 5 km (Abb. 5), so macht sie nur 0,8 oder 5% davon aus. So gesehen handelt es sich beim Bodenseebecken also bloss um eine schwache Mulde.

Das Volumen des Obersees wurde für einen mittleren Wasserstand zu $47,7 \text{ km}^3$ bestimmt, jenes des Untersees zu $0,84 \text{ km}^3$. Diese Zahlen widerspiegeln den Unterschied zwischen den beiden Seebecken wohl am deutlichsten. Insgesamt weist der Bodensee somit einen Wasserinhalt von $48,5 \text{ km}^3$ oder rund 50 km^3 (50 Milliarden m^3) auf. Ist das viel oder wenig? Es kommt auf den Vergleich an: Die Schweiz hat eine Oberfläche von etwa $41\,000 \text{ km}^2$. Würde man das Bodenseewasser gleichmäßig auf sie verteilen, ergäbe das eine Wasserschicht von 1,2 m. Das entspricht fast dem mittleren jährlichen Niederschlag von 1,4 m. Der Bodenseehalt ist also von derselben Größenordnung wie die jährlich auf die Schweiz fallende Niederschlagsmenge.

Wie erwähnt dehnt sich die Uferlänge am Obersee auf 167 km und am Untersee auf 81

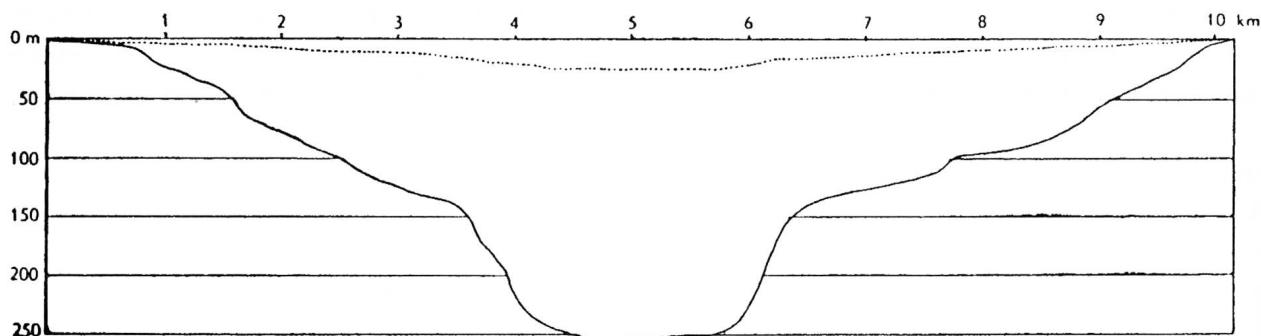


Abb. 5. Querschnitt durch den Obersee zwischen Uttwil und Fischbach, nicht überhöht dargestellt (punktiert) und zehnfach überhöht (ausgezogen). Die Maximaltiefe beträgt 252 m (aus KIEFER, 1972).

km aus. Dazu kommen noch die Uferlängen der Inseln von 19 km. Das führt insgesamt zu 267 km Uferlänge (INTERNATIONALER TECHNISCHER AUSSCHUSS, 1977), was unter anderem bedeutet, dass rund 270 km Ufer von den Wasserstandsschwankungen betroffen sind. Die mittleren und extremen Seestände für den Ober- und den Untersee zeigt Tab. 2 für die Messreihe 1930–2002. Zum Vergleich wird auch der Rekordstand von 1890 angeführt. Zunächst fällt auf, dass der Untersee immer um 20 bis 28 cm tiefer liegt als der Obersee. Das entspricht dem Fliessgefälle des Seerheins von Konstanz bis Gottlieben. Im Grossen und Ganzen schwanken die Spiegel beider Seen zeitlich parallel. Kleine Abweichungen belegen aber doch ein gewisses «Eigenleben». So trat beispielsweise der Höchststand 1999 im Obersee am 11. Juni auf, im Untersee jedoch am 14. Mai.

Die Saison der Höchststände und damit auch der allfälligen Ausuferungen liegt zwischen Mai und September. Hochstände im Winter sind selten. Die Tiefstände stellen sich zwischen Januar und März ein. Der Unterschied zwischen den jährlichen Extremwerten beträgt durchschnittlich 1,60 m. Der Rekordwert stammt mit 3,20 m von 1890 (KIEFER, 1972). Im Hochwasserjahr 1999 waren es mit 2,96 m nahezu 3 m.

Diese Spiegelschwankungen ergeben sich aus dem Umstand, dass der Bodensee nicht reguliert ist. Sein Abfluss erfolgt sowohl in Konstanz wie in Stein am Rhein frei. Dabei bewirkt ein Spiegelanstieg um 1 cm eine Erhöhung des Ausflusses um 2 bis 4 m³/s. Das setzt natürlich voraus, dass der Gesamtsee entsprechend angefüllt wird – seiner Oberfläche von 536 km² gemäss also um 5,4 Millionen m³. Ein Zufluss

zum Bodensee vermag also den Ausfluss nur dann um 2 bis 4 m³/s zu erhöhen, wenn ein Teil seiner Wassermassen, nämlich die erwähnten 5,4 Millionen m³, den See um 1 cm zum Steigen bringen. Und dieser Füllvorgang braucht eine gewisse Zeit. Das führt zwangsläufig zu einer Verzögerung der Ausflussspitze gegenüber einer Zuflussspitze und bei kurzzeitigen Ereignissen auch zu einer starken Dämpfung.

Bezüglich seiner Retentionswirkung kann man den Bodensee geradezu als einen Tiefpassfilter bezeichnen. Er absorbiert die hochfrequenten (kurzzeitigen) Zuflussschwankungen, weil er sie ausglättet, und lässt bloss die niederfrequenten (langzeitigen) durch. Das verdeutlicht der Vergleich der Jahresganglinien von Abb. 2: Die täglichen und wöchentlichen Ausschläge im Alpenrheinabfluss sind im Seeausfluss nicht spürbar. Hingegen durchläuft die saisonale Schwankung des Alpenrheins, der ja noch durch die Zuflüsse der anderen Zubringer ergänzt wird, den See praktisch ungedämpft, jedoch um etwa 3 Wochen verzögert.

3.2 Tendenz zu Spiegeländerungen?

Wie bereits in Kapitel 2 gesagt, hat sich der mittlere jährliche Abfluss des Alpenrheins in den vergangenen 100 Jahren nicht signifikant verändert. Das scheint nach der schon zitierten Arbeit der Landesanstalt für Umweltschutz von Baden-Württemberg (LUFT und VIESER, 1990) auch für die anderen Bodenseezuflüsse zu gelten, und es trifft ebenfalls für den Ausfluss aus dem Bodensee, das heisst für den Hochrhein bis zum Rheinfall, zu.

Was bewirken die Trinkwasserentnahmen aus dem Bodensee? Es sind 18 Fassungen in Betrieb, die 1989 im Mittel etwa 5,3 m³/s entnahmen (WIELAND, 1989; vgl. für den Alpenrhein auch TRÖSCH in diesem Werk). Davon flossen 1,1 m³/s als gereinigtes Abwasser wieder in den See. Von den verbleibenden 4,2 m³/s wurden rund 4 m³/s vom Zweckverband Bodensee-Was-

Tab. 2. Mittlere und extreme Wasserstände des Bodensees (gemäss Hydrologischem Jahrbuch der Schweiz, 2002).

	Obersee m ü. M.	Untersee m ü. M.
Jahresmittel (Periode 1930–2002)	395,61	395,41
Sommermittel (Periode 1930–2002)	396,00	395,78
Tiefstwert (Januar 1949)	394,59	394,31
Höchststand (Juni/Mai 1999)	397,89	397,67
Höchststand (September 1890)	398,00	397,76

serversorgung aus dem Einzugsgebiet des Sees Richtung Stuttgart ausgeleitet. Heute, das heisst 15 Jahre später, dürften es gegen $5 \text{ m}^3/\text{s}$ sein. Entsprechend der im vorangehenden Kapitel angeführten Abflussrelation, wonach eine Abflussänderung von 2 bis $4 \text{ m}^3/\text{s}$ eine Spiegeländerung von 1 cm verursacht, resultiert aus dieser Entnahme eine Spiegelabsenkung von 1 bis 2 cm. Der Betrieb des Zweckverbands begann Ende 1958 und steigerte sich allmählich. Ab etwa derselben Zeit machten sich aber die Überleitungen der Wasserkraftwerke im Einzugsgebiet bemerkbar, die per Saldo den Alpenrhein im Mittel mit gut $8 \text{ m}^3/\text{s}$ anreichern. Das überprägte den Einfluss der Entnahme. Das heisst, dass die anthropogenen jährlichen Zu- und Ableitungen die Wasserbilanz im Bodensee wenig berühren und Spiegeländerungen in der Größenordnung von 1 bis 2 cm verursachen, die kaum messbar und sicher nicht spürbar sind (VISCHER, 1993).

Bei dieser gleich bleibenden natürlichen und anthropogenen bedingten Wasserbilanz würde man erwarten, dass der mittlere jährliche Seestand in den vergangenen 100 Jahren ebenfalls gleich blieb. Das ist aber nur bedingt der Fall. Gemäss der erwähnten Arbeit (LUFT und VIESER, 1990) wies der mittlere jährliche Oberseestand einen fallenden Trend auf, während der entsprechende Unterseestand annähernd auf seiner bisherigen Kote verharrete. Das bedeutet, dass sich der Höhenunterschied zwischen dem Ober- und dem Untersee verringerte, und zwar je nach Darstellung um 12 bis 16 cm. Also reduzierte sich entsprechend das mittlere Fliessgefälle des rund 4 km langen Seerheins, was eine Veränderung seiner hydraulischen Parameter vermuten lässt. Durchflussberechnungen zeigen, dass sich wahrscheinlich das Flussbett ausgeweitet hat und das insbesondere in den so genannten Rheinrinnen bei Gottlieben und vielleicht auch im Konstanzer Trichter (ZURBRÜGG und FÄH, 1993). Freilich kann und wird diese Entwicklung der Oberseestände nicht beliebig weiterschreiten, weil der Seerhein zwangsläufig ein gewisses Fliessgefälle braucht.

Nun war bis jetzt bloss von den mittleren jährlichen Seeständen die Rede. Was ist mit

den jährlichen Hoch- und Niedrigwasserständen? Sie belegen sehr deutlich den Einfluss des Speicherbetriebs der Wasserkraftwerke im Einzugsgebiet. Weil die Speicher im Sommer gefüllt werden, und die Hochwasserstände fast immer im Sommer auftreten, sind Letztere im Mittel niedriger als früher. Umgekehrt reichert das Speicherwasser den Bodensee im Winter an, was die durchwegs winterlichen Niedrigwasserstände erhöht. Aus der bereits erwähnten Trendanalyse für 1888–1987 (LUFT und VIESER, 1990) folgt eine Verringerung der Hochwasserstände im Obersee von 27 und im Untersee von 25 cm. Und für die Erhöhung der Niedrigwasserstände werden für den Obersee 2 und den Untersee 27 cm ausgewiesen. Dazu ist allerdings ein Zwei-faches zu bemerken: Erstens muss bei den Werten für den Obersee die geschilderte generelle Seeabsenkung berücksichtigt werden. Rechnet man mit 16 cm, beträgt die zuflussbedingte Verringerung der Hochwasserstände nur 11 cm und die Erhöhung der Niedrigwasserstände 18 cm. Zweitens dürfte die Verringerung die Hochwasserstände in beiden Seen nicht bloss auf die Kraftwerke zurückzuföhren sein, sondern auch auf den Rückgang der Hochwasser in der betrachteten Periode.

Die Kraftwerke bewirken jedenfalls, dass die Seespiegel im Sommer etwas niedriger sind, was sich bei sommerlichen Hochwasserzuflüssen günstig auswirkt. Daraus darf man freilich nicht folgern, dass die Kraftwerksspeicher Extremereignisse ausschliessen. Sie liegen ja verhältnismässig hoch und kontrollieren damit nur einen kleinen Teil des Einzugsgebiets. Damit haben sie auf den Abfluss von Starkniederschlägen im übrigen Teil des Einzugsgebiets keinen Einfluss. Überdies verringert sich der Freiraum der Speicher bei ihrer Füllung, so dass die Hochwasser-Rückhaltewirkung bis Ende Sommerhalbjahr laufend abnimmt.

3.3 Die Seewallungen

Sind Seestände ohne weiteres an einem Pegel ablesbar? Wer einen einfachen Pegel beobachtet, merkt schnell, dass der Wellengang stört. Darum werden die offiziellen und selbstregis-

trierenden Pegel so ausgeführt, dass sie von Windwellen nicht beeinflusst werden. An sich könnte dies so geschehen, dass man statt den Seespiegel den Druck des Wassers in einer Tiefe von über 20 m misst. Denn die durch das Auf und Ab der Windwellen erzeugten Druckschwankungen machen sich praktisch nur bis zu einer Tiefe im Ausmass der halben Wellenlänge bemerkbar – und im Bodensee ist wohl selbst die grösste Welle nicht länger als 40 m (siehe Messungen am Genfersee, GRAF, 1983).

Man behilft sich bei den offiziellen Pegeln aber anders. Man dämpft die Windwellen, deren Perioden im Bereich von mehreren Sekunden liegen, mechanisch oder elektronisch aus, das heisst, man misst und registriert nur die mittlere Spiegellage.

Nun gibt es in einem See aber einen Wellengang mit Perioden im Bereich von mehreren Minuten, der sich so nicht ausmerzen lässt. Es handelt sich um die «Seewallungen», ein Ausdruck, der im 19. Jahrhundert vom damaligen Chef des Eidgenössischen Hydrologischen Zentralbüros, Robert Lauterburg, verwendet wurde, aber kaum mehr bekannt ist. Am Bodensee soll man statt dessen von einem «An- und Auslaufen» des Sees oder kurzerhand vom «Laufen» sprechen (KIEFER, 1972). In Fachkreisen hat sich heute aber weltweit der in Genf gebräuchliche und vom Waadtländer Gelehrten François Alphonse Forel aufgenommene Begriff «Seiches» eingebürgert. Er bezeichnet Schaukelbewegungen des Seespiegels um dessen theoretische Ruhelage. Diese Schwingung entspricht Eigenfrequenzen des Sees, die durch irgendwelche Störungen in Form von Luftdruckunterschieden, starken Winden usw. angeregt werden.

Die Seewallungen treten sowohl in der Längs- wie in der Querrichtung auf. Dabei gibt es neben einer Schwingung erster Ordnung auch solche höherer Ordnung. Am besten lässt sich die Schwingung erster Ordnung in Längsrichtung beobachten. So zeigt beispielsweise ein Pegel in Ludwigshafen ein langsames Ansteigen des Spiegels an und ein Pegel in Bregenz ein gleichzeitiges Absinken. Dann setzt die umgekehrte Bewegung ein. Hingegen bleibt ein Pegel

auf der Höhe von Uttwil-Immenstaad praktisch ruhig, weil dort der Knoten der Schwingung liegt. Schon Forel bestimmte durch Messungen in den Jahren 1874, 1890 und 1891 die entsprechende Periode zu rund 56 Minuten. Später widmeten sich andere Forscher auch noch den Schwingungen höherer Ordnung.

Eine umfassende Untersuchung vor Ort erfolgte 1967–1970 (MÜHLEISEN und KURTH, 1978). Für die Schwingung erster Ordnung in Längsrichtung wurden nur Ausschläge (doppelte Amplitude) von mehr als 1 cm berücksichtigt. Aus den rund 100 registrierten Ereignissen ging hervor, dass die Ausschläge in Ludwigshafen meist weniger als 10 cm betragen; der grösste Ausschlag erreichte 20 cm. Die Ausschläge in Bregenz machten jeweils etwa 40% davon aus. Die Perioden für die Schwingungen erster, zweiter und dritter Ordnung lagen bei 56, 39 und 28 Minuten. Mit einer numerischen Simulation lassen sich noch Schwingungen höherer Ordnung bestimmen, wobei sich dann auch die Bewegungen in Querrichtung bemerkbar machen. Abb. 6 veranschaulicht das Ergebnis einer solchen Simulation (HOLLAN, 1984).

Im Bodensee-Untersee treten natürlich ähnliche Seewallungen auf, aber mit geringeren Ausschlägen. Auch sie sind meist sehr langsam und fallen darum dem Seeanlieger und -benutzer nicht auf. Ihre Bedeutung liegt auch nicht in den Ausschlägen an sich, sondern in den beträchtlichen horizontalen Ausgleichsströmungen, die mit ihnen verbunden sind. Diese sind für das «Innenleben» des Sees äusserst wichtig. Der Vollständigkeit halber sei erwähnt, dass es neben den beschriebenen Schwingungen der Seeoberfläche auch solche in tieferen Grenzflächen gibt – namentlich in der Sprungschicht, die sich Ende Sommer zwischen dem Epilimnion und dem Hypolimnion ausbildet. Die zugehörigen Perioden liegen im Bereich von Stunden und Tagen (HEINZ, 1995).

Die bekannteste Seewallung im Bodensee trat am 23. Februar 1543 in Konstanz auf, als dort Ausschläge bis zu einer Elle (60 cm) beobachtet wurden, die sogar den Seerhein periodisch rückwärts fliessen liessen. Die Periode

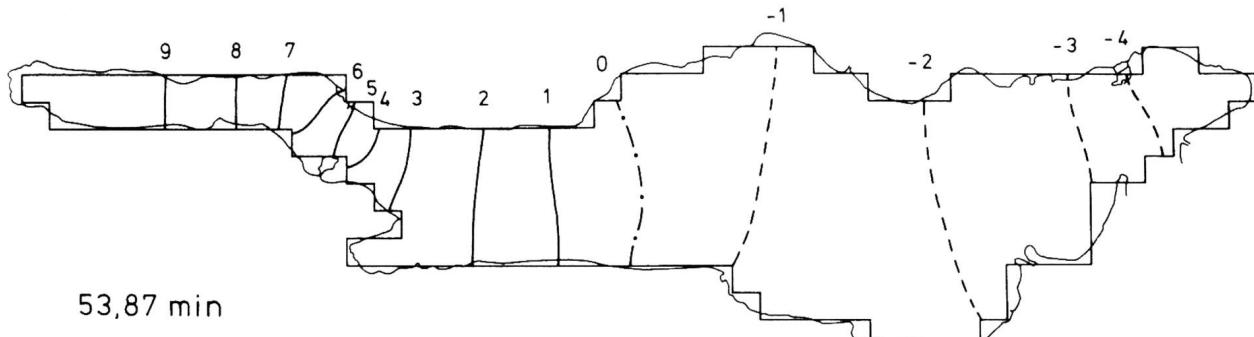


Abb. 6. Seewallung im Bodensee-Obersee. Rechnerische Werte für die Schwingung erster Ordnung in Längsrichtung. Amplituden in Zehnteln des höchsten Wertes angeschrieben (aus HOLLAN, 1984).

lag bei 12 bis 15 Minuten und entsprach damit aus heutiger Sicht einer Schwingung 7. bis 10. Ordnung, die offenbar eine Eigenschwingung der Konstanzer Bucht anregte (HOLLAN, 1984). Über die auslösende Störung ist nichts bekannt. Der Chronist Christian Schulthaiss von Konstanz hielt das Ereignis mit folgenden Worten fest: «Wunder anloffen des Wassers».

Uff disen tag ... morgens frueh, ist der see an- und abgeloffen, wol einer elen hoch, ... und so er ... klain geworden, so ist er bald mit einem ruschen, als ob das gwoll von dem wind (welcher doch nit was) getrieben wurd, wider angeloffen. Und sölchs ist etwa in ainer stund vier oder fünf mal geschehen (wie ich selbst gesehen hab). Das hat also bis nach mittag gewert, aber je speter es worden, je minder er an- und abgeloffen ist ...» (aus HOLLAN, 1984).

3.4 Die Wasserbilanz in der Periode 1978–1990

Das Institut für Seenforschung in Langenargen hat ein Modell entwickelt, das eine zeitlich enge Verfolgung der Wasserbilanz des Bodensees ermöglicht. Es wurde durch eine Arbeit des Geographischen Instituts der ETH Zürich überprüft (GURTZ et al., 1997), auf die sich die nachfolgenden Angaben stützen. Im Sinne einer Zusammenfassung seien hier jedoch nur die jährlichen Mittelwerte der Periode 1978–1990 für den Obersee betrachtet.

Die grösseren Zuflüsse zum Obersee werden in einem Dutzend Abflussmessstellen erfasst. Sie brachten insgesamt $345 \text{ m}^3/\text{s}$. Dazu kamen

noch die kleineren, nicht gemessenen Zuflüsse, deren Ergiebigkeit auf $17 \text{ m}^3/\text{s}$ geschätzt wird. Die Jahresniederschläge auf die Seefläche betragen 1070 mm oder $16 \text{ m}^3/\text{s}$. Davon verdunsteten 700 mm oder $10 \text{ m}^3/\text{s}$. In der erwähnten Periode erreichten die Ausleitungen der Wasserversorgungen gegen $4 \text{ m}^3/\text{s}$. Das Aus- und Einsickern von Grundwasser ist mengenmässig wohl vernachlässigbar. Folglich betrug die durchschnittliche Anreicherung des Obersees $364 \text{ m}^3/\text{s}$. Und diese $364 \text{ m}^3/\text{s}$ entsprachen – weil keine periodenübergreifende Seeinhaltsänderung im Spiel war – auch dem Ausfluss bei Konstanz und damit dem Abfluss des Seerheins (Abb. 7).

Für den Untersee liefert die zitierte Arbeit keine entsprechende Wasserbilanz, aber doch einige Zahlen. Sie rechnet bis Neuhausen mit einem Zufluss der Radolfzeller Aach von $8 \text{ m}^3/\text{s}$ und einem Dargebot von weiteren $3 \text{ m}^3/\text{s}$ aus dem übrigen Einzugsgebiet. Folglich ergibt sich in Neuhausen ein mittlerer Rheinabfluss von $375 \text{ m}^3/\text{s}$. In der Periode 1978–1990 wurden dort im Mittel jedoch $383 \text{ m}^3/\text{s}$ gemessen. Die Differenz von $8 \text{ m}^3/\text{s}$ oder 2% zeigt die bei einer derart grossräumigen Wasserbilanz erzielbare Genauigkeit auf.

Gestützt auf diese Wasserbilanz hält Tab. 3 den Anteil der wichtigsten Bodenseezuflüsse am Abfluss des Hochrheins in Neuhausen fest. Der mit 62% grösste Anteil stammt vom Alpenrhein. Demgegenüber fällt die Entnahme durch die Wasserversorgungen nicht ins Gewicht – ja, sie liegt sogar innerhalb der Bandbreite der Mess- und Rechengenauigkeit.

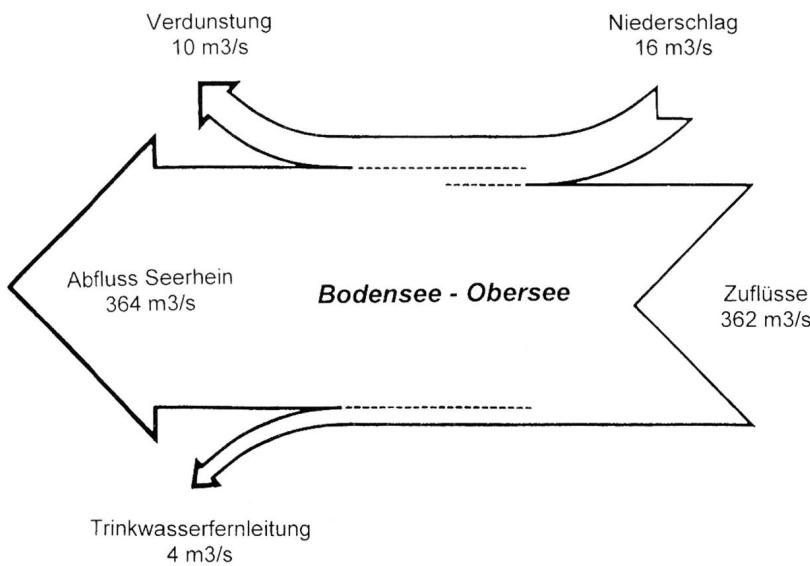


Abb. 7. Wasserbilanz für den Bodensee-Obersee, ausgedrückt durch die mittleren Zu- und Abflüsse der Periode 1978–1990.

Tab. 3. Anteil der wichtigsten Bodenseezuflüsse am Abfluss des Hochrheins in Neuhausen für die Periode 1978–1990.

Zufluss	Messstelle	m^3/s	%
Alpenrhein	Diepoldsau	233	62
Bregenzerach	Kennelbach	48	13
Argen	Giessen	20	5
Rheintaler Binnenkanal	St. Margrethen	12	3
Schussen	Gerbertshaus	11	3
Radolfzeller Aach	Rielasingen	8	2
Dornbirnerach	Lauterach	7	2
Restliche		34	9
Niederschläge minus Verdunstung		6	2
Entnahme für Wasserversorgung		-4	-1
Hochrhein	Neuhausen	375	100

3.5 Wie fliesst der Rhein durch den Bodensee?

Um diese Frage anzugehen, kann man sich zunächst zwei extreme Szenarien vorstellen. Das erste Szenario scheint in einer Karte aus dem 16. Jahrhundert auf (Abb. 8). Dort wird festgehalten, wie der Rhein als eigenständige und scharf begrenzte Strömung durch den Obersee fliesst. Dabei schlägt er von seiner damaligen Mündung unterhalb von Rheineck einen direkten Weg nach Konstanz ein. Diese alte Vorstel-

lung hielt sich sehr lange; so findet man sie noch im 18. Jahrhundert auf einer Karte des Genfersees in Bezug auf die Rhone (VISCHER, 2003). Rechnet man für den Rhein im Obersee entsprechend mit einem Fliessweg von 35 km und einer mittleren Fliessgeschwindigkeit von beispielsweise 1 m/s, erhält man eine Fliesszeit von rund 10 Stunden. So lange wäre also ein Tropfen des Rheins im Obersee unterwegs.

Das zweite Szenario setzt eine vollständige und gleichmässige Einmischung des Rheins im Obersee voraus. Nimmt man dasselbe auch für die übrigen Zuflüsse an, kann man die Fliesszeit des Rheins durch den Obersee der mittleren Aufenthaltszeit des Seewassers gleichsetzen. Aufgrund der weiter oben behandelten Wasserbilanz der Periode 1978–1990 gilt ja Folgendes: Die Zuflüsse führen dem Obersee 364 m^3/s zu, das sind 11,5 km^3/a . Demgegenüber beträgt das durchschnittliche Volumen des Obersees 47,7 km^3 . Also ergibt sich ein Quotient und daher eine mittlere Aufenthaltszeit von gut 4 Jahren. Gemäss diesem Szenario entspräche das folglich der mittleren Fliesszeit eines Tropfens des Rheins durch den Obersee.

Wie aber fliesst der Rhein tatsächlich durch den Bodensee? Diese Frage zielt auf die Zirkulation im See ab, die verschiedenen Einflüssen unterliegt. Die wichtigsten sind:

- Der Wind, der über den See streicht, Windwellen aufwirft und an der Seeoberfläche einen Schub in Windrichtung erzeugt.

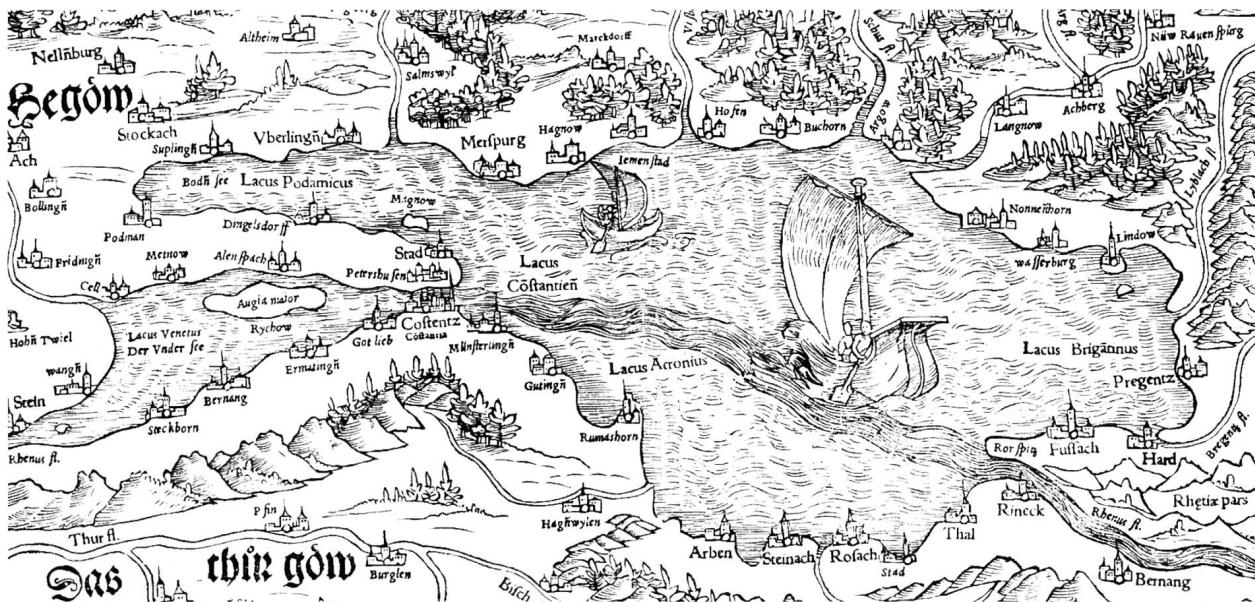


Abb. 8. Karte des Bodensees von Sebastian Münster 1540. Nach der damaligen Vorstellung floss der Rhein als scharf begrenzte Strömung von seiner Mündung nach Konstanz (aus «Der Bodensee in der erhaltenen Landschaft». E. Löpfe-Benz, Rorschach, 1980).

- Luftdruckunterschiede längs und quer zum See, die Schaukelbewegungen anregen (siehe Seewallungen).
- Dichteunterschiede im Seewasser, bedingt durch Wärmeunterschiede oder unterschiedlichen Schwebstoffgehalt.
- Die Zuflüsse, deren Mündungsströmungen dem Seewasser einen Impuls vermitteln. Das gilt besonders für den Rhein, dem weitaus grössten Zufluss.
- Der Abfluss, der umgekehrt wie ein Zufluss wirkt.
- Die Erdrotation, die bei jeder freien Bewegung auf der nördlichen Erdhalbkugel eine Rechtsablenkung erzeugt und als so genannte Corioliskraft wahrgenommen wird. Diese ist in einem See zwar klein, macht sich aber doch bemerkbar, wenn die anderen Kräfte von einer ähnlichen oder geringeren Größenordnung sind.

Welche Einflüsse wirken immer? Man kann sich vorstellen, dass auf dem See Windstille herrscht und Luftdruckunterschiede wegfallen. Ferner kann man eine Situation im Sommer betrachten, wo der See eine stabile Schichtung aufweist. Dann liegt nämlich eine warme Oberschicht (Epilimnion) von mehreren Metern Stärke auf einer kalten Unterschicht (Hypolimnion),

und die Dichte des Rheins entspricht – falls dieser nicht gerade schwebstoffreiches Hochwasser führt – etwa jener der Oberschicht. Folglich breitet sich der Rhein vor allem in der Oberschicht aus, und die Zirkulation im See unterliegt bloss drei Einflüssen: den gerade im Sommer starken Strömungsimpulsen an der Rheinmündung und beim Seeausfluss, sowie der Corioliskraft!

Aufgrund dieser immerwährenden Einflüsse lässt sich gewissermassen ein «normales Strömungsmuster» angeben. Beim Obersee wird das in den See mündende Rheinwasser infolge der Corioliskraft nach rechts abgelenkt und streicht deshalb dem Seeufer im Gegenuhrzeigersinn entlang. Eine durch Messungen unterlegte Darstellung zeigt Abb. 9 (AUERBACH, 1939). Der Rhein zieht an Lindau, Langenargen, Friedrichshafen und Immenstaad vorbei. Natürlich mischt diese Strömung laufend Umgebungswasser ein, und sie wird immer breiter und langsamer. Kurz vor Meersburg beansprucht sie schon fast die gesamte Seebreite und verlässt bei Konstanz den Obersee. Doch wird sie unterwegs durch einige Abzweiger geschwächt. Der wichtigste wendet sich im Raum Langenargen vom deutschen Ufer weg hinüber nach Romanshorn ans Schweizer Ufer und streicht von dort seeaufwärts über Arbon und Rorschach bis fast zur Rheinmündung

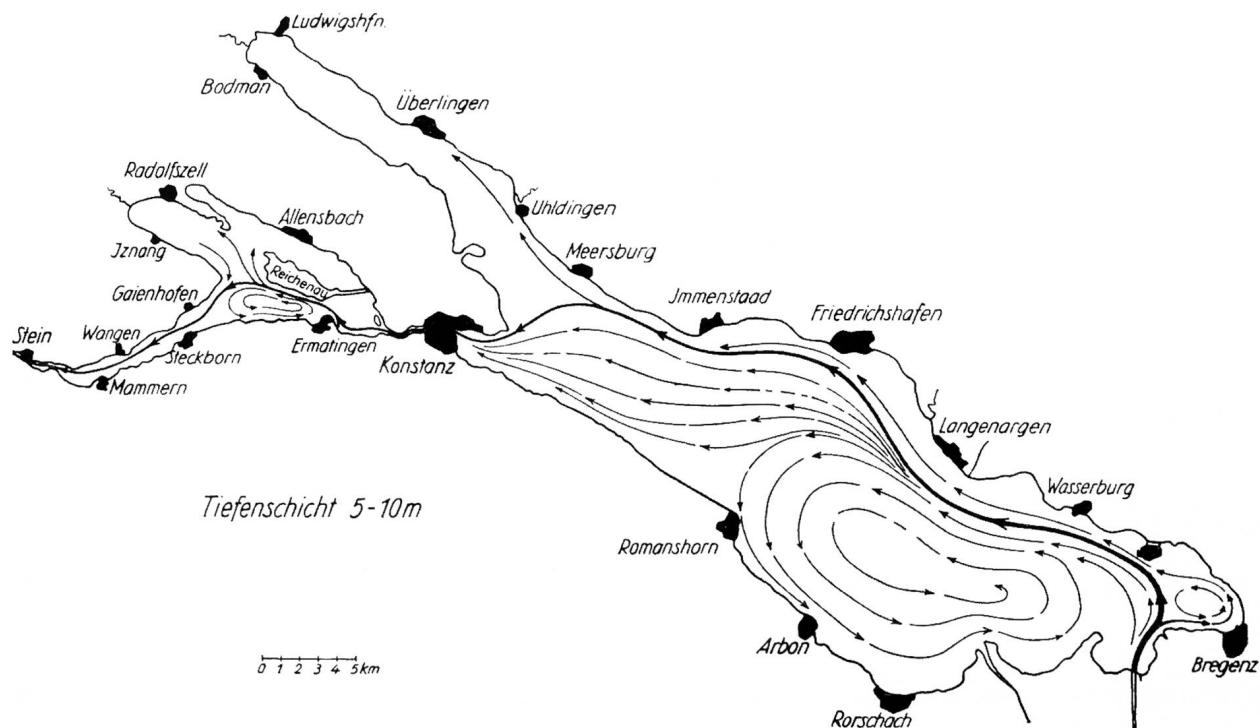


Abb. 9. Verlauf des Rheinwassers durch den Bodensee (Schema aus AUERBACH 1939). «Normales Strömungsmuster» im Sommer.

zurück, um wieder ans deutsche Ufer zu gelangen. Ein kleinerer Abzweiger dringt bei Meersburg und Uhldingen in den Überlinger See ein.

Selbstverständlich fliesst bei Konstanz nicht mehr Wasser ab, als die Zuflüsse in den Obersee eintragen. Die vom Rhein angeregte Strömung bewegt aber wesentlich grössere Wassermassen. Deshalb finden neben den beschriebenen Strömungen auch noch Kompensationsströmungen statt, die in Abb. 8 nicht dargestellt sind. Die gesamte Zirkulation im See ist recht kompliziert und vor allem dreidimensional. Die «Reisezeit» des Kerns des Rheinwassers beträgt von der Rheinmündung nach Konstanz etwa 60 Tage (AUERBACH, 1939). Das bedeutet, dass das «normale Strömungsmuster» kaum je in reiner Form auftritt. Denn es dürfte im Bodensee wohl keine 60 Tage dauernde Sommerperiode geben, in der Windstille herrscht und Luftdruckgradienten wegfallen. Also wird das «normale Strömungsmuster» immer wieder durch temporäre Einflüsse gestört oder gar von anderen Mustern überprägt. Ein Beispiel dafür lieferte eine Messkampagne von 1979 (HOLLAN, 1984).

In diesem Zusammenhang kann noch eine neuere Untersuchung des Instituts für Seen-

forschung in Langenargen angeführt werden (ROSSKNECHT, 2003). Weil der Alpenrhein bei grossen Abflüssen eine sehr viel geringere Chloridkonzentration aufweist als das Seewasser, lässt sich seine Spur im See anhand von Wasserproben und Mischrechnungen verfolgen. Anhaltend grosse Abflüsse gibt es im Alpenrhein aber nur im Sommer, so dass die Messkampagne von April bis September 2000 durchgeführt wurde, und zwar in den drei Seequerschnitten Wasserburg–Altenrhein, Langenargen–Arbon und Fischbach–Uttwil. Die Ergebnisse bestätigten in diesem Gebiet das «normale Strömungsmuster» im Wesentlichen und lassen erkennen, wie der Rhein sich in einer oberen Schicht einmischt, verbreitert und die Schicht Ende Sommer etwa zur Hälfte beansprucht. Interessanterweise ist diese 15 bis 20 m starke obere Schicht aber nicht identisch mit der warmen Oberschicht (Epilimnion), sondern umfasst neben jener auch noch die Sprungsenschicht und einen oberen Teil der Unterschicht (Hypolimnion).

Die Frage «wie fliesst der Rhein durch den Bodensee» ist damit für den Obersee und den Sommer weitgehend beantwortet. Für den Winter fehlen vergleichbare Untersuchungen

aber noch. Einige wichtige Hinweise lassen sich der bereits zitierten Arbeit entnehmen (ROSSKNECHT, 2003).

Abschliessend sei noch auf einen Sonderfall der Rheinströmung hingewiesen. Wenn der Alpenrhein bei starken sommerlichen Abflüssen trübe fliesst, taucht er kurz nach seiner Mündung in die Tiefe. Dabei erkennt man dort eine scharfe Abgrenzung zwischen dem Rhein- und dem Seewasser, die von den Anwohnern als «Rheinbrech» bezeichnet wird. Das schliesst aber nicht aus, dass sich das Rheinwasser weiter im See draussen in einer oberen Seeschicht einschichtet und somit dem «normalen Strömungsmuster» folgt. Es kann einen guten Teil seiner Schwebstoffe ja durch Sedimentation verlieren. Ist der Rhein bei mittleren und grossen Hochwassern aber sehr stark mit Schwebstoffen belastet, vermögen sich an der Mündung Trübeströme zu bilden, die wegen ihrer hohen Dichte in die untere Seeschicht abtauchen und dort auf dem Seeboden weiterfliessen. Sie erreichen schliesslich gefällsbedingt die tiefsten Stellen des Sees, wo sie zum Stillstand kommen. Diese Dichteströme können hohe Geschwindigkeiten erreichen. So wurde 1980 rund 1,6 km vor der Mündung in 35 m Tiefe und 6 m über dem Seeboden ein Spitzenwert von 1,4 m/s gemessen (LAMBERT, 1982). Im Vergleich dazu weisen gewöhnliche Seeströmungen Geschwindigkeiten auf, die im Bereich von einigen cm/s liegen. Bei einer Messkampagne im Überlingersee wurde ein Maximalwert von 20 cm/s in der See-Enge bei Mainau erhoben (HOLLAN, 1984).

3.6 Der Bodensee als Trinkwasserspeicher Europas?

Vor ein paar Jahren wurde der Bodensee als «Trinkwasserspeicher Europas» apostrophiert. Der Umstand, dass dieses Schlagwort von einem baden-württembergischen Minister verwendet wurde, verleiht ihm ein gewisses Gewicht. Der Minister dachte offensichtlich an eine Vermehrung oder Vergrösserung der Ausleitungen im Stil des Zweckverbandes Bodenseewasserversorgung, um noch andere Regionen Europas zu bedienen. Dabei stützte er sich wohl

nicht auf konkrete Pläne. Dennoch ist es im vorliegenden Zusammenhang interessant, dieser Möglichkeit nachzugehen (VISCHER, 1997).

Wie bereits gesagt, erreicht die mittlere Entnahme des Zweckverbandes Bodenseewasserversorgung heute $5 \text{ m}^3/\text{s}$. Das sind 1,3% des Hochrheinabflusses in Neuhausen (in Tab. 3 auf 1% gerundet), was dort praktisch nicht spürbar ist. Aufgrund der massgeblichen internationalen Vereinbarung könnte der Zweckverband seine Entnahme auf $12 \text{ m}^3/\text{s}$ steigern, was 3,2% des Hochrheinabflusses ausmachen würde. Das wäre in Neuhausen zwar auch nicht spürbar, aber doch messbar und würde die Produktion der Kraftwerke Schaffhausen und Rheinau entsprechend vermindern.

Die Entnahme des Zweckverbandes begann 1958, zunächst mit kleineren Werten. Es sei aber daran erinnert, dass andere deutsche Stellen 1969 noch eine zweite, weit kräftigere Entnahme von Bodenseewasser planten. Es handelte sich um die Anlage eines Stollens, der den Neckar mit Frischwasser anreichern sollte. Damit wäre die Wasserqualität dieses von Abwasser belasteten und mehrfach für Wasserkraftwerke und Schiffsschleusen aufgestauten Flusses verbessert worden. Das Projekt wurde aber wieder fallen gelassen, nicht zuletzt, weil sich dagegen aus dem Bodenseeraum eine starke Opposition erhob. Die Diskussionen drehten sich dort etwa um die übertriebene, aber einprägsame Formel: «der Bodensee als Spülkasten Europas?».

Doch zurück zur eingangs gestellten anderen Frage: «der Bodensee als Trinkwasserspeicher Europas?». Der Zweckverband Bodenseewasserversorgung entnimmt das Bodenseewasser in der Tiefe des Überlingersees und verteilt es bis an die nördliche Grenze des Landes Baden-Württemberg, das heisst bis in den Raum Mannheim und Heidelberg. Die letzten Äste des Leitungssystems, das einer Baumstruktur mit zwei Stämmen gleicht, enden in Tauberbischofsheim, mehr als 200 km Luftlinie vom Bodensee entfernt. Dementsprechend durchquert dieses System die Einzugsgebiete der Donau und des Neckars und führt bis ins Einzugsgebiet des Mains. Man kann sich nun vorstellen, dass

man das System sukzessive nach Norden und Nord-Nordwesten bis an die Nordsee ausweitet und verlängert. Sein Versorgungsgebiet würde schliesslich etwa das einstige Westdeutschland ohne Bayern und Berlin, aber mit Thüringen umfassen, sowie Lothringen, die Beneluxstaaten und Dänemark. Das wäre zwar noch lange nicht «Europa», aber immerhin ein Sektor davon.

Um eine Vorstellung über die zu transportierende Wassermenge zu erhalten, seien folgende Überlegungen wegweisend: Der Zweckverband Bodenseewasserversorgung kommt in seinem Versorgungsgebiet nicht für den gesamten Trink- und Brauchwasserbedarf auf. Er ergänzt bloss die örtlichen Wasserversorgungen eines Teils von Baden-Württemberg. Davon profitieren heute wohl 4 Millionen Einwohner mit durchschnittlich 100 Litern pro Einwohner und Tag. Im erwähnten Sektor von Europa dürfte die Einwohnerzahl wohl bald 100 Millionen erreichen. Um dorthin ebenfalls eine zusätzliche Wassermenge von 100 Litern pro Einwohner und Tag zu liefern, müsste man dem Bodensee also 25-mal mehr Wasser entnehmen als heute. Das sind $125 \text{ m}^3/\text{s}$, was nicht nur 33,3% und damit einen Drittel des mittleren Rheinabflusses in Neuhausen ausmacht, sondern dort auch den minimalen Rheinabfluss übersteigt. Der Tiefstwert seit 1959 betrug nämlich $115 \text{ m}^3/\text{s}$.

Daraus lässt sich ersehen, dass Entnahmen von einem solchen Ausmass prohibitiv und in Niederwasserzeiten sogar unmöglich sind. Der Hoch- und der Oberrhein würden damit zur «längsten Restwasserstrecke Europas». Am sichtbarsten wäre dieser Umstand am Rheinfall, der zeitweise trocken fiele. Am meisten würde wahrscheinlich die Schifffahrt auf dem Oberrhein leiden, am zweitmeisten die Kraftwerke am Hochrhein und am drittmeisten die Trink- und Brauchwasserfassungen am Hoch- und Oberrhein. Der Bodensee kommt als «Trinkwasserspeicher Europas» also nicht in Frage.

Es gibt freilich noch andere Ideen, um den Wasserreichtum der Alpen- und Voralpenregionen für andere Regionen zu nutzen. So erscheint in der Fach- und Tagespresse alle paar Jahre ein prätentiös aufgemachter Hinweis

darauf, dass für die Trink- und Brauchwasserversorgung die grösseren alpinen Stauseen eingesetzt werden sollten. Entsprechende Studien gehen davon aus, dass das praktisch unverschmutzte Wasser der Kraftwerksspeicher mit Pipelines in die Ballungszentren Europas geleitet würde. Die Grössenordnung der Ausleitungen aus dem Rheineinzugsgebiet nach Norden wäre aber selbstverständlich etwa dieselbe, wie bei der geschilderten «europäischen» Bodenseewasserversorgung. Dementsprechend würde bei einer solchen Lösung nicht nur der gesamte Rhein zur Restwasserstrecke gemacht, sondern auch viele seiner alpinen Zubringer von der Ill bis zur Saane.

Die nachhaltige Lösung des Verteilproblems für das Trink- und Brauchwasser liegt in Europa eben nicht darin, dass weiträumige Pipeline-Netze erstellt werden, sondern dass man das natürliche Gewässernetz in Ordnung hält. So werden gerade im Einzugsgebiet des Hochrheins grosse gewässerschützerische Anstrengungen unternommen, damit dessen Wasser einigermassen sauber über Basel nach Norden und damit in den genannten Sektor Europas fliesst. Dort soll es mit einem vertretbaren Aufwand gefasst und aufbereitet werden können, um den örtlichen Trinkwasserbedarf zu decken oder mindestens zu ergänzen (vgl. für den Alpenrhein auch TRÖSCH, in diesem Werk).

4 EINIGE BESONDERHEITEN DES HOCHRHEINS BIS ZUM RHEINFALL

4.1 Abflussschwankungen

Zwischen dem Bodensee-Untersee und dem Rheinfall fliessen dem Hochrhein nur kleinere Bäche zu. Der grösste unter ihnen ist die rechtsufrig unterhalb von Hemmishofen einmündende Biber. Ihre Abflüsse wurden 1927–1983 in Rammen erhoben und betragen in dieser Periode im Mittel $1,5 \text{ m}^3/\text{s}$.

Wie bereits gesagt und in Tab. 1 festgehalten, erreichte der mittlere Abfluss des Hochrheins in Neuhausen für die Periode 1959–2002 den Wert von $374 \text{ m}^3/\text{s}$. Das grösste Jahresmittel trat mit $507 \text{ m}^3/\text{s}$ im Jahr 1999 auf. Im selben Jahr wur-

den ja auch an den Stationen des Vorder- und des Alpenrheins die höchsten Jahresmittel beobachtet. Das kleinste Jahresmittel des Hochrheins liess sich mit $254 \text{ m}^3/\text{s}$ im Jahr 1972 erheben. Der Schwankungsbereich der Jahresmittel liegt demnach zwischen +36 und -32%.

Die Schwankung der Abflüsse innerhalb eines Jahres zeigt Abb. 10 für die durchschnittlichen Monatsmittel der Periode 1957–1982. Neben der Ganglinie der gemessenen und statistisch bearbeiteten Werte ist noch eine interessante fiktive angegeben. Diese beruht auf einer rechnerischen Eliminierung des Bodensees (NAEF, 1989). Das heisst, sie veranschaulicht, wie die Ganglinie ohne die Rückhaltewirkung des Bodensees aussähe: Sie wäre um etwa 3 Wochen vorverschoben! Das bestätigt die in Kapitel 3 gemachte Aussage, dass der Bodensee die langzeitigen Schwankungen der Zuflüsse zwar nicht dämpft, aber doch verzögert. Und sie lässt gut erkennen, wie sich die oberste Bodenseeschicht vom Februar bis zum Juli auffüllt und anschliessend wieder entleert.

Die täglichen und wöchentlichen Schwankungen der Zuflüsse machen sich hingegen – wie

sich erläutert und in Abb. 2 dargestellt – im Hochrheinabfluss bei Neuhausen nicht bemerkbar. Der Hochrhein ist dementsprechend frei von «nervösen» Abflussänderungen.

4.2 Ein Verkrautungsproblem

In den 1950er Jahren begann man am Hochrhein zum ersten Mal von einem Verkrautungsproblem zu sprechen (KUNZ, 1976). Es war im Vorfeld der 1960 erteilten Konzession für den Bau des Kraftwerks Schaffhausen und betraf die Flussstrecke bei Geilingen und Büsing. Man führte das Problem vor allem auf die Stauwirkung des Vorläuferkraftwerks «Moserdamm» zurück und sah sich in dieser These bestätigt, als auch in den Hilfsstauhaltungen des 1956 in Betrieb gegangenen Kraftwerks Rheinau ähnliche Erscheinungen auftraten. Ab 1960 verstärkte sich die Verkrautung und breitete sich in andern Stauhaltungen am Hochrhein aus, aber gleichzeitig auch in den frei fliessenden Flussstrecken.

Um 1968 setzte bei den Betroffenen ein Umdenken ein. Erstens sprach man bis dann von Veralgung oder Verkrautung etwa durch Fadenalgen, Laichkraut und andere bekannte Wasserpflanzen. Jetzt aber begann man als besonders störendes Gewächs den Flutenden Hahnenfuss (*Ranunculus fluitans* Lam.) auszumachen und zu bekämpfen. Zweitens erkannte man als Hauptursache der bald massiv einsetzenden Wucherung die Gewässerverschmutzung – insbesondere durch die düngenden Phosphate.

Der Flutende Hahnenfuss ist zwar schon seit mindestens 1850 im Hochrhein heimisch, kam aber früher nicht in grossen Mengen vor. Die einzelne Pflanze wurzelt auf dem Flussbett und wächst bis an die Wasseroberfläche, wobei ihre Stängel bis zu 10 m lang wer-

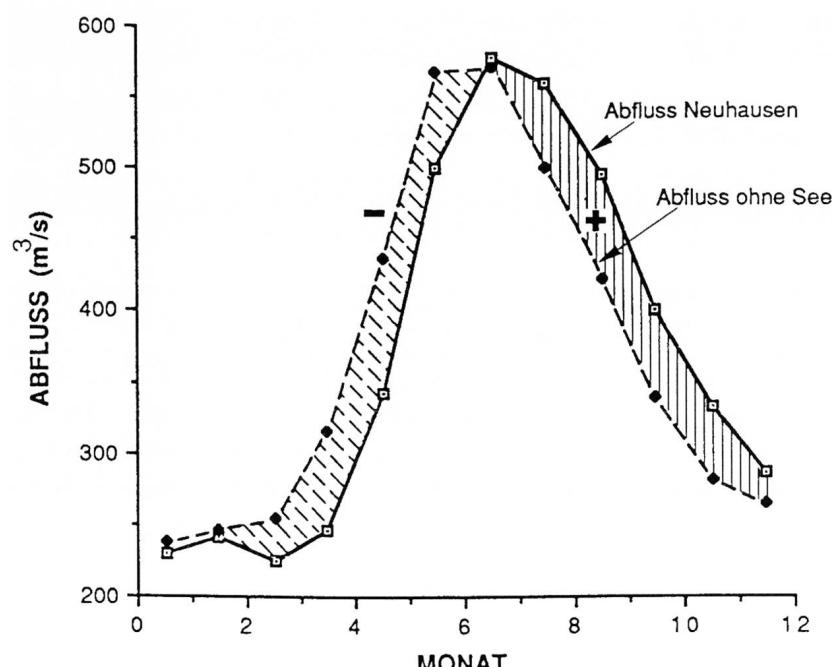


Abb. 10. Ganglinie der Abflüsse des Hochrheins bei Neuhausen: gemessene durchschnittliche Monatsmittel der Periode 1959–1982 sowie gerechnete Werte für den hypothetischen Fall, dass die Retention des Bodensees ausbleibt (NAEF, 1989).

den können. Sie treibt auf der Wasseroberfläche gut sichtbare kleine Blüten, die aber nur selten Samen bilden. Die Vermehrung erfolgt vor allem durch Ausläufer, die sich auf dem Flussbett rasch nach allen Seiten ausbreiten. Aber auch abgerissene oder abgeschnittene Stängelstücke, die abdriften und irgendwo hängen bleiben, fassen Wurzeln und bilden neue Kolonien. Der Flutende Hahnenfuss sondert einen Schaum ab und ist – wie alle Hahnenfussgewächse – giftig. In dichten Feldern und an der Wasseroberfläche als entsprechend dichter Teppich erscheinend, verdrängt er oft andere Wasserpflanzen (THOMAS, 1976).

Von den störenden Folgen sollen hier nur jene erwähnt werden, die den Abfluss der betrachteten Hochrheinstrecke betreffen. Vom Eschenzer Horn bis Hemishofen nahm das von Wasserpflanzen besiedelte Flussareal 1967 bis 1974 um 8 ha zu, von Hemishofen bis Schaffhausen um 21 ha. Dabei stieg der Anteil an Flutendem Hahnenfuss besonders unterhalb von Hemishofen stark an. 1974 erreichte die besiedelte Fläche oberhalb von Hemishofen 41% des Flussareals und unterhalb 22%. Dann kam die Ausbreitung zu einem gewissen Stillstand. Offenbar hatte der Flutende Hahnenfuss recht sprunghaft eine ihm bekömmliche ökologische Nische erobert (EICHENBERGER, 1976).

Kein Wunder, dass sich diese starke Verkrautung auch im Abfluss bemerkbar machte. Die Wasserpflanzen mehrten den Fliesswiderstand, was zu erhöhten Wasserspiegeln führte. Für die Abflussmessstationen am Hochrhein hatte das zwei Folgen. Zum einen konnten sie nur noch mit Messflügeln geeicht werden, wenn im Messquerschnitt vorgängig eine Schneise ausgemäht wurde. Zum andern hing der Wasserstand nicht mehr bloss von der Geometrie des Flussbetts ab, sondern vom Grad der Verkrautung. Das führte nebst anderen Gründen dazu, dass man Ende 1976 die Station Rhein-Rheinklingen als Abflussmessstelle aufgab. Als solche weiter betrieben wurde nur noch die Station Rhein-Neuhausen, die 1,6 km oberhalb des Rheinfalls bei der Flurlingerbrücke steht. Dort lässt sich der Einfluss der Verkrautung recht gut quantifi-

zieren. Er ändert sich monatlich und erhöht den Wasserstand um 1 bis 18 cm – die tiefen Werte im Winter, die hohen in der Vegetationsperiode im Sommer mit einem Maximum im Mai und Juni. Das bedingt, dass man die aufgrund der Eichkurve (Pegelrelation) bestimmten Abflusswerte um jeweils 1 bis 15% nach unten korrigieren muss (HAGMANN, 1976). 15% eines Juniabflusses können immerhin $90 \text{ m}^3/\text{s}$ ausmachen.

Es ist nicht auszuschliessen, dass die Verkrautung des Hochrheins auch zu einem leichten Aufstau des Bodensee-Untersees führt. Dort treten die Höchststände ja jeweils von Juni bis August auf (VISCHER, 1993), das heisst also zu einem Zeitpunkt, wenn 10 cm Spiegelanstieg stark ins Gewicht fallen. Selbstverständlich beeinträchtigt die Verkrautung auch die Produktion der Kraftwerke, da sie deren Nutzfallhöhe vermindert. Zum einen geschieht das durch eine Hebung des Unterwasserspiegels. Zum andern erfordert die Verkrautung eine stärkere Absenkung des Oberwasserspiegels. Denn sowohl beim Kraftwerk Schaffhausen wie beim Kraftwerk Eglisau muss die Staukote nicht unmittelbar oberhalb des Kraftwerks eingehalten werden, sondern an einem Pegel flussaufwärts. Das fällt vor allem beim Kraftwerk Eglisau ins Gewicht, das den Wasserstand am oberen Ende seiner rund 7 km langen Stauhaltung im Rheinfallbecken konstant zu halten hat. Erst ab einem Abfluss von $640 \text{ m}^3/\text{s}$ überlässt es diesen Wasserstand der Natur, weil dann sein Stau nicht mehr dorthin reicht.

Der Umstand, dass der Flutende Hahnenfuss Schaum bildet, macht sich gerade am Rheinfall ab und zu bemerkbar (THOMAS, 1976). Der Schaum wird durch die starke Turbulenz im Rheinfallbecken offenbar intensiviert und fliesst dann als oberflächliche «Abwasserfahne» durch die erwähnte Stauhaltung von Rheinau.

4.3 Der Rheinfall als Abflusshindernis?

Aus der ersten Hälfte des 17. Jahrhunderts stammt das Gerücht, die Holländer hätten die für den Rheinfall so charakteristischen Felstürme (die «Rheinfallfelsen») sprengen wollen. Tatsächlich hegten holländische Kaufleute

damals Pläne, die Stadt Konstanz an die europäische Flussschifffahrt anzuschliessen. Dabei dachten sie als gestandene Wasserbauer wohl kaum an eine Beseitigung der Felstürme, sondern an eine kühne Schleusentreppe am Rand des Falles. Ein solches Auf- und Abstiegsbauwerk schlügen sie ja auch für den 1638 baulich in Angriff genommenen Schiffahrtskanal vom Neuenburger- zum Genfersee vor (den «Canal d'Entreroches»). Auf jeden Fall ging es diesen Holländern nicht um die Beseitigung eines Abflusshindernisses im Hochrhein.

Hingegen wurden solche Gedanken ab und zu von den Seeanliegern gehegt. Man glaubte, die Ausräumung oder Umgehung des felsigen Flussbetts bei den Stromschnellen in Schaffhausen (den «Lächen») und beim Rheinfall müsste dem Hochrhein einen besseren «Zug» verleihen. Dementsprechend würde der Bodensee insbesondere bei Hochwasser schneller entleert, so dass er nicht mehr ausufern könnte. 1821 sah eine kühne Konkretisierung dieser

Gedanken den Ausbruch eines Umleitstollens vor, der zumindest einen Teil des Hochrheins oberhalb der Schaffhauser Rheinbrücke fassen und unter den Lächen sowie dem Rheinfall hindurch ins Rheinfallbecken führen wollte (WARTH, 1992). Abb. 11 zeigt den zugehörigen Projektplan mit zwei verschiedenen Bauphasen: den Ausbruch des Stollens von einem Zwischenschacht aus und die Aussprengung der Einlaufpartie mit einer Minenkammer. Diese Art der «Anzapfung» eines Gewässers durch eine Minenkammer wandte man beispielsweise 1836 beim Lungernsee an, um diesen um 35 m abzusenken (VISCHER, 1995).

Beim Projekt 1821 ging es übrigens nicht um die Tieferlegung der Bodenseespiegel als Selbstzweck, sondern um eine zwangsläufig damit verbundene Gefällserhöhung im Alpenrhein, der damals noch bei Rheineck mündete. Der Verfasser J.J. Waibel (Vorname und Lebensdaten unbekannt) stammte möglicherweise von Felsberg bei Chur (OSPELT, 1990) und strebte

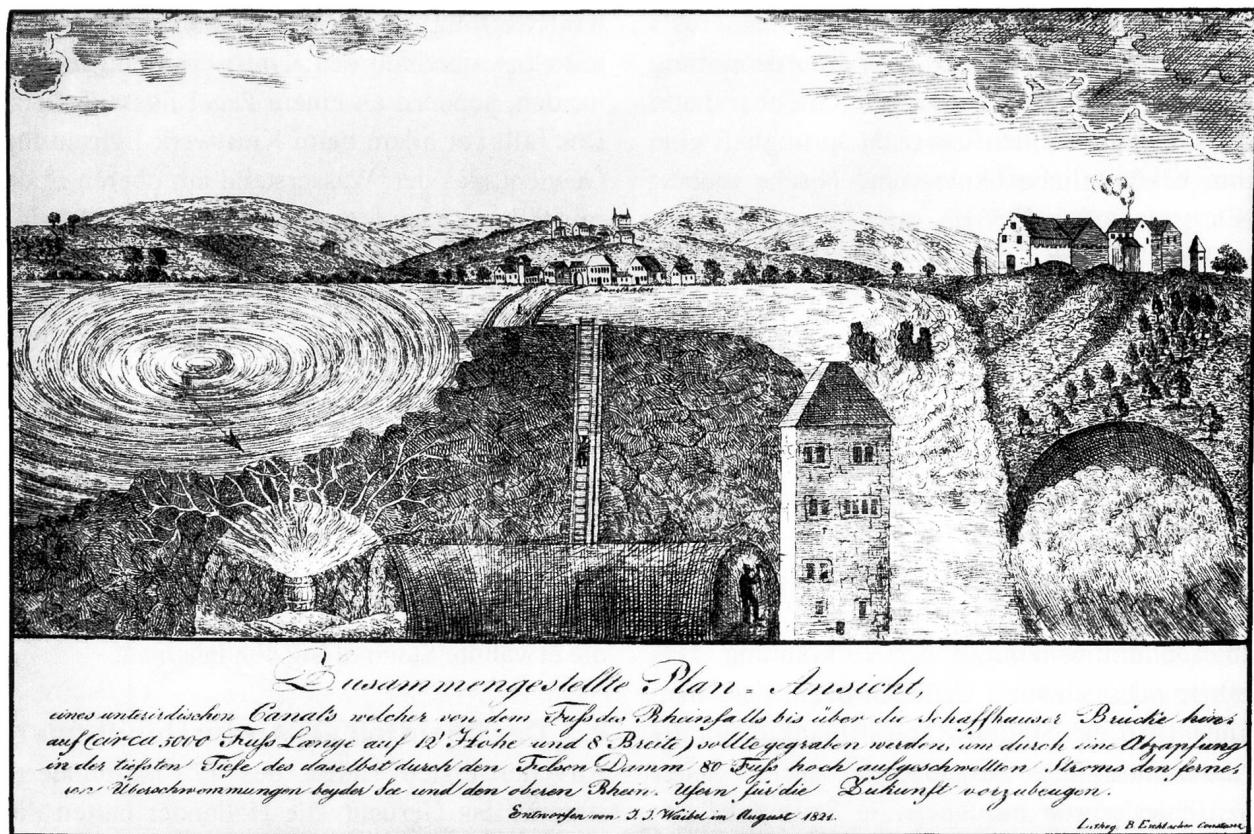


Abb. 11. Idee zur Ergänzung des Rheinbetts von Schaffhausen bis zum Rheinfall durch einen tiefliegenden Stollen von 1,5 km Länge. Durch die entsprechende Verbesserung des Abflusses sollte der Bodenseespiegel abgesenkt werden. Zeichnung von J.J. Waibel, 1821 (Staatsarchiv SG, KA R 68 D1.2).

eigentlich eine Alpenrheinkorrektion an. Es ist nicht anzunehmen, dass er sich damals mit den Schaffhausern und Neuhausern absprach. Denn diese hätten sich gegen eine solche Veränderung am Hochrhein sicher vehement gewehrt. Sie besaßen an den Lächen und am Rheinfall ja schon seit Hunderten von Jahren mehrere Mühlen und andere Einrichtungen, die sie nicht einfach aufgeben konnten.

Später wurde der Rheinfall aber gerade durch die Wasserkraftnutzung bedroht. Zunächst ersetzten die Schaffhauser und Neuhauser ihre Wasserräder durch Turbinen. Dann begannen sie ihre Anlagen zu vergrössern. So entstand 1864–1866 bei Schaffhausen der rheinquerende «Moserdamm», der einen Teil des Rheinwassers einem eigentlichen Kraftwerk zuleitete. Auch am Rheinfall wurden rechtsufrig einige Kleinkraftwerke erstellt. Die sich in Neuhausen entwickelnde Industrie wollte den Rheinfall aber bald umfassender nutzen. Deshalb reichte sie der Schaffhauser Kantonsregierung 1886 ein Konzessionsprojekt für ein Kraftwerk ein, das die bisherige Triebwasserführung verdreifachen sollte. Vorgesehen war, dass unmittelbar rechts oberhalb des Rheinfalls ein Kanal vom Rhein-

bett abgetrennt würde, um ein stattliches, mit 15 Turbinen ausgerüstetes Maschinenhaus im rechten Teil des Rheinfallbeckens zu beschicken. Seit etwa 1800 blühte am Rheinfall aber auch schon der Tourismus in verschiedenen Formen. Seine Anhänger befürchteten, das attraktive Naturschauspiel würde nicht mehr von Fremden besucht, wenn sich das Rheinwasser «statt in Regenbogen in Pferdestärken auflöste». Neben der Tourismusbranche sprachen sich aber auch Naturfreunde gegen das Projekt aus. Die Interessenabwägung führte schliesslich zu einer Ablehnung des Konzessionsgesuchs (VISCHER, 2000).

Seitdem wird der Rheinfall nur noch von der Natur selbst bedroht. Falls man geologische Zeiträume ausschliesst, betrifft diese Gefahr freilich bloss die Felstürme. Denn diese sind der unermüdlichen Kraft des Rheinfalls ganz besonders ausgesetzt und werden – obwohl das überwiegend aus dem Bodensee stammende Wasser nur wenig harte Schwebstoffe enthält – durch Erosion unterkolt. Deshalb bedurften sie Ende des 19. Jahrhunderts und erneut im Winter 1983/84 einer Verstärkung durch bauliche Massnahmen (HÄRRI, 1985).

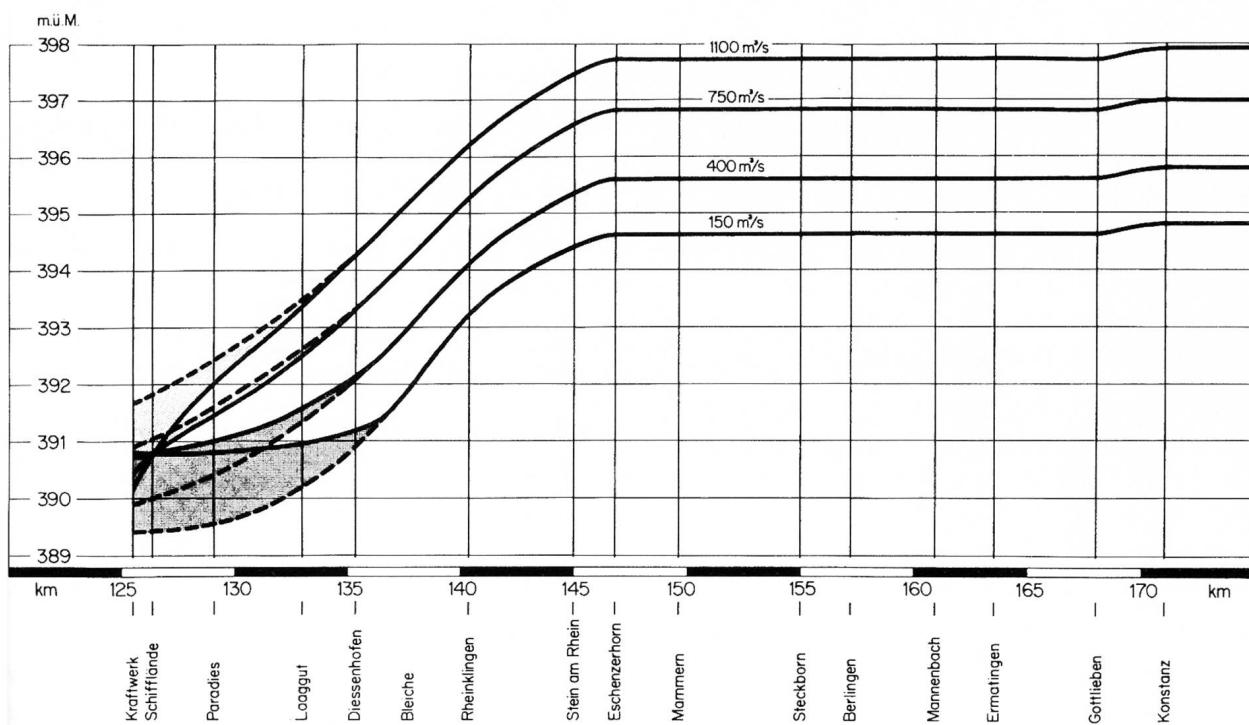


Abb. 12. Wasserspiegel oberhalb des Kraftwerks Schaffhausen im Hochrhein bei Nieder-, Mittel- und Hochwasser. Mit Kraftwerk ausgezogene Linie, ohne Kraftwerk strichlierte (VAW, 2003).

Abschliessend sei nochmals auf die Vermutungen eingegangen, wonach eine Veränderung des Flussbetts in Schaffhausen oder am Rheinfall die Bodenseestände beeinflusse. Das trifft nicht zu. Der für den Abfluss aus dem Untersee massgebende Flussabschnitt liegt zwischen Stein und Hemmishofen. Er bestimmt die Spiegel des Untersees. Deshalb ist alles, was unterhalb davon an Ausweitungen des Flussbetts geschieht, irrelevant. Ja, selbst der Stau, den das 1960 bis 1963 erstellte Rheinkraftwerk Schaffhausen ausübt, ist belanglos, weil er kurz oberhalb von Diessenhofen ausläuft und damit den erwähnten Flussabschnitt nicht berührt. Letzteres wurde 2003 durch eine Arbeit der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETHZ erneut bestätigt (Abb. 12, VAW, 2003).

5 LITERATUR

- AUERBACH, M. 1939. Die Oberflächen- und Tiefenströme im Bodensee. Deutsche Wasserwirtschaft 34, 5, München, 193–202; 8, 358–366.
- BADER, ST. & P. KUNZ 1998. Klimarisiken – Herausforderung für die Schweiz. vdf-Hochschulverlag, Zürich, 43 pp.
- EHB (Eidgenössisches hydrographisches Bureau) 1907. Rheingebiet von den Quellen bis zur Tamina mündung, zweiter Teil, dritter Teil, erster Nachtrag, Bern, Tafel 1.
- EICHENBERGER, E. 1976. Biologische und ernährungsphysiologische Gesichtspunkte zur Ausbreitung des Flutenden Hahnenfusses im Oberrhein. Wasser, Energie, Luft, 10, Baden, 234–239.
- EMMENEGGER, CH. & SCHÄDLER, B. 1997. Einfluss von Klimaänderungen auf die Hydrologie des Rheines. In: 25 Jahre KHR. Kolloquium in Dörwerth vom 30.11.1995. Bericht I–14 der Internationalen Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes (KHR), Lelystad, 18–33.
- GRAF, W.H. 1983. Beobachtete Wellen am und im Genfersee. In: Studienrichtung Kulturtechnik und Wasserwirtschaft der Universität für Bodenkultur: 100 Jahre Kulturtechnik und Wasserwirtschaft, Wien, 29–54.
- GURTZ, J., LANG, H., LUFT, G., STROBEL, F., WAGNER, G. 1997. Untersuchungen der Wasserbilanz des Bodensees. Hrsg. Geographisches Institut der ETH Zürich, Berichte und Skripte 61, 82 pp.
- HAGMANN, A. 1976. Erschwerte Bestimmung der Abflussmengen am Hochrhein zufolge Verkrautung. Wasser, Energie, Luft, 10, Baden, 243–245.
- HÄRRI, R. 1985. Sanierung der beiden Rheinfallfelsen. Schweizer Ingenieur und Architekt, 20, Zürich, 453–457.
- HEINZ, G. 1995. Strömungen im Bodensee. Ergebnisse einer Messkampagne im Herbst 1993. Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich, Mitteilung 135, 237 pp.
- HOLLAN, E. 1984. Strömungen im Bodensee. Informationsbericht der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, Teil A: Strömungen im Bodensee, 22 pp.; Teil C: Die Eigenschwingungen des Bodensee-Obersees und eine Deutung des «Wasserwunders von Konstanz», Karlsruhe, 17 pp.
- INTERNATIONALE GEWÄSSERSCHUTZKOMMISSION FÜR DEN BODENSEE 1990. Internationale Bodensee-Tiefenvermessung. Karte 1:50 000, Sonderdruck 25 m Wassertiefe. Druck Landesvermessungsamt Baden-Württemberg, Stuttgart.
- INTERNATIONALER TECHNISCHER AUSSCHUSS 1977. Bodenseeregulierung. Projekt 1973, Gesamtbericht. Deutschland, Österreich, Schweiz. Eidg. Amt für Wasserwirtschaft, Bern, 30 pp.
- KHR, Internationale Kommission für die Hydrologie des Rheingebiets 1980. Das Rheingebiet. Monographie KHR, Tafel C19.2, Den Haag.
- KIEFER, F. 1972. Naturkunde des Bodensees. Jan Torbecke, Sigmaringen, 55–84.
- KUNZ, E. 1976. Die Verkrautung des Hoch- und Oberrheins. Wasser, Energie, Luft 10, Baden, 224–229.
- LAMBERT, A. 1982. Trübeströme des Rheins am Grund des Bodensees. Wasserwirtschaft 72, 4, Stuttgart, 4 pp.
- LAMBERT, A. 1989. Das Rheindelta im See. Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik, 1, Baden, 29–32.
- LUFT, G. & VIESER, H. 1990. Veränderungen der Bodensee-Wasserstände von 1887 bis 1987. Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen 34, 5/6, Koblenz, 146–156.

- MÜHLEISEN, R. & KURTH, W. 1978. Experimental investigations on seiches of Lake Constance. Schweiz. Zeitschrift für Hydrologie 40/1, Zürich, 155–168.
- NAEF, F. 1989. Hydrologie des Bodensees und seiner Zuflüsse. Vermessung, Photogrammetrie, Kultertechnik, 1, Baden, 15–17.
- OSPELT, A. 1990. Die Rheinkorrektion entlang der st. gallisch-liechtensteinischen Grenze. In: Werdenberger Jahrbuch. Buchsdruck, Buchs, 105.
- OcCC 2002. Das Klima ändert – auch in der Schweiz. Die wichtigsten Ergebnisse des dritten Wissensstandsberichts des IPCC aus der Sicht der Schweiz. Hrsg. OcCC, Bern, 48 pp.
- ROSSKNECHT, H. 2003. Der Alpenrhein im Bodensee; chemische Indikatoren zur Aufklärung physikalischer Prozesse im Bodensee-Obersee. Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, Institut für Seenforschung, 3, Karlsruhe, 42 pp.
- SCHLEGEL, F. 1992. Naturnahe Gestaltung des Alpenrheins – eine Utopie? Schweizer Ingenieur und Architekt, 37, Zürich, 678–683.
- THOMAS, E. 1976. Der Flutende Hahnenfuss (*Ranunculus fluitans* Lam.), ein neues limnologisches Problem am Rhein. Wasser, Energie, Luft, 10, Baden, 230–233.
- VAW 2003. Jahresbericht 2002 der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich, 24–25.
- VISCHER, D. 1990. Der Bodensee, seine Zuflüsse, seine Schwankungen, sein Abfluss. Wasser, Energie, Luft 82, 7/8, Baden, 137–141.
- VISCHER, D. 1993. Der Zeitpunkt der jährlichen Höchststände im Bodensee-Untersee und im Hochrhein oberhalb der Thurmündung. Wasser, Energie, Luft, 7/8, Baden, 133–135.
- VISCHER, D. 1993. Die Trink- und Brauchwasserableitungen aus dem Bodensee; ihr Einfluss auf den Seespiegel und den Hochrhein. Wasser, Energie, Luft 85, 3/4, Baden, 45–47.
- VISCHER, D. 1995. Die Schweizer Seen in der Wasserbaugeschichte. Schriften der Frontinus Gesellschaft, Bergisch-Gladbach, 19, 33–58.
- VISCHER, D. 1997. Nachhaltige Gewässernutzung am Beispiel der überregionalen Wasserversorgung. Ökoforum Bregenz 1997 «Lebensquell Wasser», 1–7.
- VISCHER, D. 2000. Von der Wasserstrasse zur Energieachse. Der Bürger im Staat, 50, 2, Stuttgart, 93–98.
- VISCHER, D. 2003. Die Geschichte des Hochwasserschutzes in der Schweiz; von den Anfängen bis ins 19. Jahrhundert. Bundesamt für Wasser und Geologie, Bericht 5, Bern, 207 pp.
- WARTH, W. 1992. Die Schweiz, der Kanton St. Gallen, die Rheintalgemeinden und die Rheinkorrektion vor 1848. In: Internationale Rheinregulierung: Der Alpenrhein und seine Regulierung. Buchs Druck, Buchs, 152–157.
- WIELAND, CH. 1989. Der Bodensee als Trinkwasserspeicher. Vermessung, Photogrammetrie, Kultertechnik 87, 1, Baden, 43–44.
- ZARN, B. & HUNZIKER, R. 2003. Morphologie und Geschiebehaushalt Alpenrhein. Zusammenfassender Bericht über die Untersuchungen zwischen 1985 und 2000. Internationale Regierungskommission Alpenrhein, Projektgruppe Flussbau. Aarau/Domat-Ems, 34 pp.
- ZURBRÜGG, CH. & FÄH, R. 1993. Hydraulisch-mathematische Modellrechnung zum Ausfluss des Bodensees. Bericht der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich, 78 pp.

Prof. Dr. Dr. h.c. Daniel Vischer, Im Waldheim 4, CH-8304 Wallisellen,
E-Mail: vischer@vaw.baug.ethz.ch