

## Abteilung I — Binnenschifffahrt

### Fragen:

#### **Frage 1: Wasserläufe mit starken Hochwassern und großen Wasserstandsunterschieden (Flüsse und Kanäle).**

##### **1 a: Schifffahrt bei hohen Wasserständen**

Bestimmung des höchsten Schifffahrtswasserstandes,  
insbesondere an kanalisierten Flüssen.

Von Dr.-Ing. Martin Eckoldt,  
Regierungsbaurat bei der Wasser- und Schifffahrtsdirektion Stuttgart.

Zusammenfassung: An den meisten Flüssen muß die Schifffahrt bei Hochwasser eingestellt werden; als Grenze gilt der höchste Schifffahrtswasserstand (HSW). Maßgebend für seine Festsetzung sind an freien Flüssen Rücksichten auf die Ufer, die durch den Wellenschlag gefährdet sind, an kanalisierten Flüssen dagegen die Schwierigkeiten, die die Strömung, besonders im Oberwasser der Schleusen, der Schifffahrt bereitet. Die HSW müssen vor der Kanalisierung berechnet werden, da sie die Planung beeinflussen. Die am kanalisierten Neckar gesammelten Erfahrungen werden für neue Kanalisierungen nützlich sein können.

#### Literatur.

- (1) Heim, Feste Brücken und Schiffsbrücken über den Rhein. Die Wasserwirtschaft 40 Seite 241 (Mai 1950).
- (2) Der Rhein, Ausbau — Verkehr — Verwaltung. Herausgegeben von der Wasser- und Schifffahrtsdirektion Duisburg. »Rhein« Verlagsgesellschaft Duisburg 1951.
- (3) Schifffahrt-Polizeiverordnung für das deutsche Rheinstromgebiet vom 18. Januar 1939.
- (4) Deutsche Binnenschifffahrt-Polizeiverordnung vom 12. April 1939.

Gliederung: A. Die Einstellung der Schifffahrt auf freien Flüssen bei Hochwasser.

B. Besonderheiten kanalisierter Flüsse.

C. Die Berechnung des höchsten Schifffahrtswasserstandes im Kanalisierungsentwurf.

D. Die Festsetzung des höchsten Schifffahrtswasserstandes nach der Kanalisierung.

E. Die Festsetzung des höchsten Schifffahrtswasserstandes in den einzelnen Flußstrecken, besonders im Oberlauf.

#### **A. Die Einstellung der Schifffahrt auf freien Flüssen bei Hochwasser. \*)**

In den letzten Jahrzehnten sind mehr und mehr auch kleinere Flüsse durch Kanalisierung der Großschifffahrt zugänglich gemacht worden. Es hat sich dabei gezeigt, daß die Erfahrungen, die man an freien Flüssen mit der Schifffahrt bei Hochwasser gemacht hat, auf sie nicht ohne weiteres übertragen werden können. Diese Besonderheiten sollen im folgenden näher untersucht werden. Zum rechten Verständnis ist jedoch nötig, vorher einen Blick auf die Verhältnisse an den freien Flüssen zu werfen.

\*) Dieser Abschnitt wurde verfaßt unter Mitarbeit von Dipl.-Ing. Schoppe, Regierungs- und Baurat bei der Wasser- und Schifffahrtsdirektion Mainz.

1. In früheren Zeiten mußten die Schiffer die Fahrt bei Hochwasser unterbrechen, bei der Bergfahrt, weil die überfluteten Leinpfade von den Zugtieren nicht mehr begangen werden konnten, bei der Talfahrt, weil die Fahrt bei der starken Strömung durch Krümmungen und Hindernisse gefährlich wurde; außerdem veränderte sich bei Hochwasser oft das Fahrwasser und konnte wegen Ausuferung nicht mehr erkannt werden. Vielfach waren auch die Durchfahrts Höhen der Brücken zu gering.

2. Die Schleppschiffahrt mit Dampfschiffen, die sich seit etwa 1835 zu entwickeln begann, machte den Schiffsbetrieb von den Leinpfaden unabhängig und erhöhte die Schleppkraft so, daß die Fahrt bei weit höheren Wasserständen als bisher noch möglich war. Dafür trat jetzt der Nachteil in Erscheinung, daß die von den Schleppdampfern aufgeworfenen Wellen bei hohen Wasserständen auf den dann überschwemmten Vorländern und an Gebäuden große Verheerungen anrichteten, und dies um so mehr, als die Schleppzüge, um der stärksten Strömung auszuweichen, in der Nähe des Ufers führen. Besonders nachteilig, ja gefährlich war dies dort, wo Deiche die Ufer bildeten. So mußten Wasserstände festgesetzt werden, bei deren Erreichen die Schiffahrt eingestellt werden muß (höchster Schiffahrts-Wasserstand HSW). Am Rhein wurde er erstmals 1850, und zwar auf 5 m über dem mittleren Wasserstand, festgesetzt (1). Jetzt setzt man den HSW in Anpassung an die örtlichen Verhältnisse als Wasserstand an geeigneten Pegeln, sogenannten Richtpegeln, fest. Vielfach werden daneben noch niedrigere Wasserstände angegeben, bei denen die Schiffahrt mit Rücksicht auf die Ufer bereits gewissen Beschränkungen unterliegt. Es ergeben sich dann zwei oder drei Marken, von denen die höchste den HSW bedeutet. So müssen die Schiffe nach § 119 der jetzt gültigen »Schiffahrt-Polizeiverordnung für das deutsche Rheingebiet« vom 18. Januar 1939 (3) bei Marke I möglichst Strommitte einhalten oder, wenn das nicht möglich ist, die Fahrgeschwindigkeit soweit herabsetzen wie nötig ist, damit die Ufer und die Bauwerke am Ufer nicht beschädigt werden; bei Mark II (HSW) ist die Schiffahrt außer dem Übersetzen verboten. Auf anderen Flüssen wird außer dem HSW vorgeschrieben, daß bei höheren Wasserständen zu Tal nur so schnell gefahren wird, wie zur sicheren Steuerung notwendig ist, oder es wird die zulässige Geschwindigkeit angegeben (4). Die Marken selbst werden am Rhein für 18 Richtpegel angeführt, deren durchschnittlicher Abstand 41 km beträgt. Der Höhenabstand zwischen den Marken I und II ist oberhalb Straßburgs Null und wächst flußabwärts bis auf 2,10 m; er richtet sich nach Form und Besiedlung der Ufer. Zwischen zwei Richtpegeln gilt für die Bergfahrt der obere, für die Talfahrt der untere dieser Richtpegel. Oberhalb Maxau ist der zuständige Richtpegel nach Teilstrecken festgesetzt.

3. Über die Fragen, wie oft die beiden Marken an den zwei wichtigsten Richtpegeln des Rheins erreicht werden und wie hoch sie liegen, gibt nachstehende Tabelle Aufschluß; sie beruht auf Angaben der Wasser- und Schiffahrtsdirektion Mainz für die Jahresreihe 1916 bis 1951.

Richtpegel	Caub		Maxau	
	I	II	I	II
Marke				
Wasserstand cm am Pegel .....	460	640	670	720
Überschritten in % der Jahre .....	81	22	53	28
Überschreitungstage pro Jahr (i. M.) .....	10,7	1,14	2,72	0,92
Größte Zahl der Überschreitungstage .....	51	14	15	9
im Jahr .....	1940	1920	1945	1945
MHW (Mittlerer Hochwasserstand) .....	545		685	

Eingestellt wird mithin die Schifffahrt (Marke II) in Caub und Maxau etwa gleich oft (an rund einem Tag im Jahr); beschränkt (Marke I) wird sie in Caub viel häufiger als in Maxau. Der zum Vergleich angegebene mittlere Hochwasserstand MHW liegt an beiden Pegeln zwischen den Marken I und II.

An anderen Flüssen Deutschlands wird der HSW durchschnittlich an etwa 3 bis 6 Tagen überschritten.

4. Die Schifffahrt stellt den Betrieb bei Erreichen des HSW nur ungern ein. Gezwungen ist sie dazu allenfalls, wenn die Brücken keine genügende Durchfahrthöhe besitzen. Am Rhein weisen die meisten Brücken 9, 10 m Lichthöhe über Marke II auf; die Durchfahrthöhe ist also auch für große Radschlepper (mit umgelegten Schornsteinen) und für leere Kähne sehr reichlich. Die Schifffahrt weiß sich aber auch an geringere Lichthöhen anzupassen, indem die Aufbauten abgenommen werden; auch werden neue Schiffe niedrig gebaut. An einigen, besonders an den niedrigen Brücken, sind — meist auf der Unterstromseite — Umkehrpegel angebracht, die von oben nach unten beziffert sind, so daß die Bergschifffahrt einen Anhalt über die ungefähre lichte Durchfahrthöhe hat. Die Überschwemmungen des Vorlandes geben immer weniger Grund, die Schifffahrt einzustellen, da sich viele Ströme infolge von Regulierungen eintiefen und stellenweise auch noch Deiche gebaut werden. Kleinere Ausuferungen sind bei genauer Ortskenntnis nicht hinderlich. Ähnlich ging es mit der Behinderung durch die Strömungsgeschwindigkeit. In der Absicht, die Fahrt zu beschleunigen und auch Stromstrecken mit starker Strömung zu befahren, wurden die Schiffe mit immer stärkeren Maschinen ausgerüstet. Auf der seit 1904 der Schifffahrt wieder erschlossenen Rheinstrecke Basel-Straßburg muß für eine Tonne Nutzlast 1 PSi Schleppkraft aufgewendet werden, während auf den übrigen Strecken des Rheins bei normalen Wasserständen mit 1 PSi 2,5 bis 8 t Nutzlast geschleppt werden können. Da diese Schiffe also auf den Stromstrecken mit geringerer Strömung auch bei Wasserständen über Marke II noch fahren könnten, ohne daß der Betrieb unwirtschaftlich würde, und ein Anreiz besteht, die Zeit voller Ablademöglichkeit auszunützen, kann die Einstellung der Schifffahrt bei Hochwasser vielfach nur durch Zwang erreicht werden. Aus eigener Initiative wird die Fahrt eingestellt, wenn der durch die Strömung verursachte Mehraufwand an Betriebskosten und die erhöhte Gefahr, besonders bei der Talfahrt durch Brücken, höher eingeschätzt werden als der Gewinn an Zeit. Wieweit das der Fall ist, hängt von der Bauart des Schiffes, von der Einstellung des Kapitäns und von der Wirtschaftslage ab.

#### **B. Besonderheiten kanalisierter Flüsse.**

An kanalisierten Flüssen herrschen Verhältnisse, die von den bisher geschilderten in mehrfacher Hinsicht abweichen. Sie werden am Beispiel des Neckars erläutert, dessen Kanalisierung von Mannheim bis Heilbronn (112 km) seit 1935 vollendet, von Heilbronn bis Plochingen (92 km) in Bau ist; dieser Fluß eignet sich hierzu besonders, weil er infolge hohen Talgefälles (zunehmend von etwa 0,6 auf 1,7 ‰) und geringer Wasserführung (bei Plochingen bei mittlerem Niedrigwasser 9,25 m<sup>3</sup>/s, bei mittlerem Hochwasser 3,96 m<sup>3</sup>/s) im Verhältnis zur natürlichen Wassertiefe sehr hoch aufgestaut werden mußte und daher die Eigenarten der Kanalisierung im Unterschied zu denen des freien Flusses besonders deutlich hervortreten. Aus diesem Grunde gibt es z. B. am Neckar auch nicht wie am Main, der Oder usw. eine Schifffahrt bei geöffneten Wehren, also auf einem wieder »frei« gewordenen Fluß. Als Kennzeichen für die Einstellung der Schifffahrt empfiehlt es sich hier, an Stelle der Wasserstände, die durch den Anstau künstlich verändert werden, den zugehörigen Abfluß (HSQ) zu verwenden.

Die Unterschiede zum freien Fluß liegen in folgendem.

1. Der Wasserspiegel schwankt am freien Fluß sehr stark (z. B. stieg auf der schon vor der Kanalisierung schiffbaren Neckarstrecke — am Pegel Diedesheim, 31 km unterhalb von Heilbronn — der HSW 2,73 m, der MHW 4,38 m über MNW an). Am kanalisierten Fluß dagegen wechseln die durch die Wehré in einer Mindesthöhe gehaltenen Wasserstände nur wenig, in den unteren Teilen der Haltung gar nicht mehr; die zu schützenden Uferstreifen sind also bei normaler Böschungsneigung schmal. Auch ist der Uferangriff geringer, da die Fahrgeschwindigkeit mit Rücksicht auf die Enge des Fahrwassers und die scharfen Krümmungen begrenzt ist (auf 12 km/Std. (3) § 191). Die Rücksicht auf die Ufer verliert also an Bedeutung.

2. Dagegen wachsen die Schwierigkeiten der Schifffahrt bei Hochwasser. Während sich am freien Flusse die Schwankungen des Abflusses vor allem im Wasserstand, also im Querschnitt  $F$  auswirken, die Fließgeschwindigkeiten  $v$  sich aber nur wenig ändern, bleibt  $F$  am kanalisierten Fluß nahezu gleich und  $v$  ändert sich stark. Die Stärke der Schlepper muß sich aber aus wirtschaftlichen Gründen nach den meist vorhandenen geringen Fließgeschwindigkeiten richten. So versagen die Schlepper bei Hochwasser, obwohl die Fließgeschwindigkeit an den ungünstigsten Stellen nur etwa 1,7 m/s erreicht; diese Geschwindigkeit wird am Rhein auch bei Niedrigwasser fast überall überschritten. Mit 1 PSI Schleppkraft wird übrigens am Neckar 6 bis 8 t Nutzlast geschleppt, etwa soviel wie auf dem Rhein von Rotterdam bis Ruhrort und von Bingen bis Mannheim; zwar ist die Fließgeschwindigkeit auf dem Neckar geringer, dafür sind die Schleppwiderstände je t Nutzlast größer, einmal wegen der geringeren Breite und sodann, weil jeder Schlepper nur einen Kahn im Anhang hat.

Eine weitere Erschwerung der Schifffahrt entsteht bei Hochwasser durch den Einbau der Schleusen, und zwar für die Einfahrt in die Vorhäfen vom Oberwasser her. Die zum Wehr ziehende Strömung ist bestrebt, die Schiffe gegen das Wehr und, wenn sie schon in den Vorhafen eingefahren sind, noch mit dem Heck gegen die Trennmauer zu drücken. Diese Gefahr ist gering bei großer Stauhöhe, weil dann die Fließgeschwindigkeit auch bei HSW klein ist; doch gibt es auch am Neckar aus örtlichen Gründen einzelne Staustufen mit geringer Stauhöhe (Heidelberg 2,60 m). Mißlich ist die Einfahrt in den Oberhafen besonders dort, wo die Schleuse im Inneren eines Bogens liegt, so daß die an der Außenseite des Bogens fahrenden Schleppzüge die Strömung kreuzen müssen. Die geschilderten Gefahren gaben Anlaß, auf dem kanalisierten Neckar nach Erreichen der unteren der beiden Hochwassermarken den Verkehr mit Schiebe- und Ziehbooten zu untersagen; in demselben Sinne ist am kanalisierten Main bei Überschreiten der Marke II für die Talfahrt nur ein Anhang zugelassen ((3) § 238).

Die Überflutung der Vorländer tritt gerade bei HSW ein, da tiefliegende Ländereien bei der Kanalisierung bis zu dieser Höhe aufgehöhrt werden. Unter den Brücken wird bei der Kanalisierung mindestens 6 m Durchfahrtshöhe über HSW hergestellt; die meisten müssen dabei umgebaut werden, da der Wasserspiegel gehoben wird und die erwähnte Durchfahrtshöhe vorher nicht vorhanden war.

### **C. Berechnung des höchsten schiffbaren Wasserstands im Kanalisierungsentwurf.**

Die völlig veränderten Verhältnisse gegenüber dem Zustand vor der Kanalisierung lassen die Frage entstehen, nach welchen Grundsätzen HSQ festzusetzen ist. Einige der Schifffahrt hinderliche Erscheinungen, nach denen sich HSQ richtet, ließen sich einschränken; z. B. können die Ufer und Brücken im allgemeinen ohne

besonders hohe Kosten noch etwas höher angelegt werden. Im Blick auf die Strömung und auf die Gefahren an den Oberhäfen ist aber ein übermäßig hoher Wert H<sub>SQ</sub> nicht am Platze. Da die Erschwerungen nicht schlagartig einsetzen, wird in vielen Fällen der Wert H<sub>SQ</sub> aus der Zeit vor der Kanalisierung brauchbar sein. Ebenso gut könnte er aber auch definiert werden als Abfluß, der an z. B. 3 Tagen im Jahr überschritten wird. Festgesetzt wird er stets von vornherein (z. B. auch am Hochrhein, (2) Seite 45). Entscheidend ist, ob der bei einer höheren Festsetzung zu erzielende Gewinn an Schiffahrtstagen groß genug ist, um die Erhöhung der Baukosten zu rechtfertigen.

Für die Ausarbeitung der Entwürfe müssen die bei H<sub>SQ</sub> eintretenden Wasserstände H<sub>SW</sub> schon vor dem Bau berechnet werden. Sie wirken sich auf die Höhe der Uferbefestigungen, der Aufhöhungen, der Schleusenmauern und der Brücken aus. Die Richtpegel, die auch hier notwendig sind, um das Erreichen von H<sub>SW</sub> anzuzeigen, werden im Unterwasser der Schleusen angelegt, weil dort der Wasserstand am stärksten mit der Wasserführung wechselt. Die H<sub>SW</sub> der Richtpegel sind also nicht unabhängig voneinander und für die Schiffahrtsverhältnisse einer Flußstrecke charakteristisch, sondern durch H<sub>SQ</sub> bestimmt. Sie sind aus den Wasserspiegeln zu entnehmen.

Nach diesen Grundsätzen ist auch bei der 1919 in Angriff genommenen Neckarkanalisierung verfahren worden. Als H<sub>SQ</sub> hat man den Abfluß gewählt, der bei dem alten H<sub>SW</sub> am Pegel Diedesheim (320 cm) vorhanden war (am Pegel 450 m<sup>3</sup>/s). Ober- und unterhalb wurde H<sub>SQ</sub> entsprechend dem Einzugsgebiet verkleinert und vergrößert. Die Spiegellinien wurden in bekannter Weise mit den neu herzustellenden Flußquerschnitten berechnet, nachdem die Rauigkeitswerte durch Wasserspiegelmessungen bestimmt worden waren. Nennt man

$h_1$  den Anstieg des Wasserstandes im Unterwasser der Schleuse, über den hydrostatischen Stauspiegel bei H<sub>SW</sub> in m und

L die Haltungslänge (km) von der Schleuse abwärts bis zum nächsten Wehr, so ergab sich im Durchschnitt

$$h_1 = 0,117 L + 0,80$$

für Werte L zwischen 3,5 und 14 km.

#### D. Festsetzung des höchsten schiffbaren Wasserstands nach der Kanalisierung.

Nachdem im Juli 1935 die Teilstrecke Mannheim—Heilbronn des Neckars der Großschiffahrt übergeben worden war, wurden die H<sub>SW</sub> an den Unterwasserpegeln aller 11 Schleusen festgesetzt, und zwar so, daß sie, den Erfahrungen der Schiffer folgend, dem H<sub>SW</sub> am Pegel Diedesheim gleichwertig waren. Die hierzu notwendigen Beobachtungen stellte man an den unteren 7 Schleusen an, als der genannte Pegel noch nicht eingestaut war; bei den oberen 4 mußte eine errechnete Erhöhung am Pegel angenommen werden. Die H<sub>SW</sub> wurde 1937 durch gut sichtbare Marken an den Schleusenvorhäfen bezeichnet. Der Anstieg über den hydrostatischen Stauspiegel ergab sich jetzt an den Schleusen 1 bis 9 (die Schleusen 10 und 11 werden noch zu erwähnen sein) zu

$$h_2 = 0,117 L + 0,45$$

Die Abweichungen der tatsächlichen Werte von der Formel sind aus den örtlichen Umständen erklärbar;  $h_2$  ist in den Haltungen größer, die die kleinsten Wasserquerschnitte, die schärfsten Krümmungen und die meisten Brücken besitzen, und umgekehrt.

Die festgesetzten Marken haben sich im ganzen bewährt, d. h. es zeigen sich die oben dargelegten Erscheinungen, die eine Einstellung der Schiffahrt

empfehlenswert machen. Es sei hier erwähnt, daß die Pegel am kanalisiertem Main im Unterwasser der Schleusen so gesetzt werden, daß sie beim HSW sämtlich 370 cm anzeigen. Das Maß der Unter- oder Überschreitung läßt sich so besonders leicht übersehen. Am Neckar ist diese Anordnung nicht gewählt worden, weil die Pegel Höhen über NN anzeigen.

Auffällig ist, daß  $h_2$  um durchschnittlich 35 cm kleiner ist als  $h_1$ , obwohl doch beiden derselbe Wert HSW am Pegel Diedesheim zugrunde liegt. Offenbar hat man bei der Spiegelberechnung den ungünstigsten der gefundenen Rauigkeitsbeiwerte verwendet, um auf der sichern Seite zu bleiben, und hat so auch erreicht, daß die Ufer, Brücken usw. nicht zu niedrig angelegt wurden. Um jedoch bei den Brücken unnötig ungünstige Lösungen mit allzu geringen Bauhöhen und steilen Rampen zu vermeiden, empfiehlt es sich, die Rauigkeitsbeiwerte nicht zu ungünstig anzunehmen oder eine der neuen bewertfreien Formeln zu verwenden.

#### **E. Die Festsetzung des höchsten schiffbaren Wasserstandes in den einzelnen Flußstrecken, besonders im Oberlauf.**

Tage, an denen Schifffahrt nur auf einzelnen Teilstrecken möglich ist, können kaum ausgenützt werden. Die HSW sollten daher am ganzen Fluß ungefähr gleich oft überschritten werden; das würde annähernd geschehen, wenn die HSQ der einzelnen Teilstrecken im Verhältnis der jeweiligen Größe der Einzugsgebiete zu einander stehen.

Für die Schleusen 10 und 11 an der Neckarstrecke Mannheim—Heilbronn wurde HSW 30 cm höher festgesetzt als die gleichwertigen Wasserstände an den anderen Schleusen. Nachteile, etwa zu starke Strömung, haben sich nicht gezeigt, was mit den örtlichen Verhältnissen zusammenhängt; es ergibt sich aber der Vorteil, daß bei anlaufendem Hochwasser die zu Berg fahrenden Schiffe noch den Häfen Heilbronn erreichen können und die Talschifffahrt nach dem Hochwasser früher beginnen kann. Diese Vorteile werden von der Schifffahrt gern genützt.

Es liegt nahe, diesen Grundsatz auch bei der weiteren Fortsetzung der Wasserstraße bis Stuttgart und Plochingen anzuwenden. Dem kommt entgegen, daß dort die Flußquerschnitte im Verhältnis zur Wasserführung immer größer werden, also die Fließgeschwindigkeiten immer mehr abnehmen. Dies gilt einmal für die Mindestquerschnitte in den oberen Haltungsteilen, die dort von den Bedürfnissen der Schifffahrt bestimmt sind; streckenweise (im Gebiet der Stadt Stuttgart auf 21 km Länge) hat auch das hochwasserfrei eingedeichte Flußbett an Stelle des üblichen Doppelprofils ein Trapezprofil erhalten, dessen Sohle (60 m) erheblich breiter als die natürliche Sohle ist. Ganz gering ist die Fließgeschwindigkeit in den unteren Teilen der Haltungen. Die Schwierigkeiten bei der Einfahrt in die Oberhäfen verschwinden also. Die Brücken müssen bei einer hohen Annahme von HSQ kaum höher gelegt werden, da das Fließgefälle in den ziemlich kurzen Haltungen infolge der großen Querschnitte gering ist. Der Fluß ufert aus demselben Grunde auch kaum noch aus. Es steht dem also nichts im Wege, HSQ sehr groß anzunehmen. Viele Schifffahrtstage lassen sich dadurch allerdings nicht gewinnen, da HSW schon im Unterlauf nur an etwa 6 Tagen im Jahr überschritten wird. Die Erhöhung bringt also auch keinen Nutzen, mit anderen Worten: der HSW verliert an Bedeutung. Man kann sagen, der kanalisierte Fluß wird hier zum Kanal, der nebenbei noch als Vorfluter dient, wobei sich diese letztere Eigenschaft nur bei Hochwasser bemerkbar macht.