

Conference Paper, Published Version

Felkel, Karl; Gehrig, Wilhelm; Pichl, Karl; Strack, Hans; Wittmann, Heinrich

I. Maßnahmen zur Regulierung von Flüssen. Erzielte Ergebnisse. Versuche und Berechnungen am Modell einschließlich der Probleme der ferngesteuerten Modellschiffe - dargestellt an Beispielen für den Ausbau des Rheins; II. Untersuchungen zur Ausbildung eines Schiffahrtsweges in den felsigen Haltungen von Laufwasserstufen mit Hilfe des ferngesteuerten Modellschiffes - dargestellt am Beispiel für den Ausbau des Hochrheins bei Rheinfeldern

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/104755>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:
Deutsche Beiträge. Internationaler Schiffahrtkongress (PIANC)

Felkel, Karl; Gehrig, Wilhelm; Pichl, Karl; Strack, Hans; Wittmann, Heinrich (1965): I.

Zur Verfügung gestellt in Kooperation mit/Provided in Cooperation with:

PIANC Deutschland
Berechnungen am Modell einschließlich der Probleme der ferngesteuerten Modellschiffe -

dargestellt an Beispielen für den Ausbau des Rheins; II. Untersuchungen zur Ausbildung eines Schiffahrtsweges in den felsigen Haltungen von Laufwasserstufen mit Hilfe des ferngesteuerten Modellschiffes - dargestellt am Beispiel für den Ausbau des Hochrheins bei Rheinfeldern. In: PIANC Deutschland (Hg.): Deutsche Beiträge. 21. Internationaler Schiffahrtkongress; Stockholm, Schweden, 1965. Bonn: PIANC Deutschland. S. 118-145.

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



Abteilung I — Binnenschifffahrt

Thema 5

Maßnahmen zur Regulierung von Flüssen. Erzielte Ergebnisse. Versuche und Berechnungen am Modell einschließlich der Probleme ferngesteuerter Modellschiffe

Von Dr.-Ing. Karl Felkel, Regierungsbaumeister a. D., Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe; Dipl.-Ing. Wilhelm Gehrig, Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe; Dipl.-Ing. Karl Pichl, Oberregierungsbaurat, Wasser- und Schifffahrtsdirektion Mainz; Dipl.-Ing. Hans Strack, Oberregierungsbaurat, Wasser- und Schifffahrtsdirektion Freiburg; Dr.-Ing. E. h. Dr.-Ing. Heinrich Wittmann, Professor, Technische Hochschule Karlsruhe.

Themen des Berichtes:

- I. Maßnahmen zur Regulierung von Flüssen. Erzielte Ergebnisse. Versuche und Berechnungen am Modell einschließlich der Probleme der ferngesteuerten Modellschiffe — dargestellt an Beispielen für den Ausbau des Rheins.**
- II. Untersuchungen zur Ausbildung eines Schifffahrtsweges in den felsigen Haltungen von Laufkraftstufen mit Hilfe des ferngesteuerten Modellschiffes — dargestellt am Beispiel für den Ausbau des Hochrheins bei Rheinfelden.**

Zusammenfassung

I. MASSNAHMEN ZUR REGULIERUNG VON FLÜSSEN. ERZIELTE ERGEBNISSE. VERSUCHE UND BERECHNUNGEN AM MODELL EINSCHLIESSLICH DER PROBLEME DER FERNGESTEUERTEN MODELLSCHIFFE — DARGESTELLT AN BEISPIELEN FÜR DEN AUSBAU DES RHEINS.

Die einzelnen Stromabschnitte des Rheins, der bedeutsamsten europäischen Binnenwasserstraße, besitzen unterschiedliche Mindestfahrwassertiefen. Beim sogenannten Gleichwertigem Wasserstand (GIW) ist unterhalb von Köln durchweg eine Tiefe von 2,50 m und mehr vorhanden, zwischen Köln und St. Goar eine solche von 2,10 m. Zwischen St. Goar und der Einmündung des Teilkanals der Staustufe Rheinau-Sundhausen (oberhalb von Straßburg) beträgt die Mindestfahrwassertiefe beim GIW jedoch nur 1,70 m. Es wird angestrebt, die Mindestfahrwassertiefe zunächst zwischen St. Goar und Mannheim um 40 cm zu vergrößern sowie in den anschließenden Stromabschnitten für die Schifffahrt besonders ungünstige Stellen zu verbessern.

Die zur Erreichung dieses Zieles aufgestellten Entwürfe bieten Beispiele für Lösungen zahlreicher Probleme einer Stromregulierung. Hiervon wird jeweils ein charakteristisches Beispiel näher behandelt. Die Lösungen sind meist das Ergebnis von Modelluntersuchungen. Ihre Überprüfung durch in der Natur eingetretene Auswirkungen von Regulierungsmaßnahmen ist bisher allerdings erst in einem Falle möglich gewesen, nämlich an der Stromkrümmung bei Düsseldorf, wo eine gute Übereinstimmung festgestellt werden konnte.

Als Unterlage für die Projektbearbeitungen sowie für die Modelluntersuchungen waren umfangreiche Vermessungsarbeiten in der Natur erforderlich. Sie bezogen sich auf die Sohlengestalt des Strombettes, die Abflüßmengen, die Wasserspiegellagen, die Größe und Richtung der Strömungen sowie auf das Verhalten der Schiffe beim Durchfahren kritischer Stromstrecken. Die bei diesen Vermessungsarbeiten angewendeten, zum Teil

neu entwickelten Methoden werden behandelt oder es wird auf bereits vorliegende einschlägige Veröffentlichungen hingewiesen.

Das Beispiel der Niedrigwasserregulierung des Oberrheins zeigte, daß sich im Streckenabschnitt bei Sondernheim, in dem aus einer Länge von 4 km die Regulierung nicht durchgeführt ist, Mittelgründe bildeten und die Stromsohle zur Verwilderung neigte. Eine Einschränkung der Breiten durch Buhnen auch in diesem Abschnitt bei einer strömungsgünstigen Linienführung ergab hier ein genügend breites und tiefes Fahrwasser. Die Mittelgründe und Sandbänke konnten im Modell beseitigt werden.

Bei der Regulierung von Stromspaltungen geschiebeführender Flüsse hat es sich am Beispiel der Neuwieder Strecke gezeigt, daß man die Abfluß- und Geschiebeleistung beider Arme in Übereinstimmung bringen muß. Wird einer der beiden Arme mit Geschiebe überlastet, so geht seine Abflußleistung zurück und er verlandet, wenn man keine Baggerungen durchführt. Die gleichmäßige Verteilung von Abfluß und Geschiebe konnte durch Einengen der Überbreiten vor der Stromspaltung und in den Stromarmen erreicht werden.

Als wirksames Mittel zur Herstellung und Erhaltung der Fahrwasserbreiten in Krümmungen, in denen sich an der Krümmungsinne Seite die Sohle aufhöht, während sich längs des konkaven Ufers tiefe Kolke ausbilden, erwies sich das Verfüllen der Kolke. Die Auffüllung wird hierbei durch Schüttsteine vor einer neuerlichen Erosion geschützt. Diese Maßnahmen haben sich in der Praxis bewährt. Ein weiteres Mittel zur Verringerung der Kolke sind Vorlandabgrabungen an der Innenseite der Krümmung.

In der Binger-Loch-Strecke, deren Leistungsfähigkeit nahezu erschöpft ist, müssen zur Verbesserung der Schiffahrtsverhältnisse ein drittes Fahrwasser geschaffen und die beiden bestehenden, nämlich das „Binger Loch“ und das „Zweite Fahrwasser“, vertieft werden.

Im Bereich der auch als „Lochbänke“ bezeichneten Quarzitriffe bereitet die extreme Enge des Fahrweges, die ungewöhnlich große Strömungsgeschwindigkeit und anderes der Schiffahrt besondere Schwierigkeiten. Um die Auswirkungen geplanter Baumaßnahmen auf das Schiff im Modell unmittelbar erfassen zu können, wurden maßstabgerechte, ferngesteuerte Modellschiffe entwickelt, über deren Ausbildung, Eichung und Einsatz berichtet wird.

Abschließend wird der Ausbauvorschlag für die Binger-Loch-Strecke behandelt. Er ist gekennzeichnet durch die Schaffung des neuen, etwa durch die Mitte der Lochbänke führenden Fahrwassers bei gleichzeitiger Vertiefung der beiden bestehenden und eine Verminderung des an den Riffen konzentrierten Gefälles.

II. UNTERSUCHUNGEN ZUR AUSBILDUNG EINES SCHIFFAHRTSWEGES IN DEN FELSIGEN HALTUNGEN VON LAUFKRAFTSTUFEN MIT HILFE DES FERNGESTEUERTEN MODELLSCHIFFES — DARGESTELLT AM BEISPIEL FÜR DEN AUSBAU DES HOCHRHEINS BEI RHEINFELDEN.

Bei dem Entwurf zum Ausbau des Hochrheins als Schiffahrtsstraße wurde es notwendig, in felsigen unregelmäßigen Stromstrecken die Strömungsverhältnisse an wasserbaulichen Modellen und die Schiffahrtsbedingungen mit einem Modellschiff zu untersuchen.

Bei der Stromstrecke an und oberhalb der Brücke Rheinfelden wurden die von den felsigen Erosionsrinnen gebildeten Kolke aufgefüllt, die Ufer begradigt und hervorstehende Felsrippen entfernt. Trotz der Felsarbeiten mit allerdings beschränkter Aushubkubatur, einer zweckmäßigen Linienführung und dem größtmöglichen Ausgleich der Querströmungen ist die Bergfahrt nur mit Schiffen großer Leistung möglich.

Über die Untersuchungen mit Hilfe des ferngesteuerten Modellschiffes geben die Ausführungen der Herren Sektionschef H. Wyss, Bern, und Schiffbau-Ingenieur F. Bösch, Basel, weitere Auskunft.

Inhalt

	Seite
I. Maßnahmen zur Regulierung von Flüssen. Erzielte Ergebnisse. Versuche und Berechnungen am Modell einschließlich der Probleme der ferngesteuerten Modellschiffe — dargestellt an Beispielen für den Ausbau des Rheins	121
1. Vorbemerkungen und Themenbegrenzung	121
2. Überblick über die Situation am Rhein	122
2.1. Notwendigkeit der Regulierung einzelner Abschnitte	122
2.2. Bauelemente und ihre Anwendung	122
3. Vorarbeiten (Messungen und hydraulische Berechnungen)	123
3.1. Sohlenaufnahmen	124
3.2. Wasserspiegel-Flächenaufnahmen	124
3.3. Strömungsmessungen	124
3.4. Schiffsbahnmessungen	126
3.5. Messung des Absinkens der Schiffe in Fahrt	126
3.6. Hydraulische Berechnungen	127
4. Für den Rhein von der Bundesanstalt für Wasserbau durchgeführte Modelluntersuchungen	127
4.1. Niedrigwasserregulierung mit Buhnen	127
4.2. Stromverzweigung Neuwied	129
4.3. Kolke und Uferabflachungen in Krümmungen	131
4.31. Allgemeines	131
4.32. Rheinkrümmung bei Düsseldorf	132
4.33. Rheinkrümmung bei Speyer	134
4.4. Die Verbesserung der Schiffahrtsverhältnisse der Binger-Loch-Strecke des Rheins	135
4.41. Die örtlichen Verhältnisse	135
4.42. Die Methoden der Modelluntersuchungen	136
4.421. Die Ausbildung des Modells	136
4.422. Der Einsatz ferngesteuerter Modellschiffe	136
4.43. Der Ausführungsvorschlag	140
II. Untersuchungen zur Ausbildung eines Schiffahrtsweges in den felsigen Haltungen von Laufkraftstufen mit Hilfe des ferngesteuerten Modellschiffes — dargestellt am Beispiel für den Ausbau des Hochrheins bei Rheinfelden	141

I. MASSNAHMEN ZUR REGULIERUNG VON FLÜSSEN. ERZIELTE ERGEBNISSE. VERSUCHE UND BERECHNUNGEN AM MODELL EINSCHLIESSLICH DER PROBLEME DER FERNGESTEUERTEN MODELLSCHIFFE — DARGESTELLT AN BEISPIELEN FÜR DEN AUSBAU DES RHEINS.

1. Vorbemerkungen und Themenbegrenzung

Der vorliegende Bericht behandelt in allgemeiner Fassung flußbauliche Maßnahmen, die in letzter Zeit anlässlich der Projektierungen zum Ausbau des Rheins zwischen Mannheim und St. Goar (Bild 1) und zur Verbesserung einiger für die Schifffahrt besonders ungünstiger Stromabschnitte Gegenstand umfangreicher Untersuchungen waren.

Der Ausbau ist vorgesehen, um den Strom als Wasserstraße den Anforderungen des gesteigerten und in seiner Struktur gewandelten Schiffsverkehrs anzupassen. Die im Bericht beschriebenen Baumaßnahmen und Modellversuche dienen ausschließlich der Verbesserung des Rheins als Wasserstraße. Die einzelnen Untersuchungen sind zwar

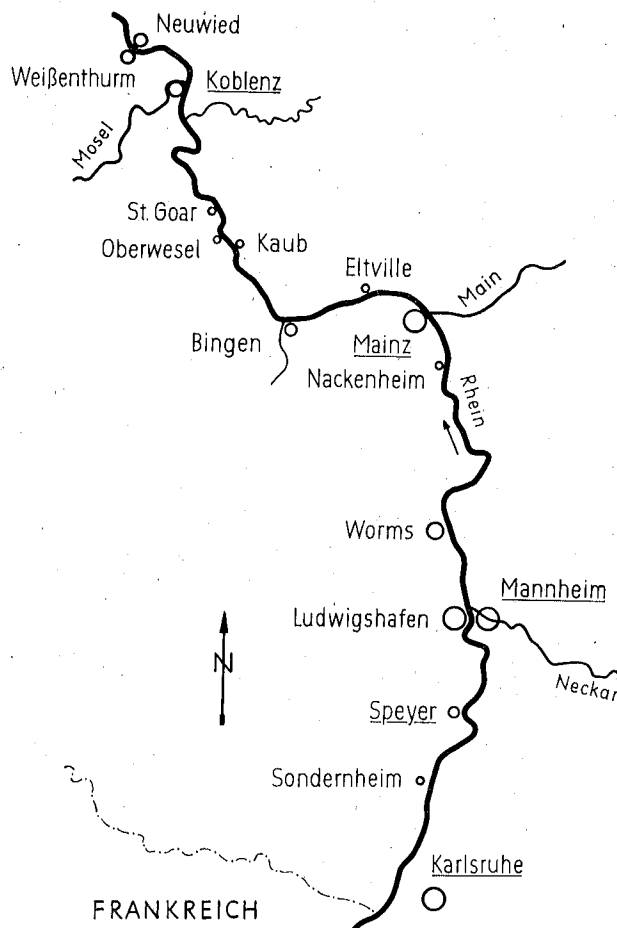


Bild 1
Lageskizze der Rheinstrecke Karlsruhe-Koblenz

auf die jeweilige Ausbaustrecke abgestimmt, den Ergebnissen kommt in den Schlußfolgerungen jedoch grundsätzlich Bedeutung zu, so daß sie auch für die Ausbauplanungen in anderen Stromabschnitten übernommen werden können.

2. Überblick über die Situation am Rhein

Im Anschluß an die umfangreichen Rheinkorrekturen des vorigen Jahrhunderts wurden am Oberrhein die nach Honsell und Spieß-Wittmann benannten Niedrigwasserregulierungen durchgeführt. Sie ergaben gemeinsam mit geringfügigen Nachregulierungen zwischen Mannheim und Bingen und dem unterhalb Bingen in der Felsenstrecke erfolgten Ausbau [1] [2] in den regulierten Stromabschnitten so gute Schiffahrtsverhältnisse, daß diese den Anforderungen der Schifffahrt viele Jahrzehnte genügten und erst seit dem vor wenigen Jahren eingetretenen sprunghaften Ansteigen der Verkehrsintensität auf dem Rhein verbesserungsbedürftig wurden [3] [4].

2.1 Notwendigkeit der Regulierung einzelner Abschnitte

Die Verkehrsleistung auf dem Rhein ist von etwa 75 Millionen Tonnen im Jahre 1936 auf rund 133 Millionen Tonnen im Jahre 1962 angestiegen. Dies ergab bei Bingen während der Niedrigwasserperiode im Herbst 1962 einen Schiffsdurchgang von durchschnittlich 508 Fahrzeugen je Tag. Die Grenze der Leistungsfähigkeit des Stromes als Verkehrsträger ist damit erreicht; ein Ausbau des Fahrwassers an seiner Engstelle ist notwendig geworden.

Die Leistungsfähigkeit des Rheins als Wasserstraße hängt vor allem von der Tiefe der Schifffahrtsrinne bei Niedrigwasser ab.

Als charakteristisches Niedrigwasser gilt am Rhein der amtlich festgelegte sogenannte Gleichwertige Wasserstand (GIW), der im Jahresdurchschnitt an 20 eisfreien Tagen erreicht bzw. unterschritten wird.

Bei St. Goar, an der unteren Grenze der untersuchten Ausbaustrecke, stoßen zwei Stromabschnitte verschiedener Leistungsfähigkeit aneinander. Während unterhalb St. Goar die Mindestdiefe der Schifffahrtsrinne 2,10 m unter GIW beträgt, besitzt das Fahrwasser oberhalb St. Goar bis zum Anschluß an die gleichzeitig für die Wasserkraftnutzung ausgebaute Oberrheinstrecke nur eine Mindestdiefe von 1,70 m unter GIW. Die um 40 cm geringere Fahrwassertiefe wirkt sich auf die Schifffahrt derart nachteilig aus, daß der Ausbau der Strecke oberhalb St. Goar auf ebenfalls 2,10 m unter GIW notwendig wird.

Neben der Vertiefung des Fahrwassers ist im Abschnitt Bingen—St. Goar die Verbesserung der Linienführung der Schifffahrtsrinne, die Beseitigung zahlreicher Felsbänke, der Ausbau des Fahrwassers an örtlichen Engstellen und das Abflachen starker Gefällstufen notwendig [4].

2.2 Bauelemente und ihre Anwendung

Als Bauelemente werden bei der geplanten Regulierung die üblichen Strombauwerke wie Bühnen, Leitwerke, Uferabflachungen und Trenndämme sowie Felssprengungen, Baggerungen und Sohlenanhebungen angewandt werden. Die Wahl der Bauelemente hängt ab von den Regulierungszielen und vom morphologischen Charakter der Regulierungsstrecken.

Es sind Maßnahmen in Stromstrecken mit bettbildendem Geschiebe und in Stromstrecken mit Felssohle, sowie Maßnahmen zur Behebung spezifisch örtlicher Schifffahrts-

behinderungen zu unterscheiden. Beispiele für die erstgemeinte Gruppe sind die im Modell untersuchten Stromstrecken bei Sondernheim, Neuwied, Speyer und Düsseldorf (Abschnitt 4).

Am etwa 6 km langen Stromabschnitt Oberwesel—St. Goar können Ausbaumaßnahmen, die für die gesamte Felsenstrecke charakteristisch sind, gezeigt werden (Bild 2). Im oberen Streckenteil ist zwischen den Felsgruppen des Tauberwerths und der Sieben Jungfrauen die Schiffahrtsrinne zu schmal, nicht genügend tief und von Klippen durch-

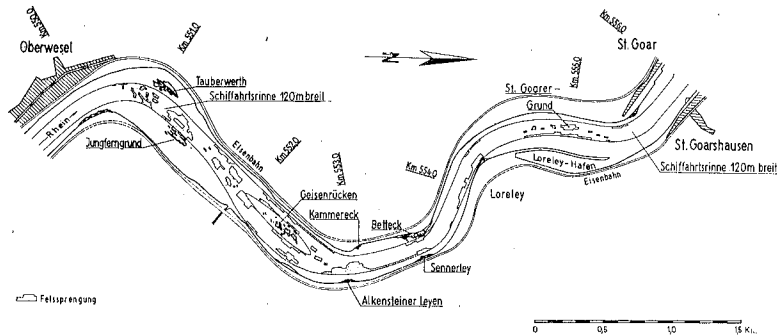


Bild 2
Lageskizze der Felsenstrecke Oberwesel—St. Goar

setzt. An beiden Seiten des mitten im Strom liegenden langgezogenen Felsens des Geisenrückens ist die Schiffahrtsrinne ebenfalls zu vertiefen und zu verbreitern. Unterhalb des Geisenrückens besitzt der schiffbare Rhein seine extremen Krümmungen und geringsten Breiten. Durch weit in den Strom reichende Felsbänke wird die Schifffahrt außergewöhnlich erschwert. Die vorgesehene Absprengung der Felsbänke führt zu einer Verbesserung der Linienführung des Fahrwassers und damit der Schifffahrtsbedingungen.

Zwischen Kammerack und St. Goarer Grund führen die genannten Gegebenheiten in Verbindung mit dem sehr geringen Gefälle häufig zu Eisversetzungen. Um ihnen zu begegnen, sind eine Vergrößerung des Gefälles durch den teilweisen Abbau der beim St. Goarer Grund vorhandenen Schwelle sowie die Sprengung weiterer, die Eisabführung behinderender Felsen vorgesehen.

Im Abschnitt 4.4 wird auf die Behebung spezifischer örtlicher Schifffahrtsschwierigkeiten, nämlich derjenigen der Binger-Loch-Strecke, eingegangen. Ähnlich schwierige Verhältnisse liegen auch im Wilden Gefähr bei Kaub und an der Nackenheimer Schwelle (Rhein-km 487) vor [4].

3. Vorarbeiten (Messungen und hydraulische Berechnungen)

Die Kenntnis der in der Natur vorgegebenen geodätischen und hydraulischen Größen sowie der nautischen Bedingungen ist Voraussetzung zur Durchführung der Modellversuche, zur Vornahme von hydraulischen Berechnungen und damit letzten Endes zur Regulierung der Stromstrecke als Wasserstraße. Da es sich um die Nachregulierung einer bereits ausgebauten, sehr verkehrsreichen Stromstrecke handelt, mußte versucht werden, die benötigten Größen möglichst exakt und umfassend zu ermitteln. Dies führte zur Verbesserung der üblichen sowie zur Entwicklung neuer Meßmethoden und Ermittlungsverfahren.

3.1 Sohlenaufnahmen

Für die Projektierungsarbeiten mußte ein Kartenwerk des Stromes im Maßstab 1 : 2000 geschaffen werden. Es enthält u. a. die auf GIW bezogenen Tiefenlinien der Stromsohle. Die Aufnahme der Stromsohle erfolgte mit Echo-Vermessungslot und Ortungstachygraph. Der kombinierte Einsatz dieser Geräte ermöglicht eine zügige und engmaschige Aufnahme des Stromgrundes [5]. Der Sohlenplan (Bild 3) bildet die Grundlage für den Modellbau.

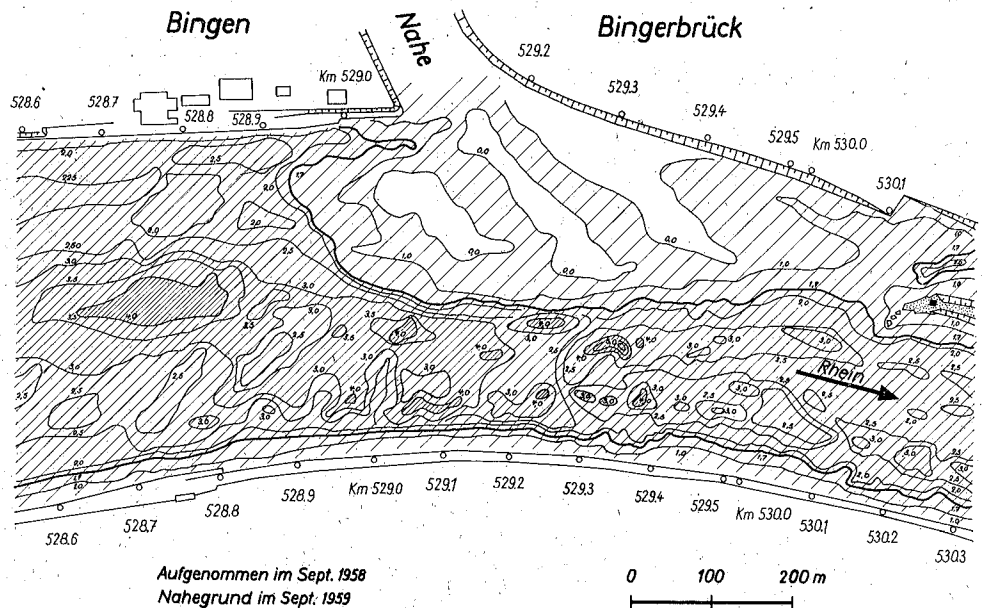


Bild 3
Sohlenplan des Rheines bei Bingen

Aus ihm werden auch die Stromquerschnitte für die hydraulischen Berechnungen entnommen. Er dient ferner der Einpassung der geplanten Strombauwerke und ihrer Massenermittlung.

3.2 Wasserspiegel-Flächenaufnahmen (Bild 4 u. 8)

Die üblichen Gefällebestimmungen aus Wasserspiegelnivellements entlang beider Ufer erwiesen sich als zu grob und unbefriedigend. Es wurden Nivellements mit schwimmender Latte durchgeführt. Eingesetzt waren ein automatisches Nivelliergerät zur Höhenmessung und der Ortungstachygraph zur Lagebestimmung der Latte [6]. Hierdurch konnte das örtliche Längs- und Quergefälle des Wasserspiegels lückenlos erfaßt werden.

3.3 Strömungsmessungen

Es wurden drei Aufnahmeverfahren entwickelt. Bei der ergiebigen aber teureren Messung mit Hubschrauber wurden über die ganze Strombreite verteilte Styroporplatten mit Triftkörpern der Strömung ausgesetzt und vom Hubschrauber aus in konstanten Zeitintervallen photographiert. Nach Entzerrung der Aufnahmen und Übertragung in den Lageplan ergab sich das Strömungsbild. Angewendet wurde das Verfahren bei den

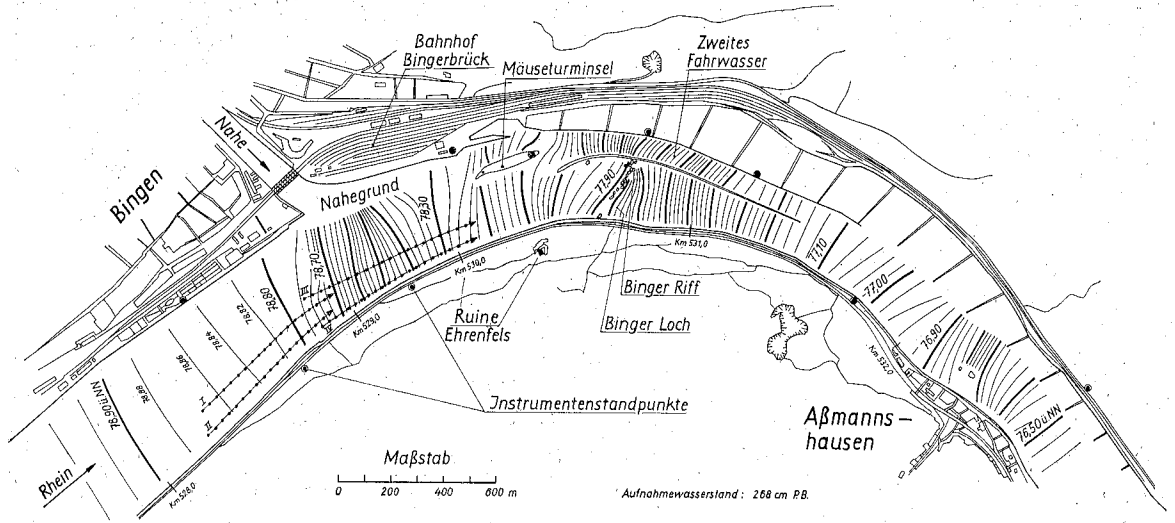


Bild 4
Die Wasserspiegelfläche des Rheines bei Bingen

Untersuchungen zum Ausbau der Stromspaltung Neuwied (Abschnitt 4.2). Aus der gemessenen Strömungsverzweigung ergibt sich die Lage der vorverlegten Inselfspitze (Bild 5).

Ein weiteres Verfahren ist die Einmessung einzelner Schwimmkörper mit dem Ortungstachygraphen. Die Bahnen der Schwimmkörper ergeben den Strömungsverlauf [5].

Strömungsmessungen können auch mit dem unter 3.4 angegebenen photogrammetrischen Verfahren ausgeführt werden. Es werden dabei mehrere Schwimmer gleichzeitig fotografiert und damit ihre Bahnen eingemessen.

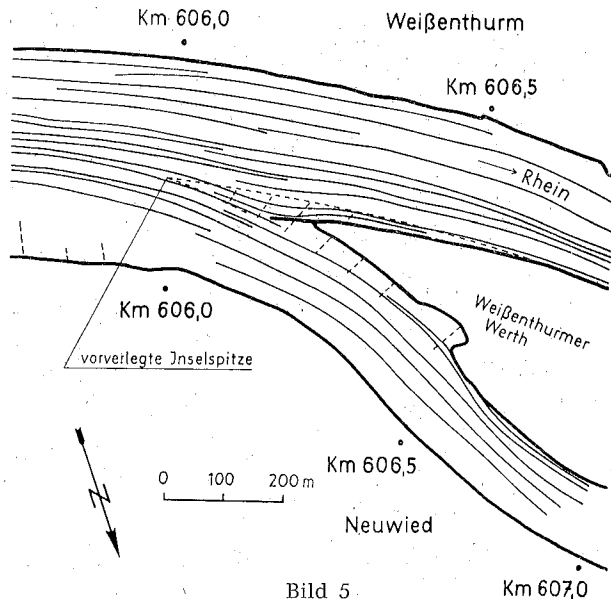


Bild 5
Ergebnis einer Strömungsmessung bei Neuwied

3.4 Schiffsbahnmessungen (Bild 6)

Wie in Abschnitt 4.4 dargestellt wird, sind in schwierig zu befahrenden Stromstrecken die nautischen Verhältnisse mitbestimmend für die Wahl der Regulierungsmaßnahmen. Um die Schiffahrtsbedingungen im Modell studieren zu können, wurden in der Natur photogrammetrische Schiffsbahnmessungen unter den verschiedensten Bedingungen durchgeführt. Zum Einsatz gelangten Kleinbildkameras, die mit einem winkelmessenden Nivellierinstrument gekoppelt waren [7].

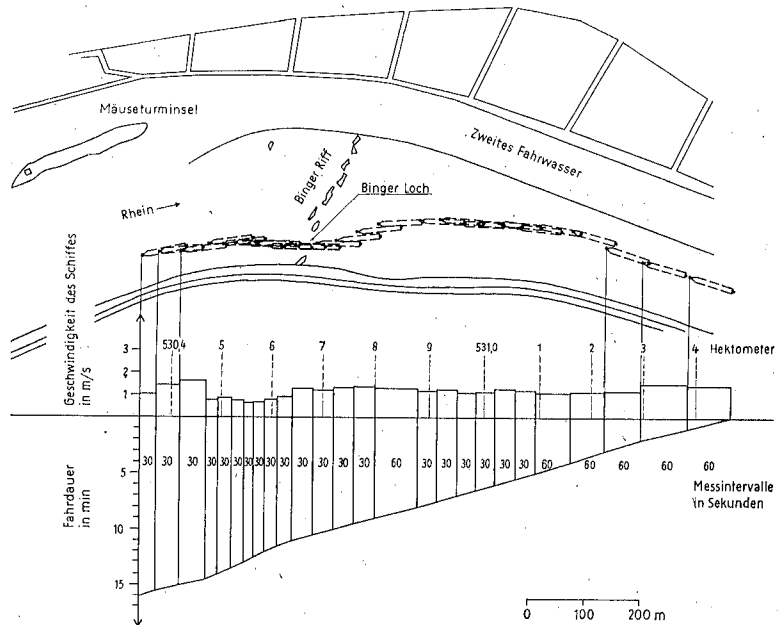


Bild 6

Bahn eines Bergfahrers durch das Binger Loch mit Darstellung der Schiffsgeschwindigkeit, der Fahrdauer und der Meßintervalle

3.5 Messung des Absinkens der Schiffe in Fahrt

Erfahrungsgemäß sinkt ein Schiff während der Fahrt tiefer ein als in Ruhe. Diese Erscheinung wurde auch bei den Modellschiffen (Abschnitt 4.4) beobachtet. Besonders beim Passieren des Binger Loches traten wegen der Enge der Durchfahrtsöffnung und der hohen Strömungsgeschwindigkeit extreme Werte auf. Am Binger Loch wurden daraufhin Messungen zur Erfassung der entsprechenden Naturwerte durchgeführt. Unterhalb des Binger Loches wurde, wenn das Schiff in Ruhe lag oder nur geringe Fahrt besaß, der Höhenunterschied vom Wasserspiegel zum Bug und Heck des Schiffes nivellistisch bestimmt. Anschließend wurden beim Durchfahren der Engstelle Bug und Heck erneut nivelliert und mit der Höhenlage des ungestörten örtlichen Wasserspiegels verglichen. Es ergaben sich Absenkungen bis etwa 25 cm. Dieses Mehreintauchen der Schiffe in Fahrt wurde bei der Festlegung der Sohllentiefe des ausgebauten Binger Loches im notwendigen Ausmaß berücksichtigt.

3.6 *Hydraulische Berechnungen*

Die Lage der projektierten Längswerke im Strom, die Länge der Buhnen, die Aufhöhung der Stromsohle und die sonstigen durch die Regulierung bedingten baulichen Veränderungen im Strombett waren durch hydraulische Berechnungen zu ermitteln und zu überprüfen. Hierbei wurde vorerst an Hand der in der Natur gemessenen Wasserspiegellinie, mit der aus Abflußmessungen bekannten Wasserführung und aus den Querschnitten des Sohlenplans durch Nachrechnung der Wasserspiegellinie der Geschwindigkeitsbeiwert des vorhandenen Stromzustandes ermittelt.

Nach Eintragen der Strombauwerke und der neuen Sohlenlage in die Stromquerschnitte erfolgte eine weitere Berechnung der Wasserspiegellinie. Die Einengung des Stromquerschnittes durch Buhnen oder Leitwerke und die Vertiefung der Stromsohle auf die für die Schifffahrt notwendige Regulierungstiefe sollen dabei so aufeinander abgestimmt werden, daß die neue Wasserspiegellinie, von Sonderfällen abgesehen, das gleiche durchschnittliche Gefälle besitzt wie die ursprüngliche Linie, da so der Strom am wenigsten in seinem Gleichgewicht gestört wird. Dabei sind örtliche Gefällbrüche möglichst zu vermeiden. Ergeben sich in den Wasserspiegellinien zu starke Differenzen, ist die Lage der Strombauwerke zu verbessern und die Berechnung erneut durchzuführen. Zu beachten ist, daß sich durch den Ausbau der Geschwindigkeitsbeiwert ändert. Hinweise auf Tendenz und Größe des neuen Geschwindigkeitsbeiwertes ergeben sich nach Einbau der Regulierungsbauwerke in das Modell aus dem Verlauf der Modell-Spiegellinien. Die hydraulischen Berechnungen wurden wegen ihres Umfanges mit elektronischen Rechenautomaten durchgeführt.

4. **Für den Rhein von der Bundesanstalt für Wasserbau durchgeführte Modelluntersuchungen**

4.1 *Niedrigwasserregulierung mit Buhnen* (Sondernheimer Schwelle)

Als Beispiel einer Flußregulierung mit Buhnen wird der Modellversuch für die etwa 20 km nördlich von Karlsruhe liegende Rheinstrecke bei Sondernheim beschrieben. Die seinerzeitigen Honsellschen und Spieß-Wittmannschen Niedrigwasserregulierungen ließen bei Sondernheim eine etwa 4 km lange Stromstrecke ohne Ausbau. Hier hat sich die von der Schifffahrt bei geringer Wasserführung gefürchtete Sondernheimer Schwelle ausgebildet. Ihre Entwicklung zeigen die Stromsohlenaufnahmen aus den Jahren 1946, 1950, 1956 und 1960 (Bild 7). Die Tiefenlinienpläne lassen eine Verwilderung des nicht mit Buhnen verbauten Stromabschnittes erkennen. Der Querschnitt ist gegenüber den oberhalb und unterhalb liegenden regulierten Querschnitten zu groß. Infolge der Überbreite kommt es zu Geschiebeablagerungen und zur Bildung von Bänken und Mittelgründen, die sich von Jahr zu Jahr verschieben und die Schifffahrt empfindlich behindern.

Zur Untersuchung der Regulierungsmöglichkeiten wurden an einem im Maßstab 1 : 100 gebauten Modell Versuche mit fester und beweglicher Sohle durchgeführt. Als Regulierungsbauwerke wurden Buhnen verwendet, deren Köpfe vorerst auf der Höhe des GIW lagen. Am Modell mit fester Sohle mußten wegen der Offenhaltung des am linken Ufer liegenden Hafenbeckens mehrere Varianten der Buhnenanordnung untersucht werden. Es wurden jeweils die Wasserspiegellagen, die Strömungsgeschwindigkeiten und -richtungen gemessen. Daraus ließen sich die Veränderungen der hydraulischen Belastungen in den einzelnen Querschnitten ermitteln und die Wirksamkeit der Buhnenanordnung hinsichtlich der Schaffung einer ausreichenden Fahrwasserrinne festhalten. Die günstigste Lösung aus den Versuchen am Modell mit fester Sohle wurde dann am Modell mit beweglicher Sohle überprüft. Zuvor mußte jedoch die Naturähnlichkeit der beweglichen

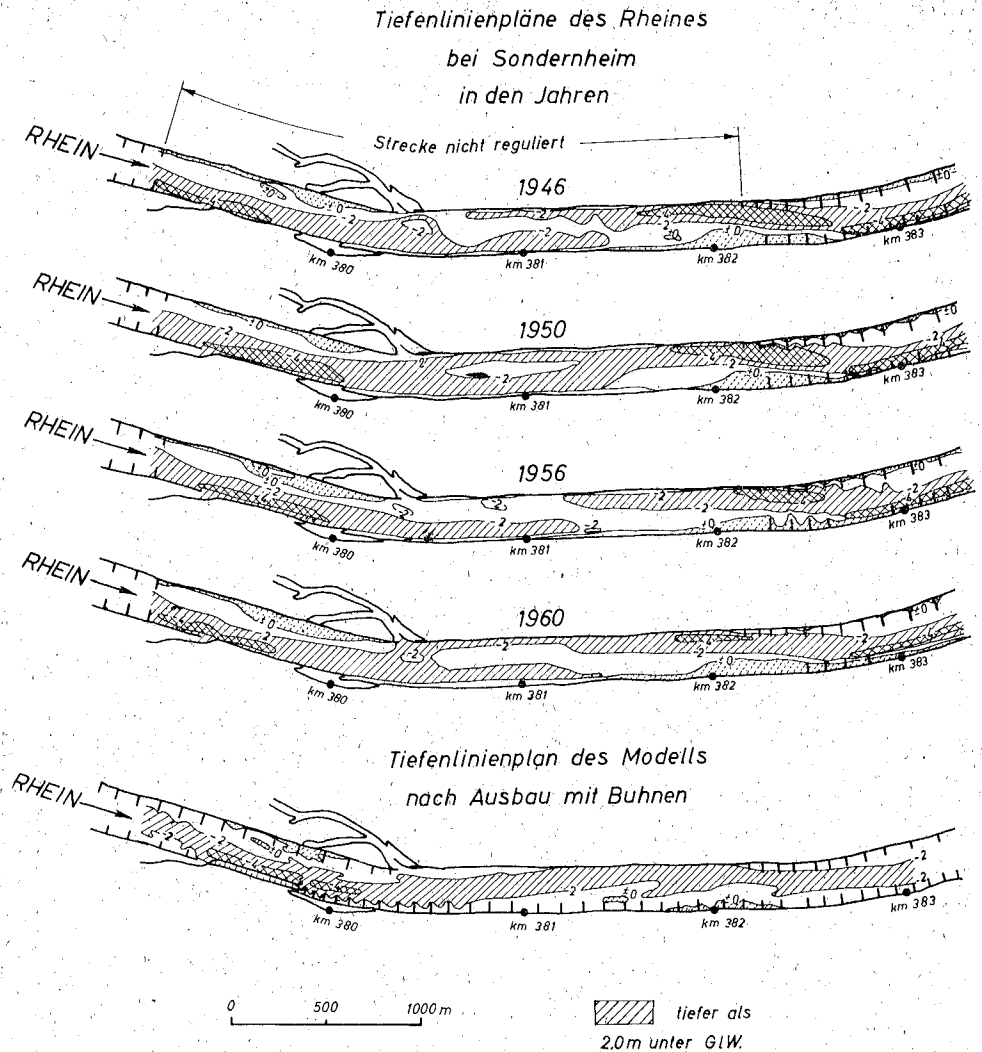


Bild 7

Tiefenlinienpläne des Rheines bei Sondernheim in den Jahren 1946, 1950, 1956 und 1960 und Tiefenlinienplan des Modells nach Ausbau mit Buhnen. Tiefenlinien bezogen auf GIW.

Sohle nachgewiesen werden. Dies gelang nach Einrichtversuchen sehr gut. Es bildete sich im Modell immer wieder die Schwelle. Die sich dabei ergebenden Sohlenpläne hatten große Ähnlichkeit mit den Naturtiefenlinienplänen. Nach Durchführung mehrerer Versuchsreihen und Erhöhung einiger Buhnen erwies sich die in der untersten Darstellung des Bildes 9 wiedergegebene Buhnenanordnung als die wirksamste. Der eingezeichnete Modelltiefenlinienplan läßt ein genügend tiefes und breites Fahrwasser erkennen; die Schwelle ist abgetragen.

Um ein sicheres Ergebnis zu erhalten, wurden die Modellversuche mit beweglicher Sohle stets mehrfach durchgeführt. Die dabei zu beobachtenden Streuungen waren verhältnismäßig gering.

4.2 Stromverzweigung Neuwied

Unterhalb Koblenz bietet die Rheinstrecke bei Neuwied das typische Beispiel einer Stromverzweigung. Das Weißenthurmer Werth teilt den Strom in zwei Arme, an denen Verladeanlagen mit beträchtlichem Umschlag liegen. Diese Anlagen und der rege durchgehende Schiffsverkehr zwingen zur Erhaltung der Schiffbarkeit beider Arme.

Der Lageplan (Bild 8) läßt die Überbreiten vor der Insel und die Fehltiefen im Fahrwasser am Eingang zu beiden Stromarmen erkennen.

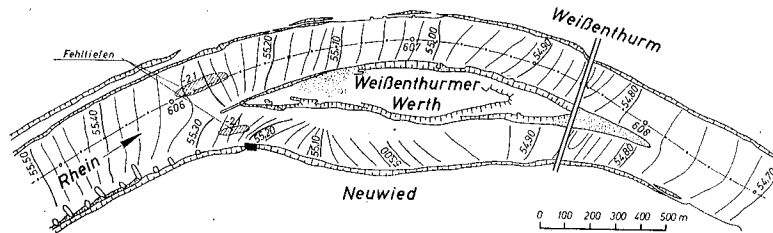


Bild 8

Wasserspiegelfläche des Rheines bei Neuwied bei einem Pegelstand von 2,45 m am Pegel Andernach. Wasserspiegellhöhenlinie bezogen auf NN.

An einem Modell im Maßstab 1 : 100 wurden zuerst mit fester, dann mit beweglicher Sohle die Regulierungsmöglichkeiten untersucht. Das Modell war so eingerichtet, daß die Abflußmengen der beiden Stromarme getrennt und direkt gemessen werden konnten. Messungen in der Natur und im Modell ergaben übereinstimmend, daß von der Gesamtmenge 60 % durch den linken, 40 % durch den rechten Arm abgeführt werden.

Die Eigenart des Strömungsvorganges in der Stromspaltung läßt sich gut aus der in Bild 8 dargestellten Wasserspiegelfläche des Rheines entnehmen. Die Linien gleicher Wasserspiegellhöhen zeigen vor der Inselfspitze die aufstauende Wirkung der Insel. Am Eingang zum rechten Stromarm ist ein ausgeprägtes, nach rechts fallendes Quergefälle zu erkennen, das für die Geschiebeverteilung in der Stromspaltung von Bedeutung ist. Im letzten Drittel des rechten Stromarmes ist das Gefälle z. T. sehr gering. Das Gefälle des linken Stromarmes ist wesentlich gleichmäßiger. Am Ende der Insel besteht noch eine geringe Wasserspiegellifferenz.

Im Verlauf der Untersuchungen wurde zunächst versucht, die aufgetretenen Fehltiefen durch eine Änderung der Abflußmengenverteilung zu beseitigen. Dazu wurde die Trennbühne an der Inselfspitze verlängert und in ihrer Lage verändert. Die Messung der Abflußmengen in den beiden Armen ergab aber jeweils nur geringe Verschiebungen der Wassermengenverteilung. Die Erhöhung der Geschwindigkeiten im Bereich der Fehltiefen war nur gering. Der starke Gefällsbruch am Eingang zum rechten Stromarm blieb bestehen. Um ihn zu beseitigen, wurde der rechte Stromarm mit Bühnen ausgebaut. Die damit erreichte Abflußmengenverlagerung vom rechten zum linken Arm war nicht ausreichend, um die Fehltiefen des linken Armes zu beseitigen. Es ergab sich nunmehr die Notwendigkeit, die Inselfspitze nach oberstrom vorzuziehen und mit Bühnen oder einem Leitwerk auf Höhe des MW auszubauen. Dadurch wurde im Bereich der Inselfspitze der Abflußquerschnitt verengt und die Geschwindigkeit erhöht. Die Wassermengenverteilung wurde gegenüber dem ursprünglichen Zustand nur geringfügig geändert. Das Vorziehen der Inselfspitze wurde bei den Versuchen am Modell mit fester Sohle in mehreren Formen durchgeführt. Es zeigte sich, daß eine ausreichende Wirkung nicht

eintrat, wenn die Inselfspitze zu wenig nach oberstrom vorgeschoben wurde. Die Trennung der Abflußmengen auf die beiden Stromarme mußte schon in dem Bereich erfolgen, in dem der Strom infolge der Stromspaltung noch nicht wesentlich erweitert ist. Die Untersuchungen haben gezeigt, daß der Ausbau oder das Vorschieben der Inselfspitze durch ein Leitwerk sich von dem Ausbau mit Bühnen nur wenig unterscheidet. Der Strömungsverlauf in der Nähe der neuen Inselfspitze ist bei einem Leitwerk gleichmäßiger und daher für die Schifffahrt günstiger als bei den Bühnen. Es lag daher nahe, beide Bauarten miteinander zu kombinieren und für die Seite mit dem stärksten Schiffsverkehr ein Leitwerk zu wählen.

Um den Verlauf des Geschiebetriebes in der Stromspaltung zu überprüfen, und um die Wirkung der einzelnen Ausbauarten auf die Stromsohle feststellen zu können, wurde das Modell mit einer beweglichen Sohle ausgestattet. Als Modellgeschiebe wurde Braunkohlengrus verwendet. Die Abflußganglinie des Modells war einer charakteristischen Ganglinie der Natur aus dem letzten Jahrzehnt nachgebildet. Die Untersuchung des bestehenden Zustandes ohne Einbauten am Modell mit beweglicher Sohle ergab die fast naturähnliche Nachbildung der Fehltiefen am Eingang zum linken Stromarm. Der rechte Stromarm zeigte dagegen starke Verlandungen, die mit den Sohlenaufnahmen der letzten Jahre zunächst nicht übereinstimmten. Eine Überprüfung der Baggerungen in der Natur ergab, daß in diesem Stromarm in der Vergangenheit immer wieder beträchtliche Mengen gebaggert worden waren. Bei allen Versuchen im bestehenden Zustand erhielt der rechte Stromarm prozentual immer mehr Geschiebe als er der Abflußmengenverteilung nach haben sollte. Dies zeigten die am Modellende gemessenen Geschiebeabgänge und aufgelaufenen Verlandungen. Das starke Eintreiben von Geschiebe in den rechten Arm war schon bei den Versuchen am Modell mit fester Sohle festgestellt worden. Einmal liegt die Stromspaltung in einer, wenn auch leichten Krümmung, bei der eine Erhöhung der Geschiebekonzentration zum Innenufer hin auftritt. Zum anderen ist das Quergefälle am Beginn der Stromspaltung nach rechts verstärkt (Bild 8), so daß sich hier eine Spiralströmung mit einer nach rechts wirkenden Sohlenströmung einstellt, die mehr Geschiebe in den rechten Stromarm zieht, als es den Breiten- und Abflußverhältnissen dieses Armes entspricht. Die Erhöhung des Längsgefälles am Eingang des rechten Armes, wie sie aus der Wasserspiegelflächenaufnahme in der Natur zu erkennen ist, verstärkt diesen Effekt.

Für die weiteren Versuche am Modell mit beweglicher Sohle wurden die beim Modell mit fester Sohle gefundenen günstigsten Bauformen verwendet. Dabei zeigte sich, daß die Fehltiefen im linken Stromarm durch die Vorverlegung der Inselfspitze beseitigt wurden. Die Vorverlegung wurde durch den Bau eines MW-Leitwerkes, kombiniert mit gleich hohen Bühnen, erzielt.

Um im rechten Stromarm Verlandung zu vermeiden und seine volle Schiffbarkeit zu erreichen, wurde dieser Arm mit Bühnen reguliert. Die Bühnenhöhe entsprach dem Mittelwasser (MW). Sie wurden so gelegt, daß eine Fahrwasserbreite von 90 m vorhanden war. Danach ergab sich das in Bild 9 dargestellte Ausbausystem, das zur Ausführung vorgeschlagen wurde.

Mit der vorgeschlagenen Anordnung und Höhe der Bauwerke stellte sich bei den Modellversuchen mit beweglicher Sohle in beiden Stromarmen ein nach Breite und Tiefe ausreichendes Fahrwasser ein. In einer weiteren Versuchsreihe wurden, bei gleicher Grundrißordnung, die Bauwerke auf die Höhe des GIW, das ist um etwa 170 cm tiefer, gelegt. Durch diese Maßnahme wurde die Wirkung der Regulierung sehr stark abgeschwächt. Die Fehltiefen wurden nur etwa zur Hälfte beseitigt, während im rechten Arm wiederum Verlandungen auftraten. Ein Niedrigerlegen der Bauwerke war danach nicht zu empfehlen.

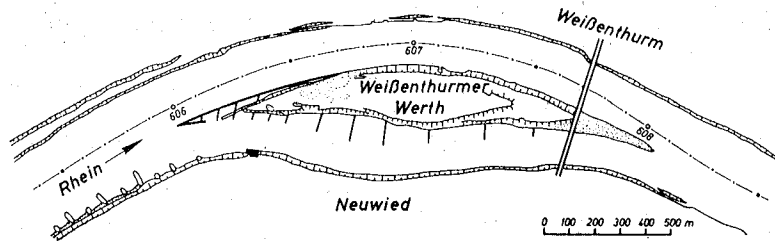


Bild 9

Ausführungsvorschlag zur Regulierung der Stromspaltung Neuwied: Vor der Inselfspitze ist ein Längswerk angeordnet. Die Überbreiten sind durch Buhnen eingeschränkt.

Die Modellversuche für die Rheinstrecke Neuwied-Weißenthurm haben gezeigt, daß man bei der Regulierung von Stromspaltungen in geschiebeführenden Flüssen in jedem Arm die Geschiebeleistung mit der Abflußleistung in Übereinstimmung bringen muß. Wird dies nicht erreicht, dann geht der geschiebeüberlastete Arm in seiner Abflußleistung immer mehr zurück und verlandet, wenn keine Baggerungen durchgeführt werden.

4.3 Kolke und Uferabflachungen in Krümmungen

4.31 Allgemeines

Bereitstellung und Erhaltung eines ausreichenden Fahrwassers in Flußkrümmungen bieten flußbaulich und schiffahrtsmäßig immer gewisse Schwierigkeiten und erfordern einen beträchtlichen Arbeits- und Kostenaufwand.

Für die Betrachtung der Fahrwasserverhältnisse in einer Flußkrümmung ist es zunächst erforderlich, sich die Wasser- und Geschiebebewegung in gekrümmten Flußstrecken zu vergegenwärtigen. Um den Wasserteilchen, die durch eine Krümmung fließen, die notwendige Richtungsänderung zu geben, ist eine Querkraft erforderlich, die durch Quergefälle erzeugt wird. Dieses Quergefälle nimmt vom Krümmungsanfang vom Wert Null bis etwa zum Krümmungsscheitel zu, um dann bis zum Krümmungsende wieder auf Null abzunehmen. Dadurch entsteht an der Krümmungsaußenseite vom Bogenanfang bis zum Bogenscheitel ein Bereich mit verzögertem Abfluß und vom Bogenscheitel bis zum Bogenende ein Bereich mit beschleunigtem Abfluß. Andererseits ergibt sich an der Bogeninnenseite vom Bogenanfang bis zum Bogenscheitel eine Beschleunigungsstrecke, vom Bogenscheitel bis zum Bogenende eine Verzögerungsstrecke.

Der Verlauf des Wasserspiegels in der Querrinne ist wie bekannt nach oben gekrümmt. Das örtliche Quergefälle stellt sich dabei nach der mittleren Geschwindigkeit in der jeweiligen Lotrechten ein. Da die Geschwindigkeit an der Oberfläche größer ist als die mittlere Geschwindigkeit, ist für die Oberflächenteilchen das sich einstellende Quergefälle zu gering. Sie werden durch das Quergefälle nicht genügend umgelenkt und streben nach außen. Umgekehrt ist für die langsameren sohlennahen Teilchen das Quergefälle zu groß, so daß sie nach der Innenseite der Krümmung abgedrängt werden. Das Quergefälle und die verschiedenen Geschwindigkeiten an Oberfläche und Sohle bedingen ein Verwinden der Strömung, die sogenannte Spiralströmung [9].

Gelangt nun ein über den Querschnitt gleichmäßig verteilter Geschiebetrieb in eine Krümmung, so wird das Geschiebe durch die nach innen gerichtete Sohlenströmung nach dem Innenufer geführt und dort in die vom Bogenscheitel bis zum Bogenende reichende Verzögerungsstrecke gebracht. Dort bleibt es dann in Form von Kiesbänken liegen,

die zum Teil bis in die Strommitte hineinreichen und den Abflußquerschnitt und das Fahrwasser einengen. Die nach innen gerichtete Sohlenströmung bewirkt aber auch, daß die Krümmungsaußenseite je nach der Stärke der Krümmung und des Geschiebetriebes mehr oder weniger vom laufenden Geschiebe entblößt wird und somit der Erosionsarbeit des Stromes direkt ausgesetzt ist. Die Erosion durch die Spiralströmung wird noch vermehrt durch die Querschnittsverminderung als Folge der am Innenufer liegenden Geschiebebanke. Das führt zu den meist etwas abwärts des Bogenscheitels liegenden tiefen Kolken. Der Abflußquerschnitt nimmt an Tiefe zu und an Breite ab. Die Geschiebebanke leiten den Strom immer mehr nach außen. Er greift das Außenufer an. Wird ihm dort kein Widerstand entgegengesetzt, so stellt sich eine Mäanderbildung ein, wie wir sie an vielen nicht regulierten Flüssen beobachten können.

Die den einseitigen Geschiebetrieb in Krümmungen verursachende Spiralströmung beruht auf der Schrägstellung des Wasserspiegels und auf der ungleichmäßigen Geschwindigkeitsverteilung in der Lotrechten. Die Geschwindigkeitsverteilung ist praktisch nicht beeinflussbar. Die Schrägstellung kann nur durch die Vergrößerung des Krümmungshalbmessers verringert werden. Größere Veränderungen des Grundrisses eines Flußlaufes sind aber bei der heutigen dichten Besiedlung selten möglich. Die Spiralströmung selbst kann also nicht wesentlich verändert werden. Bei Maßnahmen zur Verbesserung der Fahrwasserverhältnisse in Krümmungen muß man also in erster Linie versuchen, die Tiefenerosion in der Kolkstrecke zu verhindern und den Strom durch einen Kolkverbau zu einer Breitenerosion zu zwingen. Hierfür können zwei Beispiele angeführt werden.

4.32 Rheinkrümmung bei Düsseldorf

In der scharfen S-Schleife bei Düsseldorf hatten sich am linken Ufer bei Heerdt-Oberkassel und am rechten Ufer bei Düsseldorf die tiefsten Kolke des Niederrheins ausgebildet. Zugleich war die Breite der Schiffahrtsrinne, eingengt durch Umschlagsverkehr im Bereich der Krümmungen, zu gering (Bild 10).

Am Modell mit fester und beweglicher Sohle (Maßstab 1 : 150) wurde zunächst versucht, die Kolke mit Grundschwellen zu verbauen. Es wurden dabei sowohl gerade als auch

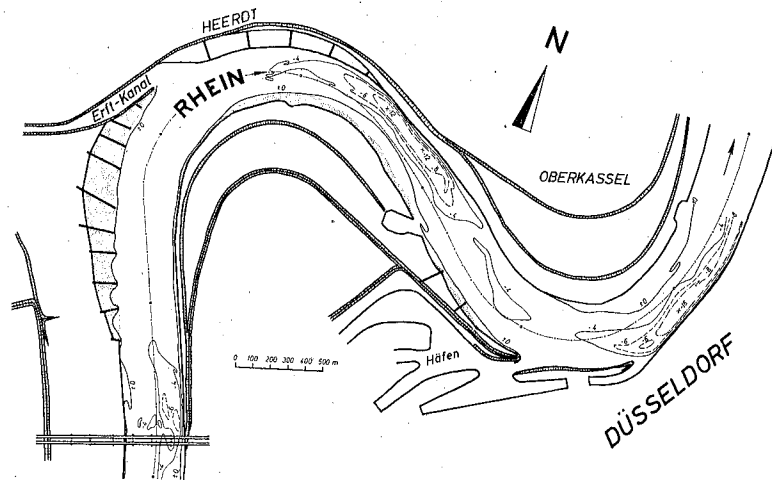


Bild 10

Sohlenplan der Stromkrümmung bei Düsseldorf aus dem Jahre 1949.
Tiefenlinien bezogen auf GIW.

gekrümmte Grundschwellen mit verschiedener Höhenlage verwendet. Die gekrümmten Grundschwellen verliefen im Grundriß in einem leichten konkaven Bogen von der Innenseite der Krümmung zur Außenseite. Durch die Versuche am Modell mit beweglicher Sohle konnte festgestellt werden, daß tiefliegende Grundschwellen nur eine sehr geringe Wirkung haben. Erst wenn die Grundschwellen eine Höhe von $GIW = 3,0$ m erreichten, wurde die Bank am Innenufer abgetrieben und damit das Fahrwasser verbreitert. So hohe Grundschwellen ergaben aber merkbare Wasserspiegelabsenkungen und Erhöhungen der Fließgeschwindigkeit über der Grundschwellenkronen, die der Schifffahrt beim Überfahren durch wechselnde Trossenkräfte Schwierigkeiten bereiten.

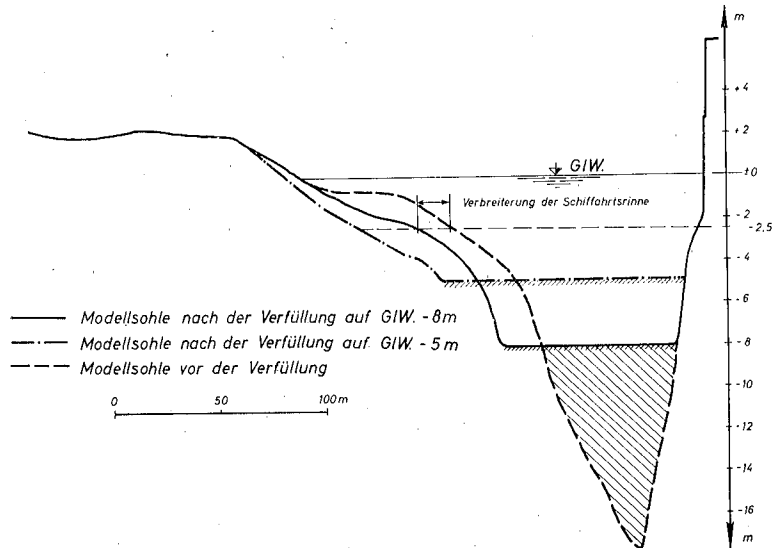


Bild 11
Querprofile im Modell. Rhein-km 743,9.

Die Grundschwellenfelder sind nicht verlandet. Es konnte nachgewiesen werden, daß sie nur wenig oder fast kein Geschiebe zugeführt bekommen und damit auch nicht verlanden können. Die Grundschwellen mit geraden und gekrümmten Grundriß hatten also keinen Erfolg. Es wurden nunmehr im Modell die Kolke verfüllt und mit einer Schicht schwerer Steine abgedeckt. Die Höhenlage der Abdeckung war einmal $GIW = -8,0$ m und bei einem weiteren Versuch $GIW = -5,0$ m. Der Erfolg dieser Maßnahme ist aus der Veränderung des charakteristischen Querprofils des Düsseldorfer Kolkes (Bild 11) bei Vergleichsversuchen zu erkennen.

Bei der Verfüllung des Kolkes auf $GIW = -5,0$ m wurde die Bank am Innenufer (linke Seite) stark angegriffen und abgetrieben. Es ergab sich eine kräftige Verbreiterung des Fahrwasser. Die Verfüllung des Kolkes auf $GIW = -8,0$ m brachte ebenfalls eine Verbreiterung des Niedrigwasserprofils, jedoch war die Wirkung hier geringer. Ein ähnliches Bild zeigten auch die Querprofile des Kolkes bei Heerd-Oberkassel. In einer Reihe von aufeinanderfolgenden Dauerversuchen wurde die Wirkung der Kolkverfüllung noch näher untersucht. Dabei ergab es sich, daß sich am inneren Rand der Kolkabdeckung eine Erosionsrinne einstellt, wenn die Abdeckung nicht weit genug zur inneren Bank hin reicht. Bildete sich eine solche Rinne aus, so vergrößerte sich wieder die Bank am Innenufer. Die Versuche wurden im Modell unter extremen Bedingungen bis zur Zerstörung der Sohle fortgeführt.

Nach diesem Modellergebnis wurden die beiden Kolke der Düsseldorfer Rheinkrümmung in der Natur verfüllt und mit grobem Kies abgedeckt. Die Abdeckung lag am Anfang und am Ende des Kolkes auf etwa GIW $-5,0$ m, in der Mitte auf GIW $-8,0$ m. Den Erfolg des Kolkverbaues in der Natur zeigt das Querprofil des Rheines bei Düsseldorf vor und nach der Kolkverfüllung (Bild 12). Hier hat sich in ähnlicher Weise wie im Modell eine Verbreiterung des Niedrigwasserprofils und damit eine Fahrwasserverbesserung ergeben. Die Kolkverfüllung wurde mit grobem Kies von durchschnittlichem Durchmesser von 8 bis 15 mm bei einer Schichtstärke von etwa 1 m abgedeckt. Die

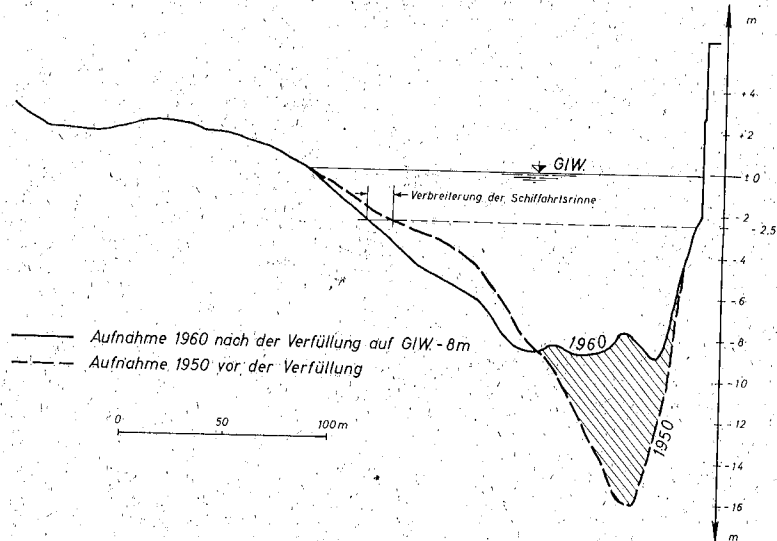


Bild 12
Querprofile in der Natur. Rhein-km 743,9.

Abdeckschicht hat sich seit ihrer Herstellung im Jahre 1954 trotz einer Reihe schwerer Hochwässer sehr gut gehalten, wie laufende Nachpeilungen ergeben haben. Die Tendenz zum Entstehen einer Erosionsrinne wurde auch in der Natur festgestellt. Ihr wurde durch eine Erweiterung der Abdeckung erfolgreich begegnet.

4.33 Rheinkrümmung bei Speyer

Ähnlich der Rheinschleife bei Düsseldorf verhält sich die große S-Krümmung des Rheines bei Speyer. Auch hier hatten sich vor dem Außenufer tiefe Kolke und am Innenufer das Fahrwasser verengende Kiesbänke gebildet. Bild 13 zeigt die nördliche, schärfere Stromkrümmung der Schleife.

Die Linienführung des Außenufers wies oberhalb der Einmündung des Speyerbaches eine Einbuchtung auf. Dadurch wurde der Krümmungskolk noch mehr vertieft. Das Außenufer war in diesem Bereich steil und war mehrfach unterspült. In die Bank am Innenufer mußte für die Anlegestelle einer Flußfähre ein Einschnitt gebaggert werden. Das enge und unübersichtliche Fahrwasser führte bei dem starken Schiffsverkehr auf dieser Strecke öfters zu Kollisionen. Auch diese Rheinkrümmung wurde im Modell mit dem Maßstab 1:150 mit fester und beweglicher Sohle untersucht. Im Gegensatz zu der Rheinkrümmung bei Düsseldorf, bei der sich in der scharfen zweiten Krümmung am Außenufer Kaianlagen befinden, konnte bei der Speyerer Krümmung das steile Außenufer abgeflacht werden. Gleichzeitig wurde oberhalb der Mündung des Speyerbaches

das Ufer vorgeschoben und die Linienführung des Ufers durch Ausrunden verbessert. Diese beiden Maßnahmen brachten bei den Modellversuchen mit beweglicher Sohle eine Verringerung des unter GlW $-4,0$ m liegenden Kolkvolumens im Bereich von Rhein-km 399,5 bis 401,0 von 7,5 %. Im eigentlichen Kolkbereich von km 400,0 bis 400,5 ermäßigte sich das Kolkvolumen um 17 %, während das Volumen der Bank über GlW $-4,0$ m am Innenufer um 11,5 % kleiner wurde. Dabei wurde gleichzeitig die Fahrwasserbreite vergrößert. Wurde dazu der Kolk auf einer Höhe von GlW $-4,0$ m verfüllt und mit schweren Steinen abgedeckt, so ergab sich eine Verringerung des Bankvolumens

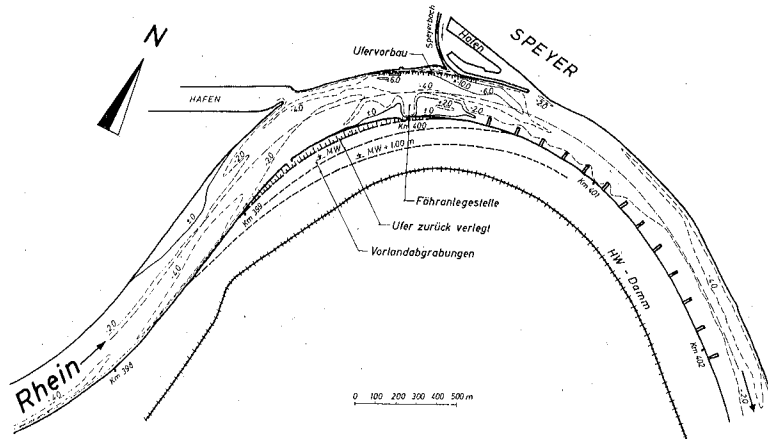


Bild 13
Sohlenplan der Stromkrümmung bei Speyer aus dem Jahre 1950
Tiefenlinien bezogen auf GlW.

um 29 % bei einer gleichzeitigen Verbreiterung des Fahrwassers um rd. 70 m im kritischen Querschnitt. Weitere Verbesserungen konnten dadurch erreicht werden, daß das Innenufer etwas zurückgenommen wurde und auf dem inneren Vorland eine zwei-stufige Vorlandabgrabung vorgenommen wurde. Die erste Stufe der Abgrabung lag auf MW und die zweite auf MW $+ 1,0$ m. Dadurch wurde für höhere, die Stromsohle umbildende Abflußmengen, eine günstigere Krümmungsdurchströmung geschaffen. Die Folge war eine weitere Verringerung der Bank am Innenufer und — wenn die Versuche ohne Verfüllung des Kolkes durchgeführt wurden — auch eine Verringerung des Kolkes, die bis zu 38 % betrug.

4.4 Die Verbesserung der Schiffahrtsverhältnisse der Binger-Loch-Strecke des Rheines

4.4.1 Die örtlichen Verhältnisse

Wenig unterhalb von Bingen durchquert, ursprünglich ohne Unterbrechung von einem Ufer zum anderen reichend, bei Strom-km 530,7 ein Quarzitriff den Rhein und bildet gleichsam ein von der Natur geschaffenes Wehr. Aus ihm wurden, vorwiegend im vorigen Jahrhundert [10], zwei Schiffahrtsöffnungen herausgesprengt, nämlich das sogenannte „Binger Loch“ am rechten und das „Zweite Fahrwasser“ am linken Ufer. Das letztere wurde durch einen rd. 1 km langen Trenndamm gegen den Hauptstrom begrenzt.

Der Schifffahrt entstehen in dieser Strecke folgende Hauptschwierigkeiten:

1. Die extreme Enge der beiden Schifffahrtswege mit etwa 30 m Breite im Binger Loch und etwa 60 m im 2. Fahrwasser.

2. Die starke Krümmung der bei der Mäuseturminsel gelegenen Einfahrt in das 2. Fahrwasser, die hier ein Überholen oder Begegnen der Schiffe nicht zuläßt.
3. Das große örtliche Wasserspiegelgefälle mit entsprechend hohen Strömungsgeschwindigkeiten. Sie zwingen einen großen Teil der Bergfahrer, zusätzlich Vorspannboote in Anspruch zu nehmen und geben zu Verzögerungen der Bergfahrt Anlaß.
4. Die geringe Fahrwassermindesttiefe von etwa 1,70 m unter den Gleichwertigen Wasserstand (GIW = 1,00 m am Pegel Bingen). Sie gestattet es etwa während der Hälfte des Jahres nicht, die Schiffe voll abzuladen.

Die Binger-Loch-Strecke ist zudem die unfallreichste Stelle aller deutschen Binnenwasserstraßen.

Das genannte, auch als „Lochbänke“ bezeichnete Felsenriff, ferner die sich vor der Nahemündung bis über die Strommitte vorschiebende Untiefe des Nahegrundes, die Mäuseturminsel mit ihren vorgelagerten Riffen, das Trennwerk des 2. Fahrwassers sowie verschiedene kleinere Riffgruppen lassen die Strömungsverhältnisse so unübersichtlich werden, daß eine verlässliche theoretische Voraussage der Auswirkungen von projektierten Baumaßnahmen auf die Strömungs- und Schiffahrtsverhältnisse hier nicht möglich ist.

Die Wasser- und Schiffahrtsverwaltung des Bundes hat daher die Bundesanstalt für Wasserbau in Karlsruhe mit der Durchführung von Modelluntersuchungen über die zur Verbesserung der Schiffahrtsverhältnisse erforderlichen Baumaßnahmen beauftragt.

4.42 Die Methoden der Modelluntersuchungen

4.421 Die Ausbildung des Modells

Das rd. 100 m lange Modell wurde unverzerrt im Maßstab 1:66²/₃ errichtet. Es umfaßt den Stromabschnitt zwischen Rhein-km 525,8 (oberhalb von Rüdenheim) und 532,6 (bei Abmannshausen). Im Hinblick auf den im maßgebenden Teil in der Natur auftretenden Felsuntergrund konnte man sich auf eine feste Modellsohle beschränken.

Grundlage für den Modellaufbau waren die in Lageplänen im Maßstab 1:2000 kartierten, auf GIW bezogenen Tiefenlinien, welche die Ergebnisse der im Abschnitt 2.1 behandelten Echopeilungen enthalten. Die Tiefenlinien wurden im Modell als verschiedene hohe Zinkblechstreifen auf einem Betonzwischenboden, der mit dem Gefälle des GIW versehen war, vom Koordinatennetz aus plangerecht verlegt. Hierauf wurde die Betonsohle zwischen den Zinkblechstreifen aufgebracht.

Um für die sich bei bestimmten Durchflüssen ergebenden Wasserspiegellagen eine Analogie zwischen Natur und Modell zu erreichen, wurde die Sohle des letzteren durch das Aufkleben von Steinchen mit einer künstlichen Rauigkeit versehen. Die in der Natur auftretenden Wasserspiegellagen waren hierbei aus den unter Ziffer 3.2 beschriebenen Wasserspiegel-Flächennivellements bekannt.

4.422 Der Einsatz ferngesteuerter Modellschiffe

Da der Ausbau der Binger-Loch-Strecke im Interesse der Schifffahrt erfolgt, spielt neben den Wasserspiegellagen die Frage der Auswirkungen der geplanten Baumaßnahmen auf das fahrende Schiff die entscheidende Rolle.

Für die Beurteilung der nautischen Verhältnisse sind die im Modell gemessenen hydraulischen Größen, also Wasserstand, Durchflußverteilung, Strömungsverlauf und Geschwindigkeit, allein noch kein ausreichendes Kriterium.

Der Gesamtwiderstand eines fahrenden Schiffes wird in Abhängigkeit von seiner Geschwindigkeit bekanntlich nicht nur durch seine Form und seine Oberflächenrauigkeit bestimmt, sondern es gehen bei der Fahrt in begrenztem und bewegtem Wasser daneben bedeutende Einflüsse auf den Gesamtwiderstand von der Gestalt der Fahrwasserstraße und vom Verlauf der Strömung aus. Je flacher und enger das Fahrwasser wird, desto stärker wächst der Schiffswiderstand an, zumindest in dem für den Güterverkehr auf dem Rhein praktisch in Frage kommenden Geschwindigkeitsbereich mit einer Froudeschen Tiefenzahl

$$Fr_t = \frac{v}{\sqrt{g \cdot t}} < 1 \quad (t = \text{Wassertiefe, } v = \text{Schiffsgeschwindigkeit}).$$

Er wird auch von Unebenheiten des Gerinnebodens beeinflusst. Bei der Überwindung kurzer Stromschnellen wirkt sich ferner neben der Größe der Gegenströmung und dem zu überwindenden Wasserspiegelgefälle auch die in der Anfahrtstrecke gewonnene kinetische Energie des Schiffes, sein Schwung, entscheidend aus.

Bei der Vielzahl dieser gleichzeitig wirkenden und sich nach unterschiedlichen mathematischen Funktionen ändernden Einzeleinflüsse ist es praktisch kaum erreichbar, sie aus geometrischen und hydromechanischen Einzelwerten, deren genaue Messung über weite Strecken hinweg im Modell zudem mit außerordentlich großem Aufwand verknüpft wäre, verlässlich vorzuberechnen, zumal wenn sich, wie es in der Binger-Loch-Strecke der Fall ist, diese Werte innerhalb kurzer Abschnitte des Schiffskurses stark ändern.

Im Gegensatz zu den Problemen des Schiffbaues, wo für die Formgebung des Schiffskörpers, der Propeller usw. die Kenntnis der einzelnen Anteile des Gesamtwiderstandes von großer Bedeutung sein kann, ist deren Ermittlung an sich bei den meisten Aufgabenstellungen des Flußbaues gar nicht erforderlich. Hier ist vielmehr in erster Linie die Frage zu klären, ob nach der Ausführung der vorgesehenen baulichen Veränderungen die Schifffahrt relativ bessere oder schlechtere Fahrverhältnisse antreffen wird. Zu ihrer Beantwortung kann auf die Kenntnis der absoluten Werte des Schiffswiderstandes oder der Leistung verzichtet und als Kriterium die Fahrgeschwindigkeit über Grund benutzt werden, die sich bei der Fahrt von Modellschiffen mit einfachen Mitteln registrieren läßt. Sie wird für die einzelnen Ausbauvarianten mit denjenigen verglichen, die für den heute vorhandenen baulichen Ausgangszustand unter gleichen Startverhältnissen des Modellschiffes beobachtet wurde. Die letzteren sind gekennzeichnet durch den Schiffstiefgang und den im Stand in einer Eichrinne ausgeübten Propellerschub sowie durch die Propellerdrehzahl.

Das bei den Modelluntersuchungen für den Rhein bei Bingen vorwiegend verwendete Modellschiff entspricht dem Regelselbstfahrertyp „Johann Welker“. Der Schiffskörper wurde im Maßstab 1:66²/₃ aus glasfaserverstärktem Polyesterharz auf der Grundlage des Spantenrisses der Großausführung naturgetreu nachgebildet. Die Abdeckung des Schiffes besteht aus Styroporschaumplatten. Die Wahl dieser Baustoffe war bedingt durch die Forderung, das Gesamtgewicht des Schiffes so klein zu halten, daß die Fahrt mit einem Tiefgang von nur 1,50 m, wie er beim gleichwertigen Wasserstand des Rheins in Frage kommt, möglich ist. Durch Ballastzugabe kann der Tiefgang bis auf 2,50 m vergrößert werden. Schiffsschrauben und Ruder werden von Elektromotoren angetrieben. Als Energiequelle dienen Bleiakumulatoren. Im Schiff ist ein Kurzwellenempfänger eingebaut, der auf 3 tonfrequenten Kanälen je ein Signal empfangen kann. Die Signale werden von einem transportablen Sender in Amplitudenmodulation auf einer Frequenz von 40,68 Mhz gegeben. An den Empfänger schließt sich eine Relaischaltung an zur Betätigung der Motoren und der Ruder.

Da Schrauben und Ruder der Rheinschiffe selbst beim gleichen Schiffstyp erhebliche Unterschiede aufweisen, konnten die entsprechenden Einrichtungen des Modellschiffes (2 Drei-Flügel-Propeller, 2 Fahnenruder), die nach einer vorliegenden Zeichnung gestaltet wurden nicht mit denen des später im Rhein für Meßfahrten verfügbaren vorher nicht bekannten Großschiffes völlig übereinstimmen. Ein Vergleich der Tourenzahlen der Propeller zwischen dem letzteren und dem Modell ergab keine krassen Abweichungen. Zudem ist dieser Umstand, da es sich um Relativmessungen handelt, ohne Bedeutung.

Das Modellschiff besitzt ferner einen zwischen die Energiequelle und die Motoren geschalteten, von Hand einstellbaren elektrischen Widerstand. Er ermöglicht innerhalb weiter Grenzen die Einstellung einer bestimmten Tourenzahl der Motoren und damit auch der auf der gleichen Welle sitzenden Propeller.

Es besteht die Möglichkeit, die Tourenzahl auch während der Fahrt des Modellschiffes laufend zu messen. Zu diesem Zwecke wird je Umdrehung der Motorwelle ein elektrischer Impuls erzeugt. Die Impulsfrequenz wird mit einem elektronischen Frequenzzeiger (Drehzahlmesser) gemessen.

Für die Durchführung intermittierender photographischer Geschwindigkeitsmessungen ist das Modell mittschiffs auf jeder Seite mit einem hell leuchtenden Positionslicht ausgestattet.

Das Bild 14 zeigt die im Schiff eingebaute elektrische Anlage.

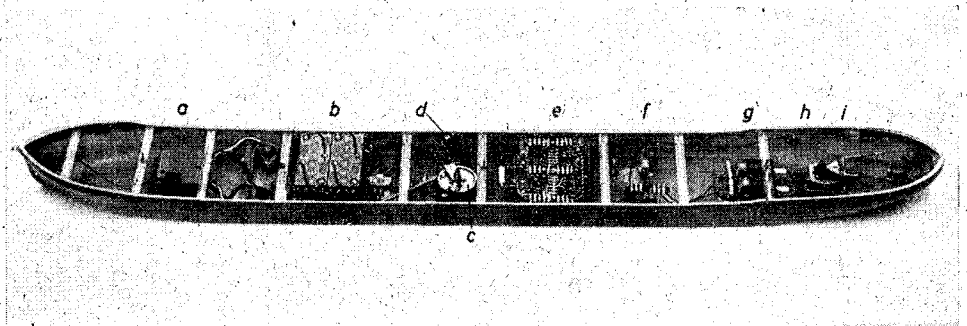


Bild 14

Die elektrischen Einrichtungen des Modellschiffes vom Typ „Johann Welker“
 a = Empfänger, b = Akkumulatoren, c = Potentiometer, d = Positionslichter für
 Photoaufnahmen, e = Relaischaltung, f = Signallampen, g = Motoren für den Propeller-
 antrieb, h = Kontakte zur Frequenzmessung, i = Ruderanlage

Der Standschub des Schiffes (in Pond) wird mittels des erwähnten elektrischen Widerstandes auf einen bestimmten Wert eingestellt und in einer Eichrinne unter stets gleichen Verhältnissen mit einer empfindlichen Federwaage gemessen.

Die durch das allmähliche, geringfügige Absinken der Akkumulatorenspannung während der Entladung bedingte Abnahme des Schubes wird mehrmals im Verlaufe einer Reihe von Meßfahrten in der Eichrinne kontrolliert. Nötigenfalls wird der Schub durch Verändern des Widerstandes auf seinen Sollwert gebracht.

Es schien hierbei nicht ratsam zu sein, sich auf das Messen der den Motoren zugeführten elektrischen Stromstärke zu beschränken, da damit nicht die in den Wellenlagern

und Stopfbuchsen auftretenden Veränderungen der Reibungsverluste, die sich durch Veränderungen der Zähigkeit des Lageröls oder anderes ergeben können, erfaßt werden.

Um nun den Schub des Modellschiffes so einstellen zu können, daß es im Ausgangszustand des Fahrwassers die äquivalente örtliche Geschwindigkeit entwickelt wie das Großschiff im Rhein, wurden in der Natur Meßfahrten ausgeführt. Dabei wurde die Schifffahrt gesperrt, um unerwünschte Beeinflussungen auszuschließen. Das Meßschiff, das Motorschiff „Dr. Meyer“ vom Johann-Welker-Typ, fuhr sodann mit konstanter Tourenzahl seiner Maschinen auf mehreren Kursen zu Berg. Mittels des unter Ziffer 3.4 beschriebenen Meßverfahrens konnten die jeweiligen Schiffspositionen in Abhängigkeit von der Fahrzeit eingemessen und im Lageplan kartiert werden. Das Bild 6 zeigt die Ergebnisse einer Naturmessung.

Nach wiederholten Meßfahrten mit dem Modellschiff, wobei dessen elektrischer Widerstand jeweils etwas verändert wurde, gelang es im Rheinmodell bei gleichem Pegelstand und gleicher Schiffsabladung annähernd naturähnliche Schiffsfahrten im Ausgangszustand zu erreichen. Die Zeit-Weg-Diagramme dieser Modellfahrten wurden durch intermittierende Photoaufnahmen mittels Kameras, die rd. 10 m über dem Modell befestigt sind und deren Objektive von elektrischen Zeitgebern geöffnet und geschlossen werden; gewonnen.

In der Eichrinne wurde sodann derjenige Standschub und diejenige Tourenzahl der Schiffsschrauben gemessen, die eine annähernd naturähnliche Fahrt des Modellschiffes ergaben. Die gleichen Werte werden bei allen späteren Meßfahrten beibehalten, wenn es sich darum handelt, die relativen Auswirkungen von geplanten Baumaßnahmen auf die Schifffahrt zu beurteilen.

Es wird somit keineswegs versucht, den in der Natur tatsächlich auftretenden Schub bzw. Schiffswiderstand oder die erforderliche Schiffsleistung zu bestimmen, sondern es werden nur die jeweiligen Zeit-Weg-Diagramme der Meßfahrt des Modellschiffes mit denjenigen des Ausgangszustandes verglichen. Zu diesem Zweck werden die Meßfahrten des Modellschiffes in ähnlicher Weise ausgewertet wie dies für die Naturfahrt in Bild 6 dargestellt ist.

Der Vergleich mit den Naturfahrten sollte zunächst sicherstellen, daß die Größenordnung der für das Modellschiff gewählten Fahrgeschwindigkeit in dem in der Natur üblichen Bereich liegt. Er ließ darüber hinaus aber auch erkennen, daß im Ausgangszustand die Fahrt von Groß- und Modellschiff an übereinstimmenden Stellen in gleicher Weise verzögert oder beschleunigt wird. Er lieferte damit eine Bestätigung dafür, daß das Modellschiff auf die von der Fahrwasserstraße ausgehenden Einflüsse im gleichen Sinne anspricht wie das Großschiff. Eine vollständige Übereinstimmung ist allerdings nicht zu erwarten. Der Grund dafür liegt nicht nur in den Ähnlichkeitsbeziehungen, sondern auch darin, daß die frei gesteuerten Fahrten weder in der Natur noch im Modell völlig gleich verlaufen.

Der Vergleich der bei verschiedenen Ausbauständen durchgeführten Modellfahrten untereinander läßt die Tendenz der als Folge baulicher Abänderungen auftretenden Geschwindigkeitsänderungen erkennen. Sie muß in Natur und Modell die gleiche sein, um eine Beurteilung der Güte der Strombaumaßnahmen zu ermöglichen. Dies ist, wie aus dem Vergleich mit den Nutzfahrten gefolgert werden kann, in einem für die Praxis ausreichenden Umfang der Fall.

Das beschriebene Modellschiff von Typ „Johann Welker“ hat sich bei über 100 Fahrten bewährt. Von entscheidendem Vorteil ist es dabei, daß bei Dutzenden von Testversuchen (z. B. Anordnung von Bühnen und Längswerken, Aufstau und Absenkung der Ober-

und Unterwasserstände an den Lochbänken durch künstliche Einbauten bzw. Vertiefungen und Entfernen einzelner Riffgruppen, Abänderungen im 2. Fahrwasser usw.) ohne zeitraubende Geschwindigkeits- und Gefällemessungen am Verhalten des Modellschiffes bei der Bergfahrt sofort die Auswirkungen dieser Baumaßnahmen zu erkennen waren. Dabei konnten auch wertvolle Aufschlüsse über die erforderliche Mindestwassertiefe durch das Beobachten des besonders bei der Fahrt durch enges Fahrwasser auftretenden Einsinkens des Schiffes gewonnen werden. Sofern man sich der Grenzen der Übertragbarkeit in die Natur bewußt bleibt, bilden die Untersuchungen mit dem Modellschiff somit ein wertvolles Hilfsmittel, ohne das zahlreiche für den Ausbau des Rheines bei Bingen wichtige Erkenntnisse nicht hätten gewonnen werden können.

Um die gegenseitige Beeinflussung bei der gleichzeitigen Durchfahrt von Schiffen durch das alte und das neue Fahrwasser beobachten zu können, wurde nach dem gleichen Prinzip auch das Modell einer Schubeinheit gebaut (vgl. Bild 15).

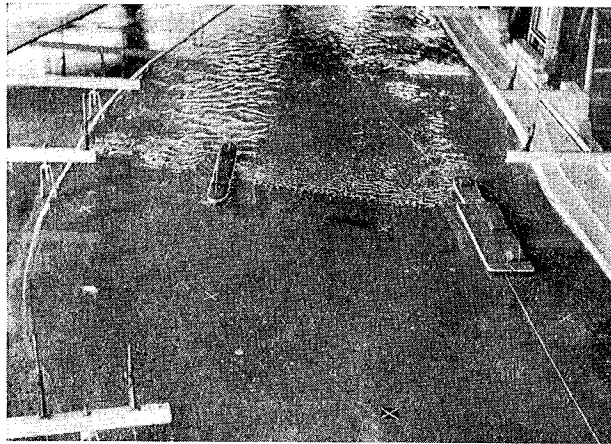


Bild 15

Gleichzeitige Bergfahrt einer Schubeinheit durch das Binger Loch und eines Modellschiffes vom Typ „Johann Welker“ durch eine neue Durchfahrtsöffnung in den Lochbänken

4.43 Der Ausführungsvorschlag

Die Modelluntersuchungen umfaßten insgesamt 34 Versuchsreihen. Zahlreiche der untersuchten baulichen Ausbildungen lösten unzutragliche Veränderungen der Wasserspiegellagen oder der Strömungsrichtungen und -geschwindigkeiten aus. Da hierüber bereits in einem Aufsatz [11] berichtet wurde, soll hier nur kurz auf den Ausführungsvorschlag eingegangen werden.

Sein wichtigstes Kennzeichen ist die Schaffung eines zusätzlichen, etwa durch die Mitte der Lochbänke führenden Schiffahrtsweges, des „Mittleren Fahrwassers“ und die Vertiefung der beiden vorhandenen Fahrwege. Das Mittlere Fahrwasser und das Binger Loch sollen künftig der Bergfahrt dienen, während das bestehende Zweite Fahrwasser den Talverkehr aufzunehmen hat. Durch den Einbau von zwei Buhnen am rechten Ufer unterhalb des Binger Loches und durch die Auffüllung von Ubertiefen zwischen den 7 vorhandenen Grundschwellen im unteren Drittel des Zweiten Fahrwassers und beim unteren Ende des Trenndammes konnte das Unterwasser an den Lochbänken angehoben werden. Die Vertiefung der vorhandenen Fahrwege sowie die Schaffung des Mittleren

Fahrwassers lösten eine Absenkung des Oberwassers aus, welche durch die Staukörper, die auf den verbleibenden Teilen der Riffe angeordnet sind, nur z. T. wiederaufgehoben wird. Die Wasserspiegelveränderungen ergaben eine Verminderung des an den Lochbänken konzentrierten Gefälles, die zu seiner besseren Überwindung bei der Bergfahrt wesentlich beiträgt.

Weitere Untersuchungen befaßten sich mit dem oberhalb anschließenden Rheinabschnitt bis Rüdesheim. Ihre Aufgabe war es, das Fahrwasser längs des Nahegrundes für einen dreischiffigen Verkehr zu verbreitern, wodurch gleichzeitig die hier entstandene Gefällevergrößerung wieder abgebaut wird, ferner die angestrebte Vergrößerung der Mindestfahrwassertiefe um 40 cm auf der gesamten Strecke herzustellen sowie die durch die Vergrößerung der Durchflußöffnungen an den Lochbänken entstandene Wasserspiegelabsenkung unschädlich zu machen. Die Mittel hierfür sind umfangreiche Sohlenvertiefungen oberhalb der Nahemündung sowie Einschnürungen des Abflußquerschnittes bei der Krausaue und unterhalb der Rüdesheimer Aue.

Die Ausführungen lassen somit erkennen, daß eine Vielzahl zusammenwirkender Maßnahmen nötig ist, um bei gleichzeitiger Vertiefung der vorhandenen Schiffahrtswege ein zusätzliches leistungsfähiges Fahrwasser zur Überwindung der für die Schifffahrt kritischsten Stelle des Rheines herzustellen. Sie lassen jedoch auch erkennen, daß zur Vermeidung von Fehlschlägen ein gründliches Studium der Auswirkungen dieser zahlreichen Teilmaßnahmen in einem Modell unerlässlich war. Der Einsatz frei fahrender Modellschiffe bildete hierbei einen wesentlichen Bestandteil der Untersuchungen.

II. UNTERSUCHUNGEN ZUR AUSBILDUNG EINES SCHIFFAHRTSWEGES IN DEN FELSIGEN HALTUNGEN VON LAUFKRAFTSTUFEN MIT HILFE DES FERNGESTEUERTEN MODELLSCHIFFES — DARGESTELLT AM BEISPIEL FÜR DEN AUSBAU DES HOCHRHEINS BEI RHEINFELDEN

Bei dem Entwurf zum Ausbau des Hochrheins als Schifffahrtstraße wurde es notwendig, in der felsigen unregelmäßigen Stromstrecke bei Rheinfelden die Strömungsverhältnisse am wasserbaulichen Modell und die Schifffahrtsbedingungen mit einem Modellschiff zu untersuchen.

Das Flußbett im Bereich und oberhalb der Rheinbrücke Rheinfelden ist durch seine tiefen verästelten Erosionsrinnen so ungleichförmig, daß hydraulische Berechnungen zur Klärung strömungs- und schifffahrtstechnischer Fragen nicht ausreichen. Es blieb nur der Weg des wasserbaulichen Modellversuches zur Feststellung der Strömungen und der Einsatz eines Modellschiffes, um die Maßnahmen zu erkennen, die für einen ungehinderten Schifffahrtsbetrieb notwendig und wirtschaftlich sind. Das wasserbauliche Modell und das Modellschiff mit seinen Abmessungen, seinem Gewicht und seinen Antriebskräften waren im Maßstab 1:60 naturgetreu nachgebildet und betrieben. Die Anströmung der dreifeldrigen Hauptbrücke ist durch den Verlauf der im Brückenquerschnitt geschlossenen Erosionsrinne und die als Staukörper wirkende Insel Burgkastell bestimmt. Die beiden Brückenöffnungen auf der linken Flußseite werden gleichmäßig durchströmt. Durch die mittlere, senkrecht zur Brückenachse angeströmte Öffnung gehen über 50 % des Gesamtabflusses. Die rechte Brückenöffnung liegt bereits außerhalb dieser konzentrierten Strömung. Der unvermittelte Übergang von dem breiten flachen Querschnitt in das schmale tiefe Erosionsprofil verzögert den Abfluß auf dem rechten Vorland. Der überwiegende Teil der kinetischen Energie wird in Druck umgesetzt und bildet eine nicht durchströmte Totwasserzone am rechten Ufer. Durch die Insel Burgkastell wird der gesamte Zufluß zur Stirnfront umgelenkt und durch die linke Öffnung der Hauptbrücke

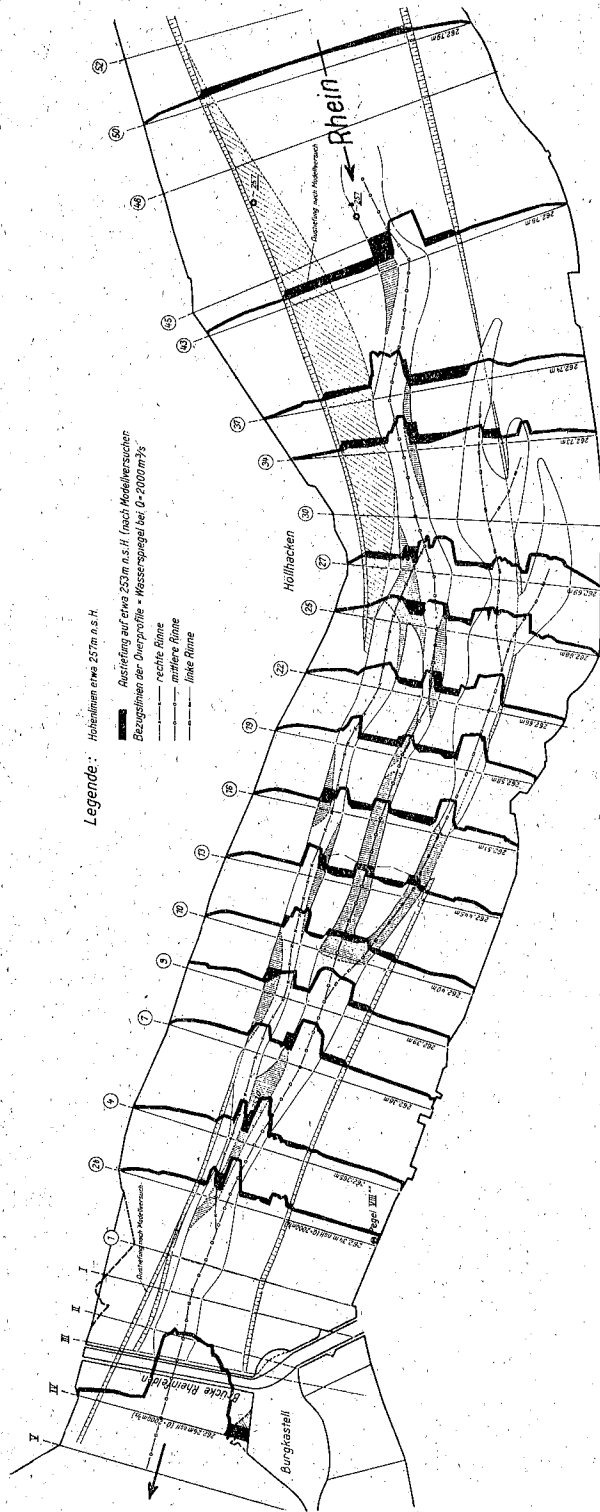


Bild 16
Lageplan Brücke Rheinfelden und Felsstrecke

abgeführt. Sie und die Brückenpfeiler werden schräg angeströmt, so daß sich unterhalb der Brückenpfeiler eine Wirbelstraße mit einer Rückströmungszone ausbildet (Bild 16).

Zu diesen strömungstechnischen Schwierigkeiten im Brückenquerschnitt kommen noch die Gegensätzlichkeiten der Sohlenformen unter- und oberhalb der Brücke. Unterhalb der Brücke geht der Erosionsquerschnitt nahezu unvermittelt in ein gleichmäßiges Flußbett über, dessen Sohlenmaterial aus bewegbarem Kies besteht. Oberhalb der Brücke entstehen in den verästelten, felsigen Erosionsrinnen einzelne, besonders ausgeprägte turbulente Strömungen mit großen Geschwindigkeiten. Die beschleunigte Bewegung dieser Flußstrecke wird unterhalb der Brücke verzögert. Aus diesen groben Gegensätzen der Sohlenformen und Strömungsgeschwindigkeiten ergeben sich die Schwierigkeiten für die Schifffahrt durch die Brücke und in der zerklüfteten Strecke oberhalb der Brücke. Berücksichtigt werden mußten die Eintiefung der Sohle des oberhalb der Brücke geplanten Kraftwerkes Neu-Rheinfelden und eine zweimalige Stauerhöhung des unterhalb der Brücke liegenden Kraftwerkes Augst-Wyhlen. Es ist allerdings vorgesehen, anstelle der vorhandenen dreifeldrigen Rheinbrücke Rheinfelden eine neue Brücke ohne Pfeilereinbauten zu errichten. Bei den Strömungsuntersuchungen war eine deutliche Konzentration der Stromlinien über den Erosionsrinnen und eine zweite, hervorgerufen durch die leichte Krümmung des Flußlaufes, am linken Ufer zu beobachten.

Für die Schifffahrt maßgebend sind die Strömungsgeschwindigkeiten bis etwa 2,0 m unter dem Wasserspiegel. Der auf Bild 17 dargestellte horizontale Isotachenplan gibt die Geschwindigkeiten in 2,0 m Tiefe wieder. Der unregelmäßige Verlauf der Erosionsrinnen spiegelt sich in der Form der Isotachen wider. Die Werte der Geschwindigkeiten bei $HSQ = 2420 \text{ m}^3/\text{s}$ variieren in der Felsstrecke örtlich sehr stark und erreichen Spitzen bis zu 4,2 m/s. Unterhalb der Brücke und oberhalb der Felsstrecke sind die Differenzen der Geschwindigkeiten kleiner und der Verlauf der Isotachen ist ausgeglichener. Schon dieser Isotachenplan läßt erkennen, daß eine gleichmäßige Geschwindigkeitsverteilung nur durch eine Korrektur der ganzen Felsstrecke erreichbar ist.

Da die beiden Pfeiler der heute bestehenden Hauptbrücke Rheinfelden wegfallen werden, bedarf es einer geringen strömungstechnischen Verbesserung an der Insel Burgkastell, um die Befahrbarkeit dieser Engstelle entscheidend zu verbessern. Dagegen werden in den Erosionsrinnen oberhalb der Brücke einschneidende Felsarbeiten notwendig. Eine Herabsetzung des HSQ von $2420 \text{ m}^3/\text{s}$ auf $1500 \text{ m}^3/\text{s}$ würde die Strömungsgeschwindigkeiten in 2,0 m Tiefe erheblich vermindern. Indessen scheidet diese Maßnahme aus, weil sie die Dauer der Schifffahrt erheblich verringern würde.

In den verschiedenen Varianten wurde versucht durch unterschiedlich hohe Auffüllung des Kolkes im Bereich der Brücke und Begradigung der Ufer den Abfluß zu verbessern. Die hydraulischen Ergebnisse der verschiedenen Varianten führten schließlich zur Variante 10, deren Einzelheiten in Abb. 16 wiedergegeben sind. Die drei vorhandenen Erosionsrinnen sind begradigt und auf die Höhe von 253,00 m n. s. H. vertieft. Die Geschwindigkeiten verkleinern sich durch diese Maßnahmen auf der ganzen Strecke beträchtlich. Die Verbesserung beträgt an den Stellen größter Geschwindigkeiten bis zu 20 % gegenüber den Geschwindigkeiten der Abb. 17. Die größte Geschwindigkeit beträgt nur noch 3,36 m/s und der Bereich der Geschwindigkeiten über 3,0 m/s ist auf eine schmale 10 bis 20 m breite Zunge über der mittleren Rinne zusammengeschrumpft. Die gesamte Aushubkubatur von $53\,000 \text{ m}^3$ Fels stellt bei der Reduktion der Geschwindigkeiten für $HQ = 2000 \text{ m}^3/\text{s}$ um 20 % ein Minimum dar. Wesentlich ist, daß die Unterschiede in den Geschwindigkeiten verkleinert sind.

Die Verbesserung durch diese Maßnahmen ist durch Modellschiffsversuche bestätigt worden. Die Bergfahrt ist im Bereich des „Höllhackens“ bei einer Abflußmenge von

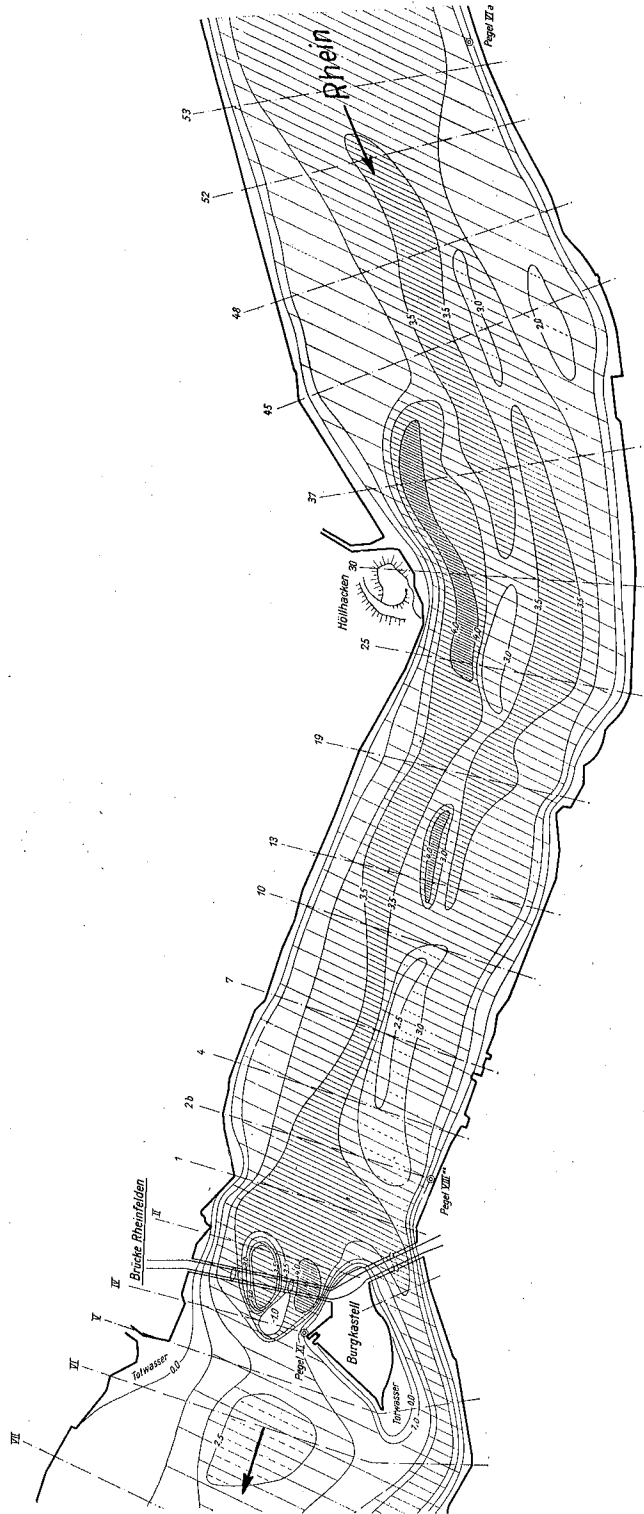


Bild 17
Rheinbrücke Rheinfelden und Felsstrecke. Geschwindigkeitsverteilung.

2000 m³/s und darüber trotz der Felsarbeiten nur mit Schiffen großer Leistung möglich, da die starke Querströmung, hervorgerufen durch die Linienführung der Austiefungsrinne, die Beschränkung der Aushubkubatur und die immer noch großen, wenn auch ausgeglichenen Geschwindigkeiten, einen erheblichen Widerstand bilden.

Über die Ausführung der Modellschiffsversuche wird von den Herren Sektionschef H. Wyss, Bern, und Schiffbau-Ingenieur F. Bösch, Basel, gesondert berichtet.

Schriftumsverzeichnis

- [1] Der Rhein, Ausbau, Verkehr, Verwaltung, Duisburg: Verlag Rhein 1951.
- [2] Jasmund, R.: Die Arbeiten der Rheinstrom-Bauverwaltung 1851—1900. Berlin: Mittler u. Sohn 1901.
- [3] Die Verkehrspolitik in der Bundesrepublik Deutschland 1949—1961. Schriftenreihe des Bundesministers für Verkehr. Band 22.
- [4] Pichl, K.: Die Regulierung des Binger Loches und die Verbesserung des Rheinschiffahrtsweges zwischen Mannheim und St. Goar. Hansa (1963) H. 21.
- [5] Pichl, K.: Der Ortungstachygraph. Die Wasserwirtschaft 49 (1959) H. 7, S. 170—183.
- [6] Pichl, K.: Wasserspiegel-Flächenaufnahmen am Rhein. Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen 3 (1959) H. 3, S. 45—50.
- [7] Pichl, K.: Photogrammetrische Schiffsbahnmessungen. Vermessungstechnische Rundschau (1963) H. 9.
- [8] Pichl, K.: Die hydraulischen Geschwindigkeitsformeln und die Ermittlung der Rauheitswerte im Flußbau. Die Wasserwirtschaft 46 (1955/56) H. 2, S. 41—45.
- [9] Gehrig, W.: Der Verbau von Übertiefen und die Erhaltung des Fahrwassers. Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau. H. 11 (1958) S. 20—34.
- [10] Felkel, K.: Strombau-Geschichte der Binger-Loch-Strecke des Rheins. Beiträge zur Rheinkunde. H. 12 (1961) S. 26—44.
- [11] Felkel, K.: Modelluntersuchungen für den Rhein bei Bingen. Die Wasserwirtschaft 53 (1963) H. 6, S. 206—213.