

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Article, Published Version

Felkel, Karl

Untersuchungen der Veränderungen der Höhenlage der Sohle des Oberrheins

Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/102998>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Felkel, Karl (1975): Untersuchungen der Veränderungen der Höhenlage der Sohle des Oberrheins. In: Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau 38. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau. S. 11-49.

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.



Dr.-Ing. K. Felkel

UNTERSUCHUNGEN DER VERÄNDERUNGEN

DER HÖHENLAGE DER SOHLE DES OBERRHEINS

Investigations of the Changes of the Altitude of the

Bed of the Upper Rhine River

Zusammenfassung

Unterhalb der kanalisiertem Strecke des Oberrheins tritt eine starke Erosion der Stromsohle auf. Im Auftrage des Bundesministers für Verkehr hat die Bundesanstalt für Wasserbau seit dem Jahre 1968 verschiedenartige Untersuchungen damit zusammenhängender Fragen durchgeführt mit dem Ziel, morphologische Gesetzmäßigkeiten zu klären und Empfehlungen für den weiteren Ausbau des Oberrheins zu erarbeiten.

Es wird ein Überblick über diese Untersuchungen und ihre relevantesten Ergebnisse vorgelegt mit Hinweisen auf die einzelnen Veröffentlichungen, in denen darüber ausführlicher berichtet wird.

Summary

Below the canalized section of the Upper Rhine River there occurs a strong erosion of the river bed. By order of the Federal Minister for Traffic the "Bundesanstalt für Wasserbau" made various investigations since the year 1968 with regard to connected questions. The aim was to clear up morphological laws and to work out recommendations for the further development of the Upper Rhine River.

A survey of these investigations and their most relevant results is submitted with references to the individual publications in which detailed reports on the subject are given.

I n h a l t

	<u>Seite</u>
0. Einleitung	15
1. Beschaffung von Unterlagen, Aufstellung eines Meßprogramms	19
2. Hydrologische Untersuchungen	19
3. Großräumige morphologische Untersuchung des Geschiebehaushalts und seiner Änderungen	20
4. Erforschung der morphologischen Gesetzmäßigkeiten	20
4.1 Die physikalischen Eigenschaften des Sohlenkorns der Rheinstrecke Straßburg-Bingen	20
4.2 Die Entwicklung von akustischen Detektoren zur Feststellung der Bewegung des Sohlenkorns	21
4.3 Registrierung des Beginns und des Endes der Geschiebebewegung sowie der Anzahl der Steinanschläge an das Meßgerät je Zeiteinheit	23
4.4 Druckänderung an der Stromsohle und Geschiebetrieb unter fahrenden Schiffen. Messungen im Rhein bei Maxau und im Modell	25
4.5 Druck und Strömung unter im Kanal fahrenden Schiffen. Messungen im Main-Donau-Kanal in Kriegenbrunn und im Modell	25
4.6 Auswirkungen des Schraubenstrahls eines stehenden Schiffes auf die natürliche Stromsohle. Versuche im Rhein bei Breisach und im Modell	27
4.7 Veränderungen der Stromsohle unter fahrenden Schiffen. Natur- und Modellversuche	29
4.8 Die Auswirkung der Leistungssteigerung der Schubboote auf die Stromsohle	31
4.9 Modellversuche über die Wirkung von Buhnen	32
5. Gutachten über die Veränderungen der Rheinsohle nach Bau von zwei Staustufen zwischen Kehl/Straßburg und Neuburgweier/Lauterburg	35
5.1 Die Entwicklung eines Rechenautomatenprogramms zur Berechnung der Veränderungen der Sohle und der Wasserspiegel	35
5.2 Das mathematische Modell des Oberrheins	35
5.3 Die unterhalb der Staustufe Straßburg eingetretenen Sohlen- und Wasserspiegeländerungen	37
5.4 Die Verbesserung des Peilverfahrens und der Darstellung und Auswertung der Meßergebnisse	38
5.5 Die Modelluntersuchungen für die Staustufe Iffezheim	41

	<u>Seite</u>
6. Empfehlungen für den weiteren Ausbau einschließlich Prognose der sich aus den empfohlenen Ausbaumaßnahmen ergebenden voraussichtlichen weiteren Entwicklung der Rheinsohle	41
6.1 Die Untersuchung der Sohlenpanzerung	41
6.1.1 Das Untersuchungsprogramm	41
6.1.2 Die Mitarbeit in der deutsch-französischen Arbeitsgruppe für das Studium der Rheinerosion und der Sohlenpanzerung unterhalb Iffezheim	43
6.1.3 Versuche in der Natur	43
6.1.4 Modelluntersuchungen	44
6.1.5 Gutachten der BAW	44
6.2 Die Erosionsverhütung durch Geschiebezugabe	45
6.2.1 Die Ideenstudie	45
6.2.2 Das Arbeitsprogramm für einen Probetrieb	46
6.3 Voruntersuchungen mit Grundswellen	47
7. Schrifttum	47

O. Einleitung

Im Jahre 1966 forderte der Bundesminister für Verkehr (BMV) die Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) und die Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) auf, je einen Vorschlag für ein Arbeitsprogramm für Untersuchungen der Veränderungen der Höhenlage der Rheinsohle vorzulegen.

Die BAW legte daraufhin den vom Verfasser bearbeiteten Schriftsatz "Das Stromregime des Rheins. Programm für Untersuchungen der Veränderungen der Rheinsohle. Karlsruhe, 28.7.1966" vor. Darin wurde folgendes Forschungsprogramm vorgeschlagen:

1. Beobachtungen, Ursachen und Gesetzmäßigkeiten der bisherigen Veränderungen des Rheins
2. Der gegenwärtige Zustand
 - 2.1 Die geometrische Gestalt und Höhenlage der Stromsohle sowie der Ufer, Strombauwerke, Bühnenfelder, Altarme, Vorländer und Häfen
 - 2.11 Bestandsaufnahme der vorhandenen Unterlagen und Festlegung der erforderlichen Ergänzungen
 - 2.12 Ausführung ergänzender Vermessungsarbeiten in der Natur
 - 2.13 Überlegungen über die Möglichkeiten, die Auftragung und Auswertung von Peilungen mit Hilfe programmgesteuerter elektronischer Geräte zu rationalisieren
 - 2.14 Kartierung bzw. zeichnerische Auftragung der Meßergebnisse
 - 2.15 Ergänzende Luftbildaufnahmen
 - 2.2 Der Abflußvorgang

Wasserspiegellagen, Abflußmengen, Verlauf und Größe der Oberflächenströmungen, Isotachenverlauf, Verteilung des Abflusses in Stromverzweigungen und in Krümmungen. Zeitlicher Ablauf des Hochwasserabflusses und seine Verteilung auf das Mittelwasserbett, die Bühnenfelder und die Vorländer, der Verlauf von Sekundärströmungen

 - 2.21 Wertung der vorhandenen Unterlagen und Festlegung eines im Interesse der Erforschung der Gesetzmäßigkeiten des morphologischen Veränderungen etwa erforderlichen ergänzenden Programms für hydro-metrische Messungen
 - 2.22 Überlegungen über Möglichkeiten der Anwendung neuer oder der Rationalisierung üblicher Meßmethoden im Hinblick auf spezielle Meßaufgaben, Überprüfung neuer Methoden in Versuchsrinnen
 - 2.23 Ausführung der hydrometrischen Messungen in der Natur
 - 2.24 Auswertung bzw. zeichnerische Darstellung der Meßergebnisse
 - 2.3 Kornverteilung und petrographische Zusammensetzung des Geschiebes
 - 2.31 Festlegung eines Programms für die Entnahme von Bodenproben der Stromsohle im gesamten Rhein sowie in den Mündungsstrecken grösserer Zuflüsse.

Überlegungen über die zweckmäßigste Anordnung der Entnahmestellen, über die Art der Analysierung der entnommenen Proben im Hin-

blick auf Kornverteilung, Dichte, Schichtung und Herkunft (Petrographie) und über die Methoden der Darstellung der Untersuchungsergebnisse

2.32 Auswahl oder Neukonstruktion geeigneter Geräte für die praktische Entnahme der Sohlenproben. Bei Entnahme mittels üblicher Greifer geht das Feinkorn teilweise verloren. Im Hinblick auf die Bedeutung der Abpanzerung der obersten Schicht für den Geschiebetransport ist die Entnahme von in der Schichtenfolge ungestörten Bodenproben erwünscht.
Erprobung der in die nähere Wahl gezogenen Geräte im Laboratorium (Glasrinne) und in der Natur

2.33 Durchführung der Probeentnahmen vom Schiff aus

2.34 Durchführung der Analysen der Proben:
Photoaufnahmen und Siebanalysen für sämtliche Proben, Registrierung der Schichtfolge, der Lagerungs- und Korndichte und der petrographischen Sortierung für ausgewählte, repräsentative Proben

2.35 Kartierung und graphische Darstellung der Untersuchungsergebnisse in Form von Kornverteilungskurven, Geschiebemischungsbändern, Bändern der prozentuellen petrographischen Zusammensetzung, des Schichtenaufbaues, der Panzerung, der Kornverteilung im Stromquerschnitt, in Krümmungen, Bühnenfeldern, Stromverzweigungen, Hafeneinfahrten u.a.

2.36 Evt. Auswahl und Aufbewahrung repräsentativer Bodenproben

2.4 Der Feststofftransport

2.41 Studium der Methoden und Geräte, die bisher im In- und Auslande zum Messen des Beginns des Geschiebetriebs und der vom Wasser als Geschiebe und in suspendierter Form transportierten Feststoffmassen angewendet wurden

2.42 Auswahl bestehender oder Konstruktion neuartiger Geräte zum Messen des Beginns des Geschiebetriebs und der Intensität der Feststoffbewegung. Erprobung dieser Geräte in der Glasrinne und in der Natur

2.43 Ausarbeitung eines Programms für die Messung des Feststofftransports.

Auswahl der Meßstellen.

Die Messung der in suspensierter Form transportierten Feststoffe sollte zwecks Feststellung der Verteilung an verschiedenen Stellen eines Querschnitts geschehen.

Die Suspensionen sollten zusätzlich auch im Rahmen der bestehenden, routinemäßigen Überwachung der Wassergüte vorgenommen werden.

2.44 Durchführung der Messungen

2.45 Auswertung und Darstellung der Meßergebnisse

3. Erforschung der morphologischen Gesetzmäßigkeiten

3.1 Hydraulische und morphologische Auswirkungen der Strombauwerke

Durch systematische Versuchsreihen an einem schematischen Modell mit fester und beweglicher Sohle sowie durch Durchführung bzw. Auswertung einschlägiger Messungen in der Natur sollten als Grundlage für die elektronische Regimeberechnung (Ziff.4), aber auch als Hilfsmittel für die Entwurfsbearbeitung, folgende Fragen geklärt werden:

- 3.11 Auswirkungen von Bühnen bzw. Längswerken auf die Wasserstände bzw. den Geschiebetrieb bei Variierung der einzelnen Parameter
- 3.12 Strömungsverlauf und Feststofftransport im unmittelbaren Bereich der Strombauwerke und in den Bühnenfeldern bei Variierung einzelner Parameter
- 3.13 Erfassung der Auswirkungen der Strombauwerke bei elektronischen Berechnungen
- 3.2 Morphologische Auswirkungen der Schifffahrt
- 3.3 Morphologische Auswirkungen der Wasserbeschaffenheit (Verschmutzung)
- 3.4 Überprüfung der bestehenden Formeln für den Geschiebetrieb auf ihre Anwendbarkeit für die einzelnen Rheinabschnitte. Erforderlichenfalls Ermittlung zutreffender mathematischer Beziehungen bzw. Beiwerte für die einzelnen Rheinabschnitte mit Hilfe von Rinnenversuchen mit Rheingeschiebe in natürlichem Maßstab
- 3.5 Experimentelle und theoretische Bearbeitung von sonstigen Fragen, die für die Beurteilung des Stromregimes von Bedeutung sind
 - 3.51 Die Abpflasterung der Sohle beim Transport von Geschiebegemischen
 - 3.52 Sonstige Fragen, die sich z.T. noch während der Bearbeitung ergeben werden
4. Elektronische Berechnung des Feststoffhaushalts des Rheins
 - 4.1 Ausarbeitung einer Programmierung für die fortlaufende iterierende Berechnung der Wasserspiegellagen und Schleppspannungen, des Geschiebetransportvermögens, des Geschiebeangebotes, -abriebs, -defizits bzw. der -übersättigung, der Feststoffaufnahme (Erosion) bzw. -ablagerung (Anlandung).

Mit anderen Worten: Herstellen eines mathematischen Modells der fortlaufenden Strommorphologie. Hierzu gehört auch die rechnerische Erfassung der durch Baumaßnahmen bewirkten Veränderung der Hochwasserganglinien längs der untersuchten Stromstrecke.
 - 4.2 Testen der Programmierung nach Ziffer 4.1 für die bisherige morphologische Entwicklung
5. Prognose der künftigen morphologischen Entwicklung und Empfehlungen für den weiteren Ausbau der Wasserstraße
 - 5.1 Durchführen der elektronischen Berechnung mit dem Programm gemäß Ziffer 4.1 zwecks Gewinnung einer Prognose der künftigen hydrologischen und morphologischen Entwicklung für den Fall, daß kein weiterer Stromausbau vorgenommen wird
 - 5.2 Wie Ziffer 5.1, jedoch für den Fall, daß die von der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung projektierten Bauvorhaben (Kanalisation, Fahrwasservertiefung) in der vorliegenden Entwurfsform ausgeführt werden (Ausgangsentwurf)
 - 5.3 Wie Ziffer 5.2, jedoch mit Entwurfsvarianten, welche bezwecken sollen, etwa zu erwartende schädliche Folgen zu verhüten bzw. ihnen entgegenzuwirken
 - 5.4 Ausarbeitung von Empfehlungen für das vorliegende und für weitere Projekte zum Ausbau des Rheins

6. Programm für künftige fortlaufende Messungen und deren Auswertung.

6.1 Zusammenfassung der Erfahrungen, die sich bei der Bearbeitung ergaben im Hinblick auf die benötigten Meßwerte, die angewendeten Verfahren und Geräte und die Auswertung der Ergebnisse.

6.2 Vorschläge für ein Programm zur fortlaufenden Messung von Daten der Flußmorphologie unter Berücksichtigung der gewonnenen Erfahrungen und der weiteren praktischen Bedürfnisse.

7. Redaktionelle Überarbeitung der Forschungsergebnisse für die Veröffentlichung.

In einem Erlaß vom 23.2.1967 faßte der BMV die Vorschläge der beiden Bundesanstalten zusammen und ergänzte sie zu dem nachstehenden, im folgenden "6-Punkte-Programm" genannten Arbeitsprogramm, wobei jeder Bundesanstalt die Federführung für je 3 Programmpunkte zugewiesen wurde. Die Untersuchungen sollten sich auf den Stromabschnitt bis Mannheim erstrecken.

1. Beschaffung aller Unterlagen über die bisherigen Veränderungen des Abflußregimes und der Höhenlage der Rheinsohle. Erfassung des gegenwärtigen Zustandes durch Beobachtungen und Messungen; Aufstellung eines entsprechenden Meßprogrammes.
(Federführende Bearbeitung: BfG)
2. Hydrologische Untersuchungen insbesondere über die bisherigen Veränderungen der Wasserführung, die gegenwärtige Wasserführung, die bettbildende Wasserführung und die Hochwasser, mit Ausblick auf die künftige Entwicklung.
(Federführende Bearbeitung: BfG)
3. Großräumige morphologische Untersuchung des Geschiebehaushalts und seiner Änderungen sowie des heutigen Zustandes der Sohle mit Ausblick auf die künftige Entwicklung, ausgehend von den bestehenden Verhältnissen.
(Federführende Bearbeitung: BfG)
4. Erforschung der morphologischen Gesetzmäßigkeiten.
(Federführende Bearbeitung: BAW)
5. Gutachten über die Veränderungen der Rheinsohle nach Bau von 2 Staustufen zwischen Kehl/Straßburg und Neuburgweier/Lauterburg.
(Federführende Bearbeitung: BAW)
6. Empfehlungen für den weiteren Ausbau einschließlich Prognose der sich aus den empfohlenen Ausbaumaßnahmen ergebenden voraussichtlichen weiteren Entwicklung der Rheinsohle.
(Federführende Bearbeitung: BAW).

Es wurde eine Koordinierungsgruppe unter Vorsitz eines Vertreters des BMV ins Leben gerufen, der neben Vertretern der beiden Bundesanstalten Vertreter der Wasser- und Schifffahrtsdirektionen (WSD'en) Freiburg, Mainz und (ab Juni 1968) Duisburg angehörten sowie der Länder Baden-Württemberg, Rheinland-Pfalz und (ab Sept. 1968) Hessen. Die Koordinierungsgruppe hielt zwischen dem 20.4.1967 und dem 7.11.1974 16 Besprechungen ab, wobei u.a. die Vertreter der Bundesanstalten über den Fortschritt der Arbeiten berichteten. Als Vertreter der BAW nahm der Verfasser an allen Sitzungen der Koordinierungsgruppe teil.

Aufgabe des nachstehenden Berichtes ist es nicht, Einzelheiten der Untersuchungen und ihrer Ergebnisse darzustellen. Vielmehr soll hier ein Überblick über die Untersuchungen sowie über die relevantesten Ergebnisse gegeben werden mit Hinweisen, an welcher Stelle darüber berichtet wurde. Dem letzteren Ziel dient das am Schluß des Textes angeordnete Schrifttumsverzeichnis.

Der Textteil folgt in seiner Gliederung dem 6-Punkte-Programm vom 20.2.1967. Zu den Punkten 1 bis 3, die der Bundesanstalt für Gewässerkunde zur federführenden Bearbeitung zugewiesen wurden, beschränken sich die Ausführungen auf die Nennung wesentlicher selbständiger Beiträge der BAW.

1. Beschaffung von Unterlagen, Aufstellung eines Meßprogramms

Das in der vorstehenden Einleitung behandelte Programm der BAW vom 28.7.1966 sah vielseitige Naturmessungen vor.

Nachdem im 6-Punkte-Programm vom 20.2.1967 die federführende Bearbeitung der Punkte 1 bis 3 der BfG zugewiesen worden war, legte die BAW eine Liste derjenigen Unterlagen vor, die sie für erforderlich hielt zur federführenden Bearbeitung der Programmpunkte 4 bis 6. Die Unterlagen sind unterteilt in solche,

- die Geometrie des Abflußraumes betreffend,
- den Abfluß betreffend,
- die physikalischen Eigenschaften des Geschiebes betreffend und
- solche über die Geschiebe- und die Schwebstoffbewegung.

Die Meßergebnisse sollten sich als Eingabedaten für programmgesteuerte Rechner eignen. In ihrer Stellungnahme wies die BfG darauf hin, daß die "Unterlagen, die die BfG beschaffen wird, für die großräumige Untersuchung der Morphologie des Rheins ausreichen. Die BAW wird im Gegensatz dazu für ihre Untersuchungen im Bereich der geplanten beiden Staustufen in beachtlichem Umfang noch zusätzliche Unterlagen benötigen. Die Beschaffung dieser zusätzlichen Unterlagen führt zweckmäßig die BAW selbst durch."

Inwieweit es der BAW gelungen ist, die tatsächlich in beachtlichem Umfang benötigten Unterlagen für ihre Untersuchungen zu beschaffen, darauf wird im Zusammenhang mit der Behandlung einzelner Untersuchungen eingegangen.

2. Hydrologische Untersuchungen

In der 4. Besprechung der Koordinierungsgruppe am 14.3.1968 erklärte die BfG, daß sie einen Überblick über die Hochwasserveränderungen geben werde, ohne Rechenautomaten zu benutzen. Später ging sie zu deren Anwendung über.

Bis zu diesem Zeitpunkt hatte die BAW auf dem Gebiete der programmgesteuerten Berechnung stationärer Wasserspiegel grundlegende Vorarbeiten geleistet und zwei diesbezügliche Computerprogramme entwickelt, bei praktischen Aufgaben mit Erfolg eingesetzt und publiziert [4] , [5] .

3. Großräumige morphologische Untersuchung des Geschiebehaushalts und seiner Änderungen

Neben Studien zur Frage der Erosion des Oberrheins zwischen Basel und Karlsruhe [9] und zur Wechselbeziehung zwischen der Morphogenese und dem Ausbau des Oberrheins [14] hat die BAW mehrere Berichte über Ergebnisse der Erforschung morphologischer Gesetzmäßigkeiten vorgelegt, die auch für die großräumige Untersuchung des Geschiebehaushalts von Bedeutung sind. Auf sie wird im anschließenden Abschnitt 4 eingegangen.

4. Erforschung morphologischer Gesetzmäßigkeiten

Die Beschäftigung mit dem Problem der Veränderungen der Höhenlage der Rheinsohle erforderte unter anderem Kenntnisse über die Beschaffenheit und über das Verhalten der Rheinsohle in Abhängigkeit vom Abfluß und von der Schifffahrt. Da entsprechende Unterlagen nicht vorhanden waren, wurden von der BAW die nachstehenden Untersuchungen durchgeführt:

4.1 Die physikalischen Eigenschaften des Sohlenkorns der Rheinstrecke Straßburg-Bingen

Zur Gewinnung von Proben des Materials der Rheinsohle wurden in den Jahren 1967 bis 1969 zwischen Straßburg und Bingen 84 Aufschlußbohrungen ausgeführt, jeweils in Gruppen von 4 Bohrungen, wobei die einzelnen Bohrlochgruppen 10 bis 12 km voneinander entfernt angeordnet wurden. Jede Bohrung erstreckte sich ab der jeweiligen Flußsohle bis zu einer Tiefe von 2,0 m. Aus den Bohrröhren mit 50 cm Durchmesser wurden mittels eines Einzel-Schaubengreifers Bodenproben der Flußsohle getrennt nach den fünf Schichten 0 bis 20 cm, 20 bis 50, 50 bis 100, 100 bis 150 und 150 bis 200 cm entnommen. Für sämtliche Proben wurden in der BAW in Karlsruhe Siebanalysen durchgeführt.

Einen Überblick über die im gesamten untersuchten Abschnitt auftretende Kornverteilung geben die Geschiebemischungsbänder der Bilder 1 und 2. Bild 1 zeigt die Verhältnisse für die oberste, 20 cm dicke Deckschicht, Bild 2 die Mittelwerte der in der Tiefe zwischen 20 und 200 cm entnommenen Proben. Aufgetragen sind jeweils die Mittelwerte aus den vier Bohrungen einer Bohrlochgruppe.

Das spezifische Gewicht des Rheingeschiebes im untersuchten Abschnitt schwankt in engen Grenzen zwischen $2,675 \text{ t/m}^3$ und $2,643 \text{ t/m}^3$ und beträgt im Mittel $2,662 \text{ t/m}^3$.

Über die Untersuchungen wurde ein ausführlicher Bericht vorgelegt, der u.a. sämtliche 494 Sieb- bzw. Schlämmkurven enthält. In gekürzter Form ist er publiziert [13].

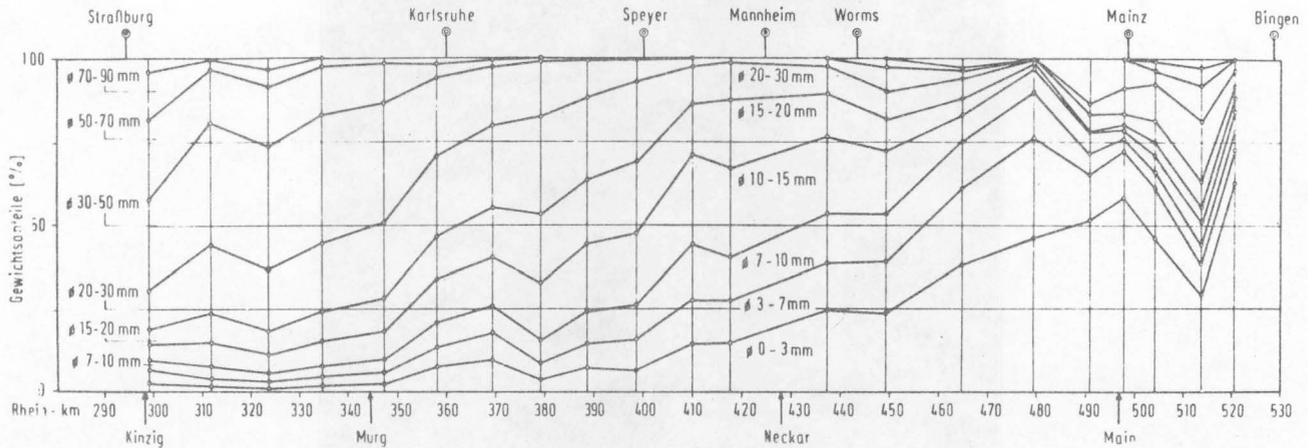


Bild 1 Geschiebemisungsband der Rheinstrecke Straßburg-Bingen für die oberste, 20 cm dicke Sohlenschicht

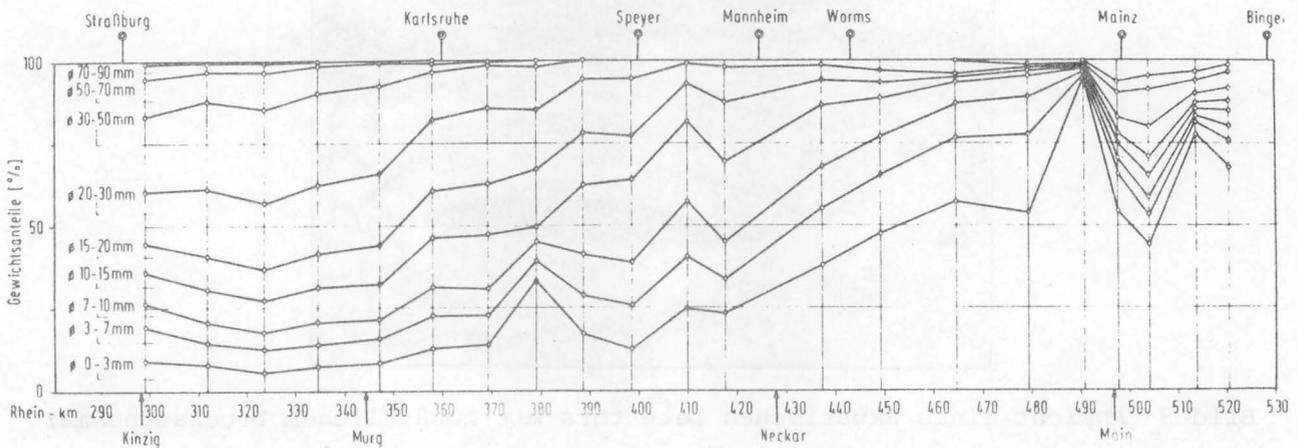


Bild 2 Wie Bild 1, jedoch für Schichten 0,20 m bis 2,00 m Tiefe

4.2 Die Entwicklung von akustischen Detektoren zur Feststellung der Bewegung des Sohlenkorns

Um den Beginn und das Ende der Geschiebebewegung im Rhein beobachten zu können, erhielt die BAW in den Jahren 1968 und 1969 den Auftrag, von ihr vorgeschlagene akustische Meßgeräte zu bauen. Das Gerät (Bild 3), das bei [11] eingehend beschrieben ist, besteht aus einem Gehäuse aus Grauguß, das zwei Mikrophone mit den dazugehörigen Verstärkern aufnimmt. Das Gehäuse wird an der Stromsohle mittels Schellen an vorher in den Untergrund gepreßte 1,5 m lange Stahlrohrpfähle aufgesetzt.

Diese Verlegearbeiten gehen im Caisson eines Taucherschachtes vor sich. Das 50 cm hohe Gehäuse des Meßgerätes ragt etwa zur Hälfte über die Stromsohle empor. Das sich an der Stromsohle bewegende Geschiebe stößt dagegen und löst akustische Signale aus, deren Weiterverarbeitung im nächsten Abschnitt 4.3 behandelt wird.

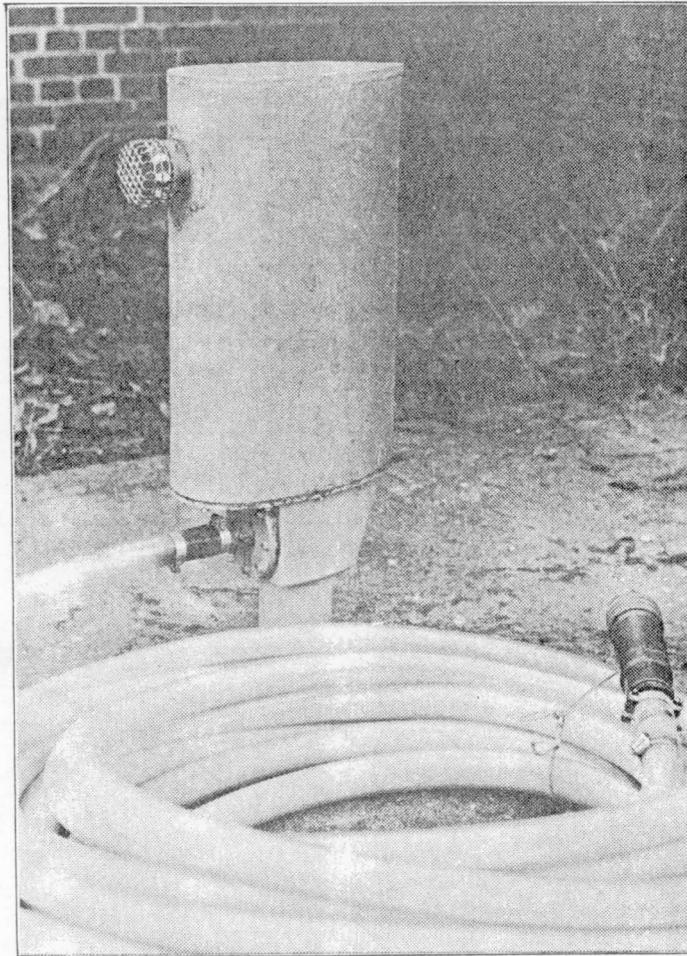


Bild 3 Ansicht eines akustischen Detektors mit zusätzlichem Druckaufnehmer

Das Meßsystem erfüllt folgende Anforderungen:

- a) Automatische, sich auf Tag und Nacht erstreckende Registrierung über Zeitabschnitte von mehreren Monaten, um Beginn und Ende der Geschiebebewegung wiederholt zu erfassen.
- b) Laufende gleichzeitige Registrierung der an mehreren über den Meßquerschnitt verteilten Punkten auftretenden Geschiebebewegung, um Aussagen über deren relative Verteilung innerhalb des Stromquerschnittes zu gewinnen.
- c) Messungen bei lebhafter Schifffahrt ohne gegenseitige Behinderung oder Gefährdung.
- d) Betriebssicherheit der Anlage auch unter der Einwirkung von anhaltendem starkem Geschiebetrieb bei Verzicht auf ständiges Bedienungspersonal.
- e) Erfassung des Einflusses der Schifffahrt auf die bewegliche Stromsohle.

Speziell für die letztgenannte Meßaufgabe wurde in eines der genannten Gehäuse zusätzlich ein Druckaufnehmer eingebaut (Bild 3). Er steht mit seiner Membranfläche senkrecht zur Strömungsrichtung.

4.3 Registrierung des Beginns und des Endes der Geschiebebewegung im Oberrhein sowie der Anzahl der Steinanschläge an das Meßgerät je Zeiteinheit

Bei Söllingen (Rhein-km 327,315) und Leimersheim (Rhein-km 370,000) hat die BAW an der Rheinsohle Meßstellen eingerichtet. Sie bestehen aus je 5 der vorstehend beschriebenen akustischen Aufnehmer, die durch ein Unterwasserkabel mit den an Land untergebrachten Registriereinrichtungen verbunden sind. Hier werden die Signale automatisch in Abständen von einigen Stunden jeweils für die Zeit von 5 Minuten auf Magnetband gespeichert. Die Meßfolge ist veränderbar.

Durch elektronische Zählung für drei verschiedene Intensitätsstufen werden anschließend die durch die Anschläge der einzelnen Steine des bewegten Geschiebes an das Aufnehmergehäuse bewirkten Impulse gezählt. Auf diese Weise kann zwar nicht die Geschiebefracht bestimmt werden, aber man erhält objektiv vergleichbare Zahlenwerte für die an jedem Aufnehmer auftretende Anzahl der Steinschläge je Zeiteinheit. Damit sollen u.a. Hinweise darauf gewonnen werden, in welchem Ausmaß der Staustufenbau und etwaige erosionsverhütende Maßnahmen Veränderungen der Geschiebeführung bewirken. Die Definition und Kenntnis des Beginns und des Endes der Geschiebebewegung ist ferner für Erosionsberechnungen von Bedeutung.

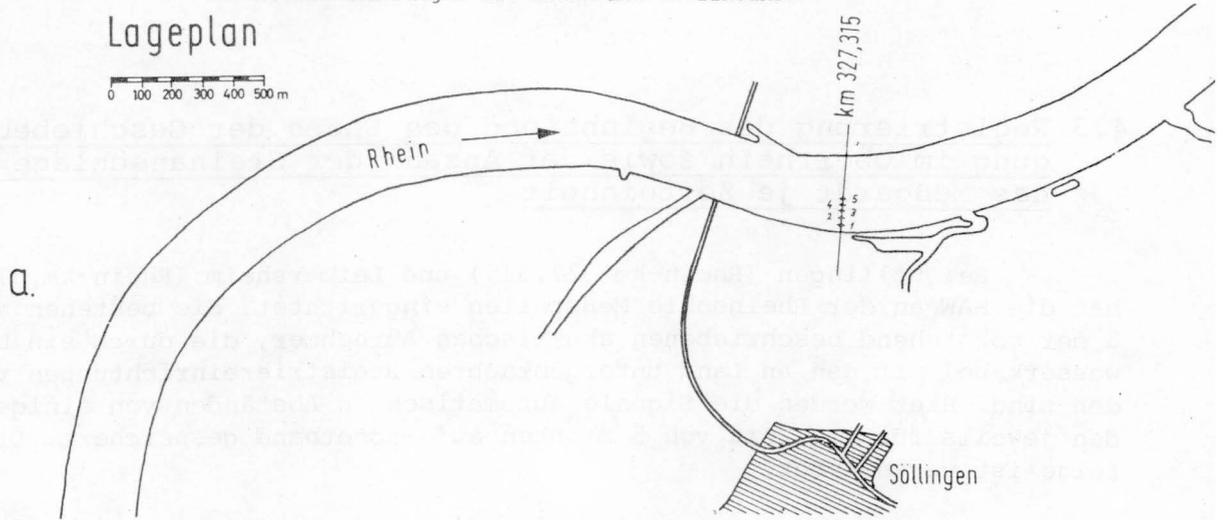
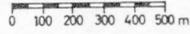
Das Bild 4 enthält ein Beispiel eines Meßergebnisses für die in einer Linkskrümmung des Rheins angeordnete Meßstelle Söllingen (Bildteile a u. b). Bildteil c zeigt neben der Pegelganglinie für 9 Tage die Ganglinien, die sich ergeben, wenn für die unterste Impulsenergiestufe für jedes Gerät und für jede der 3 Messungen täglich die Anzahl der Anschläge aufgetragen wird. Man erkennt die starke Streuung, die den Wert von Einzelmessungen, wie sie z.B. mit einem Geschiebefangkorb nur möglich sind, vermindert. Es zeigt sich, daß das im Kolk an der Krümmungsaußenseite an der tiefsten Stelle des Querschnittes untergebrachte Gerät die weitaus wenigsten Anschläge aufweist.

Im Bildteil d sind für jedes der 5 Geräte die über die 3 Messungen eines jeden Tages gemittelten Impulse je Minute aufgetragen. Der unterste Bildteil e schließlich enthält die über alle 5 Geräte gemittelte Anzahl der Impulse je Messung sowie die daraus gebildeten Tagesmittel. Hierbei zeigt sich nun eine mehr oder weniger deutliche Abhängigkeit vom Abfluß, aber auch die Tatsache, daß in diesem Meßquerschnitt Beginn und Ende der Geschiebebewegung nicht eindeutig bestimmbar waren.

Die Messungen werden fortgesetzt und die BAW bemüht sich um weitere Verbesserungen des Verfahrens.



Lageplan



Stand 9. 8. 1972

Rheinquerschnitt km 327,315

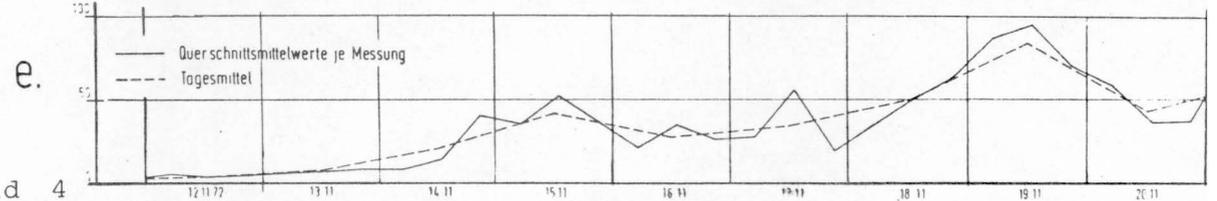
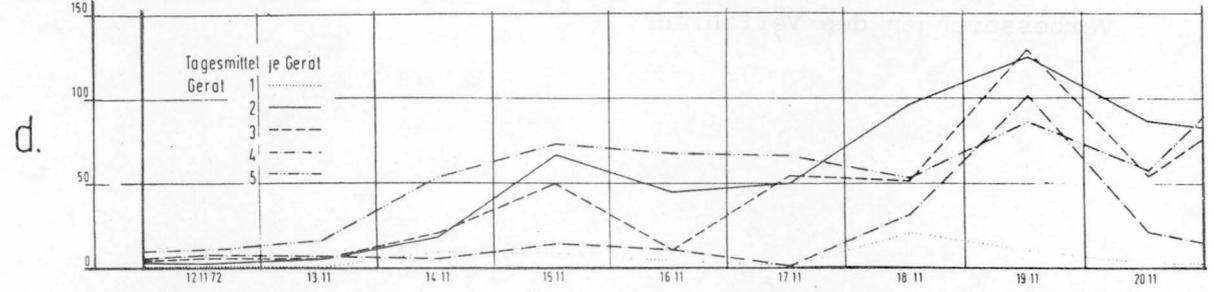
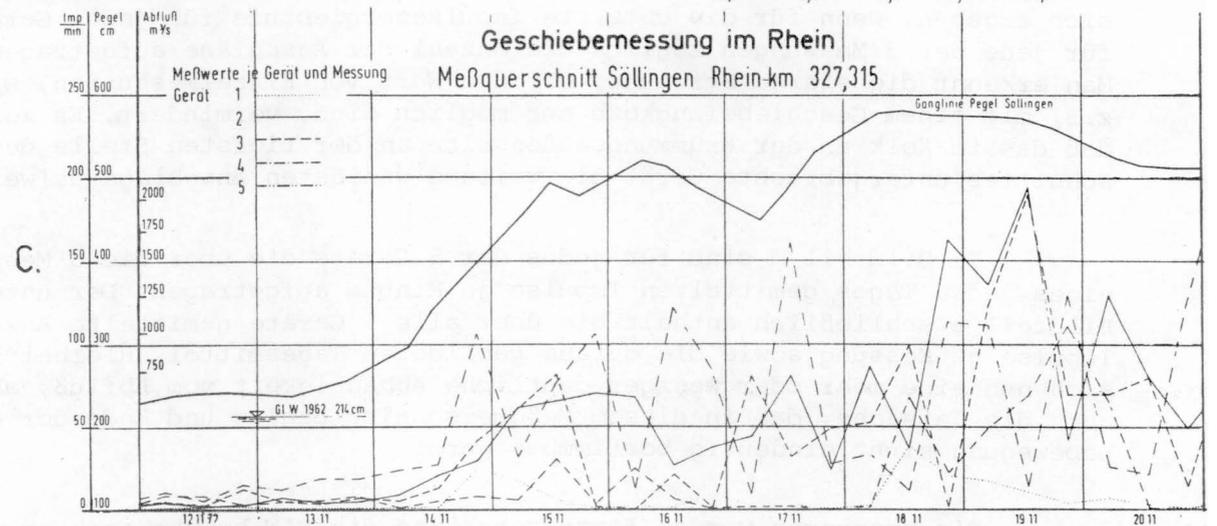
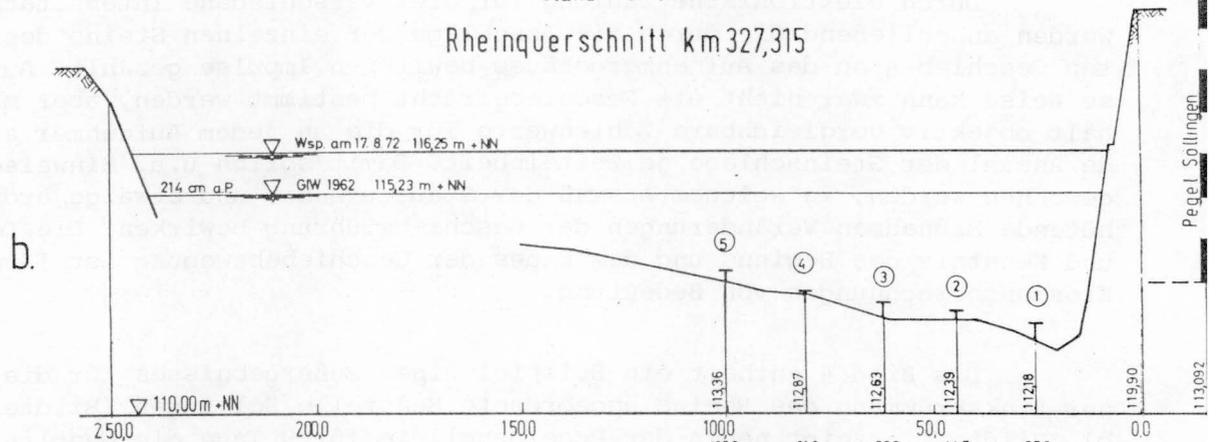


Bild 4

4.4 Druckänderungen an der Stromsohle und Geschiebetrieb unter fahrenden Schiffen. Messungen im Rhein bei Karlsruhe-Maxau und im Modell

Die BAW untersuchte die Frage, ob, in welcher Weise und in welchem Umfang die Schifffahrt Sohlenmaterial in Bewegung setzt. Dabei registrierte sie u. a. im Rhein bei Karlsruhe kontinuierlich die an der Stromsohle unter dem Schiff während der Überfahrt auftretenden Veränderungen des Druckes sowie die akustischen Signale, die dabei durch das Anschlagen von in Bewegung gesetzten Steinen an das Gehäuse des in Abschnitt 4.2 genannten Meßgerätes ausgelöst wurden. Durch die Nachbildung der in der Natur (Bild 5, obere Hälfte) beobachteten Vorgänge in einem 16-fach verkleinerten Modell (untere Bildhälfte) war es möglich, die entsprechende Analogie zu überprüfen. In beiden Bildhälften ist jeweils oben die Aufzeichnung der akustischen Signale, in der Mitte der Druckverlauf und darunter eine Spur mit einer Bug- und einer Heckmarke enthalten. Die Zeitabszisse verläuft dabei von links nach rechts. Die beiden Meßwerte stimmen in Natur und Modell in ihrem grundsätzlichen Verlauf überein, die Druckschwankungen in guter Näherung auch hinsichtlich ihrer absoluten Größen.

Durch die Messungen konnte nachgewiesen werden, daß und in welcher Weise die Schifffahrt bei Niedrigwasser Geschiebe in Bewegung setzt. Der Geschiebetrieb wird nicht erst durch den Schraubenstrahl ausgelöst, sondern er setzt bei der Bergfahrt bereits unmittelbar hinter dem Bug ein. Bei Talfahrten konnte umgekehrt beobachtet werden, daß ein vorher vorhandener Geschiebetrieb unter dem Schiff vorübergehend zur Ruhe kam [11] und [16].

4.5 Druck und Strömung unter im Kanal fahrenden Schiffen. Messungen im Main-Donau-Kanal in Kriegenbrunn und im Modell

Mittels hydrometrischer Flügel und Druckmeßdosen, die vorher im Trockenen an der Sohle des Main-Donau-Kanals befestigt wurden, registrierte die BAW den Verlauf der Strömungsgeschwindigkeiten und der Drücke unter einem fahrenden Motorgüterschiff des Types "Johann Welker" sowie unter einem Schubverband. Das Bild 6 gibt Ganglinien der sohlennahen Strömung für Fahrten des Motorgüterschiffes bei einer Wassertiefe von 4,00 m wieder.

Für eine jede Wassertiefe wurden Meßfahrten mit 5 verschiedenen Umdrehungszahlen der Schiffsschraube ausgeführt, und zwar die erste Fahrt mit der kleinsten, die letzte mit der größten Schraubenfrequenz. Vergleicht man anhand der Meßergebnisse damit die erreichten Schiffsgeschwindigkeiten, so kann man feststellen, daß die größten Schiffsgeschwindigkeiten ($\max v_s$) meist bereits bei der dritten oder vierten Frequenzstufe erreicht wurden. Eine weitere Steigerung der Schraubendrehzahl kann eine Verminderung der Geschwindigkeit des dann stärker einsinkenden Schiffes zur Folge haben, wobei sich die sohlennahen Strömungsgeschwindigkeiten und Drücke weiter vergrößern. Die Steigerung der Maschinenleistung über den Wert hinaus, bei dem $\max v_s$ auftritt, führt somit zur Gefahr vermehrter Sohlenangriffe, ohne gleichzeitigen Vorteil für den Gütertransport, und sollte daher vermieden werden. Über Einzelheiten der Durchführung und der Ergebnisse der Messungen unterrichtet der Aufsatz [15].

Auch diese Naturmessungen wurden im 16-fach verkleinerten Modell nachgebildet, um die Kenntnisse der bei Versuchen mit fahrenden Modellschiffen

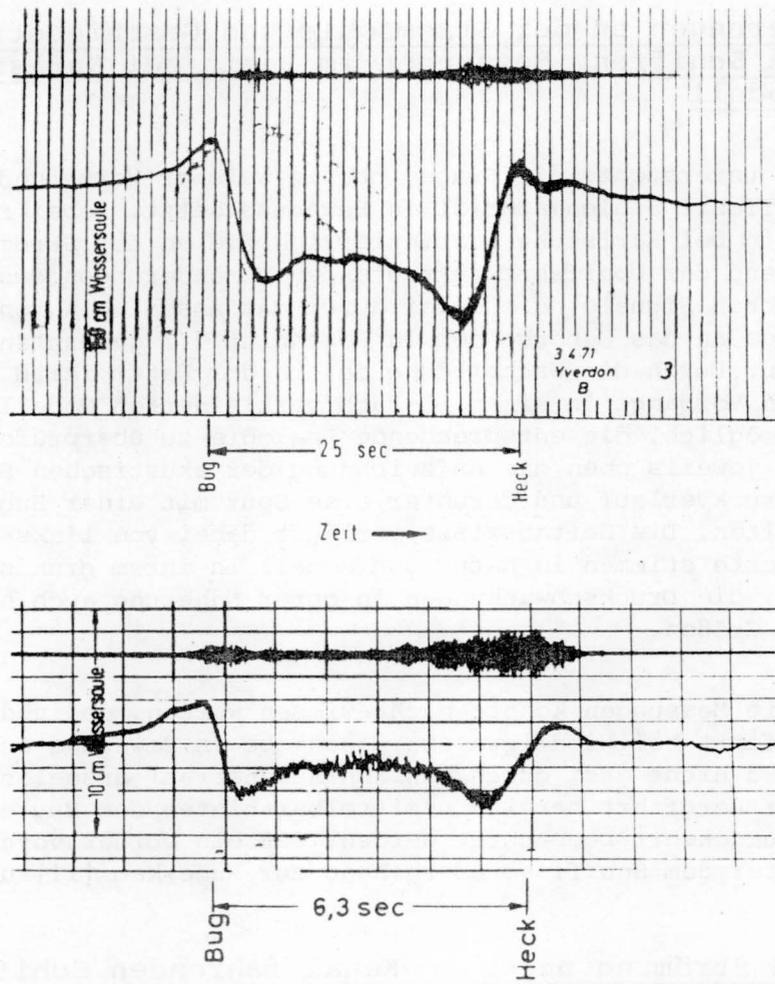


Bild 5

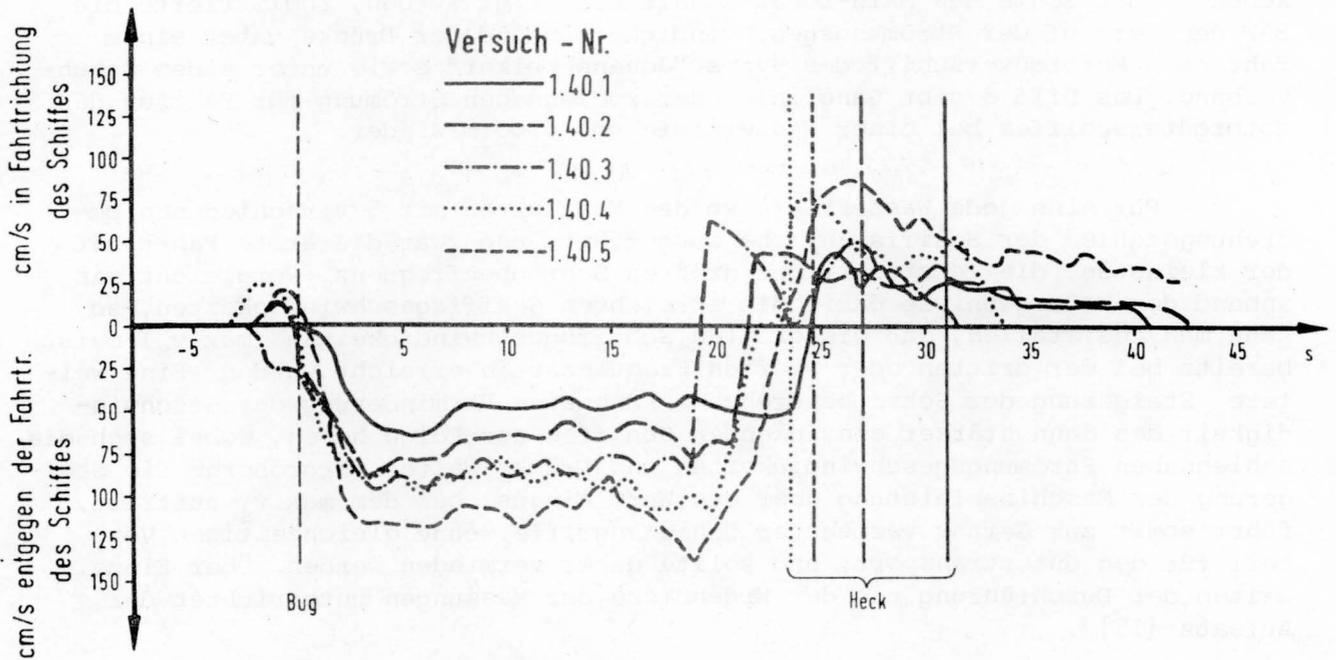


Bild 6

auftretenden Maßstabseffekte zu erweitern. Die Erforschung dieser Gesetzmäßigkeiten war notwendig im Hinblick auf die verschiedenen der BAW gestellten Fragen hinsichtlich der Veränderungen der natürlichen und der gepanzerten Rheinsohle durch die Schifffahrt.

4.6 Auswirkungen des Schraubenstrahls eines stehenden Schiffes auf die natürliche Stromsohle. Versuche im Rhein bei Breisach und im Modell

Um die bei der Deformation der Rheinsohle durch den Schraubenstrahl eines Schiffes geltenden Ähnlichkeitsbedingungen für die Umrechnung beobachteter Größen vom verkleinerten Modell in die Natur nachzuweisen und um die Ergebnisse der Modellversuche für eine bestimmte Panzerschicht (vgl. Abschnitt 6.1) zu überprüfen, wurden vom Wasser- und Schifffahrtsamt Freiburg und der BAW im November 1970 gemeinsam Naturversuche in der Stauhaltung Breisach ausgeführt.

Sie ist für solche Versuche besonders geeignet, denn sie weist keinen durchgehenden Schiffsverkehr auf. Solange der Zufluß das Abflußvermögen des annähernd parallel zu ihr verlaufenden Elsäßischen Seitenkanals, nämlich $1200 \text{ m}^3/\text{s}$, nicht überschreitet, fließen nur $50 \text{ m}^3/\text{s}$ oder weniger durch das Rheinbett. Mit dem vorhandenen Sektorwehr kann die Stauhaltung dabei weitgehend geleert oder unter das Stauziel abgesenkt werden.

In den trockengelegten Bühnenfeldern wurden zwei je 80 m lange und 25 m breite Versuchsfelder vorbereitet. In dem einen wurde das natürlich anstehende Sohlenmaterial lediglich eingeebnet, während das andere Versuchsfeld eine in Feldmitte 1,50 m dicke Abdeckschicht aus dem für die Panzerung vorgesehenen Grobkies aufnahm.

Für die Versuchsdurchführung stand ein Motorschiff des Typs "Gustav Koenigs" (Länge = 67 m, Breite = 8,20 m) zur Verfügung. Das Schiff war über dem Versuchsfeld vertäut. Die ausgebildeten Sohlenformen wurden durch Stangenpeilungen von einem vorbereiteten Meßfloß aus aufgenommen und ferner am Ende jeder der drei Versuchsreihen durch ein Nivellement des trockengelegten Versuchsfeldes.

Über beiden Versuchsfelder wurde zunächst je eine Versuchsreihe unter Beibehaltung eines Flottwassers von 30 cm ausgeführt. Jeweils nach einer Versuchsdauer von 5 min und nach weiteren 10, 15 und 20 min wurde gepeilt. Die an der natürlichen Sohle dabei eingetretenen Veränderungen sind in Abhängigkeit von der Einwirkungsdauer in den Bildern 7 und 8 festgehalten.

Alle Versuchsreihen wurden anschließend im Modell wiederholt, wobei sowohl das Schiff mit seinem Propeller als auch das Sohlenkorn 16-fach verkleinert nachgebildet wurden. Die Bilder 7 und 8 enthalten auch die im Modell beobachteten Sohlenveränderungen.

Über die Durchführung und die Ergebnisse dieser Natur- und Modellversuche wurde in [12] berichtet, auszugsweise auch in [17].

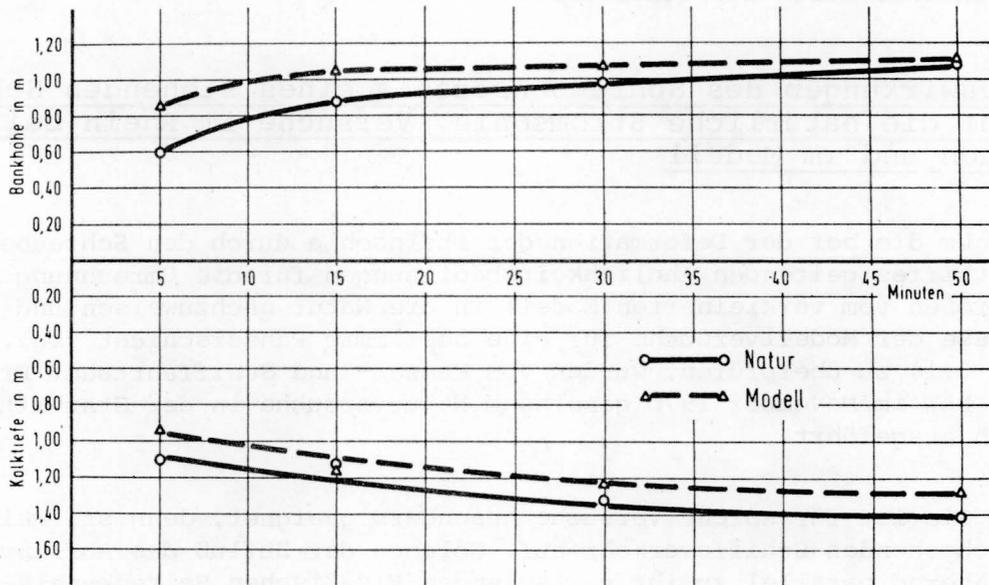


Bild 7 Zeitliche Entwicklung der Kolkiefen und Bankhöhen in Natur und Modell beim Versuch mit konstantem Flottwasser über der ungepanzerten Sohle

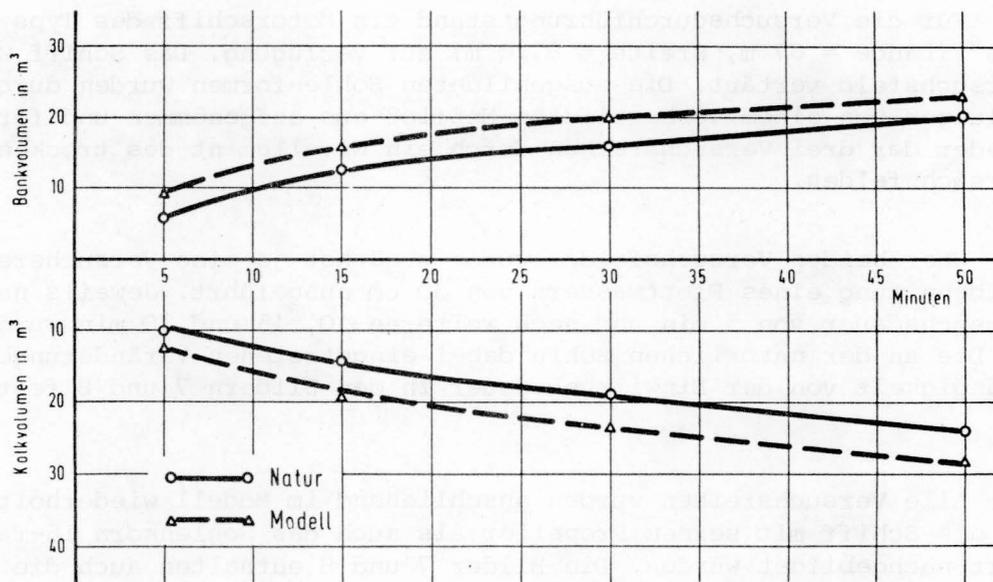


Bild 8 Zeitliche Entwicklung der Kolk- und Bankvolumina in Natur und Modell beim Versuch mit konstantem Flottwasser über der ungepanzerten Sohle

4.7 Veränderungen der Stromsohle unter fahrenden Schiffen

Über den planierten Versuchsflächen in der Stauhaltung Breisach wurden zu einem späteren Zeitpunkt mit dem gleichen Schiff zwei Meßfahrten ausgeführt. Eine größere Anzahl von Versuchsfahrten ließ sich auf wirtschaftlich vertretbare Weise nur im Modell realisieren. Hierfür wurde die in Bild 9 im Grundriß und Querschnitt dargestellte Versuchsrinne errichtet. Sowohl die darin fahrenden Schiffe (Bild 10) und ihre von Elektromotoren angetriebenen Propeller als auch das eingebaute Sohlenkorn waren im Maßstab 1:16 verkleinert.

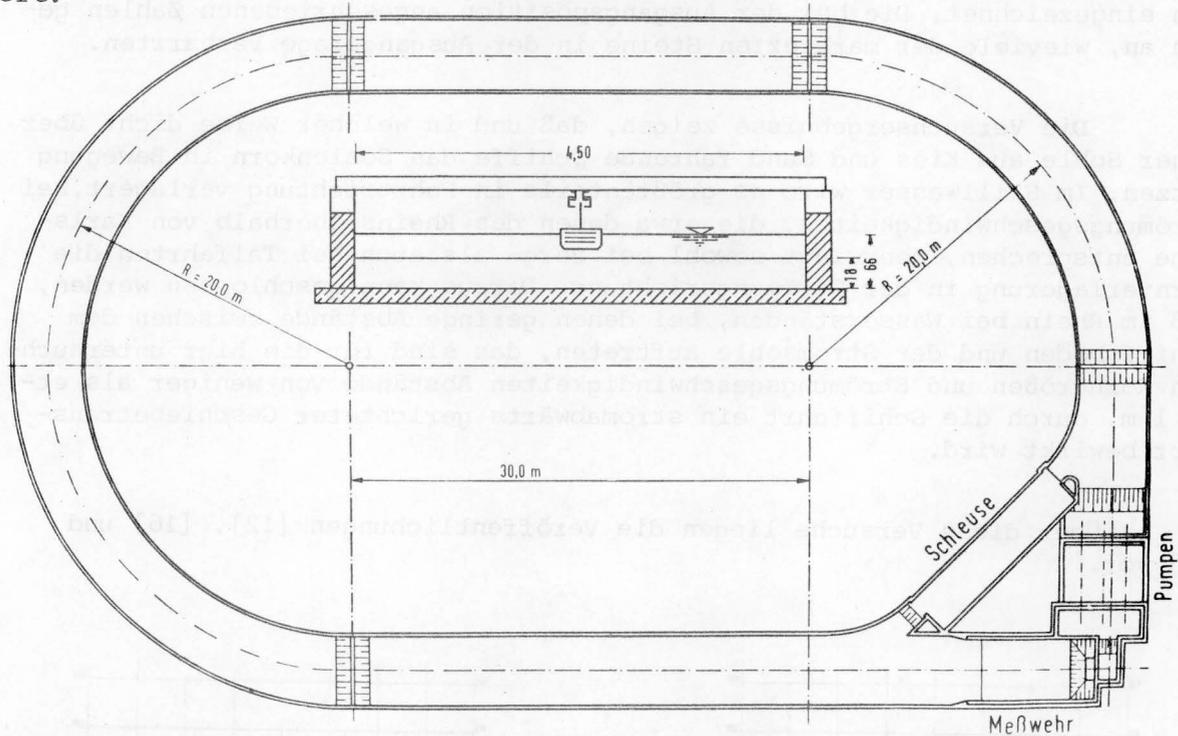


Bild 9 Grundriß und Querschnitt der Schifffahrtsrinne der BAW

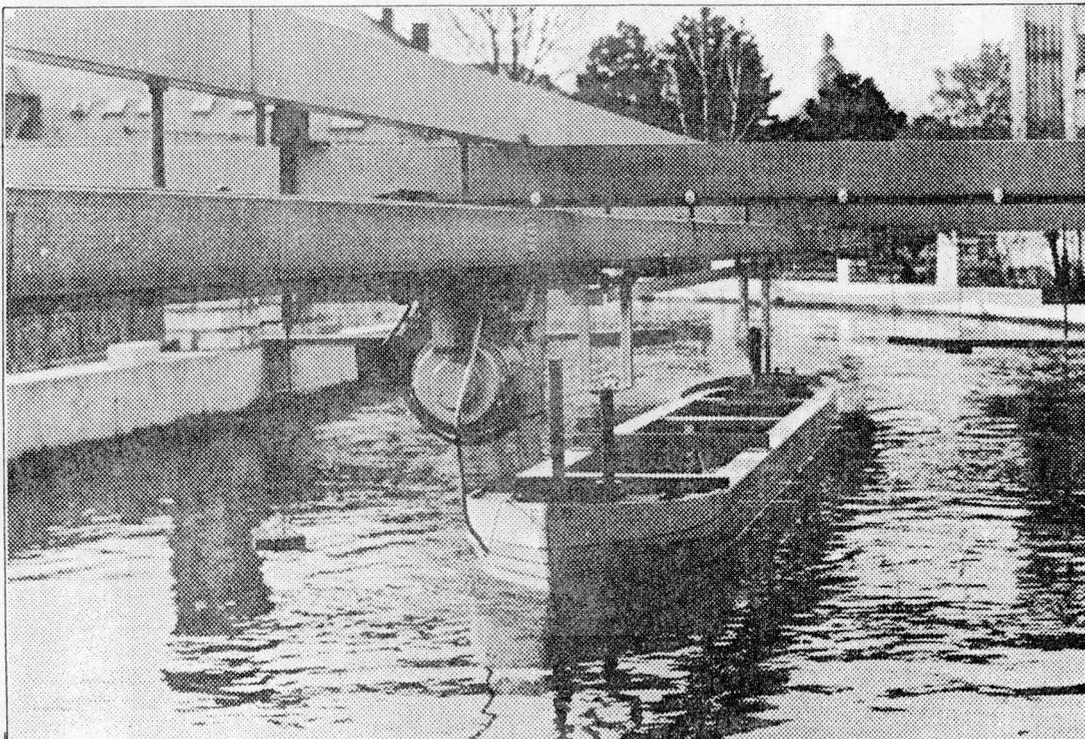


Bild 10 Modellschiff mit Laufkatze als Zusatzantrieb

In den beiden Bildern 11 und 12 sind zwei typische Versuchsergebnisse wiedergegeben. Beidemale handelt es sich um die Sohlenverformungen (Querschnitt im unteren Bildteil) und um die Tracerverlagerungen, die jeweils nach 20 nacheinander auf gleichem Kurs und in gleicher Richtung durchgeführten Fahrten mit dem Schiffstyp "Gustav Koenigs" festgestellt wurden. Alle Maße der beiden Bilder sind als Modellwerte in Millimeter angegeben. Auf der horizontal gezeichneten Nullachse des Grundrißkoordinatennetzes sind, mit größeren Symbolen, die Ausgangslagen der sieben Tracergruppen zu je 30 markierten Steinen eingetragen. Mit den entsprechenden, jedoch kleiner gezeichneten Symbolen ist die Lage der Tracer nach jeweils 20 Überfahrten eingezeichnet. Die bei der Ausgangsposition angeschriebenen Zahlen geben an, wieviele der markierten Steine in der Ausgangslage verharren.

Die Versuchsergebnisse zeigen, daß und in welcher Weise dicht über einer Sohle aus Kies und Sand fahrende Schiffe das Sohlenkorn in Bewegung setzen. Im Stillwasser wird es größtenteils in Fahrtrichtung verlagert. Bei Strömungsgeschwindigkeiten, die etwa denen des Rheins oberhalb von Karlsruhe entsprechen, überwiegt sowohl bei Berg- als auch bei Talfahrten die Kornverlagerung in der Strömungsrichtung. Daraus kann geschlossen werden, daß im Rhein bei Wasserständen, bei denen geringe Abstände zwischen dem Schiffsboden und der Stromsohle auftreten, das sind für die hier untersuchten Korngrößen und Strömungsgeschwindigkeiten Abstände von weniger als etwa 1 m, durch die Schifffahrt ein stromabwärts gerichteter Geschiebetransport bewirkt wird.

Über diese Versuche liegen die Veröffentlichungen [12], [16] und [17] vor.

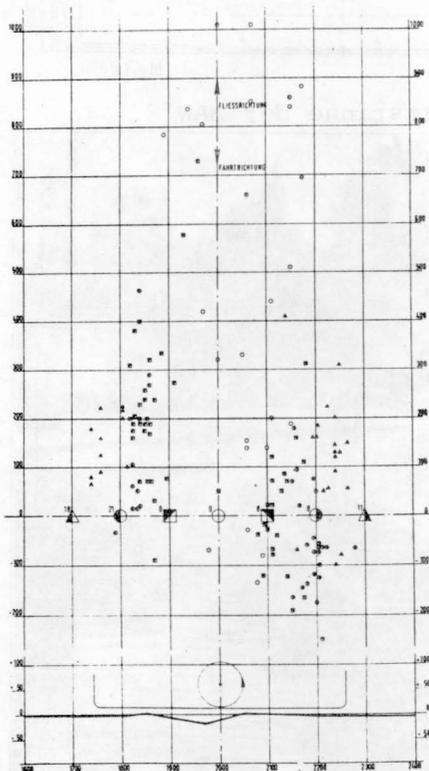


Bild 11

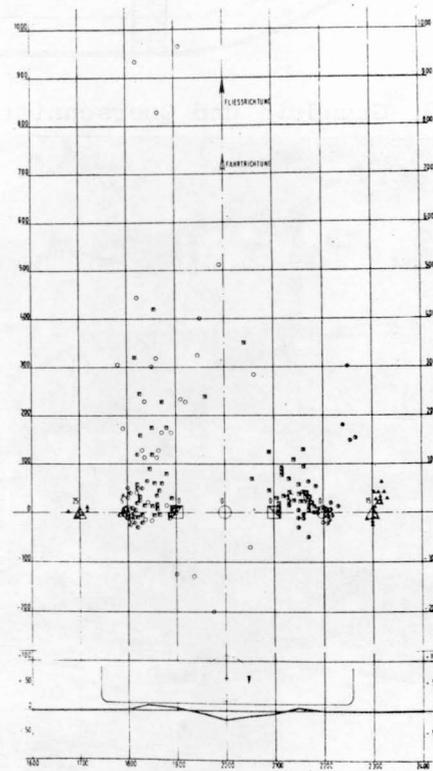


Bild 12

4.8 Die Auswirkung der Leistungssteigerung der Schubboote auf die Stromsohle

Im Jahre 1970 hat die französische Reederei CFNR mit dem Schubboot "Pierre Brousse" erstmals ein Fahrzeug in Dienst gestellt, das im Hinblick auf seine Antriebsleistung von 4800 PS weit über den Rahmen der vorher auf dem Rhein und seinen Nebenflüssen üblichen Maschinenleistungen hinausging. Inzwischen wurden auch von anderen Reedereien Schubboote mit ähnlichen oder noch größeren Leistungen in Dienst gestellt. Diese Schubboote sind bereits so ausgelegt, daß sie auch für die im Rhein versuchsweise schon gefahrenen Verbände mit 6 Leichtern mit insgesamt 16 000 t Tragfähigkeit (bei einem Leichtertiefgang von 3,80 m) verwendet werden können.

Die Zunahme der Antriebsleistung kann verstärkte Einwirkungen auf die bewegliche Stromsohle zur Folge haben. Der Herr Bundesminister für Verkehr beauftragte die BAW, eine Stellungnahme zu Art und Ausmaß dieser zu erwartenden Auswirkungen abzugeben.

Die BAW führte hierfür Modellversuche mit einem Schubverband im Maßstab 1:16 durch. Das Schubbootmodell ist dem Prototyp "Pierre Brousse" nachgebaut. Zu seiner Ausrüstung gehören neben den Elektromotoren für den Antrieb der 3 naturähnlichen Propeller Aufnehmer und Registriereinrichtungen zum Messen ihrer Umdrehungszahlen sowie ihres Schubes und Drehmoments. Aus diesen Größen läßt sich die Antriebsleistung berechnen.

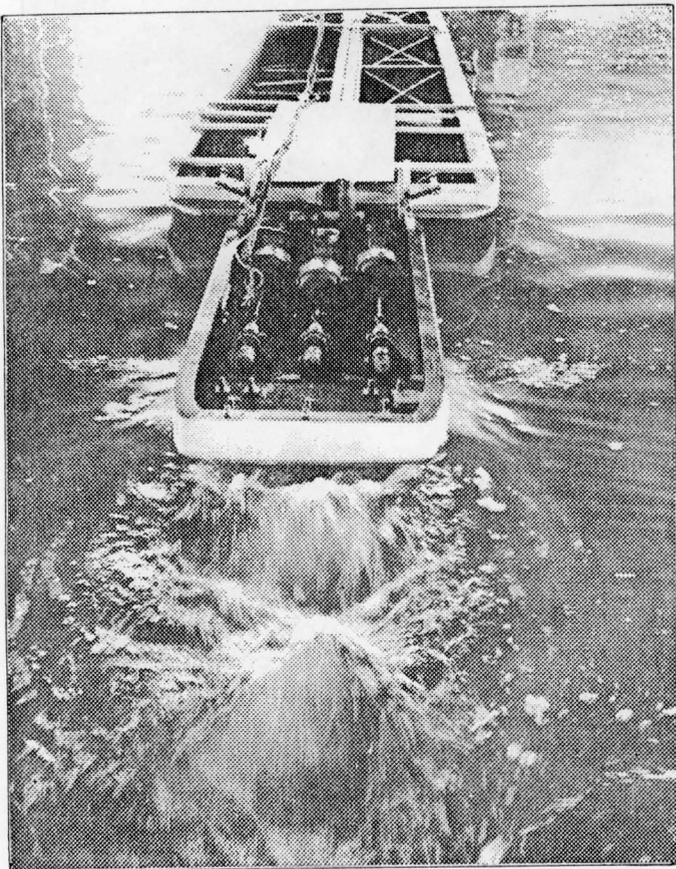


Bild 13

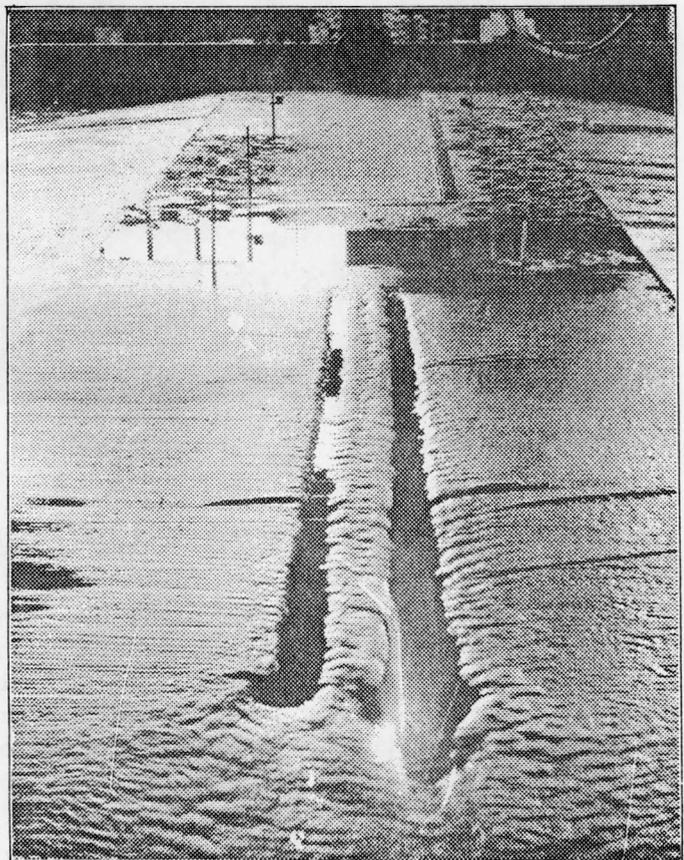


Bild 14

Bild 13 zeigt das Modell des Schubverbandes beim Anfahren, Bild 14 die Rinnen an der Sohle, die sich unter dem anfahrenen Verband gebildet haben. Bild 15 zeigt die sich im Stillwasser ergebende Sohlenumformung unter einem längere Zeit an Ort und Stelle verharrenden Schubboot des Prototyps "Marseille" (2 Propeller in Kortdüsen).

Neben der Antriebsleistung sind es u.a. vor allem das Flottwasser (Abstand zwischen Schiffsboden und Flußsohle) und die Größe des Sohlenkorns, die das Ausmaß der Sohlenumformungen bestimmen.

Über diese Versuche wurde ein Zeitschriftenaufsatz [19] zum Druck angenommen.

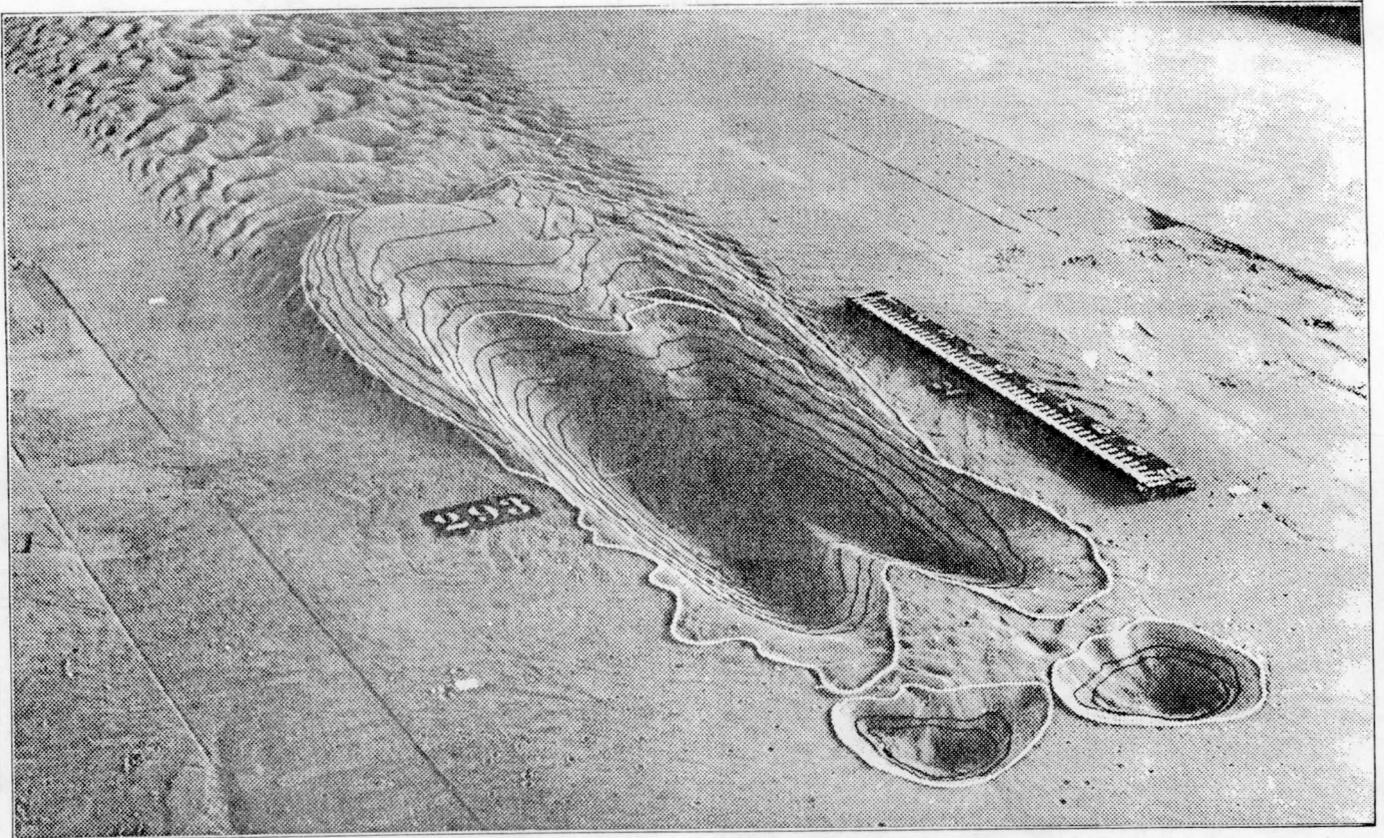


Bild 15

4.9 Modellversuche über die Wirkung von Buhnen

In einer rechteckigen, geraden Versuchsrinne mit fester Sohle wurden systematische Versuche mit schematischer Anordnung von Buhnen durchgeführt. Dabei wurden jeweils der Durchfluß, die Wasserspiegellage und die Größe und Richtung der Strömungsgeschwindigkeiten gemessen und der Geschwindigkeitsbeiwert nach Manning-Gauckler-Strickler berechnet. Diese und weitere Untersuchungen gelten vor allem der Frage, in welcher Weise die Buhnenwirkung bei hydraulischen Berechnungen, besonders solchen der als Folge von Ausbaumaßnahmen zu erwartenden Wasserspiegellagen, am besten erfaßt werden kann.

Bild 16 zeigt im Grundriß und in Querschnitten eine von mehreren Versuchsanordnungen, bei denen das Rechteckgerinne zunächst ohne Einbauten und hierauf mit Buhnen mit verschiedenen Querschnitten, Längen L und gegenseitigen Abständen A, ferner mit Grundschwellen sowie mit durchgehenden Vorländern versehen wurde.

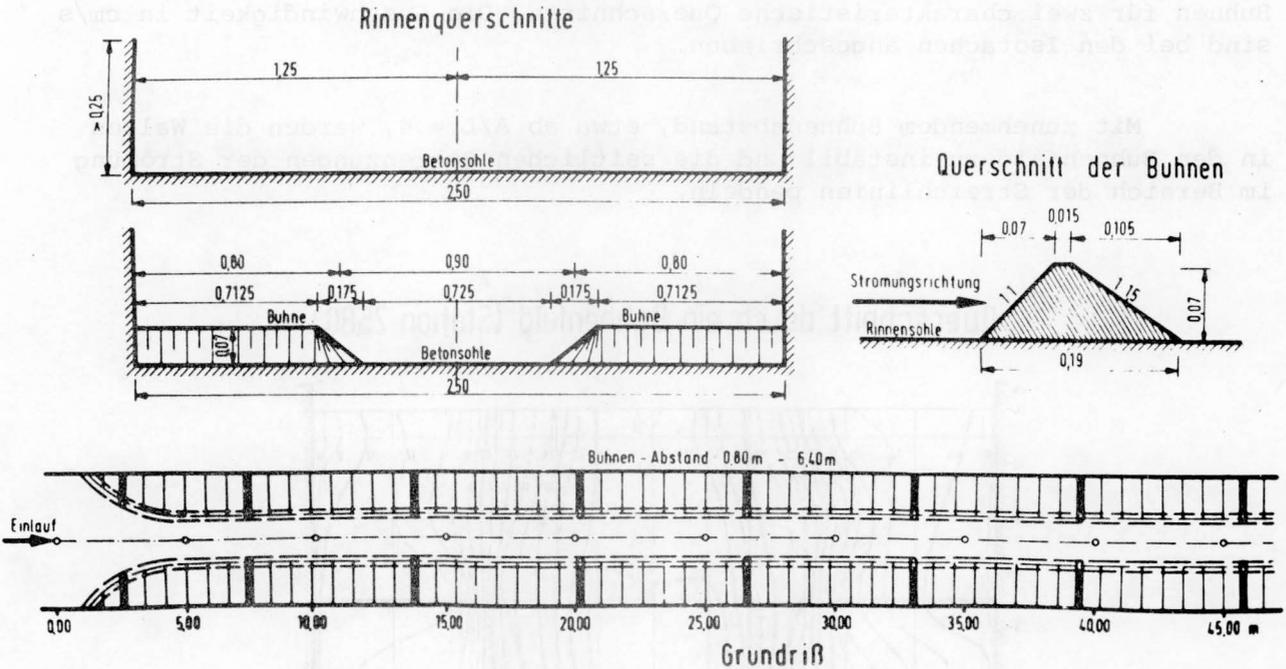


Bild 16

Modellversuche mit Buhnen

Auftragung der Geschwindigkeitsbeiwerte k bezogen auf den verbauten Querschnitt bei VR 5

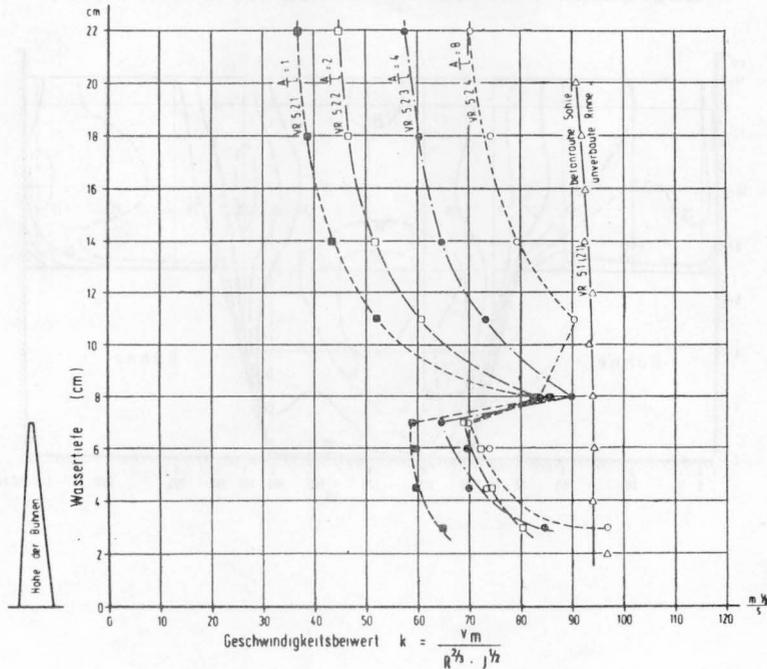


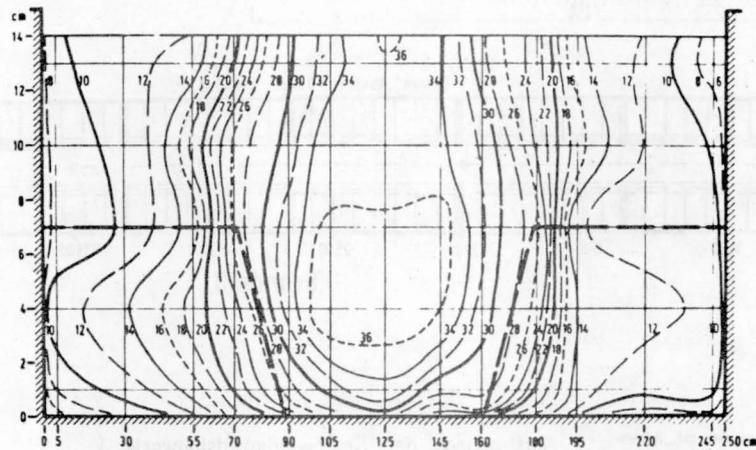
Bild 17

Bild 17 gibt für die Versuchsreihe gemäß Bild 16 das ermittelte Verhalten des nach Manning-Strickler-Gauckler berechneten Geschwindigkeitsbeiwertes in Abhängigkeit von der Wassertiefe relativ zur Bühnenhöhe sowie vom Verhältnis Bühnenabstand zu Bühnenlänge wieder.

Bild 18 schließlich enthält den Isotachenverlauf bei überströmten Bühnen für zwei charakteristische Querschnitte. Die Geschwindigkeit in cm/s sind bei den Isotachen angeschrieben.

Mit zunehmendem Bühnenabstand, etwa ab $A/L = 4$, werden die Walzen in den Bühnenfeldern instabil und die seitlichen Begrenzungen der Strömung im Bereich der Streichlinien pendeln.

Querschnitt durch ein Bühnenfeld (Station 25,80)



Querschnitt in Bühnenachse (Station 27,40)

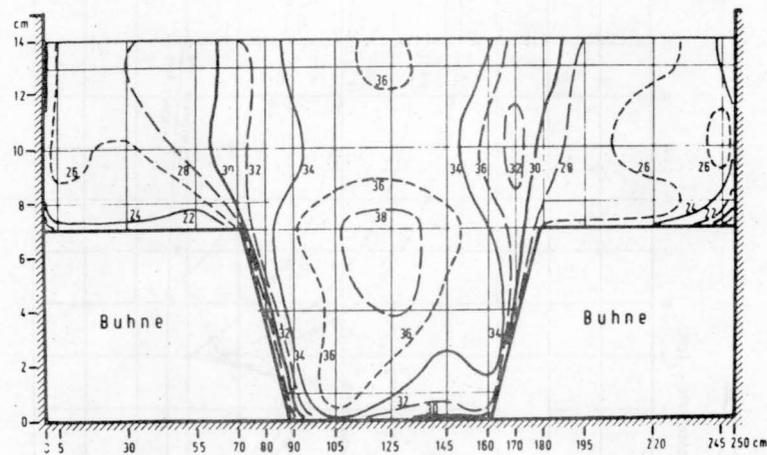


Bild 18

5. Gutachten über die Veränderungen der Rheinsohle nach Bau von zwei Staustufen zwischen Kehl/Straßburg und Neuburgweier/Lauterburg

5.1 Die Entwicklung eines Rechenautomatenprogramms zur Berechnung der Veränderungen der Sohle und der Wasserspiegel

Zum XXII. Internationalen Schiffahrtskongreß Paris 1969 legte Felkel auf dem Dienstwege einen Beitrag vor mit dem Titel: Rechenautomatenprogramm zur Berechnung der als Folge der Geschiebebewegung eintretenden Veränderungen der Höhenlage der Flußsohle und des Wasserspiegels [7].

Hierbei handelt es sich um eine theoretische Arbeit, die mit einem Strukturdiagramm für das entwickelte Berechnungssystem und einem ALGOL-Programm abschließt.

Zu den Bausteinen, aus denen sich das System zusammensetzt, gehört eine Abflußgleichung und eine Geschiebetriebformel. Bezüglich der letzteren wird im Kongreßbericht gesagt:

Das hier vorgelegte mathematische Modell beschränkt sich auf die Berücksichtigung des durch die natürliche Strömung bewirkten, in der Nähe der körnigen, kohäsionslosen Sohle stattfindenden Feststofftransportes, wobei es die Geschiebetriebformel von MEYER-PETER und MÜLLER verwendet. Sie kann jedoch auch durch eine andere Gleichung ersetzt werden. Es ist ferner möglich und kann in gewissen Fällen erforderlich werden, in der für jede Teilstrecke vorzunehmenden Feststoffbilanz auch die sekundären Beiträge mit zu berücksichtigen, etwa den Einfluß der Schifffahrt, den Geschiebeabtrieb oder die Auswirkung der natürlichen Abpflasterung der obersten Sohlenschicht. Die Erforschung der mathematischen Gesetzmäßigkeiten dieser Erscheinungen befindet sich teilweise noch in den Anfängen. Sie wurden deshalb sowie im Interesse der besseren Übersichtlichkeit in die hier vorgelegte Fassung des mathematischen Modells nicht mit aufgenommen.

Der Verfasser vertritt von vornherein die Meinung, daß nur an Hand der Ergebnisse von Naturmessungen die für eine praktische Anwendung des Rechenmodells erforderliche Kalibrierung möglich ist, wobei er offen läßt, ob dann die Formel von MEYER-PETER und MÜLLER oder eine andere die speziellen Verhältnisse eines bestimmten Flußabschnittes besser wiedergibt.

5.2 Das mathematische Modell des Oberrheins

Konkrete Vorstellungen für die Realisierung eines mathematischen Flußmodells wurden in der BAW schon frühzeitig entwickelt und in der im Jahre 1969 erschienenen Arbeit [8] publiziert. Die Hauptteile des mathematischen Flußmodells sind das Rechenautomatenprogramm und die Daten, welche die Flußbettgeometrie, die Abflußverhältnisse, die Geschiebeeigenschaften und anderes beschreiben.

Einen erheblichen Arbeitsumfang verursachte die Auswertung der handgezeichneten Querprofile des Rheins, das Ablochen ihrer Koordinaten und das Prüfen. Diese Arbeiten wurden lückenlos für die Rheinstrecke zwischen Worms und Gerstheim durchgeführt. Über weite Strecken erfolgte auch das Rückrech-

Die Profile des zuletzt genannten Abschnittes ließen streckenweise erhebliche Vertiefungen in den Bühnenfeldern erkennen (Bild 19), die das Ausmaß der natürlichen Erosion um ein Vielfaches übertrafen und die auf umfangreiche Kiesentnahmen für Bauzwecke zurückzuführen sind. Auch im Unterwasser Gerstheim muß davon ausgegangen werden, daß Kies für Bauzwecke dem Rheinbett durch die französische Verwaltung entnommen wurde, wenngleich keine detaillierten Aufstellungen darüber und auch keine diesbezüglichen Querprofile zu erhalten waren. Bereits dieser Umstand allein war ein Hindernis für die angestrebte Kallibrierung des mathematischen Modells.

Eine Prognoserechnung über die zu erwartenden künftigen Veränderungen der Rheinsohle wurde bisher nicht durchgeführt. Hingegen wurden die Peilergebnisse aus dem Unterwasser der Staustufe Straßburg zu einer mit einer Massenberechnung verbundenen zusammenfassenden Darstellung des aufgetretenen Erosionsverlaufes verarbeitet, worüber im folgenden Abschnitt berichtet wird.

Im Rahmen der für den Zeitraum 1975 bis 1980 vorgesehenen Untersuchungen der Abfluß- und Geschiebeverhältnisse des Rheins sind auch Arbeiten am mathematischen Modell der Erosionsvorgänge und die Durchführung entsprechender Berechnungen eingeplant, nachdem nunmehr sowohl Meßergebnisse aus der Natur als auch solche aus den Rheinmodellen mit beweglicher Sohle zu erwarten sind.

5.3 Die unterhalb der Staustufe Straßburg eingetretenen Sohlen- und Wasserspiegeländerungen

In den im vorangegangenen Abschnitt genannten, handgezeichneten Querprofilen des Rheinabschnitts 291,04 bis 295,520 wurden für 5 etwa ein Jahr auseinanderliegende Zeitpunkte die Querschnittsflächen planimetriert, und zwar einmal über die gesamte Flußbreite, zum anderen einerseits über die zwischen den Streichlinien (den Verbindungslinien der Bühnenköpfe) und andererseits über die landseits der Streichlinien gelegenen (von den Bühnenfeldern eingenommenen) Teilflächen. Die Flächendifferenzen zwischen den beim Ausgangszustand (März 1970) und beim jeweils betrachteten Zustand (März 1971, Mai 1972, Januar 1973 und Januar 1974) festgestellten Querschnittsflächen wurden über den Strom-km aufgetragen, wobei vorher, zwecks Glättung der Linienzüge, die übergreifenden Mittel von je 3 benachbarten Profilen gebildet wurden. Durch Planimetrieren der zwischen diesen Linien und der Abszissenachse gelegenen Flächen wurden sodann die Massenveränderungen erhalten.

Dem hierüber vorgelegten Bericht ist das Bild 20 entnommen. Darin ist im oberen Teil das Absinken des Niedrigwasserspiegels im Verhältnis zu der am 15.10.1969 durchgeführten Fixierung über den Rhein-km aufgetragen, und zwar für die beiden Messungen vom 30.12.1970 und vom 27.3.1973. Im unteren Teil des Bildes ist die Veränderung der mittleren Höhenlage der Flußsohle dargestellt. Sie wurde berechnet, indem die zwischen den Streichlinien aufgetretene Flächenveränderung durch den Streichlinienabstand dividiert wurde.

Veränderungen der Höhenlage der Rheinsohle
im Stromabschnitt unterhalb der Staustufe Straßburg

Veränderung des Niedrigwasserspiegels (NW bei einem Abfluß von $540 \text{ m}^3/\text{s}$ in Basel)

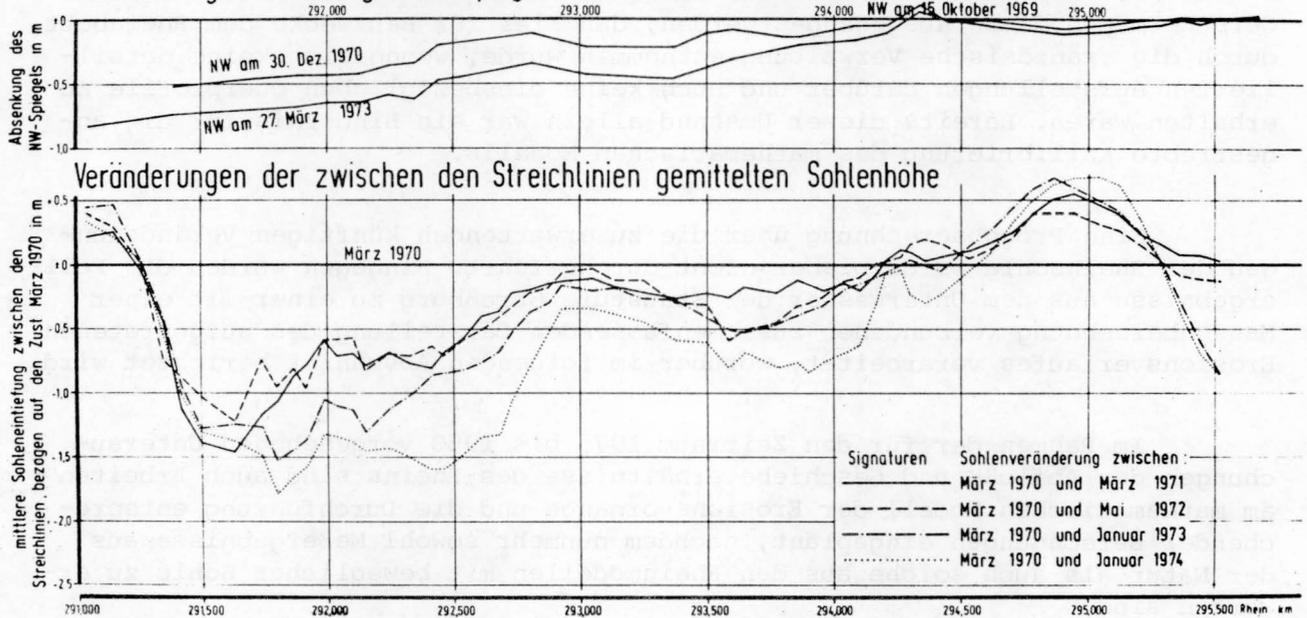


Bild 20

5.4 Die Verbesserung des Peilverfahrens und der Darstellung und Auswertung der Meßergebnisse

Zunächst lagen nur Peilungen der Rheinsohle vor, die in zeitlichen Abständen von mehreren Jahren ausgeführt wurden. Die Peilergebnisse waren von Hand als Querprofile aufgetragen worden (vgl. Muster Bild 19).

Um sie der Verarbeitung im Rechenautomaten zugänglich zu machen, wurden in der ersten Zeit für zahlreiche Punkte eines jeden Querprofils die Horizontal- und die Vertikalkoordinaten aus den Querprofilen herausgegriffen und in Listen eingetragen, aus denen sie hierauf eine Locherin auf Lochstreifen übertrug.

Eine Rationalisierung dieses zeitaufwendigen Verfahrens brachte die Anschaffung eines Abtastgerätes "Positronic" im Jahre 1969, das bei der manuellen Abtastung der Querprofile sogleich Lochstreifen mit den Koordinaten der angetasteten Querprofilpunkte lieferte.

Das Meßschiff "Walter Türk" der WSD Mainz wurde auf Grund der Entwicklung der EDV im Jahre 1973 mit einem Peilgerät ausgestattet, das die Koordinaten von Sohlenpunkten des Rheins unmittelbar in Lochstreifen stanzt. Mit Hilfe von automatischen Zeichengeräten (Plotter) in der BAW werden sodann aus diesen Lochstreifen die Querprofile in gewünschten Maßstäben gezeichnet (vgl. Bild 21) und Weiterberechnungen im Computer durchgeführt (z.B. Abflußquerschnitt, mittlere Sohlentiefe, Störfläche der Schiffahrtsrinne u.a.).

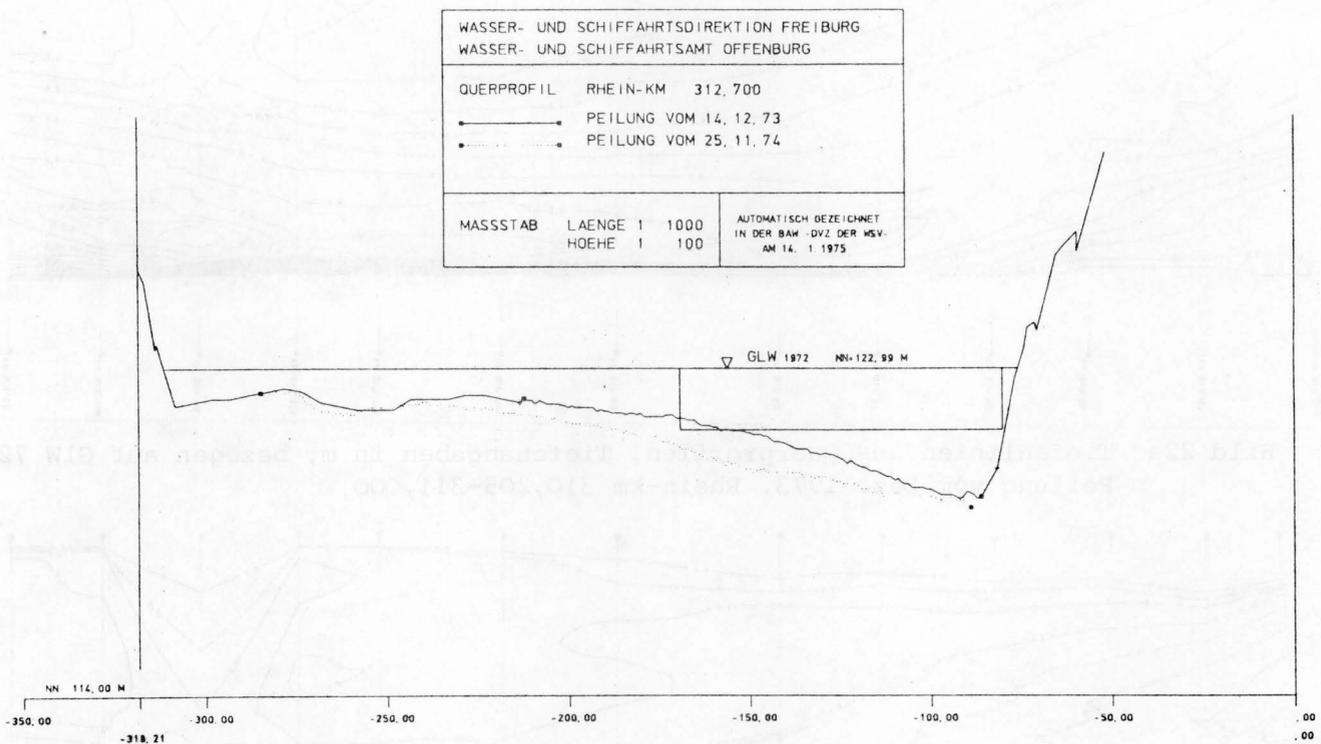


Bild 21

Im Bereich der WSD Freiburg, welche kein eigenes Meßschiff besitzt, wurde dieses Verfahren in größerem Umfang ab Dezember 1973 zur Sohlenpeilung im Unterwasser der Staustufe Gamsheim eingesetzt.

Bild 21 zeigt in einer Plotterzeichnung die Gegenüberstellung der für zwei Zeitpunkte gepellten Sohle, woraus die eingetretene Sohlenerosion hervorgeht.

Die Fachgruppe DV der BAW hat ein Programm für das Zeichnen von Lageplänen mit Tiefenlinien der Stromsohle entwickelt. Diesbezügliche Zeichnungen enthalten die Bilder 22 a und 22 b (Sohlenlinien aus zwei verschiedenen Messungen).

Bild 22 c zeigt die Veränderungen der Stromsohle (Erosions- und Aufhöhungsbereiche) zwischen zwei Zeitpunkten (vgl. Bilder 22a und 22b). Das Programm baut hierbei auf die EDV-gespeicherten Daten der Querprofile auf, erfordert also keine besondere Eingabe.

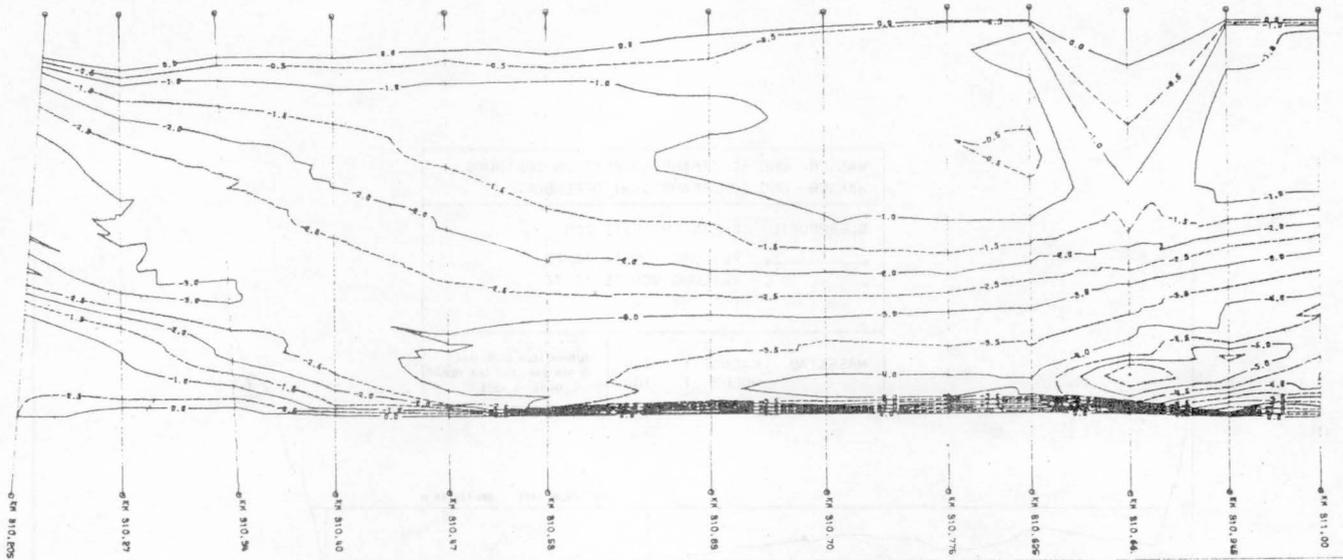


Bild 22a Tiefenlinien aus Querprofilen, Tiefenangaben in m, bezogen auf GlW 72 Peilung vom Dez. 1973. Rhein-km 310,205-311,000

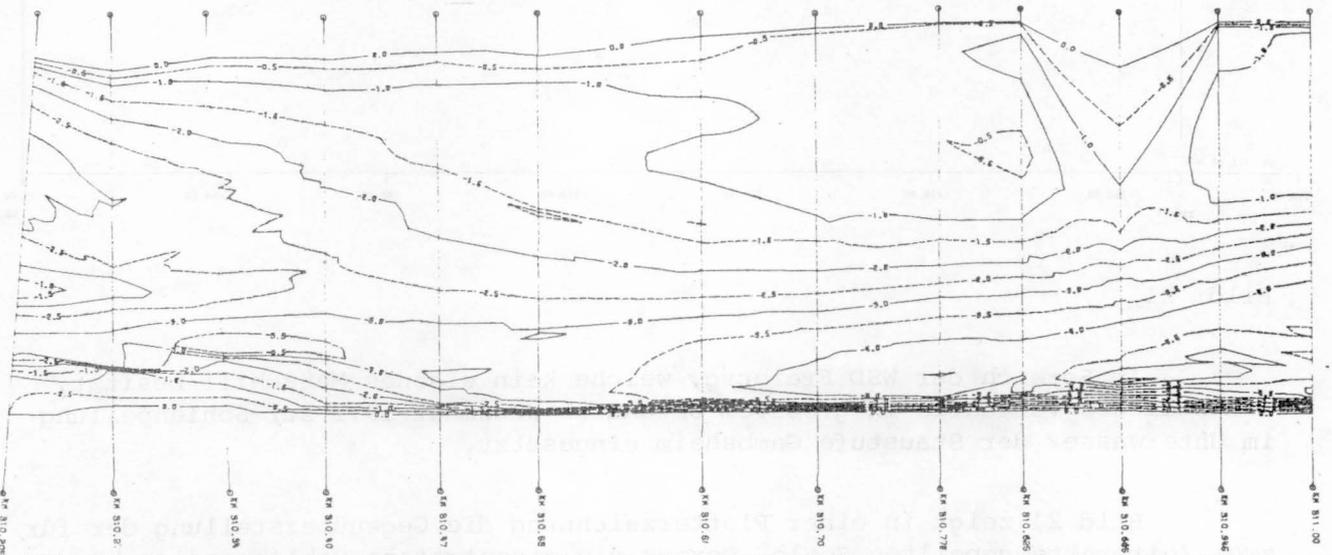


Bild 22b Wie Bild 22a, jedoch Peilung vom August 1974

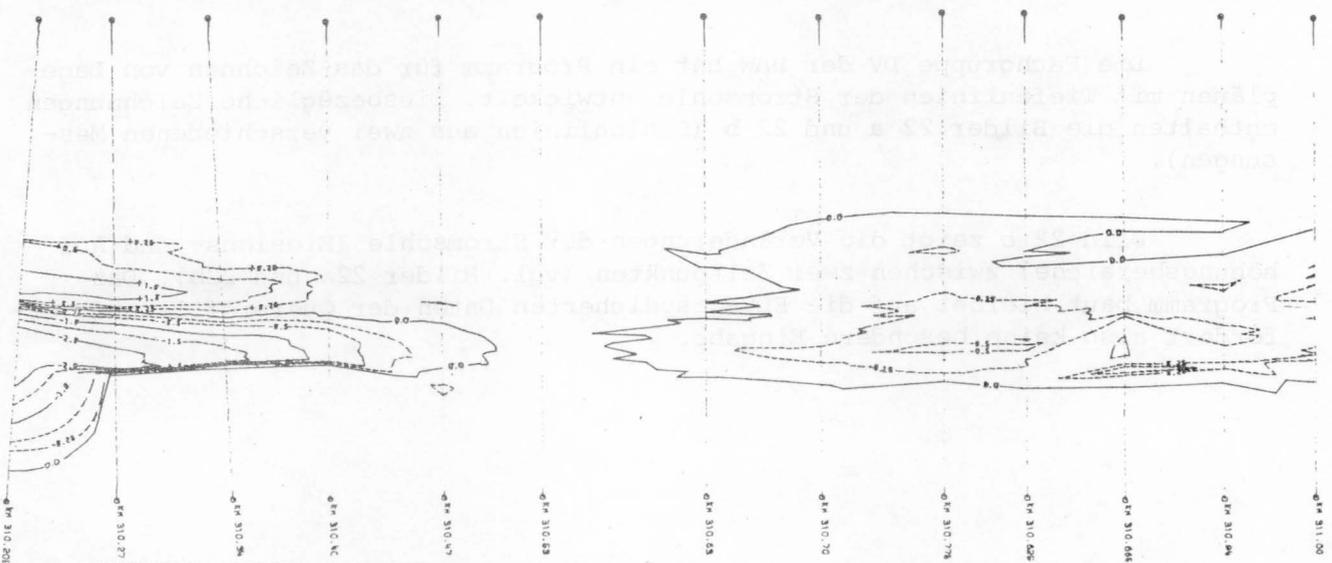


Bild 22c Differenzlinien (+ Aufhöhung, - Erosion) aus den Querprofilen der Peilungen vom August 1974 und vom Dezember 1973

5.5 Die Modelluntersuchungen für die Staustufe Iffezheim

Seit dem Jahre 1971 wurden in der BAW unter der Leitung von ORBR Dr.-Ing. Dietz Modellversuche für die Staustufe Iffezheim durchgeführt. Sie fallen nicht unter das 6-Punkte-Programm. Die Koordinierungsgruppe wurde jedoch durch den Bundesminister für Verkehr laufend über diese Arbeiten unterrichtet, so daß auch an dieser Stelle darauf hingewiesen wird. Es handelt sich um Versuche an den folgenden Modellen:

Pilotmodell der Staustufe, Maßstab 1:300/100,

Vollmodell der Staustufe, Maßstab 1:100,

Teilmodell des Wehres, Maßstab 1:33 1/3

Teilmodell der Schleusenanlage, Maßstab 1:20.

Durchführung und Ergebnisse der Modellversuche werden in mehreren Versuchsberichten und Gutachten behandelt, ferner in den Veröffentlichungen [1] , [2] und [3] .

6. Empfehlungen für den weiteren Ausbau einschließlich Prognose der sich aus den empfohlenen Ausbaumaßnahmen ergebenden voraussichtlichen weiteren Entwicklung der Rheinsohle

6.1 Die Untersuchung der Sohlenpanzerung

Im Vertrag vom 4. Juli 1969 zwischen der Bundesrepublik Deutschland und der Französischen Republik über den Ausbau des Rheins zwischen Kehl/ Straßburg und Neuburgweier/Lauterburg heißt es im Artikel I, Abs.3, daß die beiden Vertragsparteien bezüglich des Ausbaus des Rheins unterhalb der Staustufe Iffezheim eine fortschreitende Panzerung des Rheinbettes vorsehen und gemeinsam die technischen Möglichkeiten dazu untersuchen. Sollten diese Untersuchungen erweisen, daß das gesteckte Ziel nicht erreicht werden kann, so werden die Vertragsparteien andere geeignete Maßnahmen vereinbaren.

Im Rahmen dieser gemeinsamen Untersuchungen hat die BAW die Durchführung von Natur- und Modellversuchen übernommen, deren Ziel die Ermittlung der Auswirkung einzelner Schiffe auf die aus einer Abdeckschicht aus größeren Steinen bestehende Sohlenpanzerung ist. Das Laboratoire National d'Hydraulique in Chatou arbeitete gleichzeitig an einem stochastischen Rechenmodell, das aufgrund der Abfluß- und Verkehrsstatistik sowie der von der BAW experimentell festzustellenden Wirkung repräsentativer Schiffsfahrten eine Prognose darüber liefern sollte, wie sich die Panzerschicht im Laufe der Jahre verhält. Denn auch ein sehr grobes loses Sohlenkorn kann durch die Schifffahrt bei bestimmten Verhältnissen verlagert werden.

6.1.1 Das Untersuchungsprogramm

In einer Besprechung zwischen deutschen und französischen Regierungsvertretern am 29.8.1968 in Karlsruhe wurde von der BAW ein Untersuchungsprogramm vorgeschlagen. Man kam überein, eine deutsch-französische Arbeitsgruppe zu bilden (vgl. Abschnitt 6.1.2). In ihr wurde das Untersuchungsprogramm weiter entwickelt. Es ist in Bild 23 dargestellt.

6.1.2 Die Mitarbeit in der deutsch-französischen Arbeitsgruppe für das Studium der Rheinerosion und der Sohlenpanzerung unterhalb Iffezheim

Die genannte Arbeitsgruppe trat zwischen dem 22.10.1968 und dem 26.6.1970 sechsmal zu Besprechungen zusammen. Es gehörten ihr an die Herren

Meistermann,	Chef de l'Arrondissement de la Navigation de Strasbourg-Rhin,
Lebreton,	Chef du Département "Laboratoire National d'Hydraulique" de Chatou
Daubert,	Chef du groupe "Recherche" au Laboratoire National d'Hydraulique de Chatou,
Dr.-Ing. Stadie,	Präsident der Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe
Dr.-Ing. Felkel,	Leiter der Untersuchungen der Rheinerosion und der Sohlensicherung bei der Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe,
Bensing,	Oberregierungsbaurat, Dezernent bei der Wasser- und Schifffahrtsdirektion Freiburg.

In der Arbeitsgruppe wurden die die Sohlenpanzerung betreffenden Untersuchungen laufend erörtert und Übereinstimmung hinsichtlich ihrer technischen Durchführung erreicht.

6.1.3 Versuche in der Natur

Die in den Abschnitten 4.4 bis 4.7 behandelten Naturmessungen über die Wirkungen der Schiffe auf die Gewässersohle wurden durch einen Großversuch in der bereits im Abschnitt 4.6 beschriebenen Stauhaltung des Kulturwehres Breisach ergänzt, bei dem hier ein 80 m langes, 25 m breites und in Feldmitte 1,50 m dickes Versuchsfeld aus dem für die Panzerschicht geeigneten Grobkies mit 6 bis 10 cm Korndurchmesser eingebaut wurde. Ermittelt wurden die Deformationen der Panzerschicht unter dem Einfluß des Propellerstrahls eines an Ort und Stelle verharrenden Schiffes sowie auch bei Überfahrten. Bild 24 zeigt das Ergebnis eines Versuches, bei dem ein rd. 1,60 m tiefer Kolk und dahinter ein rd. 1,30 m hoher Hügel hergestellt wurden.

Die Versuche und ihre Ergebnisse sind im Zeitschriftenaufsatz [12] beschrieben.

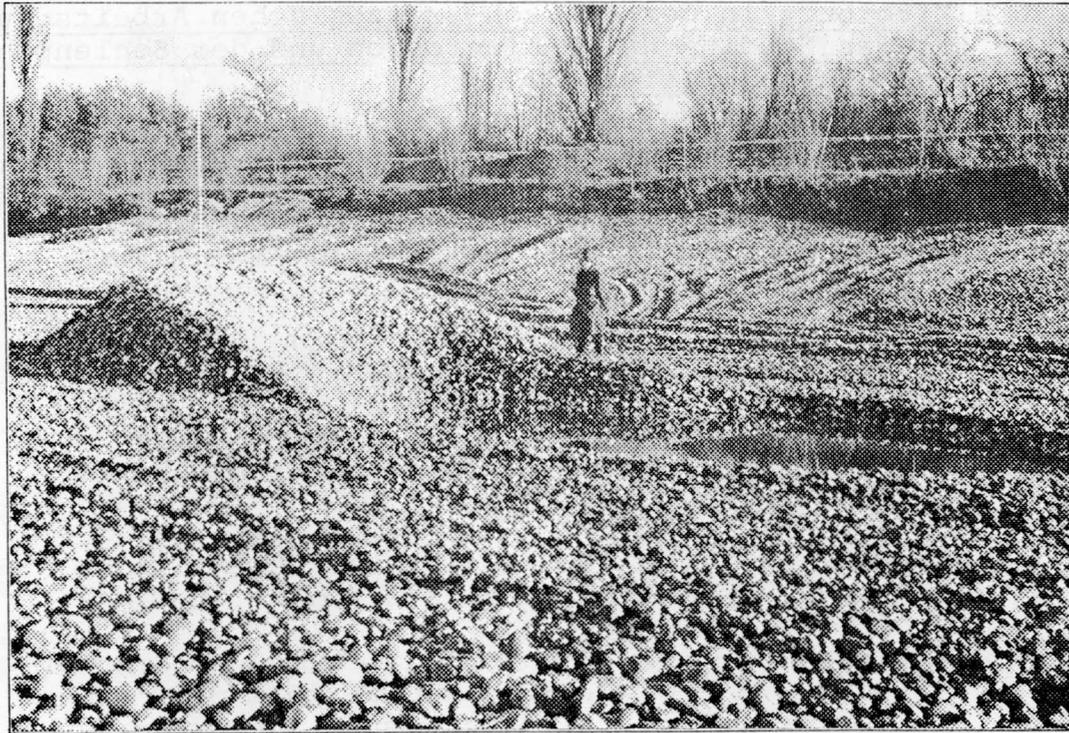


Bild 24 Naturversuch: Kolk und Hügel in der Panzerschicht

6.1.4 Modelluntersuchungen

Die Breisacher Naturversuche wurden im Modell im Maßstab 1:16 reproduziert und durch zusätzliche Parameterkombinationen erweitert. Insbesondere wurden in der im Abschnitt 4.7 beschriebenen Umlaufrinne Dauerversuche mit und ohne Strömung ausgeführt, wobei ein Modellschiff 20 oder 100 mal über die Panzerschicht hinwegfuhr. Gemessen wurden die dabei in ihr erzeugten Längsrillen und seitlich aufgeworfenen Wülste. Einige dieser Versuchsergebnisse sind in Bild 25 schematisch dargestellt. Diese Untersuchungen werden ebenfalls bei [12] behandelt.

Eine weitere Gruppe von Modellversuchen bezog sich auf die Verlagerung der einzelnen Körner der Panzerschicht, wobei verschieden gefärbte Tracer verwendet und die Ergebnisse in der Weise dargestellt wurden, wie es in den Bildern 11 und 12 gezeigt wird.

6.1.5 Gutachten der BAW

Der Technische Ausschuss der deutsch-französischen Kommission nach dem Vertrag vom 4. Juli 1969 hat in einer außerordentlichen Sitzung am 16.2.72 seinen Schlußbericht über die Sohlenpanzerung an die Ständige Kommission fertiggestellt. Er kam darin zu dem Ergebnis, daß die Sohlenpanzerung keine Maßnahme darstellt, mit welcher die unterhalb der Staustufe Iffezheim auftretenden Probleme ohne eine unzulässige Beeinträchtigung der Schifffahrt gelöst werden können.

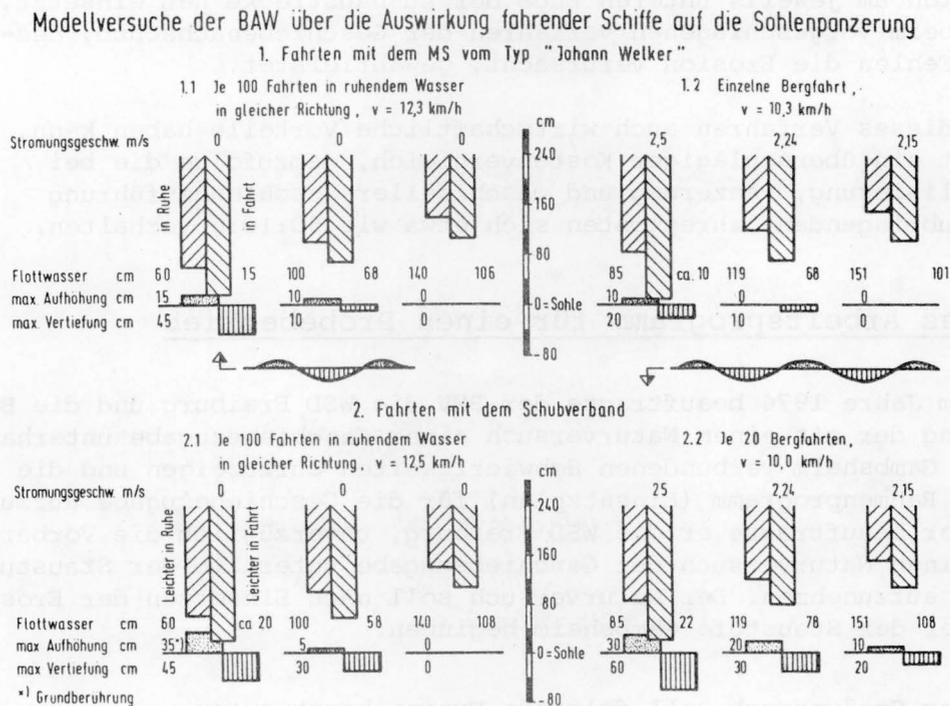


Bild 25 Schematische Darstellung von Ergebnissen der Versuche über die Verformung der Panzerschicht durch fahrende Modellschiffe

Die BAW hat vorher am 20.10.1971 dem Bundesminister für Verkehr einen Bericht vorgelegt, in dem eine Modifizierung der untersuchten Form der Panzerung zur sogenannten Teilpanzerung behandelt wird, die eine grössere Wirtschaftlichkeit aufweist.

6.2 Die Erosionsverhütung durch Geschiebezugabe

6.2.1 Die Ideenstudie

Am 21. April 1969 legte der Verfasser auf dem Dienstwege eine von ihm angefertigte "Ideenstudie über die Möglichkeit der Verhütung der Erosion des Oberrheins durch maschinelle Kiesförderung aus der Talaue ins Strombett" vor. Sie wurde mit Bericht vom 23.5.1969 von der BAW dem BMV vorgelegt mit dem Hinweis, daß eine Stellungnahme hierzu ohne genauere Untersuchungen technischer und wirtschaftlicher Art noch nicht möglich sei.

Die Studie, die in etwas verallgemeinerter Form auch veröffentlicht wurde [10], [14], zieht aus der Morphogenese des Oberrheins den Schluß, daß es flußbaulich sinnvoll sein kann, das unterhalb der jeweils letzten Staustufe abgehende Sohlenmaterial durch Kies zu ersetzen, welcher aus der seitlichen Talniederung maschinell entnommen und in das Strombett eingebracht wird. Die Studie führt ferner aus:

Während bei den beiden anderen ins Auge gefaßten Alternativlösungen gegen die fortschreitende Vertiefung der Stromsohle, nämlich der Fortführung der Kanalisierung und der Sohlenpanzerung mittels einer Abdeckschicht aus größeren, sich nicht fortbewegenden Steinen, die

Erosion am jeweils unteren Ende der Ausbaustrecke neu einsetzt, ist beim vorgeschlagenen Verfahren der Geschiebenachschub, dessen Fehlen die Erosion verursacht, gewährleistet.

Daß dieses Verfahren auch wirtschaftliche Vorteile haben kann, zeigt ein überschlägiger Kostenvergleich, demzufolge die bei Kanalisierung, Panzerung und maschineller Geschiebezuführung aufzubringenden Jahreskosten sich etwa wie 50:10:6 verhalten.

6.2.2 Das Arbeitsprogramm für einen Probetrieb

Im Jahre 1974 beauftragte der BMV die WSD Freiburg und die BAW, eine Darstellung der mit einem Naturversuch einer Geschiebezugabe unterhalb der Staustufe Gamsheim verbundenen Schwierigkeiten aufzuzeigen und die letztere, ein Rahmenprogramm (Einsatzplan) für die Geschiebezugabe aufzustellen. Ferner beauftragte er die WSD Freiburg, unverzüglich die Vorbereitungen für einen Naturversuch der Geschiebezugabe unterhalb der Staustufe Gamsheim aufzunehmen. Der Naturversuch soll nach Einsetzen der Erosion im Unterwasser der Staustufe Gamsheim beginnen.

Der Großversuch soll folgende Fragen beantworten:

1. Kann der NW-Spiegel im Unterwasser der letzten Staustufe nach Einsetzen der Erosion wieder auf die Ausgangshöhe angehoben werden?
2. Mit welchen technischen Methoden kann das Kiesmaterial genau und wirtschaftlich eingebaut werden (Einbauvorgang)?
3. Wie wirkt sich die Geschiebezugabe auf die Sicherheit und Leichtigkeit des Verkehrs aus, und zwar unmittelbar an der Einbaustelle und weiter unterstrom?
4. Treten in der unterstrom anschließenden Strecke Veränderungen gegenüber dem natürlichen Geschiebetrieb ein?

Gleichlaufend mit dem Naturversuch ist in einem Modellversuch über dieselbe Rheinstrecke zu prüfen, wie sich größere Hochwässer, die vermutlich in der kurzen Versuchszeit von vielleicht einem Jahr kaum auftreten werden, auf Kosten und Geschiebezugabe auswirken können.

Die Durchführung des Probetriebes ist eine Aufgabe der WSD Freiburg und ihres WSA Offenburg, wobei die BAW beratend bei der Vorbereitung und Durchführung der Naturversuche mitwirkt, ferner bei der Auswertung ihrer Ergebnisse und bei Spezialmessungen und -auswertungen (EDV). Zu den letzteren Arbeiten gehört das Plotten der Querprofile nach Sohlenpeilungen und der Tiefenlinienpläne und die Berechnung von Flächeninhalten und Kubaturen.

Die BAW führt während des Naturversuchs die bodenmechanischen Kontrollen durch. Ihre Aufgabe ist es, zu gewährleisten, daß das angelieferte, von Schuten auf die Rheinsohle zu verklappende Kiesgemisch die erforderlichen Eigenschaften aufweist und festzustellen, welche Kornverteilung und welche Lagerungsdichte der Kies der Rheinsohle vor, während und nach der Geschiebezufuhr aufweist.

Die BAW hat ferner ein Arbeitsprogramm aufgestellt für den Einsatz von Luminophoren.

Für die Untersuchung der Geschiebeverfrachtung bietet sich die Beimischung von markiertem Material an. Gegenüber der Verwendung von radioaktiven Tracern ist, vor allem wegen der Strahlungsgefahr, der Markierung durch fluoreszierende Farben der Vorzug zu geben. Vorversuche im Laboratorium der Fachgruppe Geologie der BAW in Kiel ergaben, daß sich das Rheingeschiebe mit fluoreszierten Farben markieren läßt, und daß die Methode einsetzbar ist.

Die gefärbten Tracer werden während einer begrenzten Zeitdauer dem zu verklappenden Kies beigegeben. In mehreren Kontrollprofilen unterstrom davon sowie in den voraussichtlichen Ablagerungsbereichen wird durch wiederholte Probeentnahmen mittels Greifer das Durchwandern des markierten Materials oder seine Ablagerung zeitlich erfaßt.

6.3 Voruntersuchungen mit Grundswellen

Neben der Errichtung weiterer Staustufen, der Sohlenpanzerung und der Geschiebezugabe soll als weitere Möglichkeit zur Verhütung der Sohlenerosion auch der Einbau von Grundswellen in die Untersuchungen einbezogen werden, wobei u.U. auch eine Kombination einzelner Maßnahmen infrage kommt.

Die BAW hat ein Programm für die Durchführung entsprechender Modellversuche vorgelegt. Vorausgehend führte sie in der vorhandenen, im Abschnitt 4.9 genannten Versuchsrinne Testversuche mit Grundswellen und einem über sie hinwegfahrenden Modellschiff durch, worüber im Heft 36 (1974) dieses Mitteilungsblattes berichtet wurde [18].

7. Schrifttum

- [1] DIETZ, J.W. : Modelluntersuchung der Schleusenvorhöfen an der Rheinstaustufe Iffezheim. Mitt.Bl.d.BAW 21 (1973) H.35, S.90-121
- [2] DIETZ, J.W. und PULINA, B. : Modellversuche für die Rheinstaustufe Iffezheim. Zeitschrift für Binnenschifffahrt und Wasserstraßen 101 (1974) H.1, S.5-14
- [3] DIETZ, J.W. und PULINA, B. : Tosbecken und Sohlensicherung am Rheinwehr Iffezheim. Wasserwirtschaft (erscheint 1975)
- [4] FELKEL, K. und CANISIUS, P. : Elektronische Berechnung von Wasserspiegellagen. Mitt.Bl.d.BAW, H.23 (1966), S.93-105
- [5] FELKEL, K. und CANISIUS, P. : Rechenautomatenprogramm zur Spiegelberechnung für ausufernde Hochwässer. Die Wasserwirtschaft 57 (1967), H.8, S.308-314

- [6] FELKEL, K. : Hydraulische Probleme beim Rheinausbau
Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen.
Sonderheft 1969
- [7] FELKEL, K. : Rechenautomatenprogramm zur Berechnung der
als Folge der Geschiebebewegung eintretenden
Veränderungen der Höhenlage der Flußsohle
und des Wasserspiegels. Deutsche Berichte
zum XXII. Internat. Schiffahrtskongreß Paris
1969, herausgeg. v. Bundesministerium für
Verkehr, Bonn 1969, S.122-144 sowie
Programme pour le calcul par ordinateur des
modifications du niveau du fond et de la sur-
face des eaux dans une rivière par suite de
charriage. XXII.Congrès International de Naviga-
tion. Paris 1969, Section I, Sujet 5
- [8] FELKEL, K. : Der Weg zum vollständigen mathematischen Fluß-
modell. Mitt.Bl.d.BAW H.28 (1969), S.71-88
- [9] FELKEL, K. : Die Erosion des Oberrheins zwischen Basel und
Karlsruhe. GWF (Wasser-Abwasser) 110 (1969),
H.30, S.801-810
- [10] FELKEL, K. : Ideenstudie über die Möglichkeit der Verhütung
von Sohlenerosionen durch Geschiebezufuhr aus
der Talaue ins Flußbett, dargestellt am Bei-
spiel des Oberrheins. Mitt.Bl.d.BAW H.30 (1970),
S.21-29
- [11] FELKEL, K. und
STÖRMER, H.-E. : Die Geschiebemeßgeräte an der Rheinsohle beim
Pegel Maxau und der Einfluß der Schifffahrt auf
den Geschiebetrieb. Die Wasserwirtschaft 60
(1970), H.11, S.357-362
- [12] FELKEL, K. und
STEINWELLER, H. : Natur- und Modellversuche über die Wirkung der
Schiffe auf Flußsohlen aus Grobkies (Breisacher
Versuche), Wasserwirtschaft 62 (1972) H.8,
S.243-249 sowie
Full-size and model tests with respect to the
effect of vessels upon river beds of coarse
gravel (Breisach tests). Translation No.74-5.
U.S. Army Engineer Waterways Experiment Sta-
tion. Corps of Engineers Vicksburg, Mississippi,
April 1974
- [13] FELKEL, K. : Das Sohlenkorn des Rheins zwischen Straßburg
und Bingen. Mitt.Bl.d.BAW H.32 (1972) S.75-87
- [14] FELKEL, K. : Die Wechselbeziehung zwischen der Morphogene-
se und dem Ausbau des Oberrheins. Jahresberich-
te und Mitteilungen des Oberrheinischen Geolo-
gischen Vereins (N.F.) 54 (1972) S.23-44

- [15] FELKEL, K. und STEINWELLER, H. : Druck und Strömung unter im Kanal fahrenden Schiffen (Kriegenbrunner Messungen). Schiff und Hafen 25 (1973) H.8, S.691-696
- [16] FELKEL, K. und STEINWELLER, H. : Strömung, Druck und Geschiebebewegung unter Binnenschiffen bei Niedrigwasser. Zeitschrift für Binnenschifffahrt und Wasserstraßen 100 (1973) H.1, S.24-29
- [17] FELKEL, K. : Déformation du fond mobile d'un fleuve par l'action simultanée du débit et des bateaux. XV.Congrès de l'Association Internationale de Recherches Hydrauliques. Comptes-rendus Vol.1, pp A 11.1-A 11.8 (Sept.1973)
- [18] FELKEL, K. : Modellversuche mit Grundswellen und Schifffahrt. Mitt.Bl.d.BAW, H.36 (1974) S.19-38
- [19] FELKEL, K. : Modellversuche über die Auswirkung der Leistungssteigerung der Schubboote auf die Stromsohle. Wasserwirtschaft, voraussichtlich 65 (1975), H.11.

