

# HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

---

Conference Paper, Published Version

**Jurisch, Rainer; Krajewski, Christian; Recker, Heinz-Josef; Rödiger, Hartmut; Timon, Adolf**

## **Verbesserung und Unterhaltung der Fahrrinntiefe in Gewässern mit alluvialer Sohlengeometrie durch Regelung der Gewässergeometrie**

Deutsche Beiträge. Internationaler Schifffahrtskongress (PIANC)

Zur Verfügung gestellt in Kooperation mit/Provided in Cooperation with:  
**PIANC Deutschland**

---

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/104796>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Jurisch, Rainer; Krajewski, Christian; Recker, Heinz-Josef; Rödiger, Hartmut; Timon, Adolf (1981): Verbesserung und Unterhaltung der Fahrrinntiefe in Gewässern mit alluvialer Sohlengeometrie durch Regelung der Gewässergeometrie. In: PIANC Deutschland (Hg.): Deutsche Beiträge. 25. Internationaler Schifffahrtskongreß; Edinburgh, Großbritannien, 10. - 16. Mai 1981. Bonn: PIANC Deutschland. S. 62-102.

### **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 3

#### Verbesserung und Unterhaltung der Fahrrinntiefe in Gewässern mit alluvialem Sohlenmaterial durch Regelung der Gewässergeomtrie

##### Berichtersteller:

Dipl.-Ing. Rainer Jurisch, Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe  
Dipl.-Ing. Christian Krajewski, Bauoberrat, Wasser- und Schifffahrtsdirektion Südwest, Mainz  
Heinz-Josef Recker, Baudirektor, Wasser- und Schifffahrtsamt Mannheim, Mannheim  
Dipl.-Ing. Hartmut Rödiger, Baudirektor, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz  
Dipl.-Ing. Adolf Timon, Baudirektor, Wasser- und Schifffahrtsdirektion West, Münster

#### Zusammenfassung

##### Naturmessungen

Die Höhe der Flußsohle wird am Rhein mit Meßschiffen überwacht. Das auf dem Rhein eingesetzte Meßschiff „Bingerbrück“ besitzt eine Echolotanlage zur Tiefenmessung, die mit einer Anlage zur zweidimensionalen elektromagnetischen Ortung gekoppelt ist. Für die Tiefenmessung sind am Schiffsboden 41 Schwinger in 1 m Abstand in einer Reihe befestigt. Dadurch kann die Flußsohle in einem Punktraster von 1 x 1 m „flächenhaft“ vermessen werden. Die Messungen werden mit Hilfe einer Datenverarbeitungsanlage bei der Bundesanstalt für Wasserbau automatisch ausgewertet. Zeichenautomaten (Plotter) stellen Querprofile und Tiefenlinienpläne her.

Zur Bestimmung der Wasserspiegelhöhen entlang des Flusses wurde am Niederrhein ein Wasserstandsrohr entwickelt.

##### Modellversuche

Bei Modellversuchen mit Sedimenttransport ist vor Versuchsbeginn die Kenntnis notwendig, ob das Sediment als Schwebstoff oder als Geschiebe im Fluß befördert wird. Im Falle eines Schwebstofftransportes sind für die Ähnlichkeit die Reynolds'sche Zahl des Kornes  $Re$  und der Shields-Parameter  $\tau_*$  in Natur und Modell gleichzusetzen. Wird das Sediment vorwiegend als Geschiebe transportiert und ist  $Re > 60$ , so kann der Einfluß der Reynolds'schen Zahl des Kornes vernachlässigt werden. Jedoch muß der Einfluß der Rauigkeit berücksichtigt werden. Unsicherheiten und Ungenauigkeiten beim Modellbetrieb werden durch eine Veränderung des rechnerisch grob festlegbaren Zeitmaßstabes ausgeglichen. Die praktische Anwendung dieser Überlegungen wird am Beispiel zweier Modellversuche bei der Bundesanstalt für Wasserbau gezeigt, und zwar eines Modells mit Schwebstofftransport der Ems bei Bollingerfähr und eines Modells mit Geschiebetransport des Rheins bei Gamsheim.

### **Oberrhein**

Der Erfolg der seit 1967 durchgeführten Regelungsarbeiten am Oberrhein zur Vertiefung der Fahrrinne zwischen Neuburgweier/Lauterburg und Mannheim wurde überprüft. Es ergab sich eine befriedigende Übereinstimmung mit den Ergebnissen der Modellversuche und der Planung. Hauptsächlich durch den Bau oder die Vergrößerung von Buhnen wurden nachteilige Ablagerungen von Geschiebe in der Fahrrinne verhindert oder zumindest vermindert. Aufgrund der Überprüfungen der Sohlenverhältnisse ist geplant, ergänzende Regelungsarbeiten auszuführen.

### **Rheingau**

Die Fahrrinne wurde durch Regelungsarbeiten vertieft. Um die großen Wasserflächen jenseits der Streichlinien zu erhalten, wurde auf den Bau von Buhnen weitgehend verzichtet. Der angestrebte Erfolg wurde mit Hilfe von Parallelwerken erreicht, die bei Mittelwasser überströmt wurden.

### **Niederrhein**

Entlang des Niederrheins wurde in den Vorländern Kies gewonnen. Dadurch entstanden größere Abflußquerschnitte, die sich ungünstig auf die Geschiebebewegung auswirkten. Durch den Bau von Leitdeichen werden die Abflußquerschnitte so verkleinert, daß diese Nachteile beseitigt werden.

Der Kolk in der Stromkrümmung bei Rees wurde, um Fehltiefen am Rande der Fahrrinne zu beseitigen, mit sandgefüllten Nylon-Säcken teilweise aufgefüllt.

Durch den Bergbau unter dem Rhein werden Stromsohle und Wasserspiegel abgesenkt. Zugleich sinkt der Wasserspiegel ober- und unterstrom der Kolke ab. Um Nachteile für den Strom und die Umschlaganlagen am Strom auszuschließen, müssen die Kolke wieder aufgefüllt werden.

Für Regelungsarbeiten, die weder eine Erhöhung des Hochwassers noch eine Verstärkung der Erosion zur Folge haben dürfen, werden bewegliche Regelungsbauwerke erprobt. Diese werden als Membranbuhnen ausgebildet, die bei niedrigen Wasserständen mit Wasser gefüllt sind und damit den Querschnitt einschränken. Bei höherem Wasserstand entleeren sie sich selbsttätig und liegen flach auf der Stromsohle.

### **Untere Elbe**

In einem rd. 20 km langen Abschnitt der unteren Elbe wurde zwischen 1936 und 1963 eine Niedrigwasserregelung mit Buhnen zur Verbesserung der Schiffbarkeit ausgeführt. Nach den Bauarbeiten wurden in diesem Abschnitt scharf abgegrenzte Bereiche mit verschiedenem Sohlenverhalten festgestellt. Einige Bereiche wiesen festliegende Sandbänke und optimale Tiefen auf, während andere Bereiche wandernde Sandbänke und unzureichende Tiefen zeigten. Letztere waren der Anlaß, das unterschiedliche Sohlenverhalten zu erforschen. Verschiedene hydraulische Parameter wurden mit dem Ergebnis

verglichen, daß Mängel im Ausbaukonzept als Ursache wahrscheinlicher sind als die nicht fertiggestellten Regulierungsmaßnahmen eines kurzen Zwischenabschnittes. Beim Vergleich verschiedener hydraulischer Größen erhalten die Abfluß-Gefälle-Beziehungen eine besondere Bedeutung.

## I n h a l t

1. Allgemeine Einführung .....	64
2. Naturmessungen und deren Auswertung (Krajewski, Timon) .....	65
3. Modellversuche mit Feststofftransport (Jurisch) .....	69
4. Regelungsarbeiten am Rhein .....	78
4.1 Situation und Ziele des Ausbaues (Krajewski) .....	78
4.2 Oberrhein zwischen Neuburgweier/Lauterburg und Mannheim (Recker) .....	79
4.3 Rheingau (Krajewski) .....	84
4.4 Niederrhein (Timon) .....	85
5. Möglichkeiten der Erfolgskontrolle einer Niedrigwasserregelung im Flachlandfluß, dargestellt am Beispiel der unteren Elbe (Rödiger) .....	90

### Schrifttumsverzeichnis

Hinweis: Im Berichtstext eingeklammerte Ziffern – [1] usw. – verweisen auf das Schrifttumsverzeichnis

## 1. Allgemeine Einführung

Das Netz der Binnenschiffahrtsstraßen in der Bundesrepublik Deutschland ist ca. 4.100 km lang. Davon entfallen ca. 930 km auf alluviale Flußstrecken von Rhein, Weser, Elbe und Donau, die bei freiem Abfluß geregelt sind. Unter diesen nimmt der frei fließende Teil des Rheins mit ca. 500 km Streckenlänge hinsichtlich seines Verkehrsaufkommens eine überragende Bedeutung ein. Im Jahre 1979 wurden 74 % der gesamten Transportleistung der Binnenschiffahrtsstraßen auf dem Rhein erbracht.

Die heutigen Schiffahrtsverhältnisse auf den frei fließenden Flüssen wurden überwiegend durch die Regelungsarbeiten in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts oder zu Beginn des 20. Jahrhunderts geschaffen. Damals wurden die Ufer durch Deckwerke gesichert und die Fahrrinnen durch den Einbau von Querwerken (Buhnen), Parallelwerken und Grundswellen vertieft. Neben der Unterhaltung dieser Bauwerke wurden aber auch

in jüngerer Zeit noch Verbesserungen zur weiteren Vergrößerung der Fahrrinntiefe vorgenommen. Über letztere, die den Charakter von Nachregelungsarbeiten haben, soll im vorliegenden Beitrag anhand von Beispielen von Rhein, Elbe und Ems berichtet werden. Dabei wird besonders auf die technischen Methoden für die Planung und die Erfolgskontrolle eingegangen.

## 2. Naturmessungen und deren Auswertung

### 2.1 Gewässergeometrie

Die Form des Flußbettes wird in Querprofilen und Tiefenlinienplänen dargestellt. Hierzu werden auf den Wasserstraßen Meßschiffe mit Echolotanlagen eingesetzt.

Seit einigen Jahren sind Verfahren in Gebrauch, bei denen der gesamte Ablauf zur Herstellung der Querprofile und Tiefenlinienpläne – Tiefen- und Lagemessung an Bord; Prüfung, Auswertung und Zeichnung im Büro – mit Hilfe von Datenverarbeitungsanlagen automatisiert ist. Dadurch ist es möglich, mit geringem Personalaufwand zu arbeiten und zugleich häufiger als früher zu peilen. Die häufigen Peilungen helfen, die Tendenzen zu Veränderungen der Sohlenverhältnisse schneller und klarer zu erkennen.

Zur Erfassung der großräumigen Gewässergeometrie werden – wie früher – Peilungen der Querprofile in 100 m Abstand ausgeführt und zu Tiefenlinienplänen ausgewertet. Will man die Tiefe in einzelnen Teilen des Flußbettes – z.B. in der Fahrrinne – genauer kennenlernen, so bedient man sich jedoch der sogenannten „flächenhaften“ Sohlenaufnahme.

Zur flächenhaften Vermessung ist auf dem Rhein das Schiff „Bingerbrück“ im Einsatz. (Bild 1)

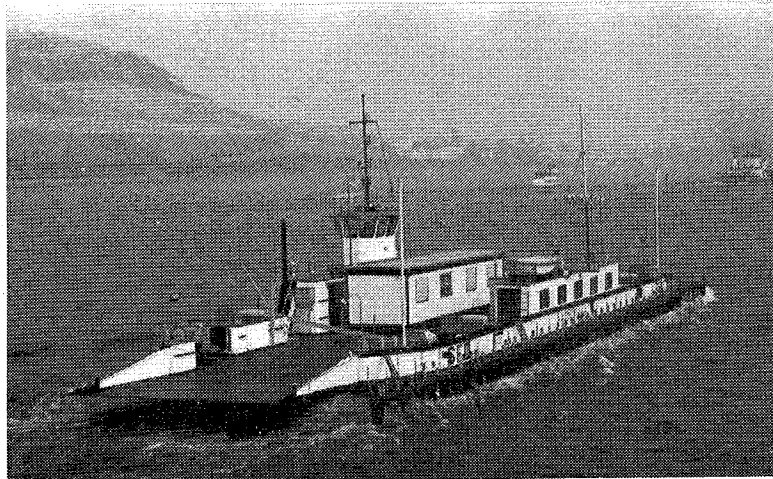


Bild 1: Vermessungsschiff „Bingerbrück“ mit 40 Echoloten nebeneinander zur „flächenhaften“ Sohlenaufnahme

Das Schiff besitzt 41 Schwinger, die in jeweils 1 m Abstand an einer Bordwand in Längsrichtung befestigt sind. Mit Hilfe von 4 Antrieben – an jeder Ecke einer – fährt das Schiff während der Messung quer zu seiner Längsachse und überstreicht einen 40 m breiten Streifen. Die von den Echoloten gemessenen Tiefenwerte werden laufend auf einem Papierstreifen – der Bodenkarte (Abb. 2) –, einem Bildschirm und auf Magnetband registriert. Bodenkarte und Bildschirm dienen zur aktuellen Kontrolle der Flußsohle. Die Höhe des Schiffes über Normal-Null (Meereshöhe) wird laufend nivellistisch von Land aus bestimmt, um die Wirkungen von Wasserspiegelschwankungen und Gefälle auszuschalten.

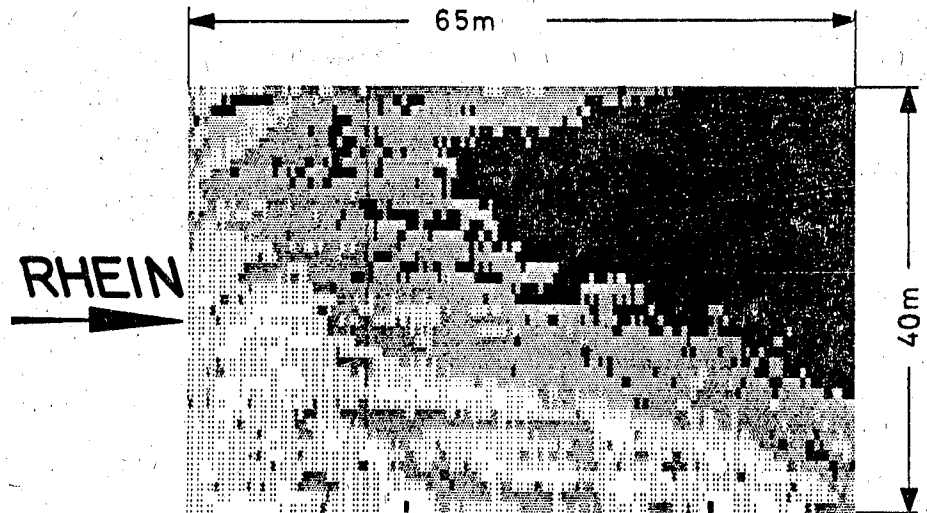


Abb. 2: Bodenkarte, automatisch aufgezeichnet durch die Meßeinrichtung an Bord der „Bingerbrück“, Abstufung von 15 cm zu 15 cm Tiefe

Die Tiefenmessung ist direkt mit einer Anlage zur zweidimensionalen Lagebestimmung gekoppelt. Hierzu wird die Lage des Schiffes durch elektronische Entfernungsmessungen zu zwei Landstationen bestimmt. Zugleich wird der Winkel der Schiffsachse gegen die Nordrichtung registriert. Aus diesen beiden Messungen werden laufend die Lage-Koordinaten jedes einzelnen der 41 Echolote berechnet und den Tiefenwerten der Echolotanlage zugeordnet. Meß- und Fahrgeschwindigkeit des Schiffes sind so aufeinander abgestimmt, daß je Quadratmeter Flußsohle etwa ein Punkt registriert wird.

Das Meßschiff ist nicht an Profilmfahrten gebunden. Die beste Meßleistung ergibt sich bei Fahrten in Längsrichtung des Flusses (ca. 50.000 – 100.000 m<sup>2</sup> am Tag). Der Kurs des Schiffes wird während der Fahrt von einem Plotter aufgezeichnet und auf Magnetbändern zusammen mit den Tiefenwerten gespeichert.

Die Magnetbänder werden im Rechenzentrum der Bundesanstalt für Wasserbau automatisch ausgewertet. Hierzu wird zunächst jeder einzelne Meßwert auf Plausibilität über-

prüft, um z.B. Fehlechos infolge von Luftblasen auszuschalten. Sodann werden mit Zeichenautomaten Tiefenlinienpläne hergestellt. Es kann jede beliebige Tiefenlinie gezeichnet werden. (Abb. 3)

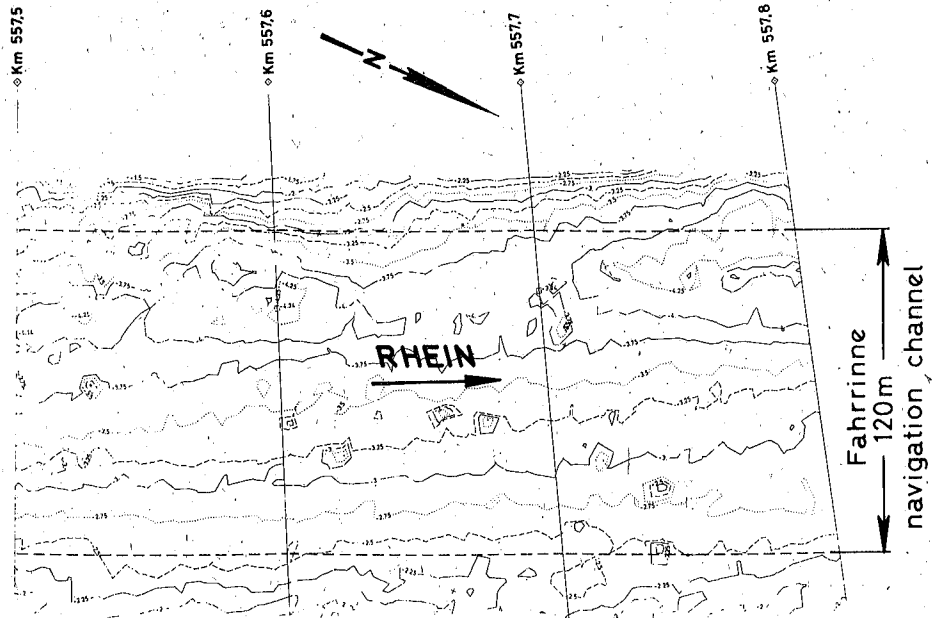


Abb. 3: Tiefenlinienplan, aus Messungen der „Bingerbrück“ bei der Bundesanstalt für Wasserbau automatisch berechnet und gezeichnet

## 2.2 Abflüsse und Wasserspiegellagen

Bezugswasserstand für die Fahrrinntiefe ist am Rhein der „Gleichwertige Wasserstand“ (GIW), der in langjährigen Mitteln an 20 eisfreien Tagen im Jahr unterschritten wird. Der GIW wird zunächst aufgrund von Abfluß- und Wasserstandsmessungen an den Hauptpegeln bestimmt. Die Wasserspiegelmessungen für die Strecken zwischen den Hauptpegeln werden am Ober- und Mittelrhein in Abständen von 100 m bis 200 m jeweils auf beiden Ufern durchgeführt. Die Fixierung wird mit Holzpfählen ausgeführt, an denen der Wasserspiegel markiert und eingemessen wird. Während der Messung wird der Schiffsverkehr für 3 bis 4 Stunden gesperrt. Da dies am Niederrhein nicht möglich ist, mußten dort neue Meßverfahren und -geräte entwickelt werden. Zum Einmessen des Wasserspiegels dient ein mit einer Spitze versehenes Eisenrohr von 60 mm Durchmesser, in das zwei gegenüberliegende Löcher mit Durchmessern von 3 mm gebohrt sind. Das Rohr wird am Ufer im Wasser soweit eingeschlagen, daß die Löcher über der Sohle bleiben. Bei Steindeckwerken wird das Rohr zwischen den Steinen eingekeilt. Die Oberkante des Rohres wird einnivelliert und der beruhigte Wasserstand im Rohr mit einem Schwimmer zur

Rohroberkante eingemessen. Die Genauigkeit dieser Wasserspiegeleinmessung beträgt  $\pm 1$  cm (Abb. 4).

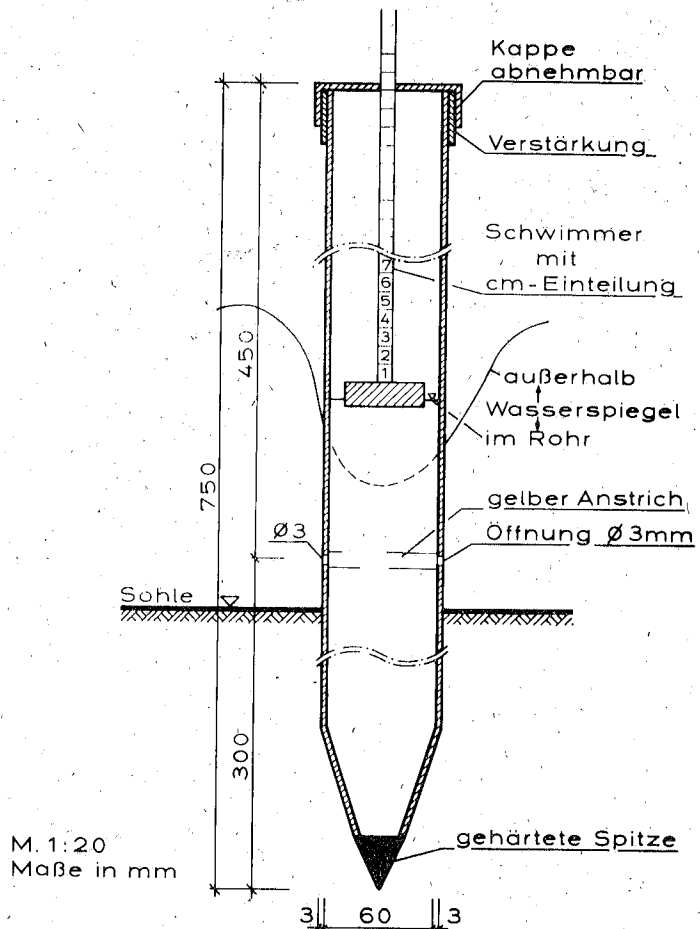


Abb. 4: Wasserstandsrohr zum Einmessen des Wasserstandes am Ufer

Da bei den Fixierungen, die ja eine Vorbereitungszeit von einigen Tagen benötigen, so gut wie nie genau der GIW erfaßt werden kann, müssen die gemessenen Wasserspiegellinien schließlich auf GIW umgerechnet werden.

Durch Vergleich der GIW-Linien vor, während und nach dem Ausbau einer Flußstrecke kann die Auswirkung auf den Wasserspiegel und – anhand des mit GIW als Bezugshorizont dargestellten Tiefenlinienplanes – der Erfolg der Ausbaumaßnahmen festgestellt werden.



### 2.3 Sonstige Messungen

Für hydraulische Untersuchungen alluvialer Flußstrecken sind Aufschlüsse über die Art des Bettmaterials und seine Bewegung notwendig. Diese werden am Rhein mit verschiedenen Methoden gewonnen:

- Bohrungen vom Schiff aus, und zwar Greiferbohrungen für gestörte Proben und Kernbohrungen für ungestörte Proben
- Greiferentnahmen vom Schiff aus mit einem neu entwickelten Greifer und Auswertung an Bord.
- Schürfen und Sondierungen im Taucherglockenschiff
- Beobachtung der Flußsohle mit einer Unterwasser-Fernsehkamera [8]
- Geschiebemessungen mit Geschiebefänger Typ Arnhem/BfG [7]
- Akustische Geschiebemessungen [4]
- Strömungsmessungen mit Schwimmer und Ortungstachygraph [9]

Mit Geschiebefängern werden vom Schiff aus in ca. 30 Meßquerschnitten des Rheins viermal jährlich Geschiebemengen bestimmt. Die akustischen Meßgeräte sind in zwei Meßquerschnitten des Oberrheins eingebaut und zählen kontinuierlich die Zahl der Steinanschläge als Maß für die Intensität des Geschiebetriebes.

## 3. Modellversuche mit Feststofftransport

### 3.1 Allgemeines

Eine theoretische Vorhersage der Veränderungen von Flußsohlen ist mit den bisher in der Literatur beschriebenen Gleichungen nur bedingt möglich. Andererseits ist eine solche Vorhersage von enormer Bedeutung für die Praxis. Aus diesem Grunde werden immer wieder Modelluntersuchungen notwendig, in denen die bei allen denkbaren Abflußzuständen sich ausbildenden Ablagerungen und Erosionszonen naturähnlich dargestellt werden sollen. Hierbei entsteht jedoch die Schwierigkeit, daß bei Untersuchungen mit beweglicher Sohle neben den Ähnlichkeitsbedingungen für offene Gerinneströmungen noch zusätzliche Einflüsse berücksichtigt werden müssen. Diese betreffen vor allem die Längenmaßstäbe und den Zeitmaßstab sowie das Sedimentmaterial. Im folgenden wird auf die Ähnlichkeitsbedingungen bei Modellen mit Feststofftransport kurz eingegangen, und die Untersuchungen für je einen Geschiebe- und einen Schwebstoff führenden Fluß werden beschrieben.

### 3.2 Ähnlichkeitsbedingungen

Allgemein kann auf Grund der in der Literatur beschriebenen Untersuchungen festgestellt werden, daß die Menge  $g_s$  des transportierten Sediments abhängt vom Korndurchmesser  $d$  des Materials, der Wassertiefe  $h$ , dem Wasserspiegelgefälle  $J$  und den Stoffeigenschaften des Sediments [6]. Es kann somit geschrieben werden:

$$f(g_s; d; h; J; \rho; g) = 0 \quad (1)$$

Mit Hilfe des  $\pi$ -Theorems von Buckingham kann hieraus eine dimensionslose Beziehung entwickelt werden, deren Parameter die dimensionslose Feststofftransportzahl  $g_* = g_s / \rho_s \cdot d \cdot v_*$ , Die Reynolds-Zahl des Kornes  $Re_* = v_* \cdot d / \nu_w$ , der Shields-Parameter  $\tau_* = \tau_o / (\gamma_s - \gamma_w) \cdot d$ , das Verhältnis der spezifischen Gewichte  $S = \gamma_w / \gamma_s - \gamma_w$  und das der geometrischen Größen  $T = h/d$  sind;  $v_* = \sqrt{\tau_o / \rho}$ . Alle in der Literatur beschriebenen Gleichungen können nach Umrechnungen mit diesen Parametern dargestellt werden.

Betrachtet man die lotrechte Verteilung des Sediments in einer turbulenten Strömung, so kann gezeigt werden, daß diese Schwebstoffverteilung nur von  $\tau_*$  und  $Re_*$  abhängt [5].

Wenn diese Werte in der Natur und in einem geometrisch ähnlichen Modell gleich sind, dann ist auch die Konzentrationsverteilung in der Lotrechten im Modell naturähnlich. Damit gelten für Modelle mit Schwebstofftransport folgende Bedingungen:

$$Re_{*p} = Re_{*m} : L_r^{-0.5} \cdot h_r \cdot d_r = 1 \tag{2}$$

$$\tau_{*p} = \tau_{*m} : L_r^{-1} \cdot h_r^2 \cdot d_r^{-1} \cdot \Delta \rho_r^{-1} = 1 \tag{3}$$

aus (2) und (3) ergibt sich:

$$h_r^3 = \Delta \rho_r \cdot L_r^2 \tag{4}$$

Unter Verwendung der Indices p für Prototyp-, m für Modellwert und r für das Verhältnis Natur- zu Modellwert bedeuten die verwendeten Bezeichnungen die folgenden Werte:

- L ..... Längen;
- h ..... Höhen
- d ..... Korndurchmesser;
- $\Delta \rho$  .....  $\rho_s - \rho_w$

Bei dem Vorgang des Schwebstofftransports ist der Einfluß der Rauigkeit, der sich beispielsweise in Reibungsverlusten ausdrückt, vernachlässigbar. Wird das Sediment dagegen an der Sohle als Geschiebe transportiert, so sind die Rauigkeitseinflüsse von großer Bedeutung. Nimmt die Reynolds'sche Zahl des Kornes  $Re_*$  Werte an, die größer als 60 liegen, so kann in diesem Falle und vorwiegendem Geschiebetransport die Bedingung (2)  $Re_{*r} = 1$  entfallen. Die Rauigkeit in Beziehung zum Korndurchmesser muß hingegen berücksichtigt werden. Somit sind zwei Bedingungsgleichungen für die Ähnlichkeit von Modellen mit Geschiebetransport einzuhalten:

$$\tau_{*p} = \tau_{*m} : L_r^{-1} \cdot h_r^2 \cdot d_r^{-1} \cdot \Delta \rho_r^{-1} = 1 \tag{5}$$

Rauigkeitsbedingung:  $L_r^3 \cdot h_r^{-4} \cdot d_r = 1 \tag{6}$

Nach der Wahl bzw. Bestimmung der Maßstäbe  $L_r$ ,  $h_r$ ,  $d_r$  und  $\Delta \rho_r$  ist noch der Zeitmaßstab  $t_r$  zu ermitteln. Dieser ist besonders bedeutsam für die Dauer der Versuche. Im allgemeinen ist er nicht frei wählbar. Für seine Bestimmung muß gefordert werden, daß die dimensionslose Feststofftransportzahl  $g_*$  in Modell und Natur gleich sind. Somit errechnet sich der sedimentologische Zeitmaßstab  $t_{s,r}$  zu:

$$t_{s,r} = \frac{L_r^{3/2}}{d_r} \cdot P_r \tag{7}$$

$p_r$  bedeutet den Maßstab für die Lagerungsdichte. Er kann bei gleichen Kornverteilungskurven in Natur und Modell mit 1 angenommen werden. In hydraulischen Modellen für offene Gerinneströmungen, in denen das Froude'sche Ähnlichkeitsgesetz gültig ist, bestimmt sich der hydraulische Zeitmaßstab  $t_{H,r}$  zu

$$t_{H,r} = \frac{L_r}{h_r^{1/2}} \quad (8)$$

Der Zusammenhang zwischen den beiden Maßstäben wird durch Gleichung (9) wiedergegeben ( $p_r = 1$ ):

$$t_{s,r} = t_{H,r} \cdot \frac{L_r^{1/2} \cdot h_r^{1/2}}{d_r} \quad (9)$$

Bei der Wahl bzw. der Bestimmung der Maßstäbe werden in praktischen Fällen einige Unsicherheiten in Kauf genommen werden müssen. Durch Versuche, in denen der sedimentologische Zeitmaßstab variiert wird, können die eventuellen Ungenauigkeiten ausgeglichen werden. Dabei wird  $t_{s,r}$  so lange verändert, bis ein in der Natur abgelaufener Sedimentationsvorgang im Modell ähnliche Ergebnisse aufweist. Diese Anpassung von Modell- an Naturwerten vor allem von Erosions- und Anlandungszonen ist naturgemäß wieder abhängig von der Verfügbarkeit und der Menge von Naturdaten. Hierbei spielt die Genauigkeit dieser Daten eine wesentliche Rolle.

### 3.3 Beispiele von Modelluntersuchungen

Im folgenden wird je eine Modelluntersuchung mit überwiegend Schwebstoff- und Geschiebetransport beschrieben. Auf Grund der zur Verfügung stehenden Räumlichkeiten im Laboratorium und der bereits vorhandenen Materialien wurden in beiden Fällen  $L_r$  und  $\Delta\rho_r$  zu Versuchsbeginn festgelegt.

#### 3.3.1 Modell mit Schwebstofftransport

Für den Bereich unterhalb der Schleuse „Bollingerfähr“ an der Ems im Nordwesten Deutschlands mußten Modelluntersuchungen durchgeführt werden, da wegen Verlandungerscheinungen in der Fahrrinne Gefahren für die Schifffahrt zu befürchten waren. Die Ablagerung des sehr feinen Sandes ( $\gamma_s = 2.65 \text{ g/cm}^3$ ) mit einem Durchmesser von 0.2 – 0.4 mm trat an der Zusammenführung des Flusses und des Unterwasserkanals der Schleuse in diesem Kanal auf (Abb. 5), da hier sehr geringe Fließgeschwindigkeiten vorherrschten. In den Untersuchungen sollten Möglichkeiten zur Verhinderung der Verlandungerscheinungen gefunden werden.

Die äußeren Umstände ermöglichten für den Bau des Modells einen Längenmaßstab  $L_r = 50$ , als Sedimentmaterial wurde Polystyrol ( $\gamma_s = 1.05 \text{ g/cm}^3$ ) verwendet. Damit ergibt sich der Verhältniswert  $\Delta\rho$  zu 33, während aus Gleichung (4)  $h_r$  sich zu 23 errechnet. Aus Gründen der Einfachheit wurde  $h_r = 25$  gewählt.

Weiterhin errechnet sich der Maßstab für den Korndurchmesser mit diesen Werten aus Gleichung (2):

$$d_r = \frac{L_r^{0.5}}{h_r} = \frac{1}{3.5} \quad (10)$$

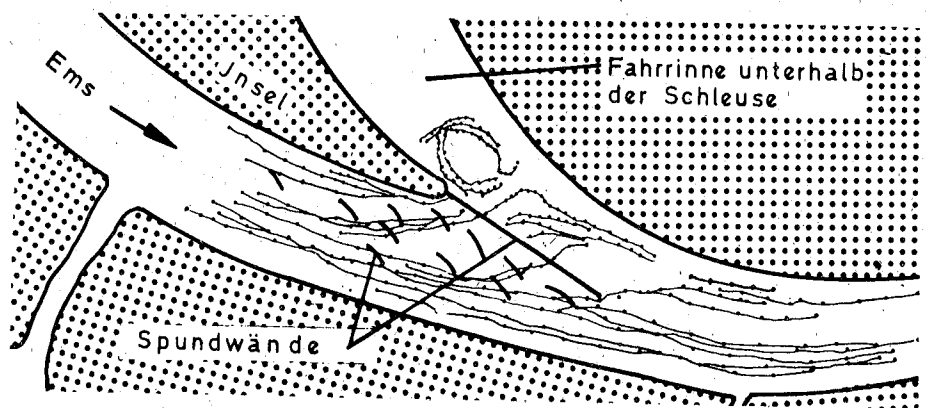
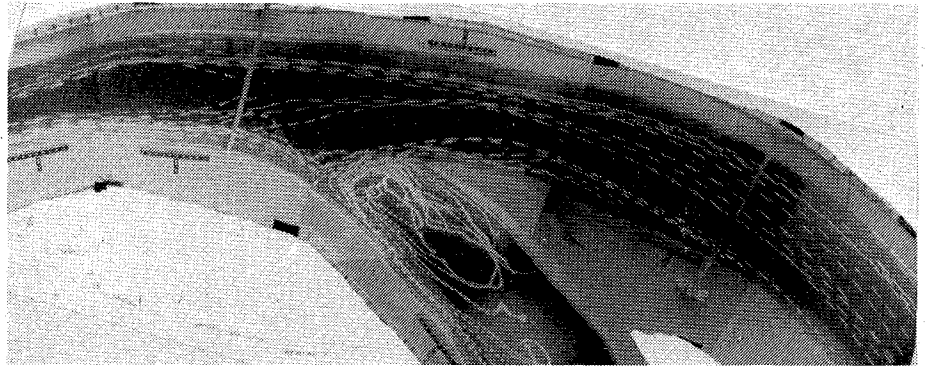


Abb. 5: Modell mit Schwebstofftransport der Ems bei Bollingerfähr.  
Oberflächenströmung im Modell (oben) und in der Natur (unten)

Das Material im Modell mußte also, damit eine naturähnliche Konzentrationsverteilung im Modell vorhanden war, einen 3,5 mal so großen Korndurchmesser aufweisen wie der in der Natur vorkommende Sand, also  $d_m = 0.7$  bis  $1.4$  mm.

Aus Naturmessungen waren außerdem die langjährige Entwicklung der Sohle, Geschwindigkeitsverteilungen in der Lotrechten und an der Wasseroberfläche bekannt.

In Bild 5 ist das Ergebnis einer Strömungsmessung in der Natur mit dem Ortungstachygraphen [9] im Vergleich zu einer Modellmessung wiedergegeben. Es ist deutlich die gute Übereinstimmung zwischen diesen beiden Messungen sowohl hinsichtlich der Größe als auch der Richtung der Geschwindigkeit zu erkennen. Insbesondere die Teilung der Strombahnen im Bereich der Inselfspitze macht die Ähnlichkeit der Natur- und Modellgeschwindigkeiten augenscheinlich. Diese Trennung wird durch Spundwände in diesem Bereich bewirkt, die die wegen der Flußkrümmung vorhandene Spiralströmung auf-

teilen. Entsprechend dieser Teilung wird auch der als Schwebstoff transportierte Sand teils am äußeren Ufer entlang befördert, teils wird er in den Schiffahrtskanal hinein geworfen. Hierbei bewirken die Einbauten bei entsprechenden Abflüssen eine Erhöhung des Schwebstofftransports, da sie die in der Strömung vorhandene Turbulenz wesentlich erhöhen. Die Folge hiervon ist, daß der an der Sohle transportierte Sand in Schwebgerät.

Bereits auf Grund der sehr ähnlichen Geschwindigkeitsverhältnisse und der Stromlinien war eine gute Ähnlichkeit zwischen Natur und Modell bezüglich der Sohlenverhältnisse zu erwarten. Tatsächlich war diese Ähnlichkeit zufriedenstellend, wie Abb. 6 zeigt.

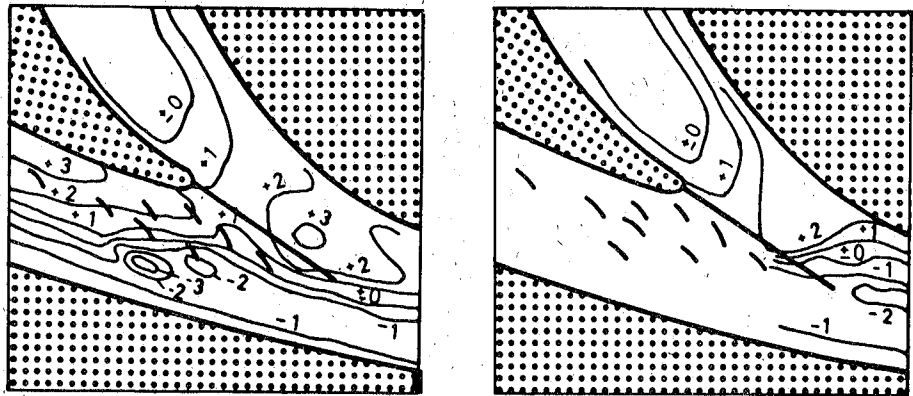


Abb. 6: Modell mit Schwebstofftransport der Ems. Linien gleicher Sohlenhöhen im Modell (links) und in der Natur (rechts)

Hierin sind die Ablagerungs- und Erosionszonen in Natur und Modell aufgetragen. Berücksichtigt man noch die Ungenauigkeiten der Naturmessungen und die Vereinfachungen im Modell, so ist die Übereinstimmung als sehr gut zu bezeichnen. Andererseits ist sie aber ein Kriterium für die Richtigkeit der Maßstabsbeziehungen. Auf Grund dieser Aussage konnten die Versuche intensiviert werden und führten schließlich zu der Notwendigkeit, die vorhandenen Spundwände in ihrer Zahl, ihrer Höhe und die Länge der an der Inselfspitze beginnenden Längswand zu ändern. Mit diesen Maßnahmen konnten die Sedimentablagerungen in solchen Größenordnungen gehalten werden, daß die Schifffahrt nicht länger behindert wird.

### 3.3.2 Modell mit Geschiebetransport

Die Erosion und das Verhalten der Flußsohle unterhalb einer Staustufe können zu Fehltiefen und Absenkungen des Wasserspiegels führen, die theoretisch nicht voll erfaßt werden können. Für den Bereich unterhalb der Rheinstaustufe Gamsheim (Abb. 10) sollten jedoch Prognosen über die Sohlenentwicklung des Rheins für praktisch mögliche Abflußverhältnisse gestellt werden.

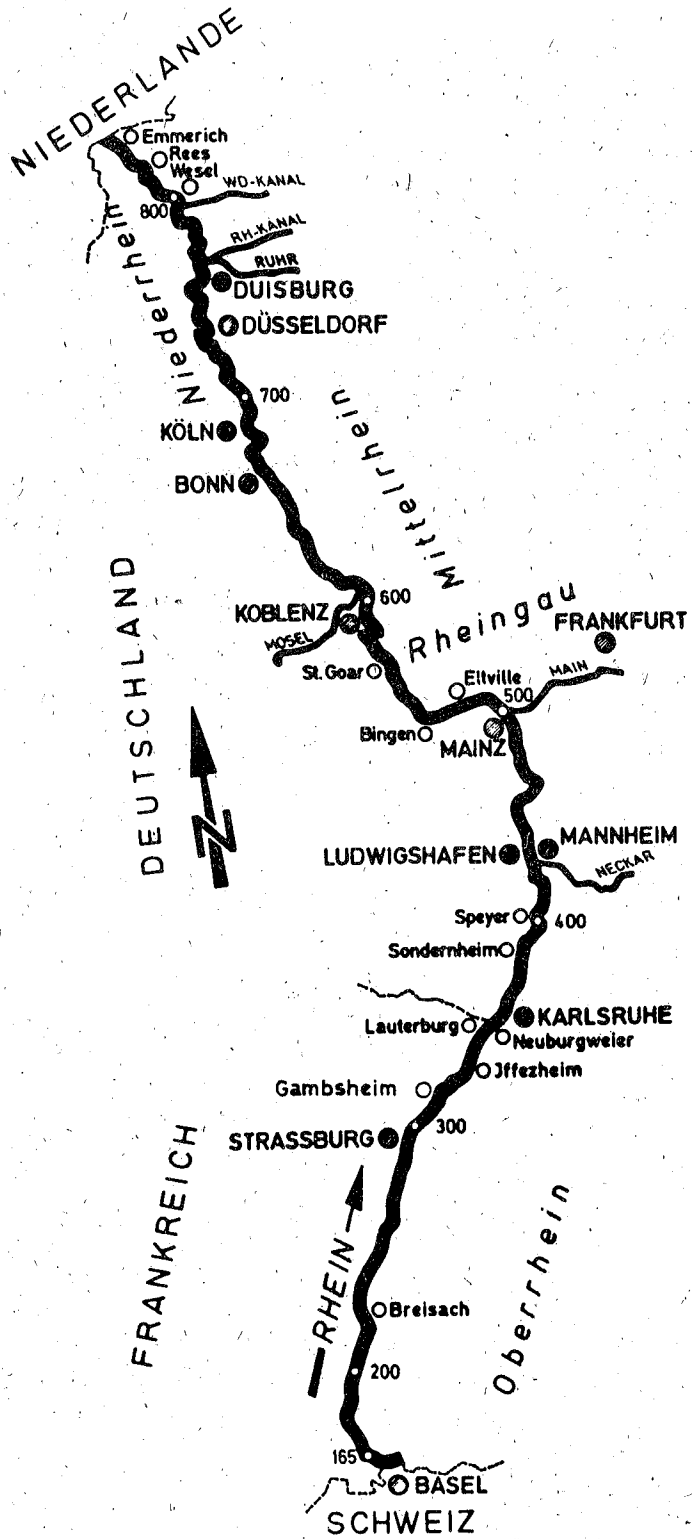


Abb. 10: Lageplan des Rheins

Bereits vor dem Bau der Staustufe und auch nach dem Einstau wurden umfangreiche Naturmessungen über eine lange Flußstrecke durchgeführt, die die Höhenlage der Flußsohle, des Wasserspiegels und den Geschiebetransport betrafen. Diese Naturbeobachtungen dienten als Grundlage einer Eichung des erforderlichen physikalischen Modells mit beweglicher Sohle, wobei davon ausgegangen werden konnte, daß das Sediment ausschließlich als Geschiebe transportiert wurde.

Das Modell selbst mußte eine Flußstrecke von mindestens 7 km in der Natur umfassen (Bild 7).

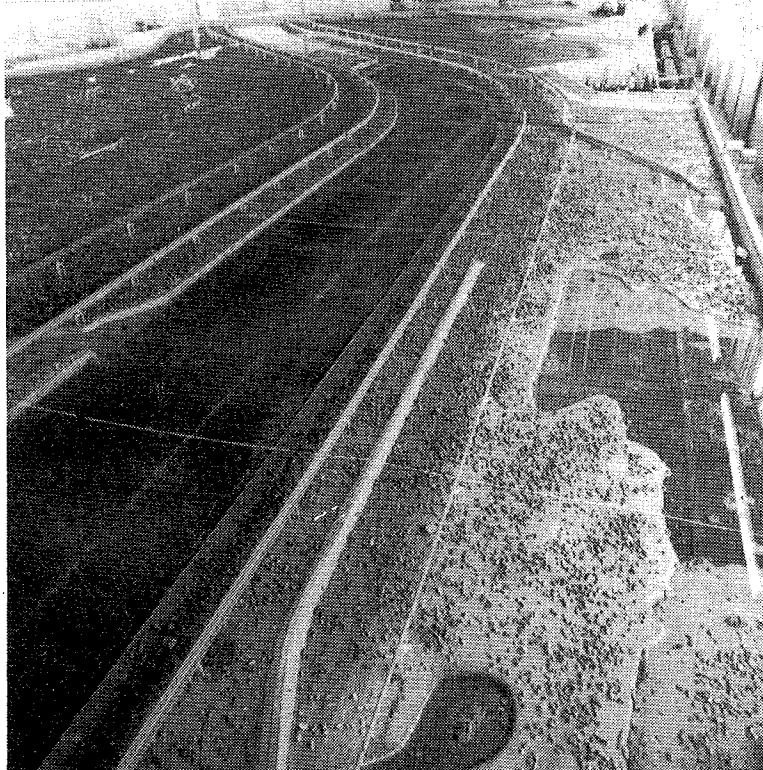


Bild 7: Modell mit Geschiebetransport des Rheins unterhalb der Staustufe Gamsheim, Blick stromab

Bei dem gewählten Längenmaßstab  $L_T = 100$  bedeutete dies eine Strecke von 70 m im Laboratorium und eine Modellfläche einschließlich der notwendigen Vorländer von etwa  $1500 \text{ m}^2$ . Als Geschiebematerial wird in der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) bei Flußmodellen vorwiegend Braunkohle ( $\gamma_s = 1.27 \text{ g/cm}^3$ ) verwendet. Auch für das hier beschriebene Modell wurde Braunkohle eingesetzt.

Für Modelle mit Geschiebetransport gelten die Ähnlichkeitsbedingungen (5) und (6). Mit  $L_T = 100$  und  $\gamma_{sm} = 1.27$  und somit  $\Delta\rho_T = 6$  errechnen sich daraus die beiden übrigen

Maßstabszahlen  $h_r$  und  $d_r$  zu

$$h_r = L_r \sqrt{\frac{1}{\Delta \rho_r}} = 40.82 \quad d_r = \frac{h_r^4}{L_r} = 2.78$$

Einfachheitshalber wurde  $h_r = 50$  gewählt, was nach Gleichung (5) zu  $d_r = 4.17$  und nach Gleichung (6) zu  $d_r = 6.25$  führte. Der sedimentologische Zeitmaßstab errechnete sich nach (7):

$$t_{s,r} = \frac{L_r^{3/2}}{d_r} \approx 200$$

In dem Modell wurden nach bestimmten Versuchsabläufen die Höhenlage der Flußsohle in einzelnen Querschnitten mit einem berührungsfreien Meßgerät ermittelt. Außerdem wurde das Wasserspiegellängsgefälle laufend auf Grund von Messungen im Abstand von 5 m im Modell festgestellt. Alle im Modell ermittelten Meßdaten wurden auf PCM-Magnetband registriert und mit Hilfe der Datenverarbeitungsanlagen der BAW ausgewertet. Mit diesen Meßeinrichtungen war es möglich, in relativ kurzer Zeit einen Eindruck über Sohlenveränderungen bei unterschiedlichen Abflüssen zu bekommen.

Die Modellversuche sollten, wie bereits erwähnt, durchgeführt werden, um Prognosen der Sohlenentwicklungen in der Fahrrinne machen zu können. Hierzu ist es unbedingt erforderlich, daß sich das Modell auch bezüglich der Sohlenveränderungen naturähnlich verhält. Demgemäß wurden die Versuche in zwei Gruppen unterteilt: a) In der Natur gemessene Verhältnisse werden im Modell nachgebildet, d.h. das Modell wird geeicht, und b) bei allen denkbaren Abflußzuständen werden die Sohlenentwicklungen erforscht, also Prognose-Versuche; hierbei werden vor allem extreme Abflußganglinien im Modell ablaufen. Im folgenden wird nur auf die unter a) genannten Versuche näher eingegangen, wobei an Hand von nur wenigen Beispielen das naturähnliche Verhalten des Modells nachgewiesen wird.

Die ersten Untersuchungen mit konstanten Abflüssen dienten vor allem dazu, die richtige Wahl des Korndurchmessers von ca. 2 mm zu bestätigen bzw. zu verändern und auch den Zeitmaßstab zu überprüfen. Besondere Beachtung mußte hierbei auch dem eventuellen Auftreten von Riffeln und Bänken geschenkt werden. Nach diesen Versuchen mit Hilfe derer letztendlich die exakten Zeitmaßstäbe ermittelt wurden, konnte mit den Versuchen mit veränderlichen Abflüssen begonnen werden. Hierzu wurden in der Natur abgelaufene Abflußdauerlinien in Modellabflußganglinien umgearbeitet. Eine derartige Ganglinie der Abflüsse ist in Abb. 8 wiedergegeben.

Für die Naturähnlichkeit der Sohlenentwicklung im Modell waren folgende Punkte von ausschlaggebender Bedeutung:

- Die Länge und Form des Erosionskeils unterhalb der Staustufe mußte in Modell und Natur gleich sein.
- Die Ablagerungs- und Erosionszonen mußten ähnlich sein.

Aus den Naturmessungen lagen Auswertungen vor, in denen die Sohlenhöhen in den einzelnen Querschnitten gemittelt waren. Obwohl bei einer derartigen Mittelung die Aussagekraft der Messung gemindert wird, eignet sie sich für vergleichende Betrachtungen.



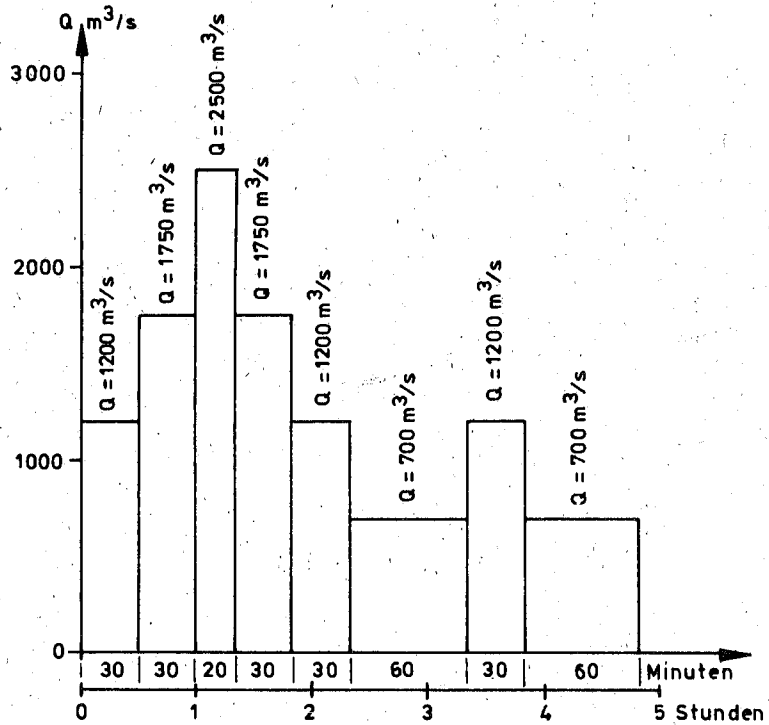


Abb. 8: Geschiebemodell Gamsheim. Abfluß-Ganglinien im Modell

Der Ausgangszustand der Flußsohle war derjenige vom Dezember 1973, weitere Naturmessungen lagen für die anschließenden Jahre vor. Hier sei nur der Zeitraum von Dezember 1973 bis Februar 1976 betrachtet. Die mittlere Sohlenlage in der Natur und im Modell geht aus Abb. 9 hervor.

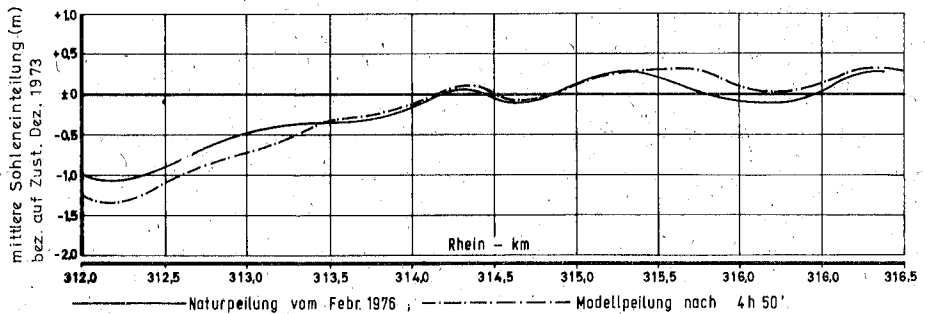


Abb. 9: Geschiebemodell Gamsheim. Vergleich der mittleren Sohlenhöhen in Natur und Modell für die Abfluß-Ganglinie nach Bild 8

Nach den genannten Kriterien für eine Ähnlichkeit ist die Übereinstimmung sehr gut; die Länge und Tiefe des Erosionskeils ist im Modell praktisch identisch mit dem in der Natur. Weiterhin ist der wellenförmige Verlauf der mittleren Sohlenhöhen ebenfalls sehr ähnlich. Lediglich weiter unterhalb treten Abweichungen auf, die aber mit verschiedenen modelltechnischen Gründen erklärt werden können.

#### 4. Regelungsarbeiten am Rhein

##### 4.1 Situation und Ziele des Ausbaus

Der Rhein ist von der Staustufe Iffezheim bis zur deutsch-niederländischen Grenze bei freiem Abfluß geregelt (Abb. 10, siehe S. 74)

Die durch die früheren Ausbauarbeiten erreichten Fahrrinntiefen gehen aus Abb. 11 hervor.

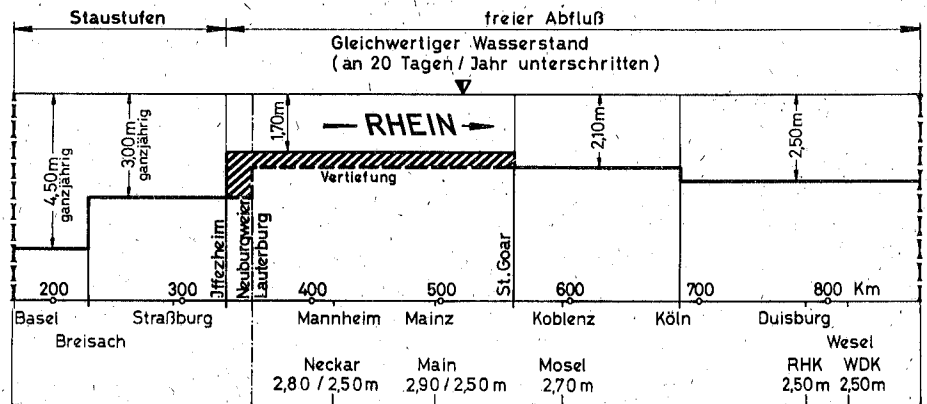


Abb. 11: Fahrrinntiefen des Rheins von Basel bis zur deutsch-holländischen Grenze

Bei Niedrigwasser, das in jedem Herbst zu erwarten ist, kann die Tragfähigkeit der größeren Schiffe nicht mehr voll ausgenutzt werden.

Dies wirkt sich umso mehr aus, als der Verkehr auf dem Rhein ein stetiges Wachstum verzeichnet:

Jahr	Durchgangsverkehr in Millionen Gütertonnen		
	Neuburgweier/ Lauterburg	Koblenz	Emmerich
1950	7,4	23,3	28,8
1960	16,2	58,1	70,6
1970	31,2	51,6	112,4
1979	27,3	50,6	133,3

Um die Wirtschaftlichkeit des Verkehrs zu verbessern und zugleich die Verkehrssicherheit in einigen Engstellen – wie z.B. am Binger Loch – zu erhöhen, wurde 1964 in der Strecke von Neuburgweier/Lauterburg bis St. Goar ein Ausbauprojekt begonnen.

Zum XXI. Internationalen Schiffahrtskongreß 1965 ist über die Voruntersuchungen und Modellversuche für dieses Projekt berichtet worden [3]. In folgendem Beitrag wird deshalb vor allem auf Ergebnisse der Arbeiten – soweit sie alluviale Flußstrecken betreffen – in Beispielen eingegangen. Das Kernstück des Ausbaus, die Felsenstrecke zwischen Bingen und St. Goar, wird entsprechend der Themenstellung nicht behandelt.

Die wichtigsten Ziele des Ausbaues sind:

1. Vertiefung der Fahrrinne zwischen Neuburgweier/Lauterburg und St. Goar von 1,70 m auf 2,10 m bei GIW
2. Beseitigung von Engpässen und Gefahrenstellen.

Die Ausbauziele oberhalb von St. Goar sind bis 1980 weitgehend erreicht [1]. Neben Arbeiten geringeren Umfanges bleiben noch Nachregelungsarbeiten zwischen Neuburgweier und Speyer sowie zwischen Bingen und St. Goar auszuführen. Die erreichte Fahrrinntiefe beträgt derzeit 2,10 m zwischen Neuburgweier und Mainz bzw. 1,90 m zwischen Mainz und St. Goar.

Am Niederrhein werden ebenfalls seit 1967 in einzelnen Strecken Ausbauarbeiten durchgeführt. Sie dienen dazu, die infolge örtlicher Sohlenveränderungen eingeschränkten Fahrrinntiefen und -breiten wieder herzustellen.

#### 4.2 Oberrhein zwischen Neuburgweier/Lauterburg und Mannheim [1]

Im vorigen Jahrhundert wurden die zahlreichen Schlingen mit Hilfe von Durchstichen nach den Plänen von Tulla begradigt. Das neue Strombett hat eine Normalbreite von 240 m zwischen den Uferbauten. In diesem Strombett bildete sich ein in langen Windungen von einer zur anderen Seite verlaufender Talweg heraus, der von Kiesbänken, die langsam talwärts wanderten, begrenzt war. Bei der zu Beginn dieses Jahrhunderts durchgeführten Niedrigwasserregelung wurden die Kiesbänke durch Buhnen und Grundswellen so fixiert, daß eine in ihrer Lage annähernd stabile Fahrrinne entstand. Die Sohlenverhältnisse blieben instabil, so daß sich Fahrrinntiefe und -breite erheblich und oft veränderten. Damit genügte dieser Regelungszustand den heutigen, gestiegenen Anforderungen nicht mehr.

Die auf eine umfassende Verbesserung dieser Situation ausgerichteten Ausbauarbeiten wurden sorgfältig vorgeplant [1]. Dabei wurden die Abmessungen der Regelungsbawerke teils mittels hydraulischer Näherungsberechnungen, teils durch Modellversuche festgelegt. Im folgenden sollen diese Werte mit den Ergebnissen in der Natur verglichen werden.

#### 4.2.1 Neuburgweier – Sondernheim (km 352 – km 379)

Der Ausbauzustand vor 1969 (Fahrrinne: etwa 1,70 m unter GIW auf 92 m Breite) konnte nur durch den häufigen Einsatz von Eimerkettenbaggern erhalten werden. Zur Vergrößerung der Fahrinntentiefe um 40 cm wurden daher die Streichlinienabstände durch Verlängerung der Buhnen verringert und zusätzlich die Buhnerrücken aufgehöhht (Abb. 12). Dabei wurden die Abstände der gegenüberliegenden Buhnenköpfe um max. 11 m auf 165 m am Anfang und 175 m am Ende dieser Strecke verkürzt und die Buhnerrücken bis zu 1 m erhöht.

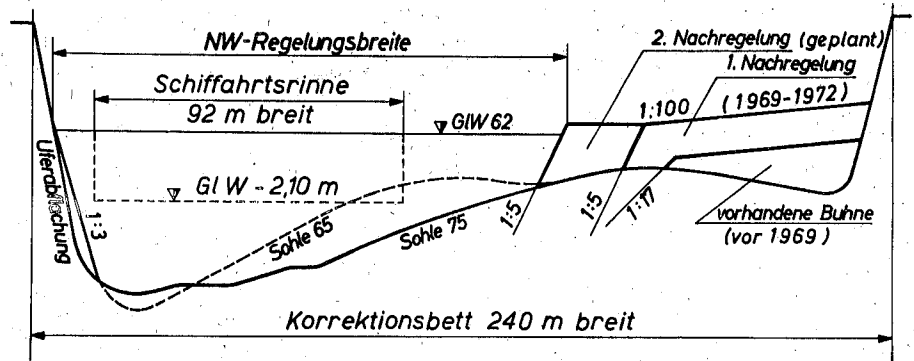


Abb. 12: Oberrhein. Erhöhung und Verlagerung von Buhnen

Nach diesem Ausbau (1969 – 1972) zeigte sich, daß an einigen Innenufern die Bänke nicht weit genug abgetragen wurden und somit Fehlbreitenstellen (Einschränkung der Fahrinnenbreite um rd. 25 m) verblieben. Eine Nachregelung ist somit erforderlich. Dafür gibt es folgende Möglichkeiten:

- a) Baggerungen. Sie stören jedoch den Geschiebehauhalt und wiederholen sich in der Regel.
- b) Kolkverbau. Am Oberrhein sind die Kolke langgestreckt und flach, ein Kolkverbau ist aber nur bei kurzen und tiefen Kolken wirtschaftlich.
- c) Erhöhung von Buhnen. Dies brächte den Vorteil, daß das Niedrigwasserbett nicht weiter eingengt würde. Da aber die Aufhöhungen in der Stärke unterschiedlich hergestellt werden müßten, würde beim Überfahren der Buhnfelder bei hoher Wasserführung die Sicherheit und Leichtigkeit der Schifffahrt erheblich beeinträchtigt.
- d) Zusätzliche Buhnen an den einbuchtenden Ufern des Niedrigwasserbettes. Diese Möglichkeit muß ausgeschlossen werden, weil die hydraulische Wirkung auf die gegenüberliegende Bank zweifelhaft ist und nahezu alle schiffahrtsüblichen Liegeplätze verbaut würden.
- e) Verlängerung der Buhnen und Erweiterung der Buhnengruppen an den ausbuchtenden Ufern.

Der letzteren Möglichkeit wird der Vorzug gegeben, weil das bisher angewendete Regelungsprinzip beibehalten wird, die zu verlängernden Buhnenköpfe im Bereich der Fehl-

breiten liegen und später eine Korrektur der Regelungsmaßnahmen leichter möglich sein wird. Die jeweilige Bühnenverlängerung wird unterschiedliche Ausmaße haben. Es ist beabsichtigt, diese Nachregelung in den Jahren 1982 – 1984 durchzuführen.

Bei Karlsruhe-Maxau überspannt eine Eisenbahnbrücke den Rhein, die 1946/47 als Dauerbehelfsbrücke errichtet wurde (Bild 13).

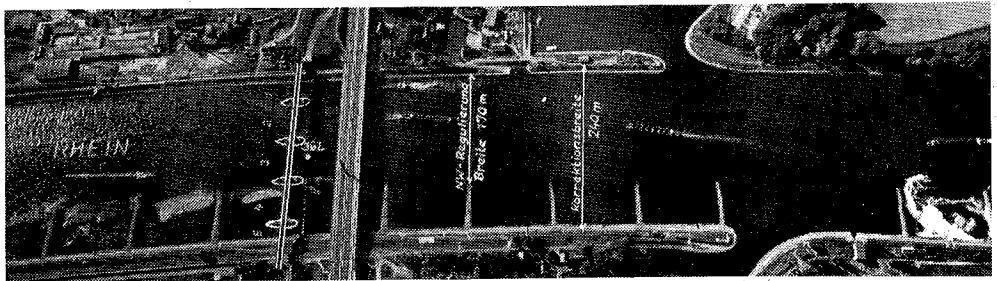


Bild 13: Oberrhein: Der Brückenbereich Karlsruhe-Maxau

Die Brücke besitzt 4 Pfeiler mit 5 Öffnungen. Davon stehen der Schifffahrt nur die 3 linken Öffnungen (30/50/50 m) zur Verfügung. Die dritte Öffnung wurde auch nach dem Ausbau (1970) durch die Kiesbank am rechten Ufer zeitweise eingeschränkt [10]. Eine Bühnenverlängerung schloß sich wegen des nahen rechten Fahrrinnenrandes an. Deshalb und weil die Öffnungen 4 und 5 für den Schiffsverkehr gesperrt waren und sind, wurden hier 1978 5 Bühnen im Brückenbereich ausnahmsweise um 50 cm aufgehöhht.

Diese Nachregelung hat sich bewährt, die dritte Öffnung ist seitdem frei von Kiesenlandungen.

#### 4.2.2 Sondernheimer Schwelle (km 379 – km 382) [3]

Bis zum Jahr 1967 war die Flußstrecke zwischen km 379 und km 382 nicht reguliert. Sie diente vornehmlich der Schleppschifffahrt als Aufdrehtplatz. Da nur noch in wenigen Fällen geschleppt wurde, verlor diese Teilstrecke ihre Bedeutung als Aufdrehtplatz. Umso störender wurde von der modern strukturierten Schifffahrt die Verwilderung des nicht mit Bühnen ausgebauten Stromabschnittes empfunden. Das hier im Gegensatz zur oberstromigen Anschlußstrecke verminderte Transportvermögen der Strömung führte zu ständig in Lage und Menge wechselnden Ablagerungen.

Die Grundlage für Planung und Art der Bauausführung bildete ein Modellversuch, der bei der Bundesanstalt für Wasserbau in Karlsruhe durchgeführt wurde. Danach wurden 1967/68 NW-Bühnen und ein NW-Leitwerk errichtet.

Bereits unmittelbar nach Abschluß der Regelungsmaßnahmen war der ständig Fehl-tiefen verursachende Übergang, die sogenannte Sondernheimer Schwelle, fast vollends beseitigt (Abb. 14).

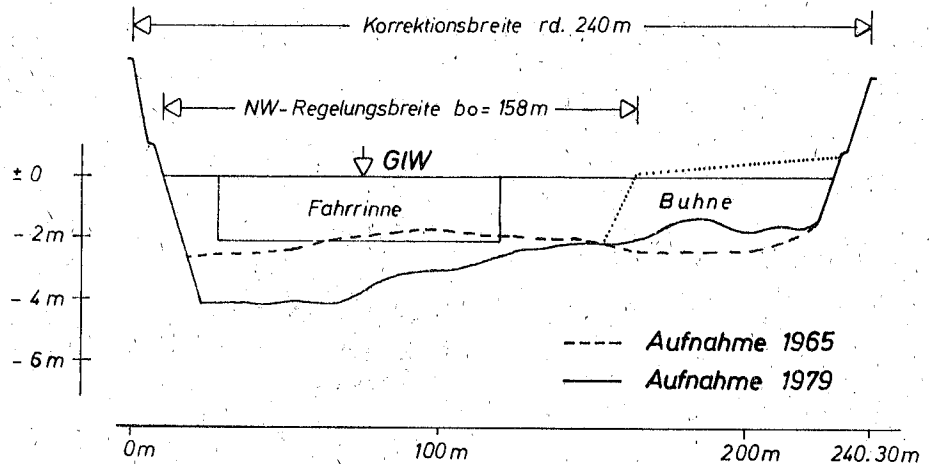


Abb. 14: Oberrhein, Niedrigwasserregelung bei Sondernheim, Querprofil bei km 381

Durch einen Massenvergleich wurde für die Bauzeit von 10 Monaten eine Geschiebebewegung von ca. 250 000 m<sup>3</sup> ermittelt. Der große Geschiebebetrieb führte unterhalb der Ausbaustrecke zu Anlandungen, weil nun dort die alten Ausbaugrößen nicht denen der neu ausgebauten Strecke entsprachen und die vorhandene Schlepptension nicht ausreichte, um das von oberstrom eingetriebene Geschiebe restlos weiter zu transportieren.

Aus dem Vergleich der einzelnen Sohlzustände (1960, Modell und 1978) miteinander läßt sich feststellen, daß einmal mit gutem Erfolg das Ausbauziel, zum anderen eine außerordentliche Übereinstimmung zwischen Modell und Natur erreicht wurde (Abb. 15).

Die den Querschnitt über die gesamte Breite beeinflussende Geschiebebank ist abgetragen. Der erforderliche Verkehrsquerschnitt ist in vollem Umfang auf der ganzen Ausbaustrecke dauerhaft vorhanden und die Übertiefe bei km 382 am linken Ufer aufgefüllt.

#### 4.2.3 Rheinkrümmung bei Speyer [3]

Zur Verbesserung der Strömungsverhältnisse, Minderung der Unterhaltungsaufgaben und Erleichterung des Schiffsverkehrs hatte die Bundesanstalt für Wasserbau aufgrund von Versuchsergebnissen aus dem Modell Speyerer Kurve als Ergänzung früherer Ausbaumaßnahmen folgendes empfohlen:

1. Ausrunden des linken Ufers, verbunden mit einer Abflachung der Uferböschung auf 1 : 3
2. Verklappen des Kolkes bis auf 4 m unter GIW
3. Abtragen der Bank am Innenufer auf GIW - 2,5 m
4. Abgraben des inneren Vorlandes.

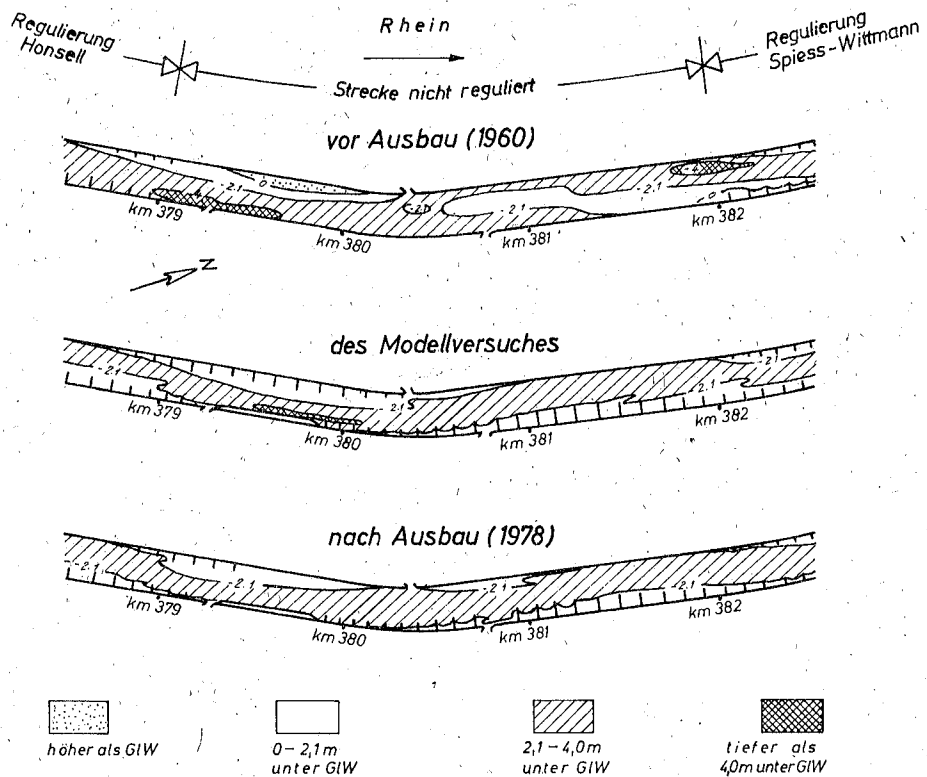


Abb. 15: Oberrhein bei Sonderheim. Tiefenlinienpläne

Tatsächlich wurde beim Ausbau der Speyerer Kurve nur die 1. Stufe der Verbesserungsvorschläge realisiert. Dabei wurde die Ausbuchtung am linken Ufer durch eine verbesserte Linienführung des Ufers beseitigt und die vorher 1 : 2 geneigte Böschung auf 1 : 3 abgeflacht (Abb. 16).

Nach dem Ausbau hat sich am linken Ufer von km 399,5 bis 399,9 eine Aufhöhung des Kolkes eingestellt. Stromabwärts bis km 400,2 hat sich der Kolk jedoch um maximal 2 m vertieft, obwohl die Wirbelströmungen vermindert wurden. Die Bank am Innenufer ist etwa um das Maß der Uferverlegung zurückgedrängt worden (Abb. 17).

Die schwierigen Schiffsahrtsverhältnisse sind entschärft, die Kolk-situation ist aber verstärkt worden. Der Gutachter empfiehlt für diesen Fall die nächste Ausbaustufe, den Kolkverbau.

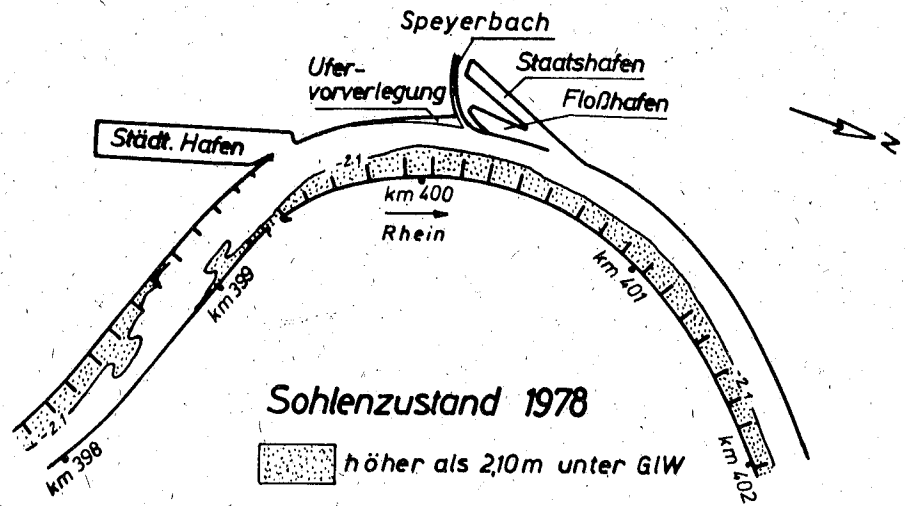


Abb. 16: Oberrhein, Uferverlegung in der Curve Speyer

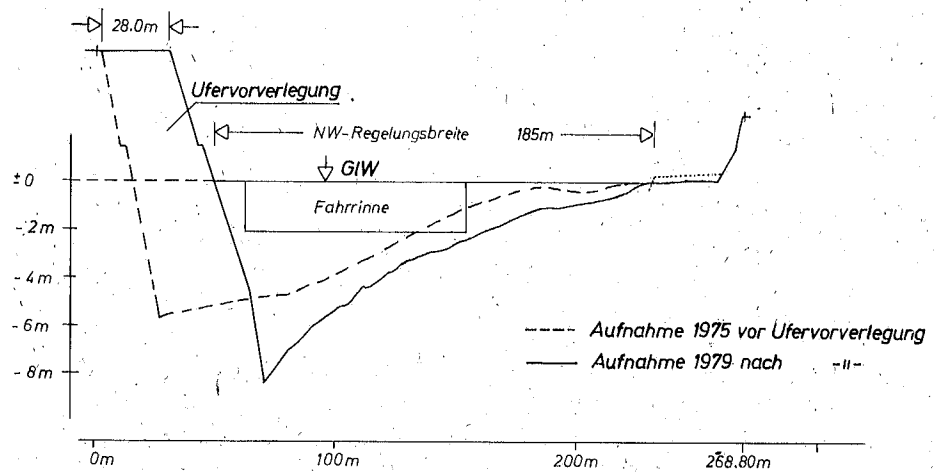


Abb. 17: Oberrhein bei Speyer. Querprofil bei km 400,1 vor und nach dem Ausbau

### 4.3 Rheingau

Das Gefälle des Oberrheins vermindert sich von Basel abwärts stetig und erreicht im Rheingau vor dem Eintritt des Flusses in die Gebirgsstrecke mit 10 cm/km seine gering-



sten Werte. Der Fluß ist dort entsprechend breit und die Fließgeschwindigkeit gering. Die Stromsohle besteht aus festgelagertem Kies/Sand, über den leicht beweglicher Sand wandert.

Die geplante Vertiefung der Fahrrinne durch Einengung des Abflußquerschnittes stieß hier auf schwierig einzuhaltende Randbedingungen. So durfte der Wasserspiegel des Hochwassers nicht angehoben werden und die bei niedrigem Wasserstand nicht durchflossenen Wasserflächen hinter den Streichlinien durften nicht verlanden. Bereits bei den Ausbauten im 19. Jahrhundert hatte sich gezeigt, daß Parallelwerke hierzu besser als Buhnen geeignet sind.

Von 1967 bis 1976 wurden deshalb weitere 16 km Parallelwerke errichtet. Den Ausbau einer Stromspaltung bei Eltvile zeigt Abb. 18.

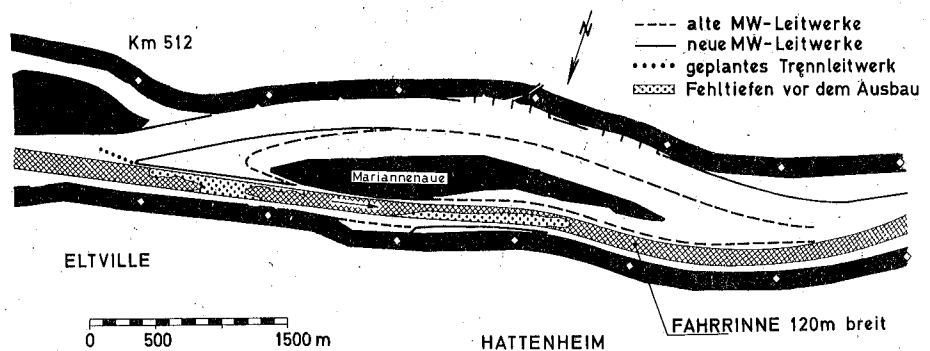


Abb. 18: Rheingau bei Eltvile. Ausbau durch Parallelwerke

Die Kronen der Bauwerke liegen 40 cm über Mittelwasser. Die Parallelwerke sind aus Bruchsteinen von 10 – 90 kg Gewicht geschüttet. Der angestrebte Regulierungserfolg hat sich eingestellt. Es ist vorgesehen, den Abfluß und damit die Schleppkraft im rechten Stromarm durch den Einbau eines Trennleitwerkes an der oberen Inselfspitze der Mariannaue noch zu erhöhen.

#### 4.4 Niederrhein [2]

##### 4.4.1 Einführung

Im vorigen Jahrhundert wurde der Niederrhein ausgebaut, um Untiefen zu beseitigen und damit bessere Verhältnisse für die Schifffahrt zu schaffen. Auch der Hochwasserschutz sollte verbessert werden. Dem Strom wurde ein Korsett aus Buhnen, Längs- und Deckwerken angelegt. Daneben wurden Stromverkürzungen vorgenommen. Schon um die Jahrhundertwende hatte sich der Niederrhein auf diesen neuen Zustand eingestellt. Durch Umlagerungen von Geschiebe hatte er sich in dem Korsett ein abflußkonformes Bett geschaffen, das auch bei extremen Abflüssen stabil blieb. Die Tiefenverhältnisse für die Schifffahrt waren damals besser als heute. Durch menschliche Eingriffe in das

Flußregime, die nicht dem weiteren Ausbau dienten, wurden die Verhältnisse nachteilig verändert.

Etwa ab 1913 wurde dem Strom Kies für die Betonherstellung entnommen und ab 1922 wurde die Stromsohle im Raume Duisburg durch Kohleabbau unter dem Rhein abgesenkt. Diese Eingriffe schufen ein Ungleichgewicht in der Geschiebebewegung. Der Strom ist allein nicht in der Lage, die durch Baggerungen und Bergbau entstandenen riesigen Kolke wieder zu verfüllen. Zur Unterstützung des Stromes sind deshalb umfangreiche Ausbaumaßnahmen erforderlich, um wieder eine Stabilisierung der im Ungleichgewicht befindlichen Rheinsohle zu erreichen. Über einige hierzu erforderlichen Arbeiten wird im Nachfolgenden berichtet werden.

#### 4.4.2 Maßnahmen gegen nachteilige Auswirkungen von Vorlandauskiesungen

Als nach 1960 die Wasserspiegelsenkung am Niederrhein von Duisburg bis zur niederländischen Grenze 4 cm/Jahr erreicht hatte, wurde erkannt, daß Baggerungen im Strom sich in Verbindung mit der Erosion sehr nachteilig auf das Abflußregime auswirkten. Gewerbsmäßige Baggerungen im Strom wurden deshalb verboten und bei Unterhaltungsbaggerungen wird jetzt das Baggergut dem Strom an geeigneten Stellen wieder zugeführt. Um der Erosion, die vornehmlich bei höheren Wasserständen stattfindet, entgegenzuwirken, wurde den Kiesfirmen erlaubt, die vor allen unterhalb Duisburg bis zur niederländischen Grenze vorhandenen großen Rheinvorländer auszukiesen und anschließend nicht wieder bis zur Ursprungshöhe zu verfüllen. Durch die dabei entstehenden Querschnittsvergrößerungen werden bei höheren Abflüssen die Strömungsgeschwindigkeiten und damit die Schleppkraft des Wassers herabgesetzt. In Abb. 19 ist in einem stark verzerrten Maßstab ein Querschnitt dargestellt, der durch Tieferlegung der Vorländer vergrößert wurde. Die schraffierte Fläche gibt die Zunahme des Abflußquerschnittes an. Sie beträgt bei MHW über 100 %. Bei Querschnittserweiterung in dieser Größe nimmt die Schleppkraft des Wassers so sehr ab, daß es zu Ablagerungen im Strom und auf den Vorländern kommt. Dieses abgelagerte Geschiebe wird den unterhalb liegenden Strecken vorenthalten, so daß hier das Arbeitsvermögen der Strömung nicht ausgelastet ist. Die Strömung kann deshalb Geschiebe aufnehmen und damit die Sohle austiefen.

Um den schädlichen Auswirkungen der Vorlandstieferlegung zu begegnen, werden jetzt Leitdeiche geplant und gebaut, wie in Abb. 19 angedeutet. Sie sollen die Aufgabe des vordem hohen Vorlandes übernehmen, den Strom auch bei hohen Wasserständen zusammenzuhalten, damit eine ausreichende Sohlschleppspannung erhalten bleibt, um das von oberstrom ankommende Geschiebe weiterzutransportieren.

#### 4.4.3 Kolkverbau Rees

Im Bericht zum internationalen Schiffahrtskongreß 1965 [3] sind die Modellversuche für den Kolkverbau in Düsseldorf behandelt worden. Die Kolkverfüllung wurde 1969 ausgeführt. Die Größe der Breitenerosion, wie sie sich im Modell zeigte, konnte in der Natur nicht ganz erreicht werden. Eine weitere Kolkverfüllung wurde 1973 bei Rees ausgeführt (Abb. 20).

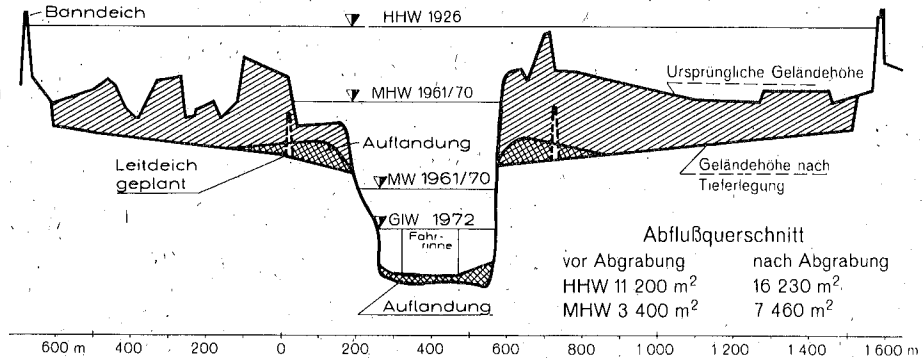


Abb. 19: Niederrhein, Vorlandtieferlegung bei Wesel (km 809,1)

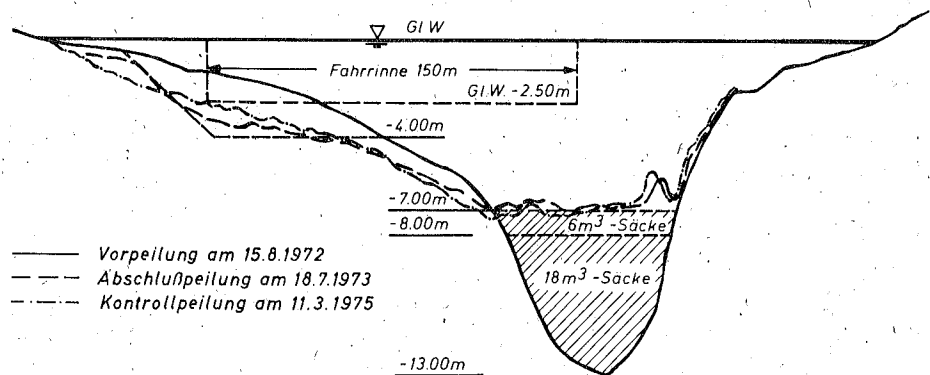


Abb. 20: Niederrhein, Kolkverfüllung bei Rees. Querprofil bei km 836,8

Diese unterscheidet sich von dem bei Düsseldorf durch eine andere Art der Verfüllung. In Düsseldorf wurde der Kolk mit Sand verfüllt und zum Schutz gegen Abtrieb mit Basaltschotter und grobem Kies abgedeckt. Bei Rees wurden die Fehlbreiten durch Baggerungen beseitigt, das dabei anfallende aus Sand bestehende Baggergut in wasserdurchlässige Nylon-Säcke gefüllt und diese in den Übertiefen eingebaut (Abb. 21).

Die zu unterst eingebauten Säcke haben ein Fassungsvermögen von 18 m<sup>3</sup>/Stck. und die als Abdeckung dienenden von 6 m<sup>3</sup>/Stck. Eine Abdeckung durch Schüttsteine wurde nicht vorgenommen. Die Lage und das Verhalten der Säcke wurde mit dem Taucherglockenschiff „Carl Straat“ mehrmals kontrolliert. Die Lage der Säcke hat sich nicht verändert. Kleine Hohlräume zwischen den Säcken haben sich mit Kies aufgefüllt und vereinzelt angetroffene beschädigte Nylon-Säcke zeigten keinen feststellbaren Sandaustrieb. Es konnte festgestellt werden, daß die mit Sand gefüllten Nylon-Säcke der starken Strömung bei Hochwasser besser widerstehen als der als Abdeckmaterial in Düsseldorf verwendete Basaltschotter und Grobkies, der z.T. abgetrieben wurde. Die vom Kolkver-

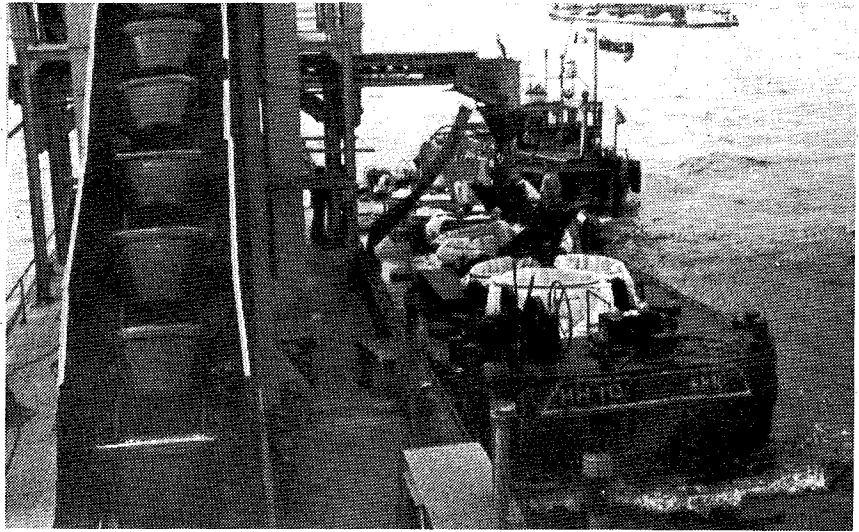


Abb.21: Niederrhein. Kolkverfüllung bei Rees. Füllen der Säcke mit Eimerkettensbagger

bau erwartete Umwandlung der Tiefenerosion in eine Breitereosion ist nicht überall in dem erwarteten Umfange eingetreten, wenn sie auch in dem in Abb.20 dargestellten tiefsten Querschnitt des Kolkes gerade erreicht wurde. Um in starken Krümmungen überall auf der ganzen Breite der Fahrrinne die vorzuhaltende Tiefe von 2,50 m unter GIW herzustellen und bei allen Abflüssen zu erhalten, ist ein Verbau der Kolke, wie es die Modellversuche für den Kolkverbau in Düsseldorf schon ergeben hätten, auf GIW — 5,0 m erforderlich.

#### 4.4.4 Kohlenbergbau unter dem Rhein

Durch den von 1923 bis 1965 betriebenen Kohlenbergbau unter dem Rhein bei Duisburg auf der Strecke von km 775 — km 795 wurde die Rheinsohle unterschiedlich bis zu 6,5 m abgesenkt. Im Mittel betrug die Absenkung des NW-Bettes rd. 1,0 m. Die Wasserspiegelsenkung war am Pegel Duisburg-Ruhrort etwa 0,2 m größer, weil durch ungleichmäßige Absenkungen die NW-Querschnitte verbreitert wurden. Das abgesunkene Flußbett wirkt wie ein Geschiebefang. Von den 6 Mio m<sup>3</sup> Sohlenmassenverlust durch den Bergbau auf dieser 20 km langen Strecke hat die Strömung bis heute schon rd. 1,5 Mio m<sup>3</sup> durch Ablagerungen wieder aufgefüllt (Abb.22). Der Strom füllt nicht nur die Absenkungsmulde auf, sondern gestaltet die Querschnitte auch wieder abflußgerecht.

Seit 1965 wird der Bergbau unter dem Rhein nur noch auf den Strecken von km 790,5 bis km 793 und von km 795 bis km 798 betrieben. Auf diesen Strecken wurden jedoch bis Ende 1979 über 5 Mio m<sup>3</sup> Sohlenmassenverlust festgestellt. Wegen der relativ kurzen Strecken bewirkte dieser Abbau trotz größerer Tiefen, eine geringere Wasserspiegelsenkung als auf der oberhalb liegenden 20 km langen Strecke.

In Abb. 22 sind die mittleren Absenkungen der Sohle durch den Bergbau und die dadurch verursachten Wasserspiegelsenkungen auf der Strecke vom Pegel Duisburg-Ruhrort bis zum Pegel Wesel dargestellt. Der Wasserspiegel senkt sich nicht nur auf der Bergbaustrecke, sondern auch nach ober- und unterstrom ab. Nach oberstrom sind die Absenkungen erheblich größer als nach unterstrom und reichen entsprechend weiter. Am Pegel Ruhrort, der rd. 15 km oberhalb der Bergbaustrecke liegt, ist der Wasserspiegel noch um rd. 15 cm abgesunken.

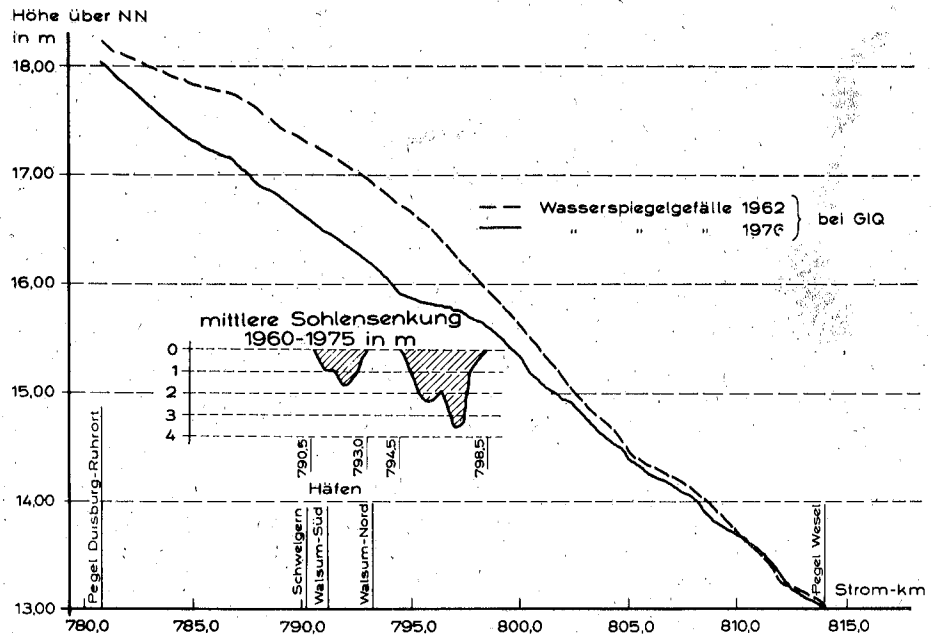


Abb. 22: Niederrhein bei Duisburg. Wasserspiegel und Sohlensenkung durch Bergbau unter dem Rhein

Eine schwerwiegende Folge der Sohlenabsenkung durch den Bergbau ist auch die Vergrößerung des Wasserspiegelgefälles nach oberstrom, durch die die Schleppekraft verstärkt wird, so daß die Sohle erodiert. Unterhalb der Bergbaustrecke wirkt die nicht abgesenkte Sohle wie eine Grundschwelle, auf der erhöhte Strömungsgeschwindigkeiten eine verstärkte Sohlentaufstufung zur Folge haben. Für die an den Rhein grenzenden Häfen ergeben sich durch die Bergsenkungen geringere Wassertiefen, so daß dort Anpassungsmaßnahmen von erheblichem Umfang erforderlich sind.

Um Nachteile für den Strom und die Umschlagsanlage zu beseitigen und in Zukunft zu verhindern, muß der Bergbau jetzt die Sohlenvertiefung durch Auffüllung wieder ausgleichen. Da es für den Bergbau unwirtschaftlich wäre, sohlengleiches Material zu beschaffen und einzubringen, ist man übereingekommen, daß die Kolke mit dem beim Kohlenabbau anfallenden vorwiegend aus Tonschiefer bestehenden Waschbergen aufgefüllt werden.

#### 4.4.5 Bewegliche Buhnen

Die Abladetiefe der auf einem Fluß verkehrenden Schiffe muß sich stets nach den Stellen mit den geringsten Wassertiefen richten. Oft ist es nicht möglich, diese Strecken durch den Einbau von festen Buhnen zu regulieren, weil dann bei HW der Wasserspiegel zu stark ansteigt oder die Erosion zu groß wird. Auf solchen Strecken muß deshalb ständig gebaggert werden, so daß hier die Stabilisierung der Sohle nicht zu erreichen ist. Diese Strecken können durch bewegliche Buhnen, die bei niedrigen Wasserständen wirksam sind und bei höheren Abflüssen unwirksam gemacht werden können, verbessert werden. Z. Zt werden Membranbuhnen erprobt (Abb. 23), die in Duisburg oberhalb der Ruhrmündung im Rhein eingebaut sind. Die Membranen bestehen aus einem PVC-Gewebe mit Neoprenbeschichtung. Das verwendete Material und die Form der Buhnen wurden von der Universität Stuttgart vorgeschlagen. Die Buhnen sind aus mehreren nebeneinander liegenden Kammern zusammengesetzt, die mit selbsttätigen Füll- und Entleerungseinrichtungen versehen sind. Unter MW sind die Buhnen mit Wasser gefüllt und heben durch Einschränkung der Abflußquerschnitte den Wasserspiegel an, so daß die Fahrrinntiefe vergrößert wird. Bei Wasserständen über MW sind die Buhnen entleert und liegen flach auf der Flußsohle, damit der Abfluß nicht behindert wird. Die Modellversuche bei der BAW in Karlsruhe haben ergeben, daß es möglich ist, durch bewegliche Buhnen bei GIW je nach Einschränkung der Abflußquerschnitte und Länge der Buhnenstrecke eine bis weit nach oberstrom reichende Anhebung des Wasserspiegels bis zu 50 cm zu erzeugen. Dabei bleiben die Strömungsgeschwindigkeiten unter den vorhandenen Strömungsgeschwindigkeiten bei MW, so daß eine verstärkte Erosion wie bei herkömmlichen Buhnen nicht zu erwarten ist.

### 5. Möglichkeiten der Erfolgskontrolle einer Niedrigwasserregelung im Flachlandfluß, dargestellt am Beispiel der unteren Elbe [11]

#### 5.1 Einführung

Die Arbeiten zur Niedrigwasserregelung der unteren Elbe (Buhnen, durchgehend) zur Verbesserung der Schiffbarkeit wurden in der Zeit zwischen 1936 und 1963 ausgeführt. Die Strombauwerke waren bis auf eine kurze Unterbrechung von 10 km Länge (Reststrecke) planmäßig fertiggestellt. Die Unterbrechung durch einen nicht ausgebauten Abschnitt gab durch dessen gänzlich andersartiges Sohlenverhalten die Möglichkeit eines Vergleichs. In der ausgebauten Strecke oberhalb der Reststrecke lag der Sand auf der Stromsohle soweit fest, daß keine Bankwanderung stattfand. Es gab nur selten störende Sandablagerungen, folglich waren auch kaum Baggerungen erforderlich. In der nicht ausgebauten Zwischenstrecke mußte häufig gebaggert werden, sich schnell verändernde Sandbänke behinderten die Schifffahrt. Im Bereich unterhalb der Reststrecke war der Ausbau zwar vollzogen, aber die Fahrrinnenverhältnisse waren wenig zufriedenstellend, verbesserten sich allerdings weiter unterhalb zunehmend. Der Eindruck entstand, als ob die nicht ausgebaute Reststrecke als „Störquelle“ für die schlechten Sohlenverhältnisse unterhalb verantwortlich sei. Würde diese Reststrecke erst ausgebaut sein, wären auf der gesamten untersuchten Strecke optimale Fahrrinnenverhältnisse wie im oberen Bereich vorhanden. Anhand einer eingehenden Erfolgskontrolle wurde untersucht, ob diese Vermutung richtig war.

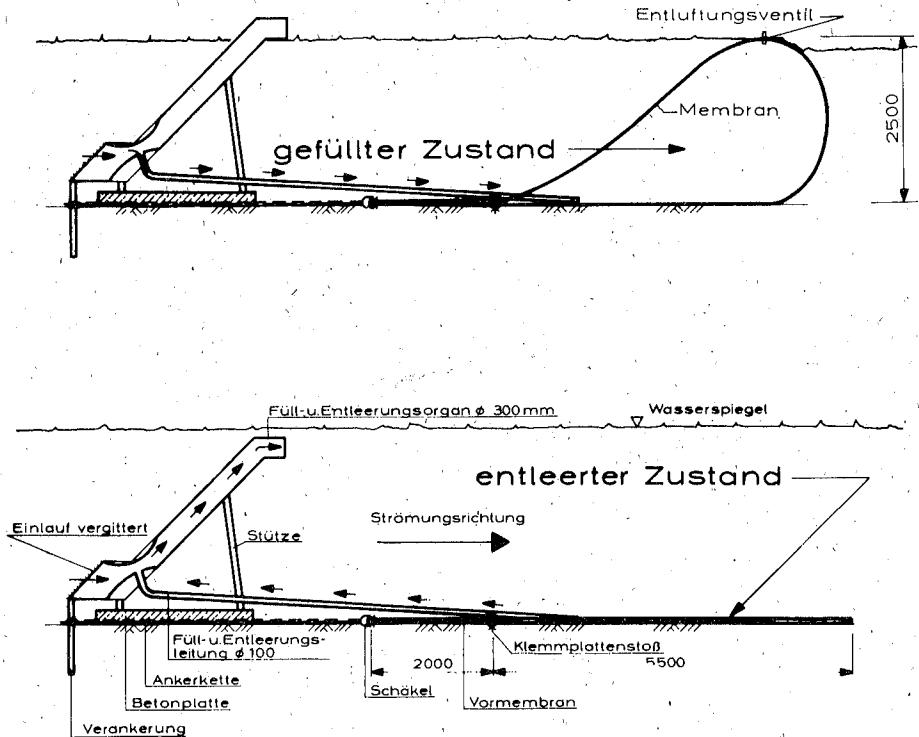


Abb. 23: Niederrhein bei Duisburg. Schematische Darstellung einer flexiblen Versuchsbühne mit automatischer Füll- und Entleereinrichtung

## 5.2. Beschreibung der untersuchten Stromstrecke

### 5.2.1 Allgemeines

Das Untersuchungsgebiet umfaßt den Elbeabschnitt unterhalb von Schnackenburg ohne den Tidebereich und ohne den unterhalb anschließenden Staubeereich der Staustufe Geesthacht, von km 474,5 bis km 555 (Abb. 24).

Dieser Untersuchungsabschnitt ist Teil der Flachlandstrecke eines ursprünglich sehr breiten und verwilderten Urstromtales. Maßgebend für den heutigen Ausbau sind die Entwürfe für die Hochwasserregelung von 1902 sowie für die Niedrigwasserregelung von 1931. Diese Entwürfe haben bewirkt, daß das ursprüngliche Abflußbett stark eingengt wurde.

### 5.2.2 Zeit-Weg-Darstellung der Sohlenbewegung

Wenn Vergleiche unterschiedlicher Sohlenformen angestellt werden sollen, ist es erforderlich, diese zunächst einmal darzustellen. Abb. 24 zeigt das Zeit-Weg-Diagramm der Elbe-Strecke zwischen Schnackenburg und Radegast über den Zeitraum von 26 Jahren

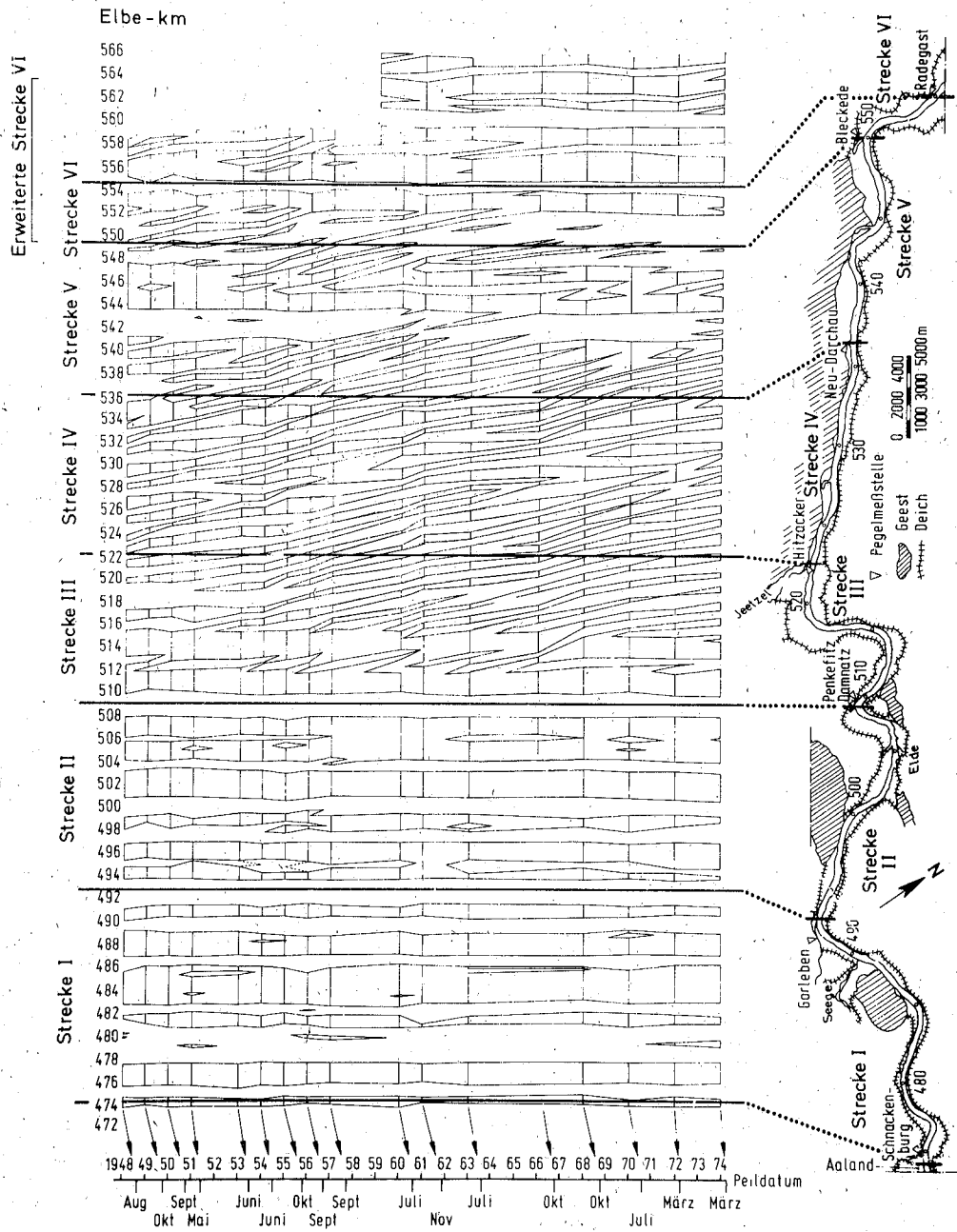


Abb. 24: Untere Elbe. Wanderung der Talwegs-Übergänge zwischen Schnackenburg und Radegast



aufgetragen. Dabei ist von den vorhandenen Tiefenplänen ausgegangen worden. Die Auftragung erfolgte von km 474 bis km 555 bzw. 566. Die eingezeichneten Zeit-Weg-Linien sind die Verbindungsgeraden solcher Orte, an denen zum Peilzeitpunkt die größten Tiefen vom Bereich einer Stromhälfte in den Bereich der anderen überwechseln, oder anders ausgedrückt, die Verbindungslinien der Kreuzungspunkte zwischen Talweg und Stromachse. Die horizontal oder schräg verlaufenden Linienzüge geben die Verschiebung einer Sandbank in Stromrichtung wieder, veränderlich über den angegebenen Zeitraum. Dort, wo benachbarte Linienzüge durch die vertikal ausgezogenen Zeitmarkierungen verbunden sind, wird die zeitliche Verschiebung einer Sandbank in der linken Stromhälfte dargestellt. Entsprechend sind die Bereiche ohne vertikale Zeitmarkierung Sandbänke in der rechten Stromhälfte. In den jeweils gegenüberliegenden Stromhälften verläuft die Fahrrinne.

Deutlich zeichnen sich drei Bereiche mit unterschiedlicher Sohlengestaltung ab. Von km 474 bis km 512 ist kaum eine Veränderung der Sandbänke festzustellen. Die Länge der Sandbänke erscheint deutlich größer als in der unterhalb anschließenden Strecke. Im Bereich von km 512 bis km 543 ist eine stetige Wanderung der Sandbänke in Talrichtung zu erkennen. Dieser Bereich enthält die oben erwähnte nicht ausgebaute Zwischenstrecke (Reststrecke). Die Sandbänke sind kürzer. Im Abschnitt unterhalb km 543 ist eine Übergangphase zwischen den beiden genannten Zuständen vorhanden.

Diese drei verschiedenen Sohlenformen unterscheiden sich derart deutlich, so daß ebenso deutliche Ursachen dafür vorhanden sein müssen, die im Folgenden in ihren wesentlichen Zügen aufgezeigt werden.

### 5.3 Analyse des Abflußverhaltens

#### 5.3.1 Größe der Sohlenbewegung

Der Untersuchungsbereich wird in 6 etwa gleichlange Einzelabschnitte (I–VI) derart aufgeteilt, daß jede Teilstrecke an ihren Enden jeweils durch eine Pegelmeßstelle markiert wird (Abb. 24). Im Zeit-Weg-Diagramm sind diese Teilstrecken dargestellt. Daraus ist ersichtlich, daß sich in jeder Teilstrecke spezifische Bewegungen der Sandbänke vollziehen. Wird diese Bewegung mit  $s$  (m/Jahr) definiert, so läßt sich für jeden Zeitabschnitt zwischen zwei aufeinanderfolgenden Peilungen getrennt nach den Strecken I bis VI dieser Wert ermitteln. Eine Zusammenstellung dieser Werte zeigt Abb. 25.

Daraus ist zu erkennen, daß in den Strecken I und II die Sandbänke im wesentlichen festliegen. In Strecke III, der Reststrecke, sind Wege bis über 500 m/Jahr zu erkennen. In Strecke IV läßt sich die gleiche Tendenz erkennen wie in Strecke III, nur in abgeschwächter Form. Ein gänzlich anders geartetes Verhalten zeigt Strecke VI. Der Trend zeigt deutlich eine von Werten um 300 m/Jahr abfallende Kurve bis zu Werten um – 50 m. Unter Abschnitt 5.3.3 wird hierauf noch näher einzugehen sein.

Die Länge dieser Wege korreliert deutlich mit den Mittelwasserwerten (MW) auf Abb. 26. Dieser Zusammenhang erscheint plausibel, weist aber gleichzeitig darauf hin, daß entscheidend für die Bewegung der Sandbänke der Hochwasserabfluß sein muß.

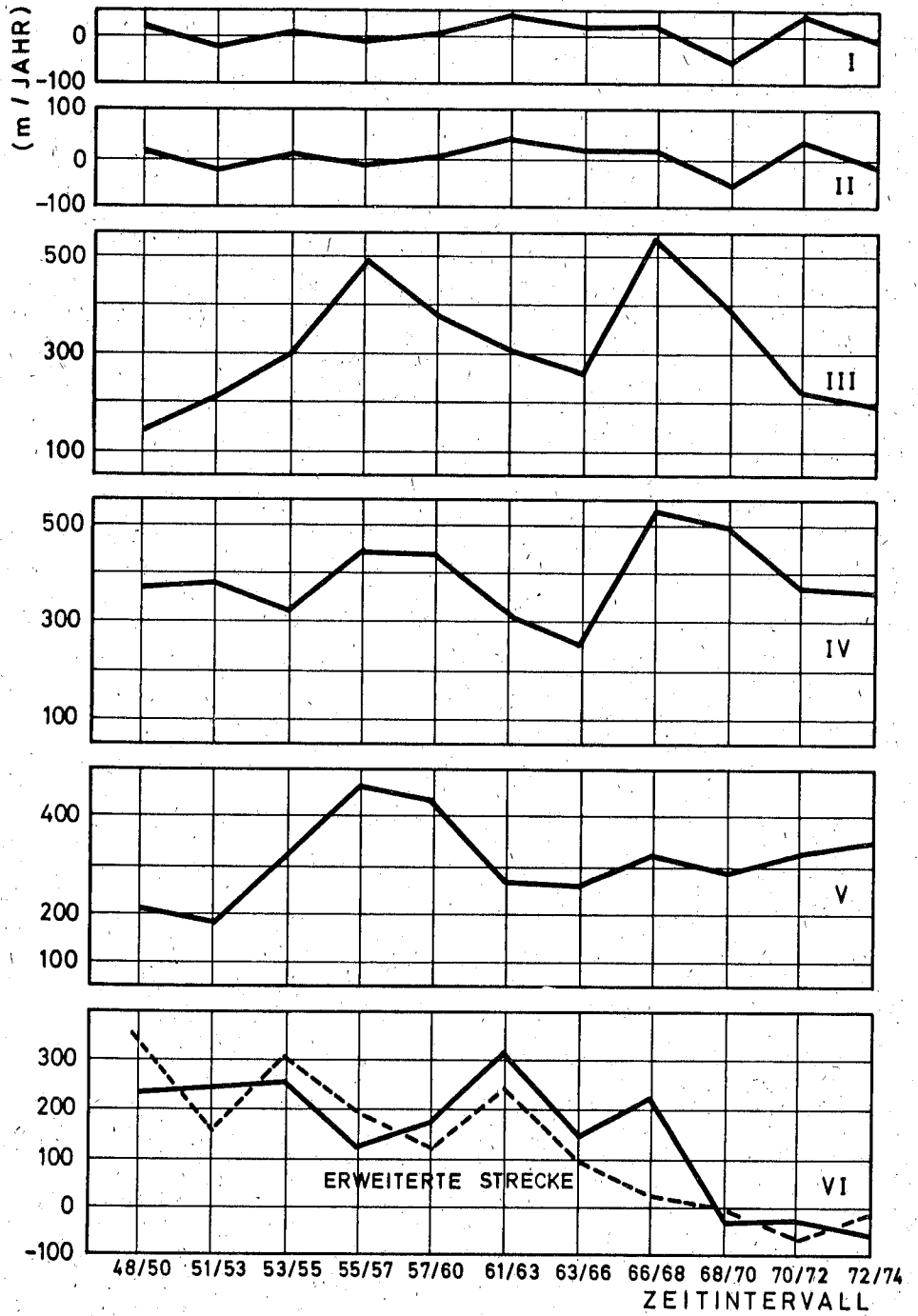


Abb. 25: Untere Elbe, Sohlenbewegung in 6 verschiedenen Strecken

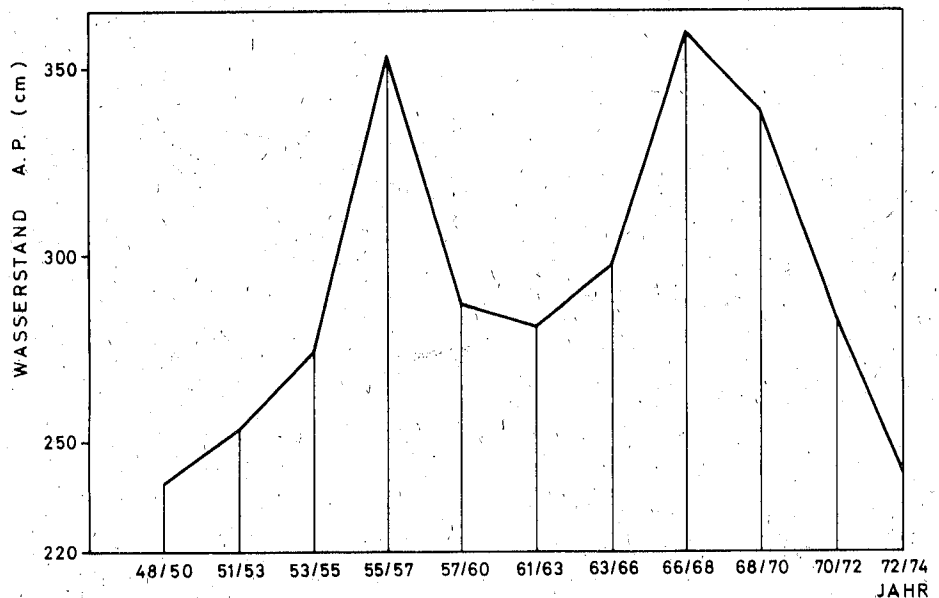


Abb. 26: Untere Elbe, Mittelwasser am Pegel Neu-Darchau, bezogen auf die Zeiträume zwischen zwei Peilungen

### 5.3.2 Das Spiegelgefälle in Abhängigkeit vom Abfluß

Da Wasserspiegelnivellements aus Direktmessungen nicht vorlagen, mußte diese aus den Wasserstandsunterschieden von je zwei benachbarten Pegeln in Zuständen der Beharung rechnerisch ermittelt werden. Wenn man auf diese Weise bei möglichst vielen verschiedenen Abflußzuständen die Gefällwerte ermittelt, ergeben sich deutlich Abhängigkeiten von Gefälle und Abfluß (Abb. 27).

Im Bereich weniger tausendstel Promille weist die Gefälle-Abfluß-Linie für jeden untersuchten Bereich eine eigene Charakteristik auf. Dabei ist im NQ-Bereich bei  $600 \text{ m}^3/\text{s}$  auch ein zeitabhängiger Einfluß festzustellen sowie die Tatsache, daß sich dort die stärksten Gefällveränderungen in Abhängigkeit vom Abfluß vollziehen. Als Ursache dafür muß der fortschreitende Ausbau bis zum Jahre 1963 vermutet werden.

Die Gefälleinie der Strecke V ist wenig aussagefähig, da hier die sohlenmorphologische Einteilung sich nicht mit der vorgenommenen Streckeneinteilung deckt. Auf diese Strecke wird daher bei der Wertung nicht weiter eingegangen.

Die dargestellten differenzierten Abhängigkeiten bei wechselnden Gefällsverhältnissen spiegeln die Inhomogenität der Abflußprofile wider. Die stark schwankende Breite der Hochwasserquerschnitte (Abb. 24) deutet schon darauf hin, daß es sich bei der unteren Elbe um einen weitgehend natürlich belassenen Strom handelt mit einer auch heute noch vielfältigen Au Landschaft innerhalb des Hochwasserabflußquerschnittes.

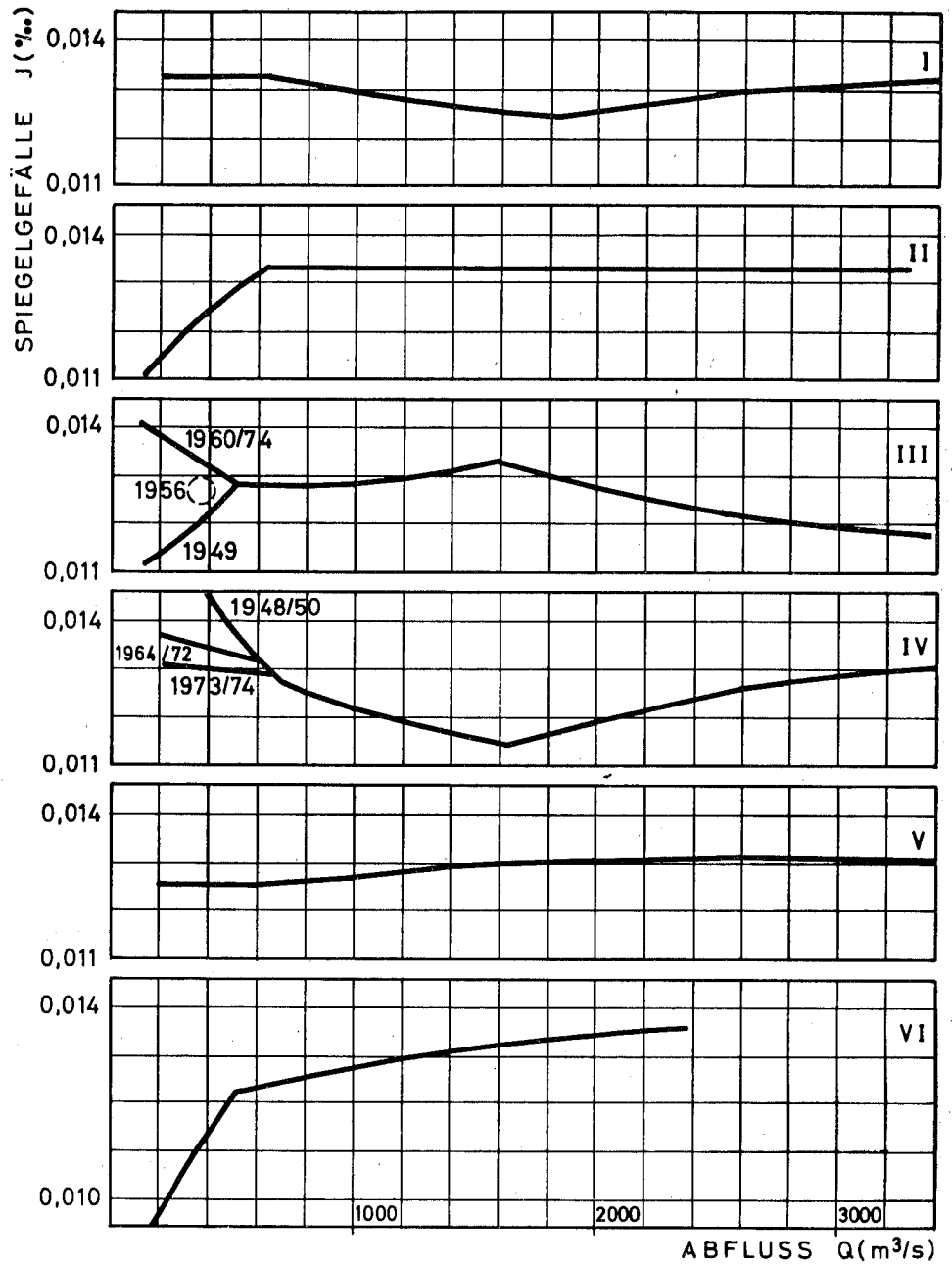


Abb. 27: Untere Elbe, Beziehungen zwischen Abfluß und Gefälle

### 5.3.3 Folgewirkungen im Zusammenhang mit Errichtung der Staustufe Geesthacht.

Die Staustufe Geesthacht bei km 586 liegt etwa 30 km unterhalb des letzten Pegels (Radegast) der untersuchten Strecke. Sie bildet die Grenze zum Tidegebiet. Die Stauwurzel liegt etwa im Bereich dieses Pegels.

Hervorgerufen durch künstlich herbeigeführte Vertiefung der Tideelbe unterhalb Hamburg waren starke Sohlenerosionen und damit Wasserspiegelabsenkungen stromaufwärts entstanden. Der Bau der Staustufe Geesthacht sollte dieser Entwicklung Einhalt gebieten. Dies ist auch weitgehend erreicht worden. Jedoch hat sich als Folge am Wehr Geesthacht ein Gefällesprung eingestellt. Dieser wird zwar bei geringen Abflüssen durch das Wehr kontrolliert. Bei Hochwasser muß aber aus betrieblichen Gründen das Wehr gelegt werden, so daß freier Abfluß stattfindet. Damit muß der Gefällesprung über ein vergrößertes Spiegelgefälle auf einer längeren Fließstrecke abgebaut werden (Abb. 27). Strecke VI läßt deutlich erkennen, daß das Gefälle mit wachsendem Abfluß wesentlich stärker ansteigt als bei den Strecken I bis V. Umgekehrt macht das Diagramm für den Bereich VI im Niedrigwasserbereich durch die mit abnehmendem Abfluß stark sinkenden Gefällswerte die Charakteristik eines Stauraumes deutlich. Wie im Folgenden zu erläutern sein wird, hat dieses spezifische Gefällverhalten Rückwirkung auf die Sohlengestaltung im untersuchten Bereich.

### 5.3.4 Schleppspannung als Funktion des Abflusses

Ermittelt man für verschiedene Abflüsse unter Verwendung der bekannten Meyer-Peter-Formel die Schleppspannungen und trägt diese über den zugehörigen Abflußwerten auf, so zeigen sich lineare Abhängigkeiten (Abb. 28).

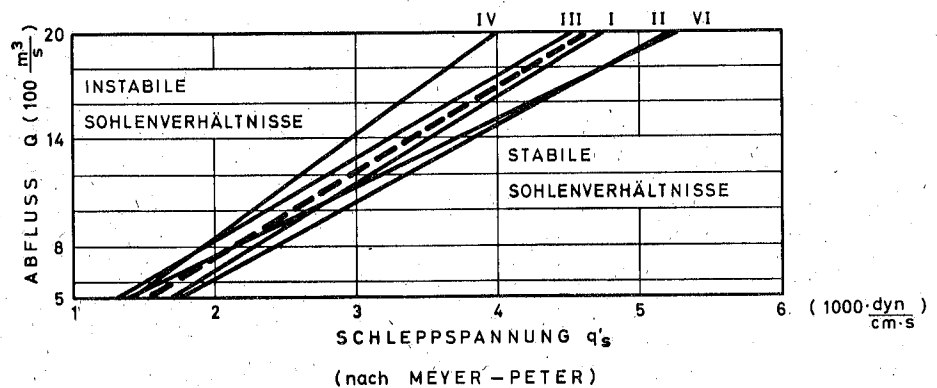


Abb. 28: Untere Elbe. Verhalten der Sänder auf der Flußsohle

Es liegen je zwei Geraden der Strecken IV und III sowie I und II nebeneinander, nahezu parallel wie von einer (gestrichelt angedeuteten) Linie getrennt. Die Gerade der Strecke VI weist eine schwächere Steigerung auf und schneidet nacheinander alle vier Geraden. Vergleicht man dieses Diagramm mit Abb. 24, so erkennt man, daß die Strecken I und II, die den für die Schifffahrt günstigen Zustand darstellen, sich rechts der gestrichelten Linie befinden. Die Strecken IV und III mit den stark wandernden Sandbänken und den häufi-

gen Veränderungen der Schiffahrtsrinne liegen links der Trennlinie. Die Strecke VI, die sich in den vergangenen 25 Jahren vom Zustand „links“ zum Zustand „rechts“ der Trennlinie in ihrer Sohlenstruktur gewandelt hat, liegt bei hohen Abflüssen ( $> MQ$ ) in dem Bereich, der für „stabile Sohlenverhältnisse“ kennzeichnend ist, bei kleinen Abflüssen ( $< MQ$ ) in dem Bereich „instabiler Sohlenverhältnisse“.

#### 5.4 Anwendung der Erkenntnisse als Mittel zur Erfolgskontrolle der Ausbaumaßnahmen

Als Erklärung für das aus der Rolle fallende Verhalten der Schleppspannung der Strecke VI in Abhängigkeit vom Abfluß kann im wesentlichen nur die Gefälländerung im unteren Abschnitt angeführt werden, welche durch Errichten der Staustufe Geesthacht entstanden ist. Das wiederum bedeutet, daß der in den Strecken IV, V und VI abgeschlossene Niedrigwasserausbau nicht bzw. nicht allein für die Entwicklung verantwortlich gemacht werden kann. Daraus ergibt sich, daß das Ausbauziel wohl in den Strecken I und II erreicht werden konnte, nicht aber in den unterhalb angrenzenden Abschnitten. Es muß daher bezweifelt werden, daß eine nach den alten Ausbaurichtlinien zu regulierende Strecke III den Zustand „stabiler Sohlenverhältnisse“ hervorrufen würde, weder in der Strecke III noch im unterhalb angrenzenden Bereich.

Geht man von der Voraussetzung aus, daß alle untersuchten Parameter (nur ein Teil konnte hier aufgeführt werden) verantwortlich sind für das gute Ausbauergebnis der Strecken I und II, kann gefolgert werden, daß die Strecken III bis VI ein ebenso gutes Ergebnis zeigen würden, falls man die hydraulischen Bedingungen dort so änderte, daß die Schleppspannungen vergrößert und damit in Abb.28 ebenfalls rechts der gestrichelten Linie verlaufen würden.

Die Ergebnisse dieser Untersuchung über die untere Elbe lassen sich mit Sicherheit nicht ohne weiteres auf andere Flußgebiete übertragen. Sie können jedoch geeignet sein, neue Wege aufzuzeigen zur Erfolgskontrolle von Ausbaumaßnahmen oder zur intensiven Vorbereitung von Flußregelungen allgemein.

## S c h r i f t t u m

- [1] Berger, W., Wyss, F., Recker, H.-J., Behlke, G., Langschieb, K., Krajewski, C., Stiller, K., Horn, H.: Ausbau des Rheins. Zeitschrift für Binnenschifffahrt und Wasserstraßen, Heft 4/1977.
- [2] Hansen, H., Lanckenau, D., Meinhard, H., Martell, J., Timón, A.: Ausbaurbeiten am Niederrhein. Zeitschrift für Binnenschifffahrt und Wasserstraßen, Heft 10/1975.
- [3] Felkel, K., Gehrig, W., Pichl, K., Strack, H., Wittmann, H.: Maßnahmen zur Regelung von Flüssen. . . . . dargestellt am Ausbau des Rheins. Deutsche Berichte zum XXI. Internationalen Schiffahrtskongress, Stockholm 1965, Thema 1-5.
- [4] Felkel, K., Störmer, H. E.: Die Geschiebemeßgeräte an der Rheinsohle beim Pegel Maxau und der Einfluß der Schifffahrt auf den Geschiebetrieb. Die Wasserwirtschaft, Heft 11/1970.
- [5] Gehrig, W., Jurisch, R.: On the law of similitude in physical models with suspended material. 17. IAHR-Congress, Baden-Baden, August 1977.
- [6] Gehrig, W.: Über die Frage der naturähnlichen Nachbildung der Feststoffbewegung in Modellen. Mitt. des Franzius-Instituts der TU Hannover, Heft 29/1967.
- [7] Hinrich, H.: Geschiebe und Geschiebefracht im Abschnitt Freistett-Worms in den Jahren 1968 - 1971. Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen, Heft 2/1972.
- [8] Hinrich, H.: Der Geschiebetrieb, beobachtet mit Unterwasserfernsehkamera und aufgezeichnet durch Unterwasserschallaufnahmegerat. Wasserwirtschaft, Heft 4/1973.
- [9] Jurisch, R.: The tachygraph - a reliable instrument for measurements in field. Proc. of FLOMEKO, Groningen, North-Holland Publishing Company, Amsterdam, Sept. 1978.
- [10] Recker, H.-J.: Die neue Verkehrsregelung im Brückenbereich Karlsruhe/Maxau. Zeitschrift für Binnenschifffahrt und Wasserstraßen, Heft 7/1976.
- [11] Rödiger, H.: Die Wirkung eines nicht ausgebauten Streckenabschnittes auf die Gestalt der Flußsohle in der regulierten unteren Elbe. Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen, Heft 2/1979.