

# HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

---

Article, Published Version

**Eckert, P.; Glazik, G.; Thieler, H.**

## **Beitrag zur Bestimmung von Flußbettveränderungen mittels hydraulischer und mathematischer Modelle zwecks Erhaltung der Schiffahrtstiefen**

Mitteilungen der Forschungsanstalt für Schiffahrt, Wasser- und Grundbau; Schriftenreihe  
Wasser- und Grundbau

---

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/106217>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Eckert, P.; Glazik, G.; Thieler, H. (1985): Beitrag zur Bestimmung von  
Flußbettveränderungen mittels hydraulischer und mathematischer Modelle zwecks Erhaltung  
der Schiffahrtstiefen. In: Mitteilungen der Forschungsanstalt für Schiffahrt, Wasser- und  
Grundbau; Schriftenreihe Wasser- und Grundbau 47. Berlin: Forschungsanstalt für  
Schiffahrt, Wasser- und Grundbau. S. 113-144.

### **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.



5) Dk 627.423 Erhaltung ausreichender Fahrtiefe  
626.001.57 Hydraulische Modelle  
57.001.57 Mathematische Modelle

Beitrag zur Bestimmung von Flußbettveränderungen mittels  
hydraulischer und mathematischer Modelle zwecks Erhaltung  
der Schiffahrtstiefen

Dipl.-Ing. P. Eckert  
Dr.-Ing. G. Glazik und  
Dipl.-Ing. H. Thieler

Beitrag zum XXV. Internationalen Schiffahrtkongreß,  
Edinburgh 1981

## 1. Einleitung

Die aus dem Bestreben nach Erhöhung der Effektivität der Schifffahrt resultierende Forderung nach Verbesserung bzw. Erhaltung der Schifffahrtstiefen in alluvialen Flüssen ist um so eher zu erfüllen, je exaktere Kenntnisse über die den Flußlauf gestaltenden Vorgänge vorhanden sind. Dies gewinnt ferner um so mehr Bedeutung, je weiter im konkreten Fall ein Fluß durch Ausbaumaßnahmen bereits an bestimmte Grenzen seiner Nutzung gebracht wurde.

Bei der Entwicklung der theoretischen Grundlagen für alluviale Flußläufe wurden in den letzten Jahrzehnten beachtliche Fortschritte erzielt, die auch deren Ausbau im Interesse der Schifffahrt förderten. Als wesentliches Hilfsmittel dabei haben sich modellmäßige Untersuchungen erwiesen. Versuche an maßstabsgerechten hydraulischen, d. h. physikalischen Flußmodellen haben seit langem ihren anerkannten Platz in der wasserbaulichen Praxis. Besonders hervorzuheben sind dabei Modelle mit beweglicher Sohle, die auch unmittelbar flußmorphologische Prozesse widerzuspiegeln vermögen / 3 /, / 10 /, / 11 /, / 14 /, / 17 /, / 18 /, / 19 /, / 23 /, / 24 /. In jüngerer Zeit wurden durch die Entwicklung mathematischer Modelle für Flüsse mit beweglicher Sohle sowohl methodische neue Wege beschritten als auch mit deren Hilfe erweiterte Aussagemöglichkeiten erreicht / 1 /, / 14 /, / 15 /, / 20 /.

Beiden Arten von Modellen - hydraulischen und mathematischen - ist gemeinsam, daß für ihren Einsatz zur Lösung praktischer Aufgaben ihre Testung an Hand von Prototyp-Daten erforderlich ist. Da bei mathematischen Modellen keine Vergleichsversuche über die Flußbettdeformation in dem Sinne wie bei physikalischen Modellen möglich sind, ist ihre Aussagekraft sehr wesentlich abhängig von der Qualität und Quantität der verfügbaren Daten. Die Entwicklung mathematischer Modelle kann nicht die bekannten hydraulischen Modellversuche ersetzen. Beide haben ihre spezifischen Vor- und Nachteile. Sie haben jeweils bestimmte Einsatzgrenzen, wobei sich jedoch ihre Aussagemöglichkeiten gewissermaßen durch Rückkopplung er-

höhen lassen. Während z. B. wegen des großen Aufwandes und Platzbedarfs in einem hydraulischen Modell nur relativ kurze Flußabschnitte dargestellt werden können, kann in einem mathematischen Modell ein ganzes Flußsystem simuliert werden. Dagegen kann ein hydraulisches Modell detaillierte Aussagen über bestimmte lokale Erscheinungen vermitteln, deren systematische Untersuchung und Quantifizierung u. a. auch der Weiterentwicklung mathematischer Modelle dient. Andererseits dürfte die mathematische Formulierung der Gesetzmäßigkeiten der Flußbettprozesse die exaktere Herausarbeitung von Ähnlichkeitskriterien für hydraulische Modelle mit beweglicher Sohle fördern.

Anknüpfend an die weithin bekannten Arbeiten der früheren Preußischen Versuchsanstalt für Wasser-, Erd- und Schiffbau in Berlin / 17 /, / 18 /, / 19 /, verfügt die Versuchsanstalt für Schiffahrt, Wasser- und Grundbau über umfangreiche Erfahrungen mit Flußmodellen mit beweglicher Sohle / 3 /, / 10 /, / 11 /, / 12 /, / 14 /, / 24 /.

Vor einigen Jahren haben wir in der Versuchsanstalt begonnen, mathematische Modelle für alluviale Flußläufe zu erarbeiten und schrittweise zu vervollkommen, welche sowohl die Wasser - als auch die Sedimentbewegung und deren Wechselwirkungen beschreiben / 15 /. Wir glauben, daß die uns vorliegenden Ergebnisse der hydraulischen Modellversuche mit beweglicher Sohle einen wertvollen Fundus darstellen, um durch Vergleiche sowie Kombinationen von physikalischen und mathematischen Modellen die Entwicklung aussagekräftiger mathematischer Modelle für alluviale Flußläufe zu fördern.

Unsere hydraulischen Modellversuche für Flüsse waren überwiegend auf die Verbesserung und Erhaltung der Schiffahrtsbedingungen, u. a. im Zusammenhang mit anderen Wassernutzungen, gerichtet. Als Beispiele wird auf / 2 /, / 3 /, / 4 /, / 13 / und / 24 / verwiesen.

Die Umsetzung ihrer Ergebnisse in die Praxis hat nachweisbar zu Effektivitätserhöhungen der Schiffahrt geführt, die durch andere Methoden nicht in dieser Weise möglich gewesen wären. Ein wesentliches Kriterium für die Nutzung einer Wasserstras-

se ist die Schaffung und Erhaltung sowie vorausschauende Bekanntgabe der unter konkreten hydrologischen und wasserwirtschaftlichen Bedingungen größtmöglichen Schiffahrts- bzw. Tauchtiefen. Die allgemeine wirtschaftliche Entwicklung hat in den letzten Jahren zu einer verstärkten Entnahme von Brauchwasser aus den Flüssen (z. B. als Kühlwasser für Kraftwerke und Bewässerungswasser für die Landwirtschaft) geführt / 4 /, / 16 /, was u. a. neue Erfordernisse zur Erhaltung der Schiffahrtstiefen mit sich brachte. In den nachfolgenden Ausführungen wird dargelegt, wie mittels hydraulischer und mathematischer Modelle entsprechende Maßnahmen erarbeitet wurden; gleichzeitig werden an diesem Fall-Beispiel die verschiedenen Möglichkeiten der Aussage sowie der Weiterentwicklung beider Arten von Modellen erörtert.

## 2. Aufgabenstellung

Die prinzipielle Aufgabenstellung wurde bereits einleitend umrissen. Für den konkreten Fall werden nachstehend noch stichwortartig einige Ausgangsbedingungen und zu beantwortende Teilfragen zusammengestellt.

Aus einem Flußlauf ohne Abflußregelung sind seitlich größere Wassermengen für die Durchflußkühlung eines Kraftwerkes zu entnehmen und unterhalb der Entnahmestelle wieder einzuleiten. Die Entnahme erfolgt aus dem freifließenden Gewässer ohne Errichtung einer Stauanlage. Das Entnahmeverhältnis ist zeitlich veränderlich in Abhängigkeit sowohl von der Abflußganglinie des Flusses als auch der saison- bzw. temperaturbedingten Kühlwassermenge.

Der Abstand zwischen Entnahme- und Wiedereinleitungsstelle sowie die Gestaltung des Entnahmebauwerks sind zu optimieren unter Berücksichtigung folgender Aspekte:

- Verhinderung thermischen Kurzschlusses
- möglichst geringe Beeinflussung der Wassertiefen, der Wasserspiegelgefälle und des Geschieberozimes
- günstige Unterhaltungsbedingungen sowohl für die Betriebsanlagen des Kraftwerkes als auch für die Wasserstraße.

Bezüglich der Sedimentation sind nachstehende Probleme zu lösen:

- Ermittlung der Geschiebefracht
- Geschiebeeintrag in das Entnahmesystem und Möglichkeiten zu seiner Reduzierung
- Ausbaumaßnahmen am Flußlauf im Bereich der Entnahme, der Mittelstromzone und der Rückführung im Interesse der Sicherung der Schifffahrtstiefen / 7 /, / 8 /.

Die Charakteristik der Flußstrecke kann wie folgt kurz umrissen werden:

Alluvialer Flachlandfluß mit feinem Geschiebe ( $I \approx 1 : 5.600$ , relativ gleichförmiger Mittelsand mit  $d_{50} \approx 0,7 \text{ mm}$ ) / 9 /; mit Buhnen reguliert, natürliche Abflußganglinie..

### 3. Untersuchungen am hydraulischen Modell

Die experimentellen Untersuchungen wurden an einem Modell im Maßstab 1 : 75 (Bild 1 und 2) bei Verwendung von Sand als Modellgeschiebe durchgeführt. Da für die Durchführung von Flußmodellen mit beweglicher Sohle z. Z. noch keine allgemeingültige Ähnlichkeitsbeziehungen zwischen Modell und Natur existieren, wurden die in der FAS in der praktischen Anwendung bewährten empirischen Ansätze von Krey zur Ermittlung einzelner Modellparameter verwendet und die Naturähnlichkeiten der Sohlengestaltung im Modell durch Vergleich einzelner Querprofile aus Natur und Modell nachgewiesen (Bild 3).

Mit Hilfe der eingesetzten Modelltechnik zur Ermittlung der im Modell während einzelner Zeitabschnitte vorhandenen Geschiebefrachten konnte die Gültigkeit der Geschiebeformel der FAS für das Modell bestätigt werden. Sie wurde daher zur Darstellung der Geschiebeverhältnisse herangezogen.

Zur Lage von Entnahgebauwerken und deren Gestaltung liegen allgemein anwendbare Richtlinien vor. Durch Einhaltung einzelner Kriterien, wie

- Anordnung der Entnahme an der Außenseite von Krümmungen im Bereich oder unterhalb des Krümmungsscheitels,

- Anordnung von Entnahmeschwellen,
- größtmögliche Höhenlage der Entnahmesohle über der Flußsohle,
- Berücksichtigung der Einströmgeschwindigkeit und
- Anordnung von strömungsgünstigen Übergängen vom Fluß zur Entnahme

kann der Geschiebeeintrag in das Entnahmesystem beeinflusst werden.

Auf Grund der Forderung nach einer ganzjährigen Nutzung des Wasserdargebotes und die während eines Abflußjahres in natürlichen Gerinnen auftretenden Wasserstandsschwankungen ist eine Optimierung des Entnahmequerschnittes nicht möglich. Es kommt je nach Größe des Entnahmeverhältnisses  $Q_E/Q$  in den meisten Fällen zu einer Unter- oder Überdimensionierung des Entnahmequerschnittes. Bei einer Unterdimensionierung treten verhältnismäßig große Einströmgeschwindigkeiten auf, die Ursache für einen erhöhten Geschiebeeintrag in das Entnahmesystem sein können. Eine Überdimensionierung führt zu stark einseitiger Einströmung mit erhöhten örtlichen Maximalgeschwindigkeiten. Mit der Erhöhung der Entnahmegeschwindigkeit bei einseitiger Entnahme durch Überdimensionierung ist eine Erhöhung der im Entnahmebereich vor dem Entnahmebauwerk auftretenden Quergeschwindigkeiten verbunden. Das kann dazu führen, daß die Kursbeständigkeit der Schiffe nicht mehr gesichert ist. Durch eine Unterteilung des Entnahmequerschnittes mit Strömungsleiteinrichtungen kann der einseitigen Einströmung entgegengewirkt werden (Bild 4). Die Anzahl der Unterteilungen und die Dimensionierung und Gestaltung der Leiteinrichtungen hängt von den örtlichen Bedingungen ab und ist durch Versuche zu ermitteln.

Bei der Entnahme großer Brauchwassermengen  $Q_E$  im Verhältnis zum Durchfluß  $Q$  des Flusses kann infolge der Störung des hydraulischen Regimes im Entnahmebereich das Eindringen von Geschiebe in das Entnahmesystem nicht verhindert werden. Nach den durchgeführten Untersuchungen besteht eine Abhängigkeit des Geschiebeeintrages  $G_E$  vom Entnahme-Abflußverhältnis

nis  $Q_E/Q$  und von der Geschiebefracht  $G_F$  des Flusses.

Für das Modell wurde für normale Verhältnisse der Sohlengestaltung im Entnahmebereich, d. h. ohne größere Geschieberampen und für den durch Leiteinrichtungen unterteilten Entnahmequerschnitt folgender empirischer Ansatz abgeleitet:

$$\frac{G_E}{G_F} = 4,435 \left| \frac{Q_E}{Q} \right|^{2,38} \quad (1)$$

Der Geschiebeeintrag in das Entnahmebauwerk erfolgte infolge der Unterteilung des Entnahmequerschnittes nahezu gleichmäßig (Bild 5).

Zur Vermeidung schiffahrtsbehindernder Geschiebeablagerungen im Entnahmebereich und in der Zwischenstromzone sind flußbauliche Maßnahmen erforderlich. Unter Verwendung der in / 8 / erläuterten Berechnungsansätze zur Querschnittsgestaltung wurde im Modell die Wirkung von drei Verbauungsgraden auf die Sohlenlage untersucht.

Die Ansätze wurden aus der Geschiebeformel der FAS unter Verwendung vereinfachender Annahmen entwickelt und können daher nur zur ersten näherungsweise Abschätzung der erforderlichen Querschnittseinengung herangezogen werden. Stark vereinfacht ergibt sich folgender empirischer Ansatz zur Überschlagsermittlung:

$$\frac{G_2}{G_1} = \left( 1 - \frac{Q_E}{Q} \right)^2 \frac{F_m}{F_m'} \quad (2)$$

$G_1$  = Geschiebefracht, die von oberstrom in den Entnahmebereich transportiert wird

$G_2$  = Geschiebefracht in der Mittelstromzone

$Q_E$  = Entnahmemenge

$Q$  = Abfluß im Fluß

$F_m$  = Durchflußfläche bei nicht eingengtem Querschnitt

$F_m'$  = durch Querschnittseinengung reduzierte Durchflußfläche

Es wird hierbei davon ausgegangen, daß die aus der Mittelstromzone abzutransportierende Geschiebemenge  $G_2$  gleich der ankommenden Menge  $G_1$  ist. Durch die Untersuchungen wurde jedoch nachgewiesen, daß ein Teil des Geschiebes  $G_1$  in das Entnahmesystem gelangt. Die erforderliche Transportkraft des Flusses wird damit geringer, und eine Reduzierung der Querschnittseinengung ist somit möglich.

1. Verbau  $B'/B = 0,106$

2. Verbau  $B'/B = 0,294$

$B =$  Streichlinienbreite

3. Verbau  $B'/B = 0,442$

$B' =$  Bühnenvorstreckung

Die Querschnittseinengung wurde von dem der Entnahmeseite gegenüberliegenden Ufer (Krümmungsinnesseite) durch Vorstrecken der Bühnen vorgenommen. Sie begann etwa 1 Streichlinienbreite vor Beginn der Entnahme, erreichte zum Ende der Entnahme den Maximalwert und ging im Bereich der Kühlwasserrückführung wieder zurück. Es ist in jedem Fall eine strömungsgünstige Linienführung erforderlich.

Bild 6 zeigt den Verlauf der mittleren Sohlenhöhen für einzelne Untersuchungsvarianten. Zum Vergleich ist die mittlere Istsohlenhöhe bei ungestörtem Abfluß (Modell) ohne flußbauliche Maßnahmen angegeben. Die Untersuchungen wurden mit einem Entnahme-Abflußverhältnis  $Q_E/Q = 0,25$  bis etwa zur Mittelwasserrückführung und bei darüberhinausgehenden Abflüssen mit einer konstant bleibenden Entnahme durchgeführt. Wird keine Querschnittseinengung vorgenommen, bildet sich oberhalb der Entnahme eine Erosionsstrecke aus. Im Bereich der Entnahme und in der Zwischenstromzone kommt es zu größeren Geschiebeablagerungen. Durch die Querschnittseinengung bei gleichen Entnahmeverhältnissen erfolgt ein Abtrag der Ablagerungen in der Mittelstromzone und eine geringe Anhebung der Sohle oberhalb der Entnahme. Die Ergebnisse bestätigen somit die in / 3 / dargelegten theoretischen Überlegungen über die Wirkung einer Querschnittseinengung auf das örtliche Geschieberegime.

Die Variante  $Q_E = Q_Z = 0$  stellt einen besonderen Fall dar. Infolge des mit der Querschnittseinengung verbundenen Aufbaus

oberhalb der Entnahme wird in diesem Bereich durch die Gefällereduzierung die Schleppkraft vermindert und es kommt zur Akkumulation. Im Bereich der Entnahme und in der Mittelstromzone erfolgt eine wesentliche Erhöhung des Transportvermögens des Flusses. Gefährliche Erosionen sind die Folge. Da dieser Fall,  $Q_E = Q_Z = 0$ , in der Regel beim Flußausbau, der in den meisten Fällen den anderen Arbeiten vorgezogen wird und auch nach Inbetriebnahme der Entnahme nicht auszuschließen ist, muß die Flußsohle im gesamten Bereich gesichert werden. Das kann entweder durch eine Steindeckschicht oder durch Grundschwelen erreicht werden. Bei den Untersuchungen wurde die Variante Grundschwelen weiter untersucht. Folgende Ergebnisse wurden ermittelt:

- Werden die Höhen der Oberkanten der Sohlschwelen in der für den Flußabschnitt zulässigen Höhe von Bauwerksvorlagen angeordnet, ist der durch die Sohlschwelen erzeugte Querschnittsverbau des Durchflußprofils bei der Ermittlung des erforderlichen Querschnittsverbaus einzubeziehen. Nach den Untersuchungen, wobei die örtlichen Verhältnisse des im Modell nachgebildeten Flußabschnittes ausschlaggebend waren, verringerte sich die erforderliche Vorstreckung der Bühnen auf  $B'/B = 0,18$ .
- Um die Sohle im Entnahmebereich und in der Zwischenstromzone zu sichern, sollte der Abstand der Sohlschwelen etwa 30 % der ursprünglichen Streichlinienbreite betragen.
- Eine Sohlensicherung unterhalb der Mittelstromzone wird in einzelnen Fällen erforderlich sein.
- Übergänge zu der ober- und unterhalb des Sicherungsbereiches liegenden Ist-Sohle sind allmählich zu gestalten.

#### 4. Untersuchungen mit einem mathematischen Modell

Um die Besonderheiten eines mathematischen Modells zu testen, wurde das oben beschriebene hydraulische Modell auf einer Rechenanlage simuliert.

Nachfolgende Voraussetzungen gelten für das Modell:

1. Es wird eine eindimensionale Bewegung des Wassers und Sediments betrachtet.
2. Die Bettrauhigkeit bleibt zeitlich konstant, kann jedoch örtlich und in Abhängigkeit vom Durchfluß variieren. Diese Abhängigkeiten müssen bekannt sein.
3. Es wird nur mit einem charakteristischen Korndurchmesser des Geschiebes gerechnet.
4. Der suspendierte Sedimenttransport wird vernachlässigt.

#### 4.1. Stetiges Modell

Das mathematische Modell der Strömungsvorgänge in offenen Gerinnen wird durch die Grundgleichung von Barre de Saint-Venant beschrieben.

Kontinuitätsbedingung:

$$\frac{\partial q}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial t} = 0 \quad (3)$$

Bewegungsgleichung:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} + g \frac{\partial H}{\partial x} = -g \frac{v/v}{M^2 R^{4/3}} \quad (4)$$

Hierbei stellt die rechte Seite das Energieliniengefälle nach dem empirischen Ansatz von Manning und Strickler dar.

$$J_e = \frac{v/v}{M^2 R^{4/3}} \quad (5)$$

Für den Sedimenttransport werden in der Literatur / 5, 20, 21, 22 / ebenfalls zwei Grundgleichungen angegeben.

Kontinuitätsbedingung:

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial g}{\partial x} = 0 \quad (6)$$

Bewegungsgleichung:

$$g = f(v) \quad (7)$$

Gleichung (7) stellt eine starke Vereinfachung des Geschiebetransports dar. Hierfür kann jede brauchbare Geschiebefrachtformel eingesetzt werden.

Wegen der Besonderheiten bezüglich des zeitlichen Ablaufes der Wasser- und Geschiebebewegung kann der Durchfluß als stationär betrachtet werden / 20, 22 /. Folgende Annahmen sind dafür maßgebend:

1. Im ungestauten Flachlandfluß tritt eine relativ langsame Veränderung des Durchflusses auf.
2. Die Geschiebebewegung ist im Vergleich zum Wasserabfluß wesentlich langsamer.
3. Wegen der notwendigen Diskretisierung und einer eindimensionalen Berechnung ist die Flußgeometrie stark vereinfacht.
4. Bei den vielfach ausgeführten hydraulischen Flußmodellen, die anerkannte Ergebnisse lieferten, wurde der Abfluß in mehreren Stufen stationär eingestellt.

Damit entfällt die lokale Beschleunigung (  $\frac{\partial v}{\partial t} = 0$  ) und Gleichung (3) kann geschrieben werden als:

$$q = v \cdot h = \text{konstant bzw. } Q = v \cdot F = \text{konstant} \quad (8)$$

Die Gleichung (4) ergibt sich unter Berücksichtigung von Gleichung (5) zu:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{v^2}{2g} + H \right) = - J_e \quad (9)$$

Die Veränderung der Sohlenhöhe wird durch die Gleichung (6) beschrieben, in die eine Geschiebefrachtformel (Gl. 7) integriert wurde.

Die Aufgabe besteht in der Lösung der Gleichungen (6) und (9). Nach / 20, 22 / kann diese Lösung in Verbindung mit brauchbaren Randbedingungen in alternierenden Schritten erfolgen.

- Schritt 1: Berechnung von  $v$  bei gegebenem  $z$  mit Gleichung (9).  
 Schritt 2: Berechnung von  $z$  bei gegebenem  $v$  mit Gleichung (6).

#### 4.2. Diskretes Modell

Zur Lösung der Differentialgleichungen des Modells stehen verschiedene mathematische Schemata zur Verfügung / 5, 20, 21, 22 /. Dazu wird eine ortsdiskrete Approximation vorgenommen. Die für die Berechnung ausgewählten Querprofile sollen den ihnen zugeordneten Flußabschnitt möglichst gut repräsentieren. Innerhalb eines Abschnittes ändern sich die Parameter wie Geometrie, Rauigkeitsbeiwert, Sohlgefälle nur wenig.

Der Abstand zwischen den Profilen kann unterschiedlich sein, d. h. in relativ gleichförmigen Abschnitten kann ihr Abstand größer gewählt werden als in stark ungleichförmigen Abschnitten.

Hier soll die Diskretisierung ähnlich wie bei FELKEL / 6 / entsprechend Abb. 7 vorgenommen werden. Die Bewegungsgleichung der Wasserströmung ergibt sich danach wie folgt:

$$\frac{1}{\Delta x} \left( \frac{v_i^2 - v_j^2}{2g} + H_i - H_j \right) = - J_e \quad (10)$$

und unter Berücksichtigung von Gleichung (8)

$$\frac{1}{\Delta x} \left( \frac{v_i^2 - v_j^2}{2g} + H_i - H_j \right) = \frac{-Q^2}{F_{ij}^2 M_{ij}^2 R_{ij}^{4/3}} \quad (11)$$

Diese Gleichung ist ausgehend von einer bekannten Randbedingung iterativ lösbar.

Für das ortsdiskrete Modell geht Gleichung (6) in eine Bilanzgleichung für jedes Profil über:

$$B_{s_{ij}} - \Delta x \frac{z_j^t - z_i^t - \Delta t}{\Delta t} = G_i^t - G_j^t \quad (12)$$

Dies bedeutet, daß sich Ablagerungen oder Erosionen gleichmäßig über den gesamten Abschnitt zwischen zwei Profilen ausbreiten. Zur Bestimmung des Geschiebetransports wurde eine in der FAS entwickelte Geschiebefrachtformel verwandt / 12 /.

$$g = A (q - q_0)^{1/2} \quad (13)$$

Diese Formel entstand durch systematische Forschungen in Versuchsrinnen und hydraulischen Flußmodellen und hat sich seither speziell für Flachlandflüsse gut bewährt. Der Wert  $q_0$  gibt den Abfluß an, bei dem die Geschiebebewegung beginnt. Er ist abhängig von der Korngröße, Geschiebezusammensetzung und vom Sohlgefälle. Der Beiwert  $A$  berücksichtigt die Besonderheiten der Flußstrecke und beinhaltet somit alle von der Formel nicht erfaßten Abhängigkeiten.

#### 4.3. Anfangs- und Randbedingungen

Die Berechnungen im mathematischen Modell laufen für einen bestimmten Zeitabschnitt der Natur, für den die entsprechenden Werte als Anfangsbedingungen vorzugeben sind. Im angegebenen Beispiel wurde die 3 km lange Strecke durch 28 Profile in 27 Abschnitte unterteilt. Um eine möglichst gute Wiedergabe der Geometrie zu erreichen, erfolgte die Darstellung der gemessenen Profile entsprechend ihrer Unregelmäßigkeit mit bis zu 30 Stützstellen. Im Bereich der Flußsohle wurde eine Mittelbildung der Sohlhöhen durchgeführt, die damit die Ausgangsbedingung  $z = z(x)$  zur Zeit  $t = 0$  darstellt. Wichtig ist bei der Aufbereitung der Geometriedaten, daß speziell die Vorländer den hydraulischen Abflußverhältnissen der Natur entsprechen (z. B. sind abflußlose Senken auszuschalten). Der Rauigkeitsbeiwert nach MANNING wurde zu  $M = 24$  für das Flußbett und zu  $M = 15$  für die Vorländer ermittelt und der charakteristische Korndurchmesser des Geschiebes betrug  $d = 0,52$  mm. Da in der Rechnung von stationären Beziehungen ausgegangen wird, sind andere Anfangsbedingungen (z. B.  $h = h(x)$ ) nicht notwendig.

An beiden Rändern der Flußstrecke sind Randbedingungen vorzugeben, mit denen das Problem lösbar wird. Am unterstromigen Rand muß die Beziehung zwischen Abflußmenge und Wasserspiegelhöhe  $H = H(Q)$  bekannt und über die gesamte Berechnungszeit gültig sein, d. h. in diesem Querschnitt sollte sich die Flußsohle annähernd in einem Gleichgewichtszustand befinden ( $z = \text{konstant}$ ). Für die Wasserströmung wird die oberstromige

Randbedingung durch eine Ganglinie  $Q = Q(t)$  gebildet. Entsprechend dem hydraulischen Modell wurde aus gemessenen Jahresreihen eine charakteristische Ganglinie gebildet und in eine Treppenkurve mit unterschiedlich langen Zeitschritten zerlegt. Für den Sedimenttransport muß ebenfalls eine oberstromige Randbedingung  $G = G(t)$  vorgegeben werden. Da hier die Nachrechnung eines hydraulischen Modells erfolgte, war diese Randbedingung bekannt. In der Natur sind dazu allerdings selten ausreichend Meßwerte vorhanden. In diesen Fällen und wenn keine anderen eindeutigen Randbedingungen vorhanden sind (z. B. Wehr ohne Geschiebedurchgang) kann versucht werden, aus Beobachtungen der Sohlenveränderungen oberhalb des zu untersuchenden Streckenabschnittes und unter Anwendung einer Geschiebefrachtformel den Geschiebetransport zu ermitteln.

#### 4.4. Ergebnisse

Mit dem mathematischen Modell wurden die durchgeführten hydraulischen Versuche nachgerechnet, um somit Aussagen über dessen Genauigkeit zu erhalten. Dabei war es notwendig, Veränderungen in der Geometrie des hydraulischen Modells (z. B. Einbau der Wasserentnahme und des Rücklaufkanals sowie angleichende Uferverbauungen) auch im mathematischen Modell genau wiederzugeben. Obwohl infolge der Diskretisierung der Flußlauf nur durch einzelne Stützstellen dargestellt werden kann, beeinflussen diese Veränderungen, insbesondere Variationen der geschiefeführenden Sohlbreite, die Ergebnisse deutlich.

Den Vergleich zwischen mathematischem und hydraulischem Modell zeigen die abgebildeten Sohlenlängsschnitte. Die Reproduktionen der Sohlenveränderungen durch das mathematische Modell können unter Berücksichtigung der nachfolgenden Bemerkungen als gut bezeichnet werden.

- Die Voraussetzung stationärer Abflüsse ist auch im hydraulischen Modell gegeben. Ebenso können die weiteren Randbedingungen durch Messungen für das mathematische Modell über-

nommen werden.

- Im hydraulischen Modell war ein reiner Geschiebetransport vorhanden (keine Suspensionen), so daß die Anwendung der Geschiebetriebleichung (13) akzeptiert werden kann.
- Die Vorgänge im Bereich der Entnahme und Wiedereinleitung sind mindestens zweidimensionaler Natur, werden aber nur eindimensional wiedergegeben. Deshalb können besonders in diesen Bereichen größere Abweichungen auftreten.
- Das Geschiebe wird durch einen Korndurchmesser charakterisiert, während im hydraulischen Modell ein Korngemisch eingesetzt wurde. Somit ist es nicht möglich, Kornsortierungen in Krümmungen, bei der Entnahme und Wiedereinleitung zu simulieren.
- Die gemessene Sohlenlage ist ein Augenblickszustand. Unter Berücksichtigung dessen, daß der Geschiebetransport in Form von Transportkörpern vorschiebt, kann die Sohlenhöhe innerhalb der Transportkörperhöhe schwanken.

Aus den Ergebnissen ist die Schlussfolgerung möglich, daß sorgfältig vorbereitete mathematische Modelle der Veränderung der Flußsohle auch für örtlich eng begrenzte Störungen angewandt werden können. Sie geben die qualitative Entwicklung der Sohle über lange Zeiträume an und demonstrieren die tendenzielle Wirkung von baulichen Maßnahmen, wobei sie in der Lage sind, in kurzer Zeit eine größere Zahl von Variationen zu simulieren. Mit einer geringen Zahl von daraus ausgewählten Vorzugsvarianten können dann im (dreidimensionalen) hydraulischen Modell genauere Untersuchungen ausgeführt werden.

### Zusammenfassung

Die notwendige Erhöhung der Effektivität der Schifffahrt erfordert u. a. exaktere Kenntnisse über die den Flußlauf gestaltenden Vorgänge. Dabei haben sich modellmäßige Untersuchungen als wesentliche Hilfsmittel erwiesen. Die anerkannten physikalischen Modelle wurden in den letzten Jahren mehr und mehr durch mathematische Modelle ergänzt.

Die allgemeine wirtschaftliche Entwicklung hat zu einer verstärkten Entnahme von Brauchwasser aus den Flüssen (z. B. als Kühlwasser für Kraftwerke und Bewässerungswasser für die Landwirtschaft) geführt, was u. a. neue Erfordernisse zur Erhaltung der Schiffahrtstiefen mit sich brachte. Im Bericht wird die Anwendung hydraulischer und mathematischer Modelle zur Erarbeitung entsprechender Maßnahmen an einem Fallbeispiel einer Wasserentnahme beschrieben.

Aus einem ungestauten Fluß werden seitlich große Wassermengen für die Durchflußkühlung eines Kraftwerkes entnommen und unterhalb der Entnahmestelle wieder eingeleitet (Abb. 1). Mittels eines hydraulischen Geschiebemodells im Maßstab 1 : 75 wurden folgende Probleme geklärt:

- Ermittlung der Geschiebefracht
- Geschiebeeintrag in das Entnahmesystem und Möglichkeiten zu seiner Reduzierung
- Ausbaumaßnahmen am Flußlauf im Bereich der Entnahme, der Mittelstromzone und der Rückführung im Interesse der Sicherung der Schiffahrtstiefen.

Die ermittelten Geschiebefrachten bestätigen den in der FAS aufgestellten Berechnungsansatz, Gl. 13, (Abb. 3). Nach den Versuchsergebnissen besteht eine Abhängigkeit des Geschiebeeintrages  $G_E$  vom Entnahme-Abflußverhältnis  $Q_E/Q$  und von der Geschiebefracht  $G_F$  des Flusses, Gl. 1. Der Geschiebeeintrag in das Entnahmebauwerk erfolgte infolge einer Unterteilung des Entnahmequerschnittes nahezu gleichmäßig (Abb. 5). Zur Vermeidung schiffahrtsbehindernder Geschiebeablagerungen im Entnahmebereich und in der Zwischenstromzone wurden Profilverengungen durch Buhnenvorstreckung vorgenommen, Gl. 2, (Abb. 6). Für den Fall der nicht in Betrieb befindlichen Wasserentnahme muß der eingeengte Bereich durch Sohlschwellen geschützt werden.

Die im hydraulischen Modell mechanisch erfaßten Randbedingungen und Ergebnisse dienen einem mathematischen Modell als Ausgangs- und Vergleichswerte. Das eindimensionale Modell simuliert sowohl in der Wasserbewegung als auch im Se-

imenttransport stationäre Verhältnisse, Gl. 11 und 12, (Abb. 7). Die Lösung erfolgt wechselweise für die Wasserbewegung bei konstanter Sohlenlage und für die Sohlenhöhe bei konstanten hydraulischen Verhältnissen. Die Ergebnisse des mathematischen Modells werden mit denen des hydraulischen Modells verglichen (Abb. 8, 9, 10).

## Literaturangaben

- / 1 / ABBOTT, M. E. Computational hydraulics, a short pathology.  
"Journal of Hydraulic Research",  
Vol. 14 (1976), Nr. 4, p. 271
- / 2 / BLAU, E. Die modellmäßige Untersuchung eines Durchstiches.  
"Wasserwirtschaft-Wassertechnik",  
1957, Heft 2, S. 55
- / 3 / BLAU, E. Die Entwicklung und der gegenwärtige Stand der Versuchstechnik bei Flußbauversuchen mit beweglicher Sohle.  
"Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Universität Dresden",  
12 (1963), Heft 6, S. 1661
- / 4 / BLAU, E. Der Einfluß der Einlaufbauwerke auf die Geschiebebewegung und auf die Schifffahrt.  
"Mitteilungen der Forschungsanstalt für Schifffahrt, Wasser- und Grundbau, Schriftenreihe Wasser- und Grundbau", Heft 7, Berlin 1963
- / 5 / CUNGE, J. A.;  
PERDREAU, N. Mobile Bed Fluvial Mathematical Models.  
"La Houille Blanche", 1973, Heft 7,  
S. 561
- / 6 / FELKEL, K. Programme pour le Calcul par Ordinateur des Modifications du Niveau du Fond et de la Surface des Eaux dans une Riviere par Suite du Charriage.  
XXII<sup>nd</sup> International Navigation Congress, Paris 1969, Section I, Subject 5

- / 7 / FUEHRER, M.;  
GLAZIK, G.;  
THIELER, H.      Scale model investigations for  
fluid mechanical problems of envi-  
ronmental protection.  
Paper S. I-4  
24th International Navigation Con-  
gress, Leningrad 1977
- / 8 / FUEHRER, M.;  
THIELER, H.      Hydraulische und hydrothermische  
Probleme der Kühlwasserversorgung  
von Wärmekraftwerken aus ungestau-  
ten Flußläufen.  
Wasserwirtschaft-Wassertechnik,  
(1976) 12
- / 9 / GLAZIK, G.      Zusammenhänge zwischen Geschiebeab-  
rieb und Gefälle mitteleuropäischer  
Flachlandflüsse.  
Internationale Konferenz über hy-  
draulische Forschung, Brno 1967,  
Publ. Technical University Brno,  
Vol. B - 5
- / 10 / GLAZIK, G.      Notes on consideration of river  
morphological processes in river  
model tests with movable bed.  
XIIIth Congress of the IAHR, Kyoto/  
Japan, 1969, Proc. Vol 5 - 1 (Semi-  
nars), 3 - 4, p. 207
- / 11 / GLAZIK, G.      Practical performance of river  
scale model tests with movable bed.  
XIIIth Congress of the IAHR, Kyoto/  
Japan, 1969, Proc. Vol. 5 - 1 (Semi-  
nars), 3 - 5, p. 211
- / 12 / GLAZIK, G.      Ergebnisse neuerer modellmäßiger Un-  
tersuchungen über die Geschiebebewe-  
gung in Flachlandflüssen.  
"Mitteilungen der Forschungsanstalt  
für Schiffahrt, Wasser- und Grund-

- bau, Schriftenreihe Wasser- und Grundbau", Heft 29, Berlin 1971, S. 189
- / 13 / GLAZIK, G. Causes of local changes of the level of regulated alluvial riverbeds and the elaboration of counter-measures by means of river scale model tests.  
 XIVth Congress of the IAHR, Paris 1971, Proc. Vol. 3 (Subject C)
- / 14 / GLAZIK, G. Morphological processes in hydraulic river models with movable bed and practical performance of scale model tests.  
 Conference "Advances in Sediment Transport", Polish Academy of Sciences, Jablonna 1978
- / 15 / GLAZIK, G. The state of river hydraulics as fundamental subject for the design of stable channels.  
 Conference "Advances in Sediment Transport", Polish Academy of Sciences, Jablonna 1978
- / 16 / GLAZIK, G.; THIELER, H. Principles for an adequate hydraulic outlining of side water intakes at rivers with special regard of the sedimentation problem.  
 XVIIIth Congress of the IAHR, Cagliari/Italien, 1979, Seminar 1: Sedimentation problems originating from withdrawing water from rivers
- / 17 / KREY, H. Modellversuche für einen Fluß mit starker Geschiebebewegung ohne erkennbare Bankwanderung.  
 Verlag von Wilhelm Ernst und Sohn, Berlin 1935

- / 18 / LIEBS, W. Die Nachbildung von Flüssen mit beweglicher Sohle im Modell. "Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasser-, Erd- und Schiffbau", Heft 43, Berlin 1942
- / 19 / SEIFERT, R. Allgemeine Ähnlichkeitsbetrachtungen über Modelle geschiebeführender Flüsse nach praktischen Gesichtspunkten. "Die Bautechnik", 1942, Heft 36/37, S. 327
- / 20 / VRIES, M. de Solving river problems by hydraulic and mathematical models. Conference "Selected problems from the theory of simulation of hydrodynamic phenomena", Polish Academy of Sciences, Jablonna 1969
- / 21 / VRIES, M. de River-bed variations-aggradation and degradation. "Publication Delft Hydraulics Laboratory", Heft 107, 1973
- / 22 / VRIES, M. de; ZWAARD, J. J. van der Movable-bed river-models. "Publication Delft Hydraulics Laboratory", Heft 156, 1975
- / 23 / ZNAMENSKAJA, N. S. Morphological principle of modelling of river-bed process. XIIIth Congress of the IAHR, Kyoto/ Japan, 1969, Proc. Vol. 5 - 1 (Seminars), 3 - 2, p. 195
- / 24 / ZSCHIESCHE, O. Ergebnisse von Flußmodellversuchen mit beweglicher Sohle für zwei Elbestrecken. "Veröffentlichungen der Forschungsanstalt für Schifffahrt, Wasser- und Grundbau", Nr. 4, Akademie-Verlag, Berlin 1954



Abb. 1 Übersichtsskizze

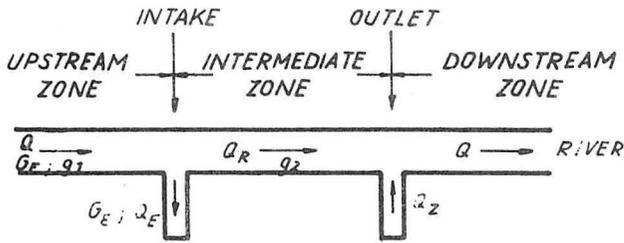


Abb. 2 Schematische Darstellung eines Durchfluß-  
kühlsystems

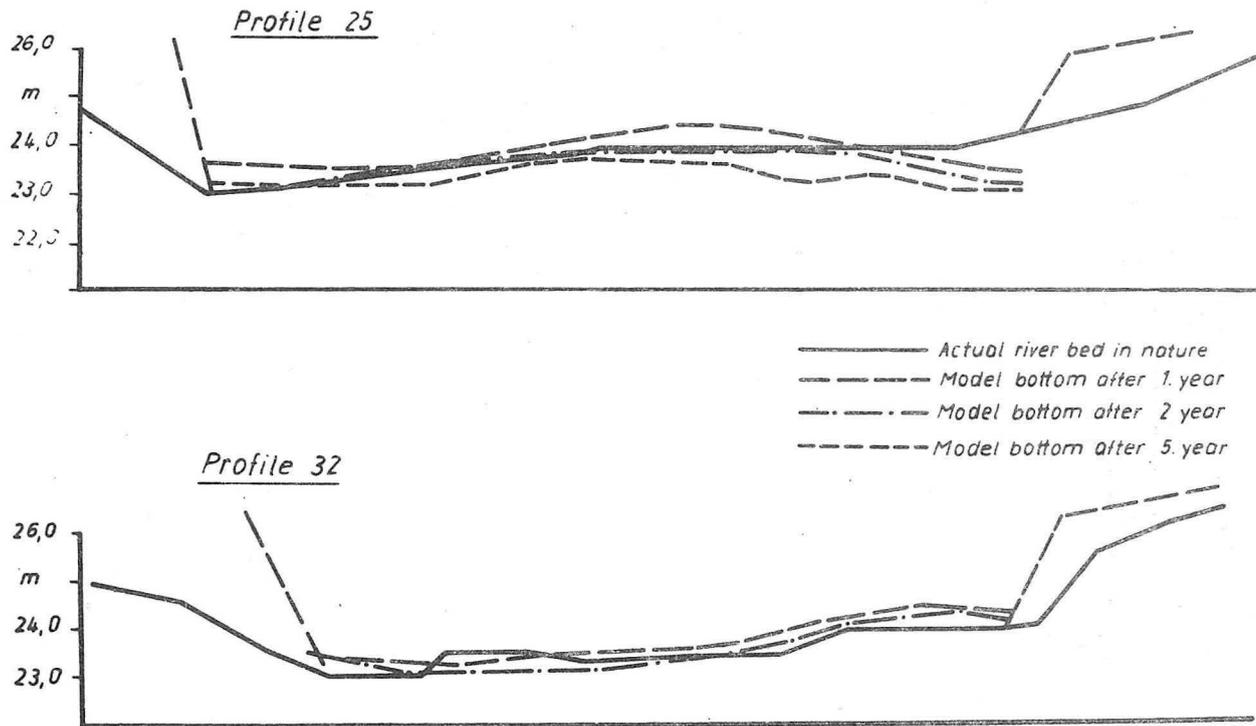


Abb. 3 Profilgestaltung in Natur und Model

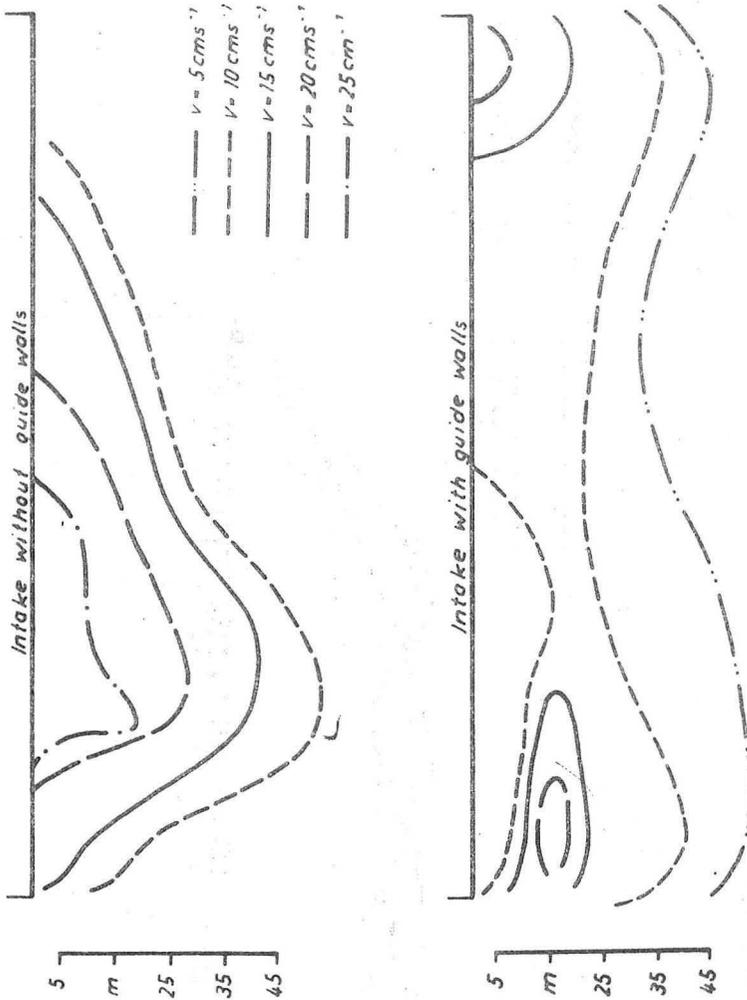
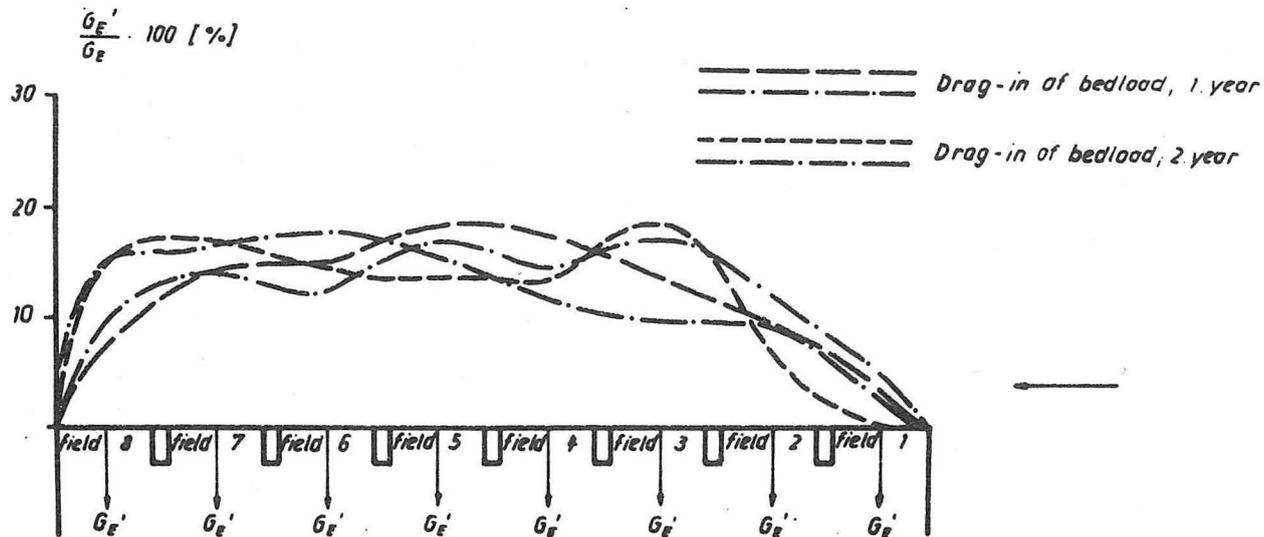


Abb. 4 Einfluß von Leiteinrichtungen auf die Quergeschwindigkeiten in Höhe des Entnahmebauwerkes,  $Q_E/Q = 0,25$

Abb. 5 Verteilung des Geschiebeeintrages in das  
Entnahmebauwerk



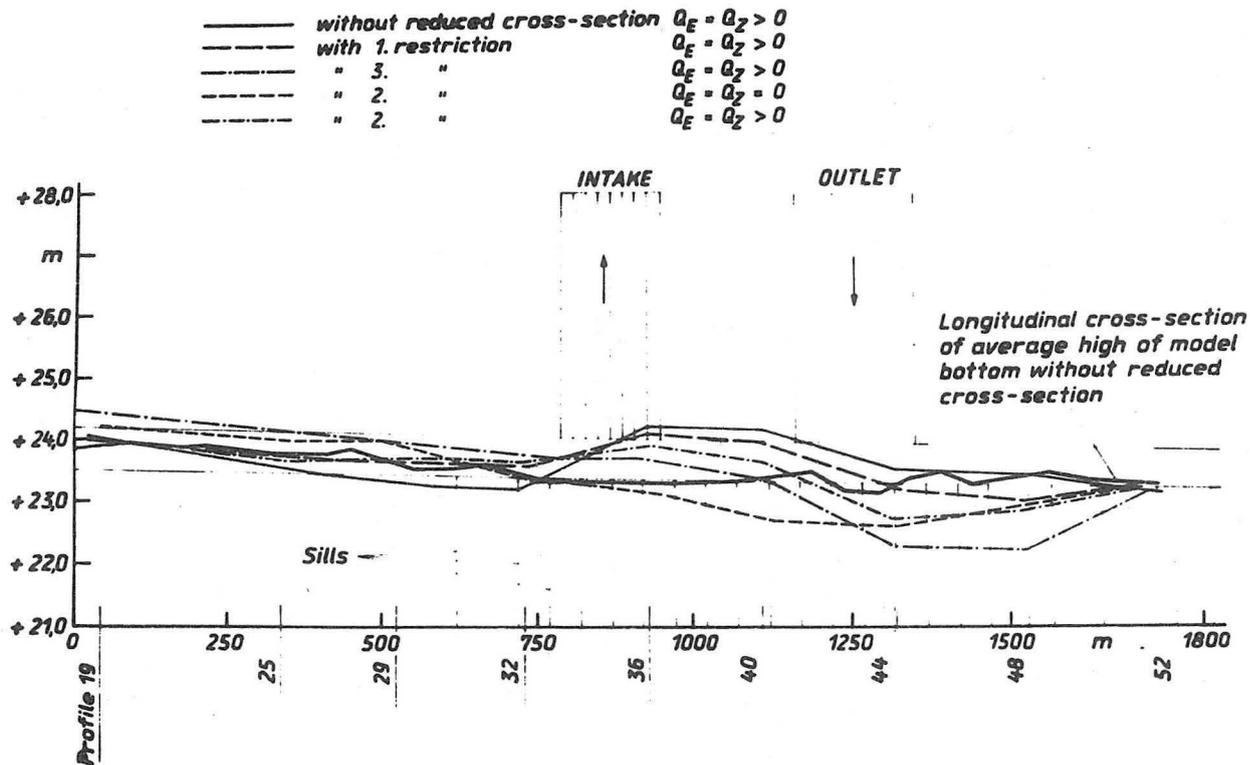
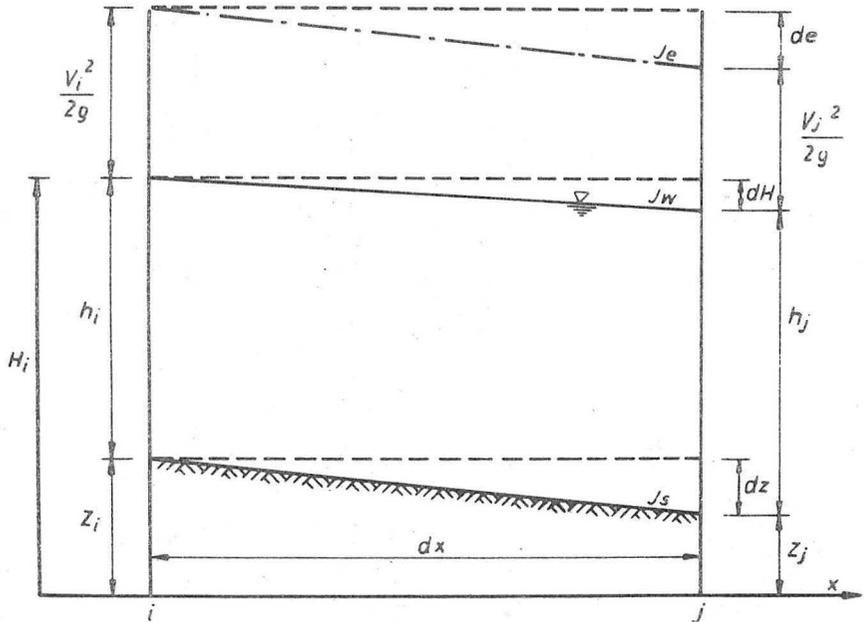


Abb. 6 Darstellung der mittleren Sohlenhöhen bei einzelnen Querschnittseingungen und Entnahme-Abfluß-Verhältnissen



$$J_e = - \frac{de}{dx}$$

$$J_w = - \frac{dH}{dx}$$

$$J_s = - \frac{dz}{dx}$$

$$de = dz + dh + d\left(\frac{v^2}{2g}\right)$$

$$dH = dz + dh$$

Abb. 7 Definitionsskizze

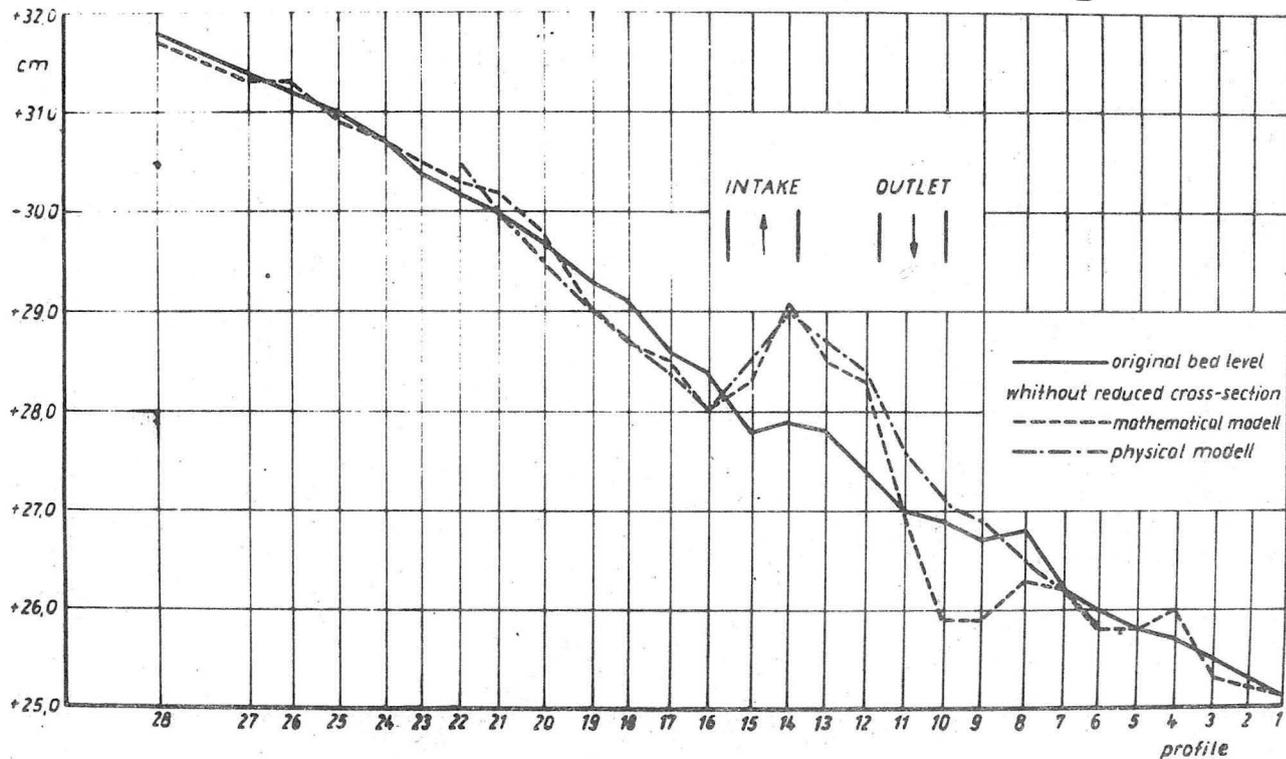


Abb. 8 Vergleich der Sohlenlagen aus hydraulischem und mathematischem Modell (in Modellwerten)

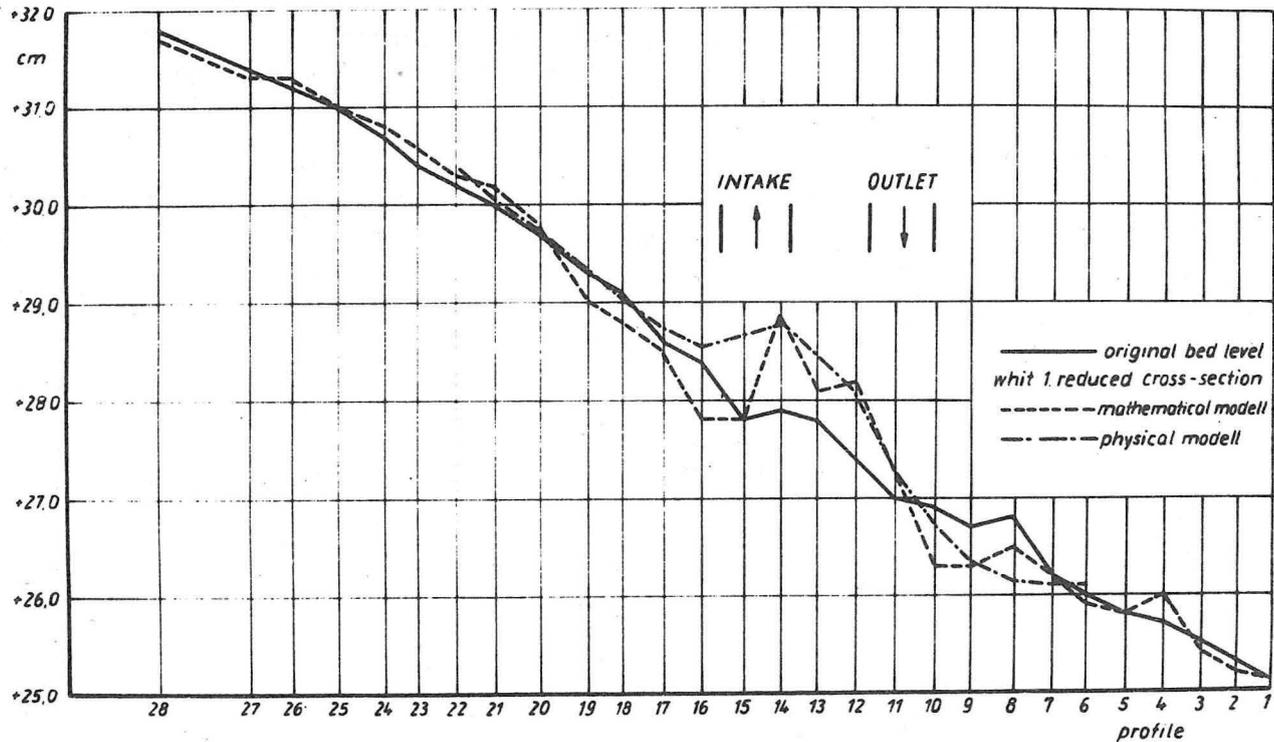


Abb. 9 Vergleich der Sohlenlagen aus hydraulischem und mathematischem Modell (in Modellwerten)

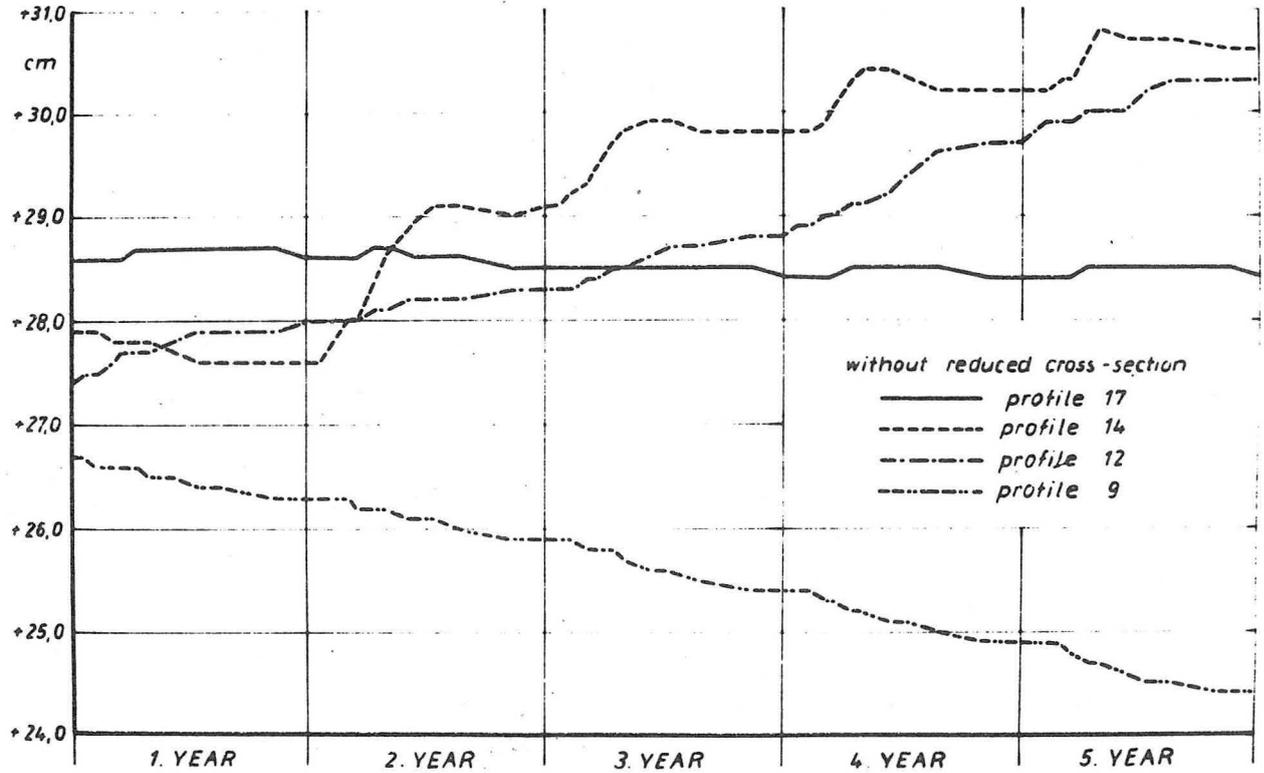


Abb. 10 Zeitliche Entwicklung der Sohlenlagen im mathematischen Modell (in Modellwerten)

