

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Article, Published Version

Nestmann, Franz

Oberrheinausbau, Wassermodell mit beweglicher Sohle des UW Iffezheim

Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/102792>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Nestmann, Franz (1993): Oberrheinausbau, Wassermodell mit beweglicher Sohle des UW Iffezheim. In: Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau 70. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau. S. 97-132.

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.

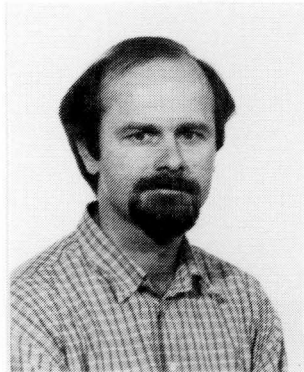
Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply;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



Oberrhinausbau, Wassermmodell mit beweglicher Sohle des UW Iffezheim

Hydraulical water model with mobile bed downstream barrage Iffezheim

Реконструкция русла Верхнего Рейна. Гидравлическая модель с подвижным дном в нижнем бьефе гидроузла Иффецхайм.



Franz Nestmann, Dr.-Ing., Baudirektor, Abteilungsleiter in der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW). Geboren 1951; Studium des Bauingenieurwesens an der Universität Karlsruhe 1972 - 1977. Wiss. Angestellter und Projektleiter von BMFT-Forschungsprojekten über Sauerstoffeintrag in Strömungen von 1978 - 1986. Seit 1985 Lehrbeauftragter an der Universität Karlsruhe im Fachbereich Strömungsmechanik. Seit 1986 Referatsleiter in der BAW Karlsruhe. Seit 1990 Leiter der Abteilung Wasserbau/Hydraulik.

Veröffentlichungen über wasserbauliches Versuchs- und Meßwesen, Gerinnehydraulik, Modell- und Naturversuche zum Sauerstoffeintrag in Wasser, Feststofftransport, Wasserstraßen.

Inhaltsangabe

Für die Beherrschung der Erosionsvorgänge im Unterwasser der Staustufe Iffezheim wurde in der Bundesanstalt für Wasserbau ein 160 m langes Modell mit beweglicher Sohle betrieben. Das Modell konnte aufgrund verfügbarer langzeitiger Datenreihen aus der Natur geeicht werden. So entstand ein Instrumentarium, das sich dazu eignete, flußbauliche Regulationsmaßnahmen in der Strecke zu beurteilen und die dort erstmals praktizierte Geschiebezugabe im wasserbaulichen Modell zu quantifizieren. Darüber hinaus werden Probleme des instationären Modellbetriebes diskutiert.

Summary

The Federal Waterways Engineering and Research Institute used a 160 m long experimental model with mobile bed in order to gain experience with the erosion processes in the tail water of the barrage Iffezheim. The model was calibrated based on long-term data gained from nature. So a method was developed, which was suitable for estimating the regulation measurements in this reach and for quantifying the artificial grain feeding, which was for the first time practically performed in an experimental model. Additionally problems which may occur when running unsteady models are discussed.

Аннотация

Для освоения процессов размыва русла Рейна в нижнем бьефе гидроузла Иффецхайм, в Федеральном институте водного строительства Германии была создана модель с подвижным дном длиной 160 м. На основе имеющихся натуральных данных, накопленных в длительный период, удалось обеспечить калибровку модели. Таким образом был создан инструментарий, способный для моделирования принимаемых мер по регулированию участка реки и получения достоверных данных о применении впервые на этом участке метода дозированной отсыпки гравийно-песчаных материалов в русло. Кроме того рассматриваются проблемы, связанные с работой модели в неустановившемся режиме.

INHALT		Seite
1	Vorgeschichte	99
2	Einleitung	103
3	Grundlagen zum Feststofftransport	106
3.1	Bettbildender Abfluß	106
3.2	Geschiebetransportfunktionen	108
3.3	Geschiebejahresfrachten	110
4	Vorbereitung experimenteller Untersuchungen	112
4.1	Aufbau des experimentellen Modells	112
4.2	Ähnlichkeitsbetrachtungen	114
5	Eichung des Modells	120
6	Besonderheiten des instationären Modellbetriebs	126
Zusammenfassung		128
Literaturangaben		131

1 Vorgeschichte

Der Oberrhein war bis zum Anfang des 19. Jahrhunderts im Abschnitt südlich der Murgmündung bei Rhein-km 344,5 in viele Stromarme aufgeteilt, vgl. Bild 1. Diese waren infolge der Zustromverhältnisse eines Flusses mit alpinem Charakter (Sommerhochwasser infolge Schneeschmelze) einer andauernden Eigendynamik unterworfen.

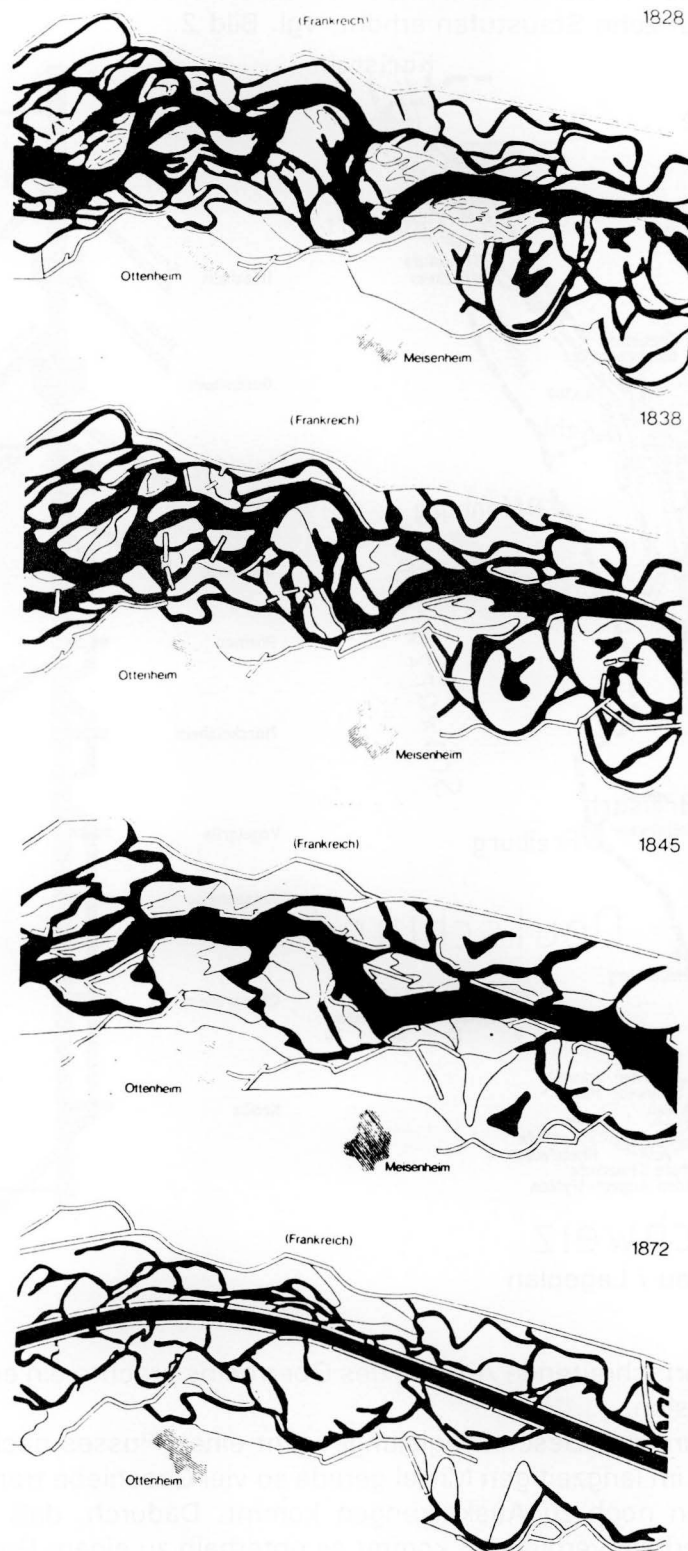


Bild 1 Vergleich von Stromsituationen südlich der Murgmündung

Ab 1817 wurde in einem Zeitraum von 50 Jahren in der badischen Strecke die nach dem Initiator Tulla benannte Rheinkorrektion durchgeführt, die den Oberrhein in ein künstlich fixiertes Bett zwängte. Diese Rheinkorrektion war ein ausgesprochenes Meliorationswerk. In dem für das Niedrigwasser zu breiten Flußbett pendelte der Talweg für die Schiffe von einem Ufer zum anderen. Kolke, Kiesbänke und lokale Sohlenanhebungen behinderten die Schifffahrt.

Seit Frankreich unterhalb von Basel 1928 mit dem Bau der ersten Staustufe begann, hat sich deren Zahl bis heute auf zehn Staustufen erhöht, vgl. Bild 2.

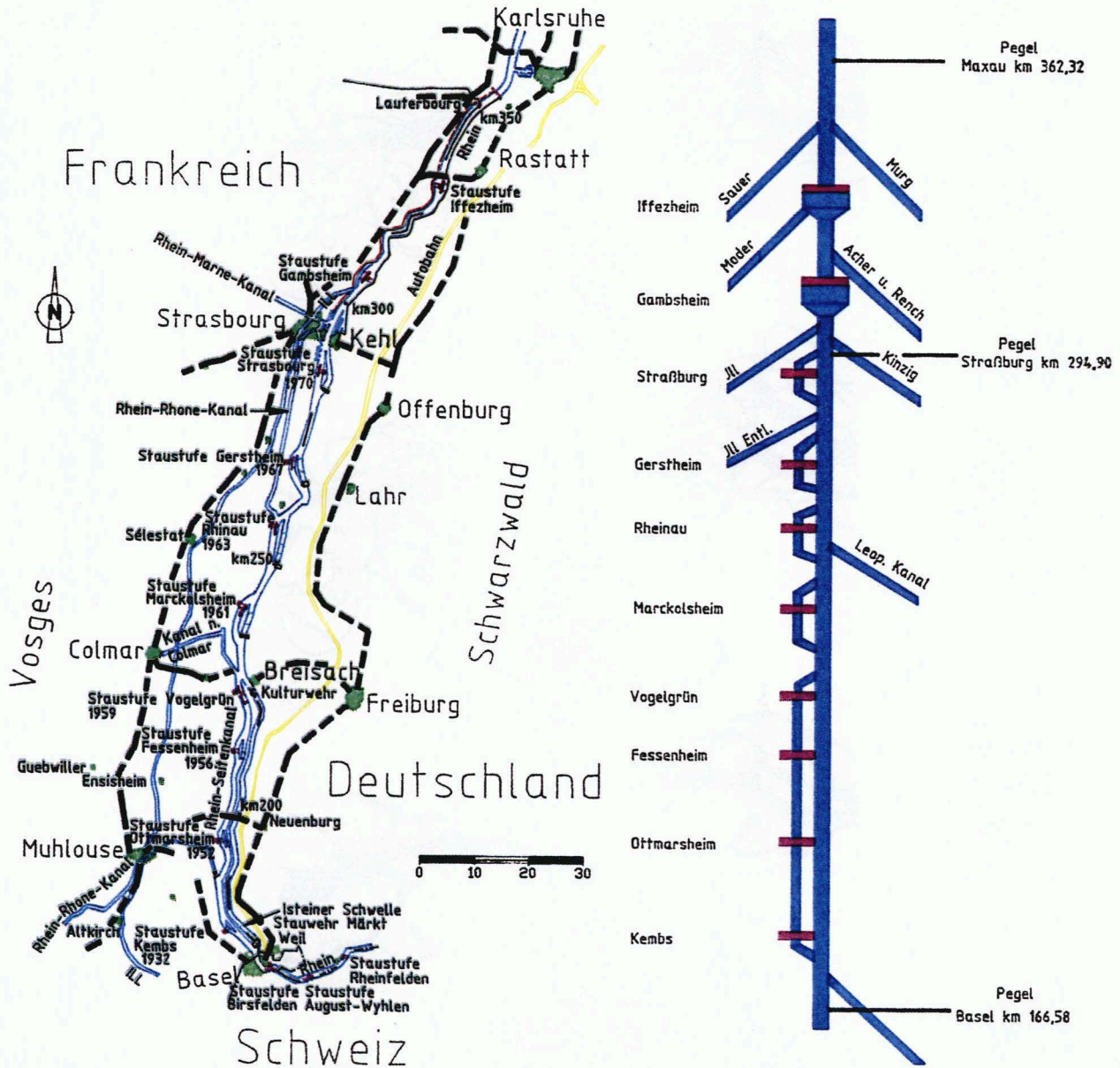


Bild 2a Oberrheinausbau / Lageplan

Dieser stromabwärts fortschreitende Ausbau des Oberrheins brachte ein erhebliches Problem mit sich: die Sohlenerosion.

Durch die Staustufe wird das Geschiebegleichgewicht eines Flusses nachhaltig gestört. Im Idealfall würde ein Fluß im langzeitigen Mittel gerade so viel Geschiebe transportieren, daß es weder zu Ablagerungen noch zu Auskolkungen kommt. Dadurch, daß die Staustufe den Geschiebetrieb von oberhalb verhindert, kommt es unterhalb zu einem Geschiebedefizit. Der Fluß reagiert auf dieses Ungleichgewicht, indem er seinem Bett das notwendige Geschiebmaterial entzieht, da wegen des Defizits überschüssige Transportenergie zur Verfügung steht.

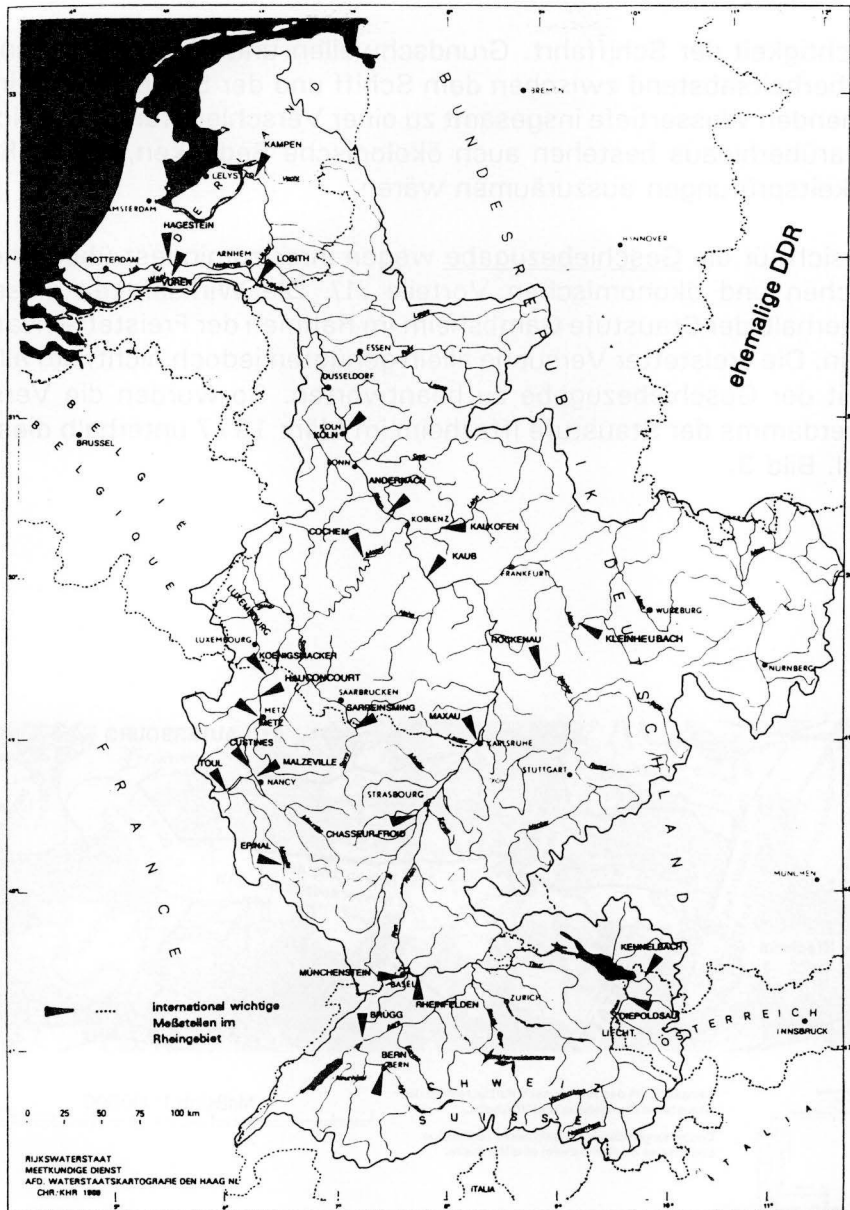


Bild 2b Einzugsgebiet des Rheins

So entsteht ggf. unterhalb einer Staustufe eine Sohlerosion von beträchtlicher Tiefe und Länge. Die Folge sind u. a. fallende Wasserspiegel und dadurch sich verringernde Grundwasserspiegel, die wiederum zur Austrocknung der Landschaft führen. Zur Lösung des Problems standen damals folgende Alternativen zur Verfügung:

- Bau von Grundschwellen
- Erstellung einer Sohlenpanzerung
- weiterer Staustufenbau
- Geschiebezugabe

Im Rahmen von Voruntersuchungen zeigte sich, daß die drei erstgenannten Varianten wohl in der Lage wären, die Sohlerosion innerhalb des ausgebauten Bereiches zu stoppen, doch würde sich das Problem früher oder später aufs neue am unteren Ende der Ausbaustrecke stellen, in Abhängigkeit von den strömungsmechanischen und den morphologischen Randbedingungen. Darüberhinaus bieten derartige Maßnahmen noch nicht genügend Schutz für die

Sicherheit und Leichtigkeit der Schifffahrt. Grundschwellen und Sohlenpanzerung erfordern einen größeren Sicherheitsabstand zwischen dem Schiff und der Sohle, was beim Erhalt der zur Verfügung stehenden Wassertiefe insgesamt zu einer Verschlechterung der Leichtigkeit der Schifffahrt führt. Darüberhinaus bestehen auch ökologische Bedenken, die im Rahmen von Umweltverträglichkeitsprüfungen auszuräumen wären.

So entschied man sich für die Geschiebezugabe wegen ihrer zumindest über einen längeren Zeitraum ökologischen und ökonomischen Vorteile /1/. Die Wirksamkeit dieser Methode wurde erstmals unterhalb der Staustufe Gamsbheim im Rahmen der Freistetter Naturversuche 1975 nachgewiesen. Die Freistetter Versuche allein genügten jedoch nicht, um alle Fragen im Zusammenhang mit der Geschiebezugabe zu beantworten. So wurden die Versuche nach Schließung des Querdamms der Staustufe Iffezheim im März 1977 unterhalb dieses Bauwerkes fortgeführt, vgl. Bild 3.

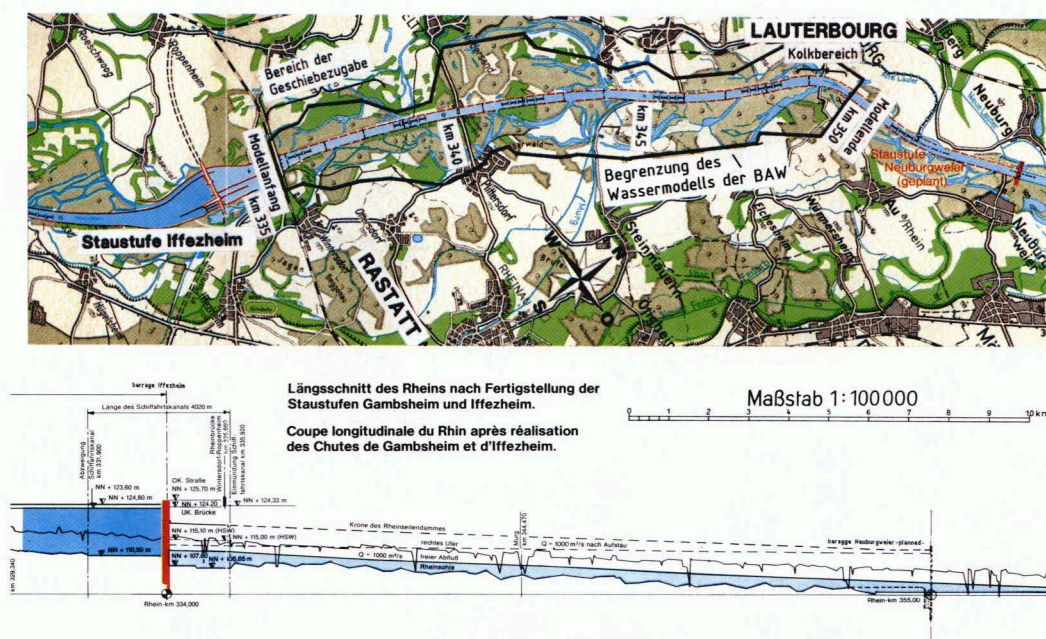


Bild 3 Längsschnitt des Rheins nach Fertigstellung der Staustufen Gamsbheim und Iffezheim

Entsprechend dem Rahmenteilentwurf B für den Ausbau des Rheins zwischen Neuburgweier/Lauterburg und Mannheim vom 11.02.1966 steht der Schifffahrt stromab Rhein-km 352, eine durchgehende Fahrrinntiefe von 2,10 m unter GIW zur Verfügung. Nach der Zurückstellung des Baus einer weiteren Staustufe bei Au/Neuburgweier wurde festgelegt, im Streckenabschnitt unterhalb Iffezheim von Rhein-km 336 bis Rhein-km 352 ebenfalls eine Fahrrinntiefe von 2,10 m unter GIW herzustellen.

Auf den Bau einer Staustufe bei Au/Neuburgweier wurde bis heute verzichtet, da die 1978 zunächst als Naturversuch begonnene Geschiebezugabe unterhalb der Staustufe Iffezheim bis heute eine wirkungsvolle Maßnahme zur Verhinderung weiterer Rheinerosion in dem von der Staustufe nach unterstrom beeinträchtigten Rheinabschnitt ist. Zusätzlich zu diesen Naturver-

suchen sollten die Bedingungen für eine Geschiebezugabe in einem experimentellen, physikalischen Modell mit beweglicher Sohle untersucht werden, insbesondere um das Verhalten der Rheinsohle bei extremen Abflußbedingungen, die Auswirkungen bei Unterbrechung der Geschiebezugabe, die erforderlichen Fließregelungsmaßnahmen und die hydraulischen Grundlagen für Maßnahmen der Verbesserung von Sohlenstabilität systematisch zu erweitern.

2 Einleitung

Aufgrund der durchgeführten Modellversuche liegen seit 1990 sowohl ein geeigneter Vorschlag vor, den Lauterburger Hang zu sanieren, als auch ein Bühnenausbaukonzept, welches bei Niedrigwasser eine Wassertiefe von 2,10 m unter GIW verspricht. Ferner konnten auf der Grundlage umfangreicher Naturerhebungen und eines experimentellen Modells mit beweglicher Sohle die naturähnliche Nachbildung der Flußbettprozesse überprüft und daraus neue Untersuchungsmethoden entwickelt werden.

Beim Iffezheimer Wasser-Modell mit beweglicher Sohle war es durch den Einsatz einer Rechnersteuerung erstmals möglich, beim Modellbetrieb eine aus der Natur vorgegebene Abflußganglinie, vgl. Bild 4, im Wassermodell nachzufahren.

Der Modellbetrieb läuft hierbei instationär ab, was insgesamt zu folgenden, für experimentelle Modelle neuen Anforderungen führte:

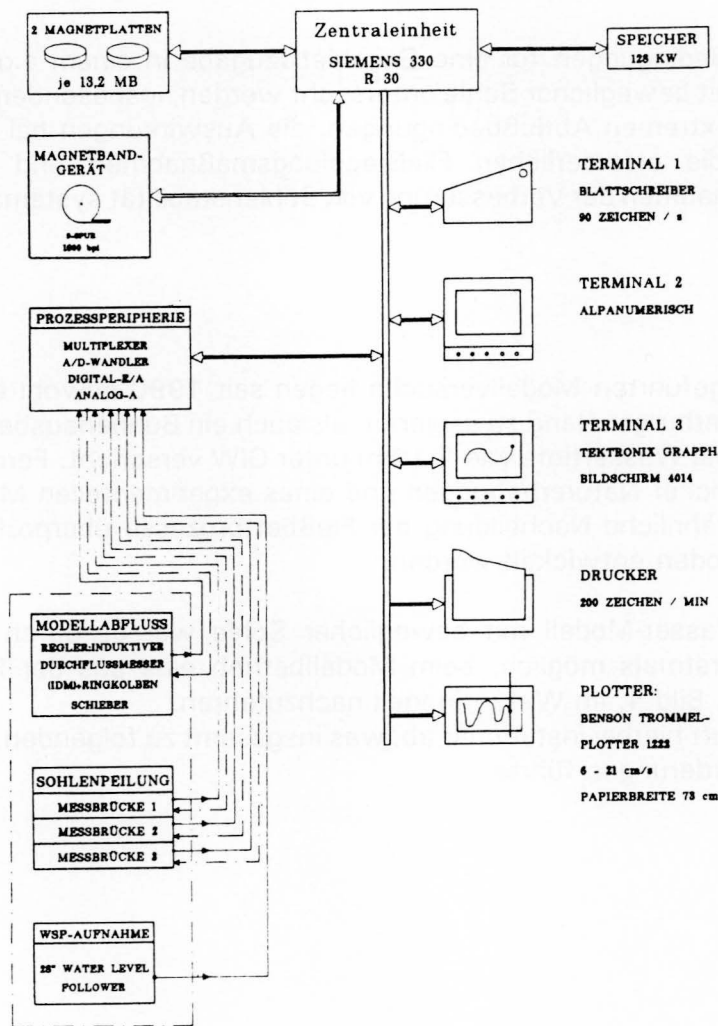


Bild 4 Verarbeitung der im experimentellen Modell gemessenen Daten

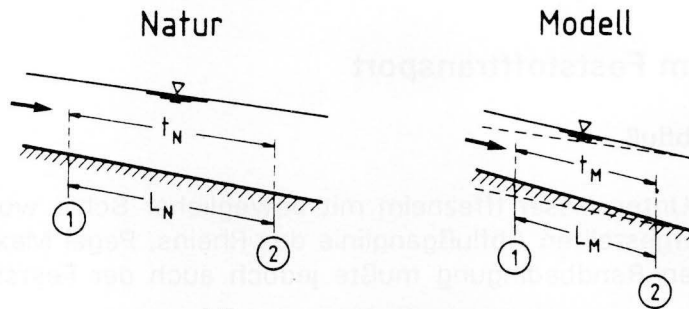
- instationäre Modellsteuerung im Zu- und Ablauf,
- instationäre Wasserspiegelmessungen zeitgleich an vielen Punkten,
- zeitgleiche Datenerfassung und Datenauswertung,
- meßtechnische Erfassung des Sohlenbildungsprozesses über den gesamten Modellbereich hinweg,
- Nachweis der Ähnlichkeit des experimentellen Modells als Grundlage für Weiterentwicklungen von Untersuchungsmethoden für Bettbildungsprozesse bzw. Sohlenstabilität und
- Weiterentwicklung der Luftmodelluntersuchungstechnik als Voruntersuchungsmethode zur
 - * quantitativen integralen Sichtbarmachung der Sohlbettprozesse und
 - * quantitativen Ermittlung von räumlichen Geschwindigkeitsverteilungen (vgl. Nestmann /17/).

Diese Weiterentwicklung der Modelltechnik (Verwendung eines Modells mit beweglicher Sohle) warf ein neues Problem auf, welches sich bei allen experimentellen Modellen stellt, bei denen das gleiche Fluid, aber wegen der Ähnlichkeitsanforderungen und der Betriebsbedingungen ein anderer als der in der Natur vorkommender Modellfeststoff Verwendung findet. Bei der analytischen Ermittlung der Modellmaßstäbe ergeben sich zwei Zeitmaßstäbe, der sedimentologische und der hydraulische Zeitmaßstab (ZM). Der Zeitmaßstab (ZM) ergibt sich generell aufgrund der kinematischen Betrachtung aus dem Quotienten $ZM = t_N/t_M$ (t_N : charakteristische Zeit in der Natur; t_M : entsprechendes charakteristisches Zeitmaß im Modell,

vgl. Bild 5). Bei vollständiger Ähnlichkeit müssen beide Zeitmaßstäbe gleich groß sein. Bei der Nachbildung der Feststoffbewegung im Modell resultiert jedoch aufgrund der Feststoffwahl im allgemeinen ein Zeitmaßstab, der wesentlich größer als der für die naturähnliche Beschreibung der Wasserbewegung notwendige Zeitmaßstab ist.

In Modellen ist üblicherweise $t_{rs} \gg t_{rhy}$.

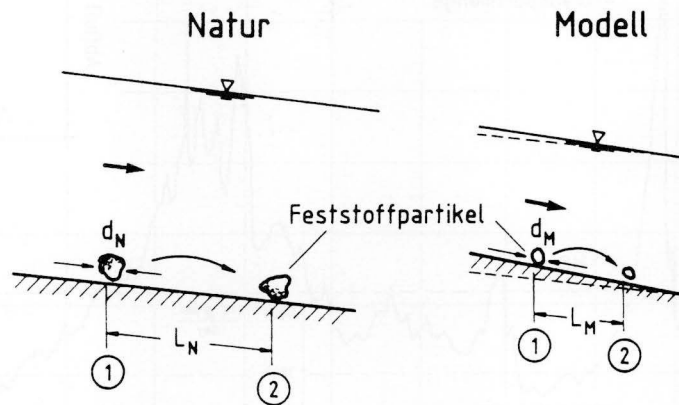
* hydraulischer Zeitmaßstab t_r



$$t_{rhy} = t_r = (L_r \cdot n)^{1/2} \quad \text{Froude'sches Modellgesetz}$$

mit $1/n = L_{zr}/L_{xr} = l_r$

* sedimentologischer Zeitmaßstab t_{rs}



$$t_{rs} = L_{xr}^{3/2} / d_r$$

Beispiel für ein Modellgesetz

$$d_r = d_N / d_M$$

Bild 5 Modellähnlichkeit

Die physikalische Bedeutung der beiden Zeitmaßstäbe soll anhand Bild 6 diskutiert werden. Beim instationären Betrieb des Wassermodells (beispielsweise anhand einer Ganglinie) werden die veränderlichen Abflüsse in diskreter Form nach dem Froudegesetz in entsprechende Modellgrößen umgewandelt (Berücksichtigung des hydraulischen Zeitmaßstabes). Die für den Modellbetrieb anzusetzende Wirkungsdauer des jeweils ins Modell eingeregelter Abflusses ergibt sich aus dem sedimentologischen Zeitmaßstab. Hieraus resultiert, daß

- der hydraulische Zeitmaßstab t_{hy} den Betrag und
- der sedimentologische Zeitmaßstab t_s die Wirkungsdauer der Regelgrößen im Modell bestimmen.

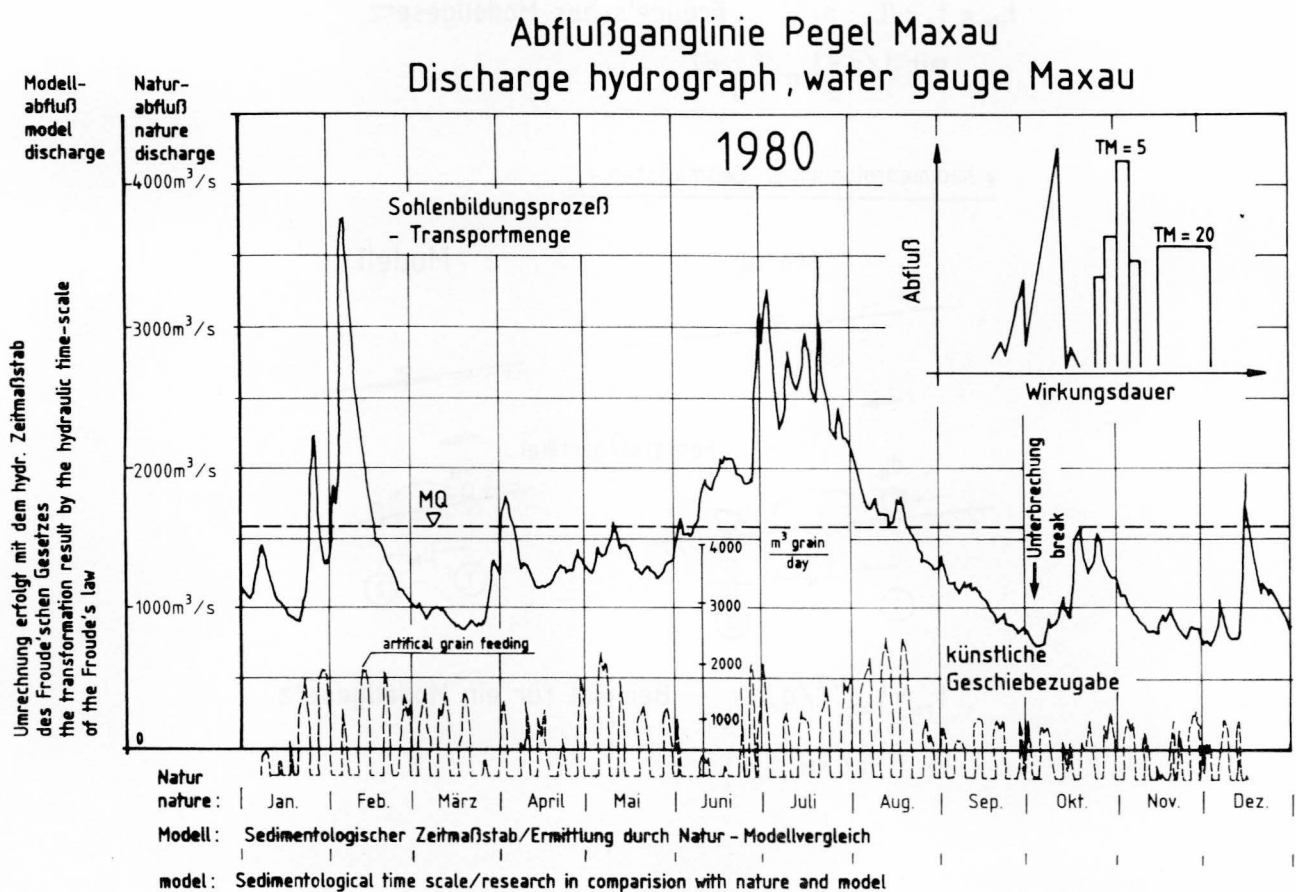
In Bezug auf den Bettbildungsprozeß wird durch das erste Zeitmaß die Intensität des strömungsbedingten Feststofftransportes und durch das zweite Zeitmaß die Dauer der Bettbildung infolge des Transportes bestimmt. Der Abflußganglinie sind auch die künstlichen Geschiebezugabemengen zugeordnet.

Beides ist für die dynamischen Wechselwirkungen zwischen den flüssigen und festen Phasen von physikalischer und grundlegender Bedeutung.

3 Grundlagen zum Feststofftransport

3.1 Bettbildender Abfluß

Das Wassermmodell Unterwasser Iffezheim mit beweglicher Sohle wurde mit der in Bild 6 ausschnittsweise dargestellten Abflußganglinie des Rheins, Pegel Maxau, betrieben. Neben dieser hydrologischen Randbedingung mußte jedoch auch der Feststofftransport aus Na-



Instationärer Modellbetrieb I

Bild 6 Modellabfluß des Rheins, Pegel Maxau am Beispiel des Jahres 1980.

turdaten zum Betrieb des Modells quantifiziert werden. Hierbei konnte auf Datenmaterial der Tabelle 1 zurückgegriffen werden.

Tabelle Geschiebetransport und Schwebstofftransport im Rhein bei Maxau

Jahr (Abflußjahr)	Geschiebefracht		Schwebstofffracht t	MQ m ³ /s
	t	m ³		
1975	358970	199430	1499090	1460
1976	94460	52480	507070	865
1977	317550	176420	1474900	1360
1978	371370	206320	1241130	1490
1979	221490	123050	822670	1230
Summe	1363840	757700	5544770	
Jahresmittel	272768	151540	1108954	1281

Für das "Hochwasser" 1970 werden folgende Jahresfrachten angegeben:

Geschiebe: 437 000 t Schwebstoff: 2 573 000 t

Der hohe Schwebstoffanteil am Gesamttransport wird zu einem großen Anteil durch die sogenannte "wash load" verursacht. Unter diesem Feststoffanteil versteht man Material, dessen Korngröße kleiner ist als diejenige des an Sohle und Böschung anstehenden und bei entsprechenden Abflüssen bewegten Flußbettmaterials.

Dieses "angeschwemmte" Material hat seinen Ursprung in den Bodenerosionen im Einzugsgebiet und in den Vorländern durch das Abwaschen von Staub, Schlamm etc. infolge Niederschläge, Abrieb von Sohlenmaterial u. ä.. Im Oberwasser der Staustufe Iffezheim sind so in den vergangenen Jahren im Wehrbereich große Schlammablagerungen aufgetreten, die ihren Ursprung im "wash load" haben. Zur Sicherung der Abflußleistung und des Speichervolumens müssen diese Ablagerungen ständig beseitigt werden.

Im Gegensatz zu dem als Geschiebe an der Sohle und als Schwebstoff transportierten Flußbettmaterial ist die Transportrate des "wash load"-Materials nicht nur vom Abfluß sondern u.a. auch von anthropogenen Einflüssen (Einleitungen, etc.) abhängig und somit nicht im voraus zu berechnen. Bei den experimentellen Untersuchungen wurden die Einflüsse des Schwebstofftransportes nicht quantifiziert, da es keine geeignete experimentelle Untersuchungsmethode bei gleichzeitig beweglicher Sohle gibt. Diese Anteile tragen auch nicht zur Bettbildung und Sohlstabilisierung in relativ stark durchströmten Bereichen, wie beispielsweise der Fahrinne, bei.

Den Geschiebetransport betreffend ist bei Flüssen mit großen Abflußschwankungen der sogenannte "bettbildende Abfluß" eine Bewertungsbasis für die die Flußsohle verändernden Einflüsse. Dies gilt insbesondere für die Ermittlung der charakteristischen physikalischen Größen eines Modells mit beweglicher Sohle. Die Veränderungen des Flußbettes sollten jedoch nicht anhand einer lokalen Betrachtung bewertet werden. Hierbei wären Korrelationen derartiger Auswertungen in mehreren Querschnitten erforderlich.

In Bild 7 sind für eine lokale Betrachtung auf der rechten Seite eine Häufigkeitsverteilung der Abflüsse eines typischen Abflußjahres mit Bezeichnung charakteristischer Niedrig-, Mittel- und Hochwasserabflüsse angegeben. Auf der linken Seite ist die aus Naturmessungen ermittelte Geschiebefrachtkurve dargestellt.

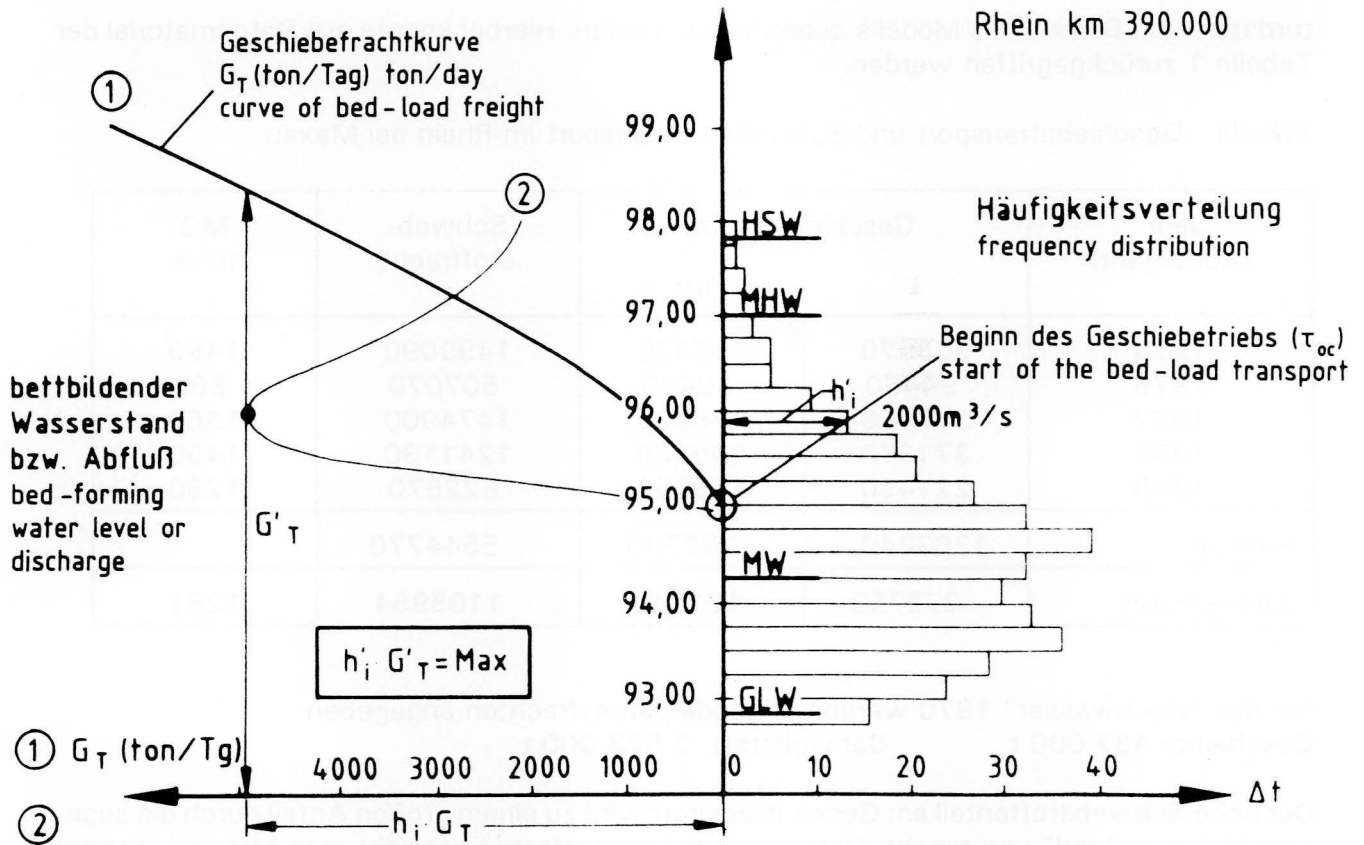


Bild 7 Berechnung des bettbildenden Wasserstandes bzw. Abflusses

Es wird angenommen, daß derjenige Abfluß bettbildend ist, bei dem der größte Geschiebetransport stattfindet. Hierbei ist das Produkt aus Häufigkeit des Abflusses und des Geschiebetransportes ein Maximum. Für den Rhein bei km 390,00 ergibt sich ein bettbildender Abfluß von ca. $Q = 2000 \text{ m}^3/\text{s}$.

3.2 Geschiebetransportfunktionen

Der Geschiebetransport beginnt bei demjenigen Abfluß, bei welchem an der Flußsohle die Grenzscherbanspannung $\tau_c = \rho \cdot g \cdot h \cdot \gamma_c$ erreicht wird, vgl. Shields /3/ (1936), Dorer /4/ (1984). Entsprechend der Annahme des Überschubspannungskonzeptes $\Delta\tau_o = (\tau_o - \tau_c)$ findet ein Geschiebetransport als Funktion von $\Delta\tau_o$ statt:

$$g_s = f(\Delta\tau_o) \text{ bzw. } f(\tau_o) \tag{1}$$

Bei Entwicklung einer Potenzreihe ergibt die Geschiebetransportfunktion:

$$g_s = f(\tau_o) = a_0 + a_1\tau_o + a_2\tau_o^2 + \dots$$

Die Annahme, daß der Geschiebetransport bei einer kritischen Sohlenscherbanspannung $\tau_{o \text{ crit}}$ (Schwellenwertansatz) beginnt, ergibt folgende Werte für a_0 , a_1 , a_2 :

$$\begin{aligned} \tau_o &= 0 \rightarrow g_s = 0, a_o = 0 \\ \tau_o &= \tau_c \rightarrow g_s = 0, a_1 = -a_2 \tau_c \\ g_s &= a_2 \tau_o (\tau_o - \tau_c) \end{aligned} \quad (2)$$

In Analogie zur universellen Beziehung

$$v = c \cdot \sqrt{g \cdot I} \quad (3)$$

für die mittlere Fließgeschwindigkeit v , vgl. Naudascher /5/ (1987), bezeichnet die Gleichung (2) die Grundform gebräuchlicher Transportgleichungen nach dem Überschubschubspannungskonzept wie beispielsweise:

Meyer-Peter und Müller:
(dimensionslos)

$$g_* = 8 \tau_* \left(1 - \frac{0,047}{\tau_*} \right)^{3/2} \quad (4)$$

Shields
(dimensionslos):

$$g_* = \frac{v_m}{u_*} 10 \tau_* (\tau_* - \tau_{*c}) \quad (5)$$

DuBoys:

$$g_* = \frac{\psi_s \tau_o}{\rho_s \cdot d \cdot u_*} (\tau_o - \tau_c) \quad (6)$$

$\psi_s = f(d)$ DuBoys-Beiwert

mit

$$g_* = \frac{g_s}{\rho_s u_* d} \quad \text{Transportkennzahl}$$

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau}{\rho}} \quad \text{Schubspannungsgeschwindigkeit}$$

$$Fr_* = \frac{u_*^2}{\Delta g d} \quad \text{Froude-Zahl des Einzelkörpers}$$

$$\tau_* = \frac{\tau_o}{g (\rho_s - \rho) d} \quad \text{Shieldskennzahl}$$

$$\Delta = \frac{\rho_s - \rho}{\rho}$$

Dichteverhältnis

 d

charakteristischer Korndurchmesser

Meyer-Peter und Müller /6/ (1949) entwickelten ihre Transportgleichung auf der Grundlage von Messungen im Rhein. Dies ist ein Grund dafür, daß diese Gleichung für den Rhein relativ gute Ergebnisse liefert und für Geschiebetransportberechnungen im Rhein häufig verwendet wird.

3.3 Geschiebejahresfrachten

Die Auswertung der in Bild 8 zusammengestellten Geschiebejahresfrachten in Abhängigkeit einer typischen Dauerlinie und vom Korndurchmesser des Sohlenmaterials geschah auf der Grundlage der Meyer-Peter-Gleichung und des von Gehrig /7/ (1981) zusammengetragenen Datenmaterials.

Die Sohle von Flüssen, die durch alluviale Ablagerungen führt, zeigt Tendenzen, sich mit größeren Anteilen dieser Alluvionen selbst abzupflastern. Die Abpflasterung kann dadurch geschehen, daß bei der Erosion feinere Kornfraktionen bevorzugt werden und sich dadurch in der obersten Sohlenschicht grobes Material anreichert. Bei diesem Prozeß der partiellen Kornsorrierung, der durch die kritische Sohlenschubspannung des Einzelkornes gesteuert wird, spielen die turbulenten Schwankungen der Sohlenschubspannung eine Rolle, d.h. die Abpflasterung ist eine Erscheinung der dreidimensionalen turbulenten Gerinneströmung.

Nach Raudkivi /8/ (1981) ist für das Auftreten der Abpflasterung erforderlich, was für die untersuchte Flußstrecke zutrifft:

$$G_g = \sqrt{\frac{d_{84,1}}{d_{15,9}}} > 2,5 \text{ bzw. } \frac{d_{90}}{d_{10}} > 5 \quad (7)$$

In der untersuchten Fließstrecke kann also mit Abpflasterungserscheinungen gerechnet werden. In diesem Zusammenhang wird auf die Untersuchungen von Gessler /9/ (1965) verwiesen.

Die Abpflasterung des Sand-Kiesbetts eines Flusses hat Auswirkungen auf sein morphologisches Verhalten. Durch die Pflasterung wird der Beginn des Geschiebetriebs bei Anlaufen einer Hochwasserwelle verzögert. Nach dem Aufbrechen der Pflasterschicht läuft jedoch der Geschiebetrieb viel intensiver ab im Vergleich zu einer nicht abgepflasterten Sohle. Das heißt, daß die ohnehin schon diskontinuierliche Bewegung von Dünen und Bänken infolge des Einflusses der Grenzschichtströmungen in verstärktem Maße "unstetig" erfolgt /10/, /11/, /12/. Bei Ablauf der Hochwasserwelle kann ein solcher Feststofftransport strömungsbedingt auch an einer für die Schifffahrt ungünstigen Stelle wieder zur Ruhe kommen und dort durch Verringerung der Fahrwassertiefe zu Störungen führen. Derartige Vorgänge wurden in diesen experimentellen Untersuchungen durch vergleichende Darstellungen zum Ausgangszustand festgestellt.

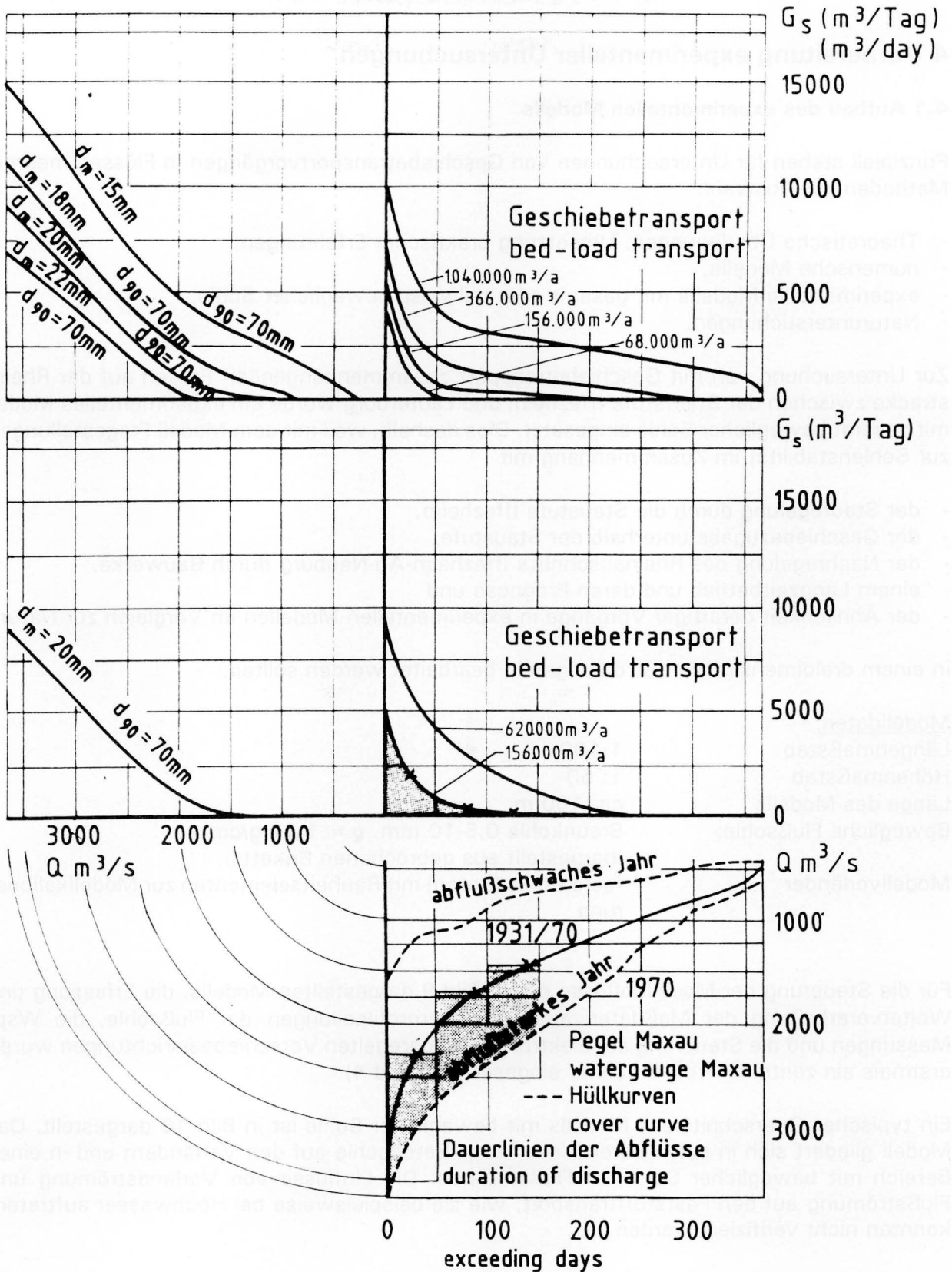


Bild 8 Jährlicher Geschiebetransport

4 Vorbereitung experimenteller Untersuchungen

4.1 Aufbau des experimentellen Modells

Prinzipiell stehen für Untersuchungen von Geschiebetransportvorgängen in Flüssen mehrere Methoden zur Auswahl:

- Theoretische Überlegungen, Umsetzung praktischer Erfahrungen,
- numerische Modelle,
- experimentelle Modelle mit gesamt oder teilweise beweglicher Sohle,
- Naturuntersuchungen.

Zur Untersuchung von mit Geschiebetransport zusammenhängenden Fragen auf der Rhein-
strecke zwischen der Staustufe Iffezheim und Lauterburg wurde ein experimentelles Modell
mit gesamt beweglicher Sohle eingesetzt. Dies deshalb, weil mit dem Modell Fragestellungen
zur Sohlenstabilität im Zusammenhang mit

- der Stauregelung durch die Staustufe Iffezheim,
- der Geschiebezugabe unterhalb der Staustufe,
- der Nachregelung des Rheinabschnitts Iffezheim-Au-Neuburg durch Bauwerke,
- einem Langzeitbetrieb und deren Prognose und
- der Ähnlichkeit derartiger Vorgänge in experimentellen Modellen im Vergleich zur Natur

in einem dreidimensionalen Strömungsfeld bearbeitet werden sollten.

Modelldaten:

Längenmaßstab	1:100
Höhenmaßstab	1: 50
Länge des Modells	ca. 160 m
Bewegliche Flußsohle:	Braunkohle 0,5-10 mm, $\rho = 1,27 \text{ g/cm}^3$ (hergestellt aus gebrochenen Briketts)
Modellvorländer	feste Sohle (Beton) mit Rauheitselementen zur Modellkalibrie- rung

Für die Steuerung der Modellabflüsse des in Bild 9 dargestellten Modells, die Erfassung und Weiterverarbeitung der Meßdaten aus den Querprofilpeilungen der Flußsohle, die Wsp-Messungen und die Steuerung der elektronischen geregelten Verschiebeeinrichtungen wurde erstmals ein zentraler Prozeßrechner eingesetzt (s. Bild 4).

Ein typischer Querschnitt des Modells mit beweglicher Sohle ist in Bild 10 dargestellt. Das Modell gliedert sich in einen Bereich mit fester Betonsohle auf den Vorländern und in einen Bereich mit beweglicher Sohle im Flußschlauch. Die Einflüsse von Vorlandströmung und Flußströmung auf den Feststofftransport, wie sie beispielsweise bei Hochwasser auftreten, konnten nicht verifiziert werden.

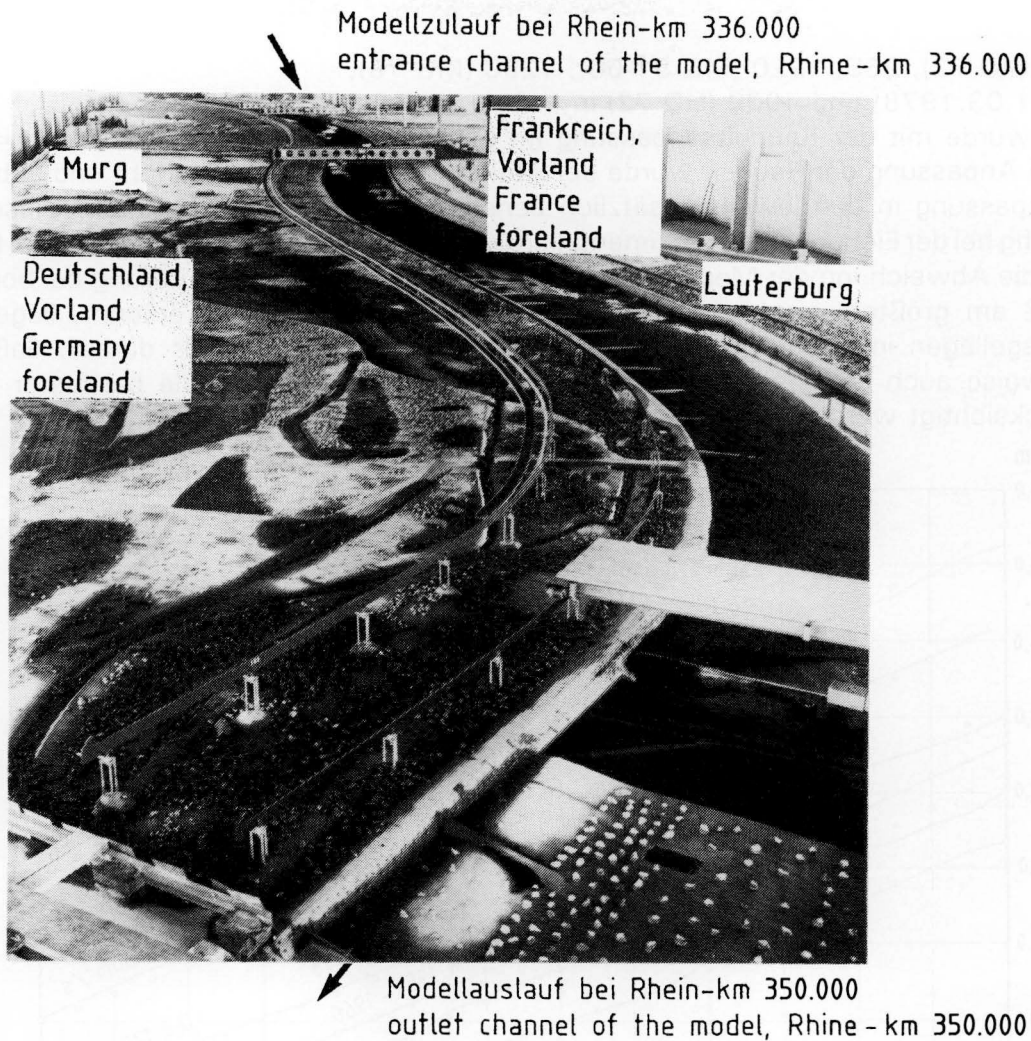


Bild 9 Modell UW Iffezheim, Gesamtansicht entgegen der Fließrichtung

Querschnitt durch das Modell mit Wasserspiegelmeßeinrichtung
Cross section of the model with a water surface measurement system

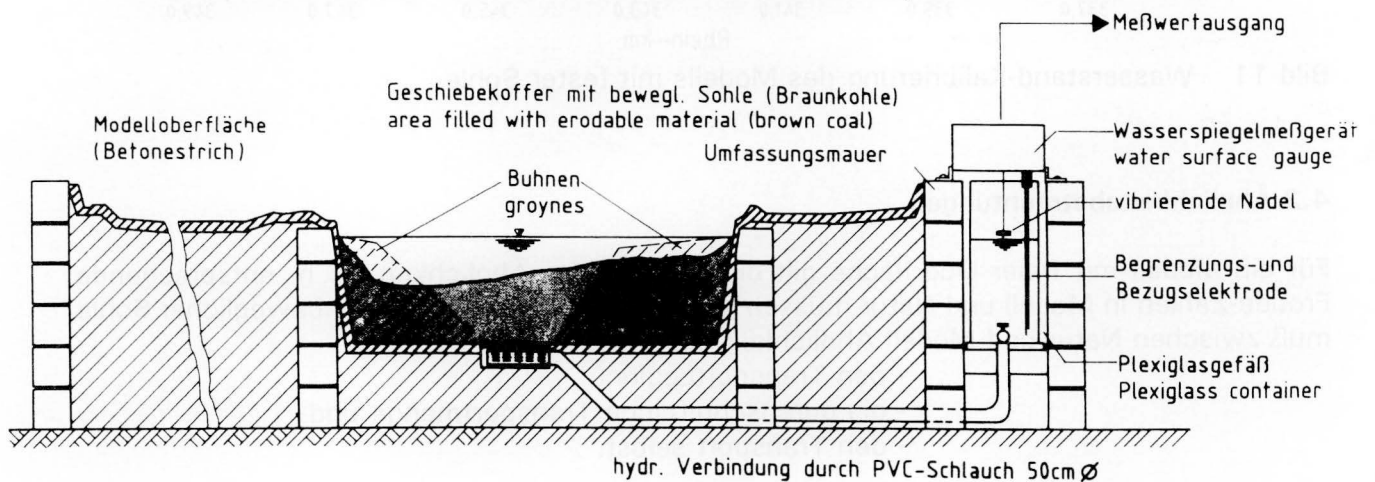


Bild 10 Querschnitt des Modells mit beweglicher Sohle

Dieses Modell wurde in einem ersten systematischen Versuchsgang geeicht, und zwar anhand von ungewöhnlich vielen Naturfixierungen mit folgenden Abflüssen:

$Q = 858$ (GIQ 72), 965, 1220 (MQ 51-60), 1250 (MQ 78), 2350 (Q 01.03.1978) und 4000 (HQ 72) in (m^3/s).

Begonnen wurde mit der Rauheitsanpassung im Modell beim geringsten Abfluß $Q = 858 m^3/s$. Nach Anpassung der Rauheit wurde der Abfluß auf den nächsten erhöht und dabei die Rauheitsanpassung in den jeweils zusätzlich benetzten Flächen vorgenommen. Diese sich zwangsläufig bei der Eichung von experimentellen Modellen ergebende Vorgehensweise führte dazu, daß die Abweichung der Modellwasserspiegellagen von der Naturfixierung bei bordvollem Abfluß am größten wurde (nahezu 0,1 m). Wie man in Bild 11 erkennt, liegen die Wasserspiegellagen im Modell unterhalb den Naturwerten. Ein Hinweis darauf, daß sich möglicherweise auch abflußabhängige Transportkörperformen bilden, die bei fester Sohle nicht berücksichtigt werden.

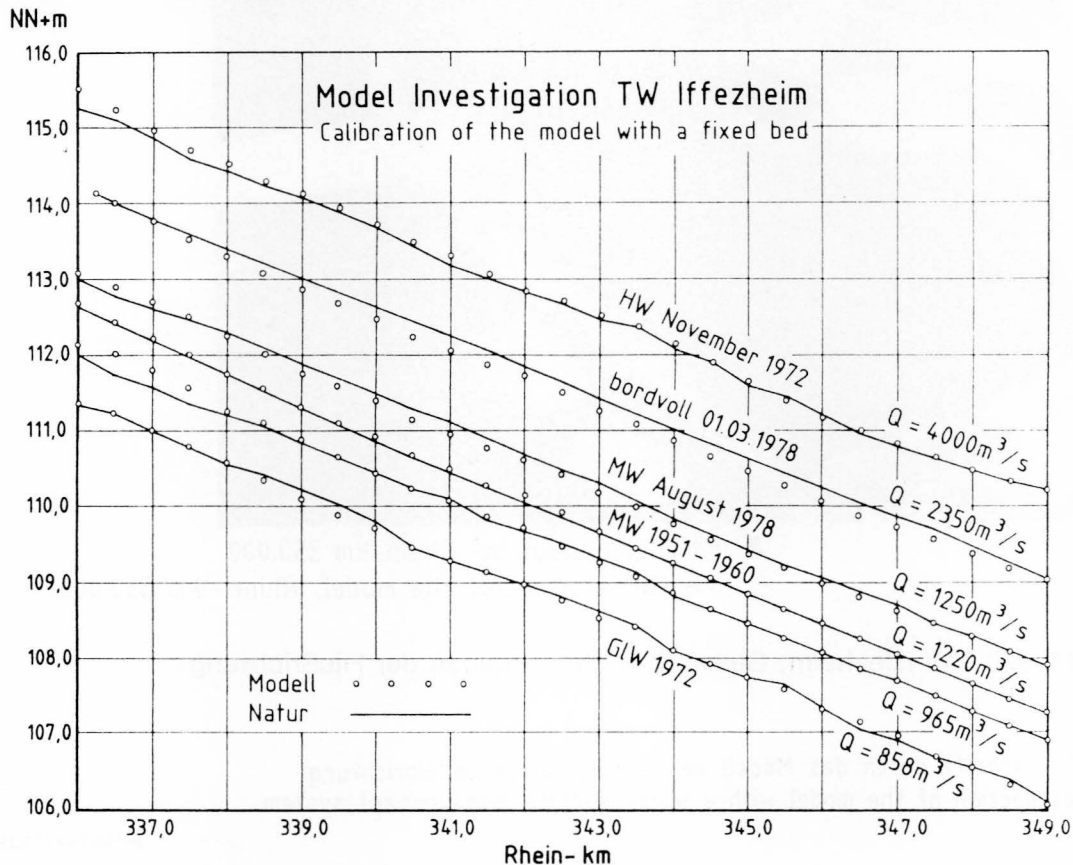


Bild 11 Wasserstand-Kalibrierung des Modells mit fester Sohle

4.2 Ähnlichkeitsbetrachtungen

Für ein Modell mit freier Oberfläche gilt die Froude'sche Ähnlichkeit, d. h. entsprechende Froude-Zahlen in Modell und Natur müssen gleich groß sein, s. Bild 5. Bei beweglicher Sohle muß zwischen Natur und Modell Ähnlichkeit bestehen für

- den Transportbeginn
- die durchschnittliche Transportmenge und
- den Transport selbst.

Maßgebende dimensionslose Kennzahlen hierfür sind:

$$Fr_* = \frac{u_*^2}{\Delta g d} \quad \text{Froude-Zahl des Einzelkorns}$$

$$Re_* = \frac{u_* d}{\nu} \quad \text{Reynolds-Zahl des Einzelkorns}$$

Information bzgl. der Relevanz-Diskussion wird von Klingebiel/ Theobald /10/ /11/ gegeben.

Diese Tatsache ergibt sich aus einer Dimensionsanalyse, wodurch die prinzipiellen Ähnlichkeitsbedingungen für "lange" Modelle , vgl. Dorer /4/ 1984, mit beweglicher Sohle abgeleitet werden können.

Während bei kurzen Modellen mit fester Sohle, z. B. Bauwerksmodelle ohne Zweiphasenströmung, das Froude'sche Modellgesetz zur Beschreibung der Bewegungsvorgänge ausreicht, trifft dies bei langen Modellen mit beweglicher Sohle nicht zu. Bei diesen Modellen sind zusätzlich zu der Forderung nach Übereinstimmung der Froude-Zahl in Natur und Modell noch folgende Punkte einzuhalten:

- Ähnlichkeit des Wasserspiegelgefälles,
- Ähnlichkeit des Energieliniengefälles,
- Ähnlichkeit des Feststofftransportbeginns,
- Ähnlichkeit des Feststofftransports und
- Ähnlichkeit der Sohlenmorphologie und der Transportkörper.

Die Größen, die den Fließvorgang sowie die Sohlenumbildung in einem Gerinne mit beweglicher Sohle ohne Schwebstofftransport bestimmen, lassen sich in folgende Gruppen einteilen:

Fluid:	ρ : spezifische Dichte von Wasser η : dynamische Zähigkeit von Wasser
Strömung und Gerinne:	\bar{u} : mittlere Strömungsgeschwindigkeit $u(t)$: Instationarität = $u' + \bar{u}$ u_* : Schubspannungsgeschwindigkeit bzw. I_e : Energieliniengefälle h : mittlere Wassertiefe r_{hy} : hydraulischer Radius g : Erdbeschleunigung Geometrie
Sohlenmaterial:	ρ_s : spezifische Dichte des Sohlenmaterials d : maßgebender Korndurchmesser der Kornverteilung w : Sinkgeschwindigkeit des Einzelkorns
Transport:	g_s : Masse / (Breiteneinheit x Zeit)
Index r:	Naturgröße (... _N) / Modellgröße (... _M) = (... _r)

Durch diese Größen lassen sich die Strömung- und Feststoffbewegung in einem Gerinne aufgrund einer Dimensionsanalyse folgendermaßen beschreiben:

$$\Pi_i = f(g, \rho, \rho_s, \eta, h, \bar{u}, u_*, d, w, g_s, \text{ Kornverteilung, Geometrie, Instationarität}) \quad (8)$$

In dimensionsloser Form lautet diese Beziehung:

$$\Pi = f(Fr, Fr_*, Re_*, g_*, u_*/w, h/d, \Delta, \text{ Kornverteilung, Geometrie, Instationarität}) \quad (9)$$

Der Feststofftransportbeginn kann prinzipiell nach folgenden Methoden ermittelt werden:

- Ermittlung einer charakteristischen Grenzgeschwindigkeit,
- Ermittlung der kritischen Sohlschubspannung nach Shields,
- Bestimmung der auf ein Korn wirksamen Liftkraft und Vergleich mit einer kritischen Größe,
- Charakterisierung durch eine turbulente Strömungsgröße oder
- Charakterisierung durch einen stochastischen Ansatz.

In der vorliegenden Untersuchung wurde auf die Methode nach Shields zurückgegriffen. Alle anderen Methoden hatten sich als nicht praktikabel erwiesen. Demnach ist Ähnlichkeit des Feststofftransportbeginns dann vorhanden, wenn die charakteristischen Kennzahlen des Kornmaterials im Modell und in der Natur identisch sind:

$$Fr_{*,r} = 1; Re_{*,r} = 1 \quad (10)$$

Damit ergeben sich formal für die Maßstabszahlen folgende Bestimmungsgleichungen:

$$\text{mit } u_{*,r} = \sqrt{g_r \cdot h_r \cdot I_r}, \quad g_r = 1, \quad I_r = 1/n \text{ und } h_r = L_r/n$$

$$\begin{aligned} Fr_{*,r} = 1 &= (u_*^2 / \Delta g d)_r \\ L_r / (n^2 \Delta_r d_r) &= 1 \\ L_r &= n^2 \Delta_r d_r \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} Re_{*,r} = 1 &= (u_* d / \nu)_r \\ L_r^{1/2} d_r &= n \\ L_r^{1/2} d_r = n, L_r &= n^2 / d_r^2 \end{aligned} \quad (12)$$

In Fr_* sind die Einflüsse des Dichteunterschieds (Δ) und der Rauheit (u_*) enthalten. Hierbei ist zu berücksichtigen, daß u_* nicht immer unabhängig von der kinematischen Zähigkeit ν variierbar ist, weswegen auch die Reynoldszahl Re_* bereichsweise Einfluß haben kann. Da die Reynolds-Zahl des Kornes Re_k gleichbedeutend ist mit der Reynolds-Zahl Re_k , die mit dem Rauheitsmaß k gebildet wird, kann nach Yalin /15/ angenommen werden, daß bei Werten Re_* > 70 der Abfluß ohne Reynoldseinfluß im hydraulisch rauhen Bereich stattfindet. Jedoch spielen auch hierbei die hier nicht berücksichtigten Lagerungsdichten und Kornverteilungen eine große Rolle.

Die nachfolgenden Tabellen 2 und 3 geben einen direkten Hinweis auf modelltechnische Einschränkungen für die Fälle $Re_* < 70$ und $Re_* > 70$.

Tabelle 2, $Re_* < 70$: Mit der Wahl eines Modellfeststoffes einer Dichte ρ sind auch gleichzeitig die Modellmaßstäbe unveränderbar L_r und d_r festgelegt.

Tabelle 2 Dimensionsbetrachtungen I, $Re_* < 70$

Maßstabsdef.: $(\dots)_r = (\dots)_{\text{Natur}} / (\dots)_{\text{Modell}}$

I $\pi = f(Fr_*, Re_*, \dots)$

$$\left. \begin{aligned} L_r \cdot d_r^{-1} \cdot \Delta_r^{-1} &= 1 \\ L_r^{1/2} \cdot d_r &= 1 \end{aligned} \right\} L_r^{2/3} \cdot \Delta_r^{-1} = 1$$

(höhenverzerrtes Modell $\rightarrow L_r = L_{zr}^2 \cdot L_{xr}^{-1}$;

$L_{zr} / L_{xr} = l_r$, $L_{xr} / L_{zr} = n$)

$Re_* < 70$

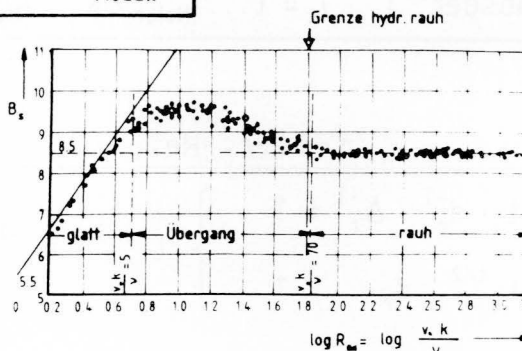
	GILSONIT	POLYSTYROL	PLEXIGLAS	BRAUNKOHLE	SAND
ρ (kg/dm^3)	1,035	1,05	1,18	1,27	2,65
$\Delta = \frac{\rho_s - \rho}{\rho}$	0,035	0,05	0,18	0,27	1,65
Δ_r	47,143	33,00	9,17	6,11	1
L_r	13,05	10,29	4,38	3,34	1
$d_r = \frac{d_N}{d_M}$	0,28	0,31	0,48	0,55	1
$d_N=0,5$ (mm) $\triangleleft d_M$	1,79	1,62	1,04	0,91	0,5
$d_N=2,2$	7,8	7,1	4,6	4,0	2,2

Dimensionsbetrachtungen I , $Re_* < 70$

Tabelle 3 Dimensionsbetrachtungen II, $Re_* > 70$

Maßstabsdef.: $(\dots)_r = (\dots)_{\text{Natur}} / (\dots)_{\text{Modell}}$

II
 $\pi = f(Fr_* \dots)$
 unverzerrt $L_r \cdot d_r^{-1} \cdot \Delta_r^{-1} = 1$
 verzerrt $L_{xr}^{-1} \cdot h_r^2 \cdot d_r^{-1} \cdot \Delta_r^{-1} = 1$
 $Re_* > 70$



Sand $\Delta_r = 1$

L_r	100	50	30	20	10	1
d_r	100	50	30	20	10	1
$d_M = 22$ mm / d_M mm	0,22	0,44	0,67	1,1	2,2	22

Kohle $\Delta_r = 6,11$

L_r	100	50	30	20	10	1
d_r	16,4	8,2	4,9	3,3	1,6	1
$d_M = 22$ mm / d_M mm	1,3	2,7	4,5	6,7	13,4	137

Dimensionsbetrachtungen II, $Re_* > 70$

Tabelle 3, $Re_* > 70$: Mit der Wahl eines Modellfeststoffes können entweder der Geometriemaßstab oder der Kornmaßstab frei gewählt werden. Der jeweils andere Maßstab ergibt sich aus der angegebenen Maßstabsbeziehung. An den Beispielen Sand und Kohle sind Variationsmöglichkeiten quantifiziert.

Das bedeutet, daß bei Modellen im Bereich $Re_* > 70$ zur naturähnlichen Nachbildung des Modellgeschiebetransportbeginns die Einhaltung der Beziehung (11) genügt. Daraus ergibt sich die Ähnlichkeitsbedingung des Transportes zu:

$$Fr_{*r} = \frac{Fr_{*N}}{Fr_{*M}} = 1$$

→ Ähnlichkeit Bewegungsbeginn und Transport

$$L_{xr}^{-1} h_r^2 d_r^{-1} \Delta_r^{-1} = 1$$
(13)

$$\left[\frac{v}{u_*} \left(\frac{d}{h} \right)^{1/6} \right]_r = 1$$

→ "langes" Modell, ähnliche Wsp-Gefälle

$$L_{xr}^{-4} h_r^3 d_r = 1$$
(14)

Bei der Festlegung des Modellgeschiebematerials sollten laut Dorer /4/ folgende Kriterien bedacht werden:

- Bei Korngemischen sollten die "Kornverteilungskurve" in Natur und Modell möglichst nah beieinander liegen.
- Es sollte darauf geachtet werden, daß für ein in der Natur kohäsionslos vorliegendes Material, im Modell kein Material mit einer kleineren Korngröße als 0,1 mm bis 0,2 mm verwendet wird, da ansonsten im Modell Kohäsion auftritt.
- Im Modell sind die erzeugten Bettformen mit denen der Naturversion in Übereinstimmung zu bringen.

Um feststellen zu können, welche Bettform sowohl im Prototyp als auch im Modell vorliegen, kann man sich des Diagramms von Chabert und Chavin /16/ bedienen. Sie stellten in ihrem Diagramm die möglichen Sohlenformen in Abhängigkeit von Fr_* , Re_* und d_* dar (vgl. Bild 12).

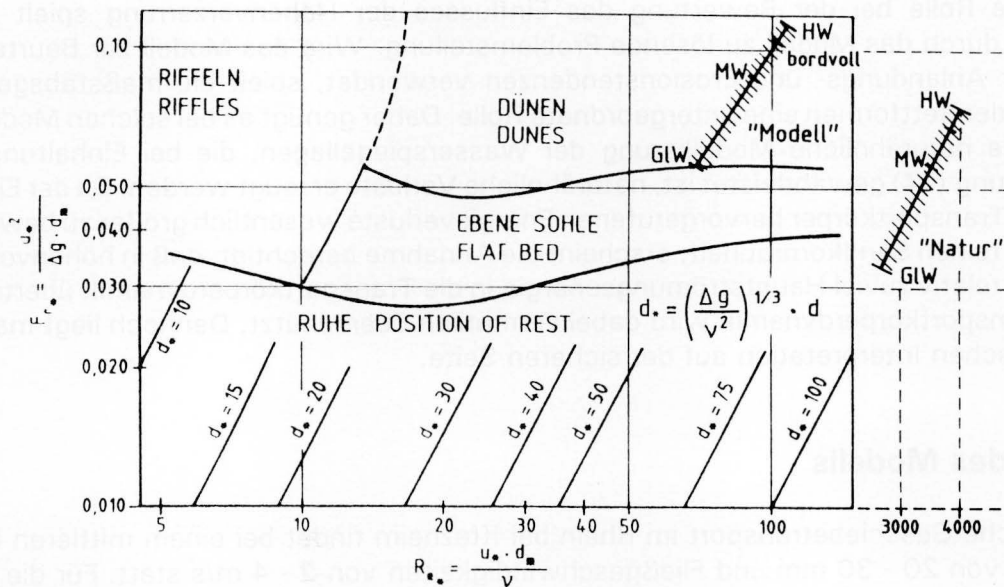


Bild 12 Sohlenformen bei strömendem Abfluß

Der Modellbereich liegt noch innerhalb des Diagramms, der Naturbereich befindet sich außerhalb bei $Re_* = 2500$ bis 4000 und $Fr_* = 0,035$ bis $0,075$. In beiden Fällen gibt die

Auswertung jedoch einen Hinweis darauf, daß auch die Bildung von Transportkörpern berücksichtigt werden muß. Hieraus können auch Rückschlüsse auf die bereits im Zusammenhang mit Bild 11 angesprochene Transportkörperbildung gezogen werden.

Die Abmessungen von Dünen und Bänken dagegen werden durch andere Faktoren beeinflusst. Sie sind abhängig von Fr_r , Fr_m und d/h , der relativen Rauheit. Um Dünen und Bänke im Modell naturähnlich darzustellen, braucht man gemäß der oben angeführten Abhängigkeit zusätzlich zu der Bedingung $Fr_r = 1$ noch eine zweite Bedingung, die die Gleichheit von d/h in Natur und Modell beinhaltet. Dies führt zu der Bestimmungsgleichung:

$$L_r = n^4 d_r \quad (15)$$

Da diese Gleichung nur bei nicht überhöhten Modellen ($n = 1$) identisch ist mit der Bestimmungsgleichung

$$L_r = n d_r \quad (16)$$

die sich aus der alleinigen Forderung nach gleicher relativer Rauheit in Natur und Modell, $(d/h)_r = 1$, ergibt, folgt daraus, daß vollkommene maßstäbliche Übereinstimmung in Form und Abmessungen von Dünen und Bänken bei überhöhten Modellen mit der Naturversion nicht zu erwarten ist.

Trotzdem sollte dies nicht zu dem Schluß führen, daß Modelle nicht verzerrt werden dürfen, wenn in der Natur Transportkörper (Riffel, Dünen, Bänke) die Sohlenoberfläche bilden. Vielmehr sollte man sich der von Yalin /15/ vertretenen Meinung anschließen, daß eine Höhenverzerrung bei Modellen mit Transportkörpersohle zwar eine Beeinträchtigung der vollkommenen dynamischen Ähnlichkeit nach sich zieht. Dennoch können verzerrte Modelle mit Transportkörpern ausgeführt werden, da es sonst keine praktikable Möglichkeit gäbe, die Oberflächenrauheit in experimentellen Untersuchungen zu berücksichtigen, Kobus /12/ (1978).

Eine wichtige Rolle bei der Bewertung des Einflusses der Höhenverzerrung spielt dabei zunächst die durch das Modell zu lösende Problemstellung. Wird das Modell zur Beurteilung großräumiger Anlandungs- und Erosionstendenzen verwendet, spielt die maßstabsgetreue Nachbildung der Bettformen eine untergeordnete Rolle. Daher genügt es bei solchen Modellen, daß durch die naturähnliche Modellierung der Wasserspiegellagen, die bei Einhaltung der Bezugsgleichung (14) gewährleistet ist, naturähnliche Verluste erzeugt werden. Da der Einfluß der durch die Transportkörper hervorgerufenen Energieverluste wesentlich größer zu bewerten ist als der der reinen Sandkornrauheit, erscheint die Annahme berechtigt, daß in höhenverzerrten Modellen relativ zuviel Hauptströmungsenergie in die Transportkörperdynamik übertragen wird. Die Transportkörperdynamik wird dabei vermutlich überschätzt. Dennoch liegt man bei der physikalischen Interpretation auf der sicheren Seite.

5 Eichung des Modells

Der wesentliche Geschiebetransport im Rhein bei Iffezheim findet bei einem mittleren Korn-durchmesser von 20 - 30 mm und Fließgeschwindigkeiten von 2 - 4 m/s statt. Für die Ähnlichkeitsbetrachtungen kann somit die Re.-Zahl außer Betracht bleiben. Werte für Re. der Natur zwischen 2750 und 3650 liegen weit über der Grenze $Re. = 70$ und begründen die getroffene Annahme.

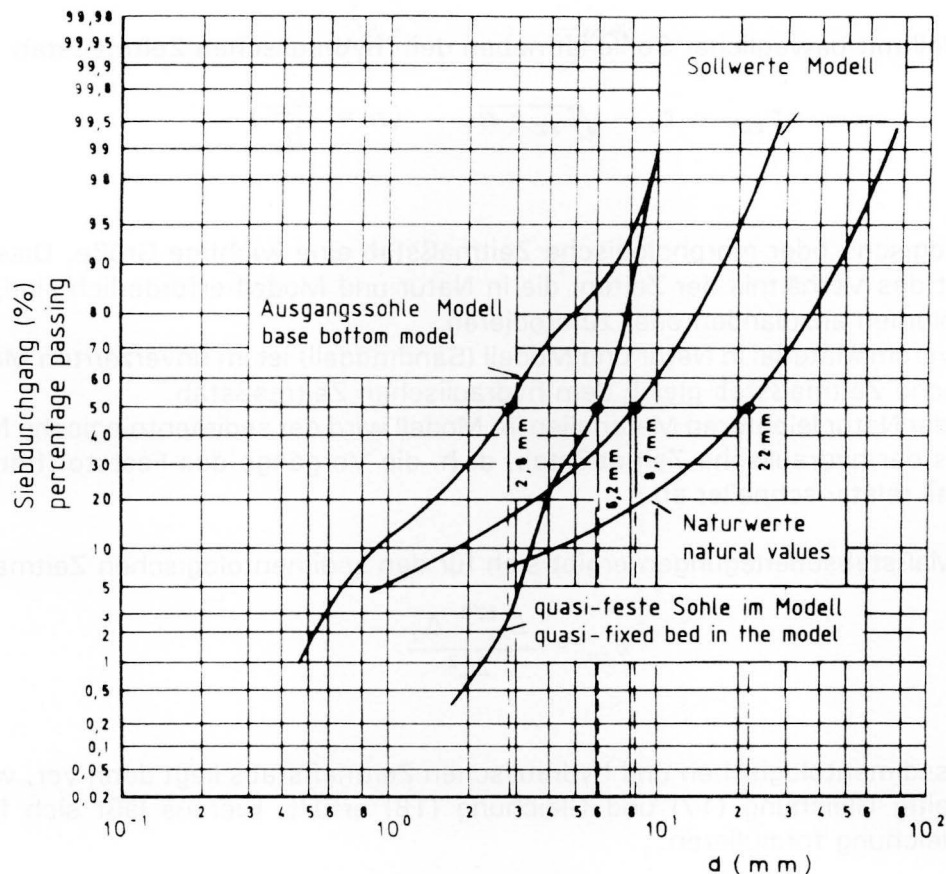


Bild 13 Kornverteilung der Natur und des Modells vergleichend dargestellt

Mit den Festlegungen

$L_{xr} = 100$
 $\Delta_r = 0,27$
 $\Delta_r = 6,11$
 ergibt sich

Längenmaßstab für die horizontale Ebene
"Modellgeschiebe Braunkohle"
 $\rho_s = 1,27 \text{ g/cm}^3$

$h_r = 40,45$, gewählt:
 $d_r = 2,68$, gewählt:

$h_r = 50$
 $d_r = 7,86$

Längenmaßstab für die vertikale Richtung
 Maßstab für die mittlere Körngröße.

Als mittlerer Korndurchmesser für das Modell ergibt sich mit $d_r = 2,68$ und $d_{Nn} = 22$ $d_{Mm} = 8,21$ mm. Als mittlerer Korndurchmesser wurde $d_m = 2,8$ mm gewählt, was einem Korngrößenmaßstab $d_r = 7,86$ entspricht, vgl. Bild 13.

Die Wahl des relativ feineren Modellgeschiebes hatte folgende Gründe:

1. Relativ kleinere Rauheiten schaffen eine bessere Bedingung für die Ähnlichkeit des Geschwindigkeitsprofils im Grenzschichtbereich, was sich gewiß vorteilhaft auf die Ähnlichkeit des Feststofftransportes auswirkt.
2. Beim Zerkleinern von Braunkohle wird ein relativ zu großer Anteil mit einem relativ zu geringen Korndurchmesser erzeugt.
3. Beim Transport zerfallen die großen Braunkohlekörner in kleinere. Durch die ohnehin notwendige Modellkalibrierung werden die aus technischen Gründen erforderlichen Modellverzerrungen zum Teil wieder kompensiert.

Bei einem Modell mit beweglicher Sohle ist neben dem **hydraulischen Zeitmaßstab**

$$t_{rhy} = t_r = \sqrt{L_{xr} \cdot n} \quad (n = \frac{L_{xr}}{h_r}) \quad (17)$$

der sedimentologische oder morphologische Zeitmaßstab eine wichtige Größe. Dieser Maßstab beschreibt das Verhältnis der Zeiten, die in Natur und Modell erforderlich sind, um ein bestimmtes Volumen anzulanden oder zu erodieren.

Bei gleich schwerem Material in Natur und Modell (Sandmodell) ist im unverzerrten Modell der sedimentologische Zeitmaßstab gleich dem hydraulischen Zeitmaßstab.

Bei gegenüber der Natur leichteren Materialien im Modell wird der sedimentologische Maßstab dann größer als der hydraulische Zeitmaßstab, d. h. die Vorgänge des Feststofftransportes laufen im Modell relativ schneller ab.

Aufgrund der Maßstabsüberlegungen ergibt sich für den sedimentologischen Zeitmaßstab

$$t_{rs} = \frac{L_{xr}^{5/2} \Delta_r}{h_r^2} \quad (18)$$

Gleichheit des sedimentologischen und hydraulischen Zeitmaßstabs liegt dann vor, wenn ein Modell gleichzeitig Gleichung (17) und Gleichung (18) erfüllt. Hieraus läßt sich folgende Bestimmungsgleichung formulieren:

$$\Delta_r = n^{-3/2} \quad \frac{\Delta_N}{\Delta_M} < 1 \quad (19)$$

also: mit $\Delta_r = 1$ und $n = 1$ ergibt sich $t_r = t_{rs}$!

Diese Gleichung ist aber nur von Modellen erfüllbar, die nicht höhenverzerrt sind und bei denen als Modellgeschiebe das Naturmaterial verwendet wird.

Nach dem Bau des Modells waren bis zur endgültigen Betriebsbereitschaft noch zahlreiche Untersuchungen notwendig. Diese betrafen zum einen die Überprüfung der gewählten Modellrauheit und zum anderen die Ermittlung des für den Betrieb des Modells maßgebenden sedimentologischen Zeitmaßstabes. Für beide Untersuchungen lagen Daten aus der Natur vor, die zur Kalibrierung des Modells mit der Naturversion zugrundegelegt wurden.

Zur Überprüfung der ersten Forderung zur Modellrauheit wurde in das Modell eine quasi-feste Sohle eingebaut. Diese Sohle bestand wie in Bild 13 dargestellt ist aus Feinkies der Körnung 2 bis 8 mm, dessen kritische Sohlschubspannung über den im Modell auftretenden Werten lag. Mit Hilfe dieser quasi-festen Sohle in Form einer Feinkiesschüttung war es möglich, den zu jeder aus der Natur vorliegenden Wasserspiegelmessung zugehörigen Sohlzustand, wie bereits diskutiert, auf einfache Weise naturähnlich zu modellieren.

Die Rauheitsbedingung wurde aber auch im Modell mit beweglicher Sohle weitgehend erfüllt, was die in Bild 14 vergleichend zur Natur aufgetragenen Wasserspiegellagen beweisen. Das Froudsche Modellgesetz ist somit erfüllt und wegen den vorliegenden großen Reynoldszahlen und dem damit bestätigten rauhen Strömungszustand können Zähigkeitseinflüsse als vernachlässigbar betrachtet werden.

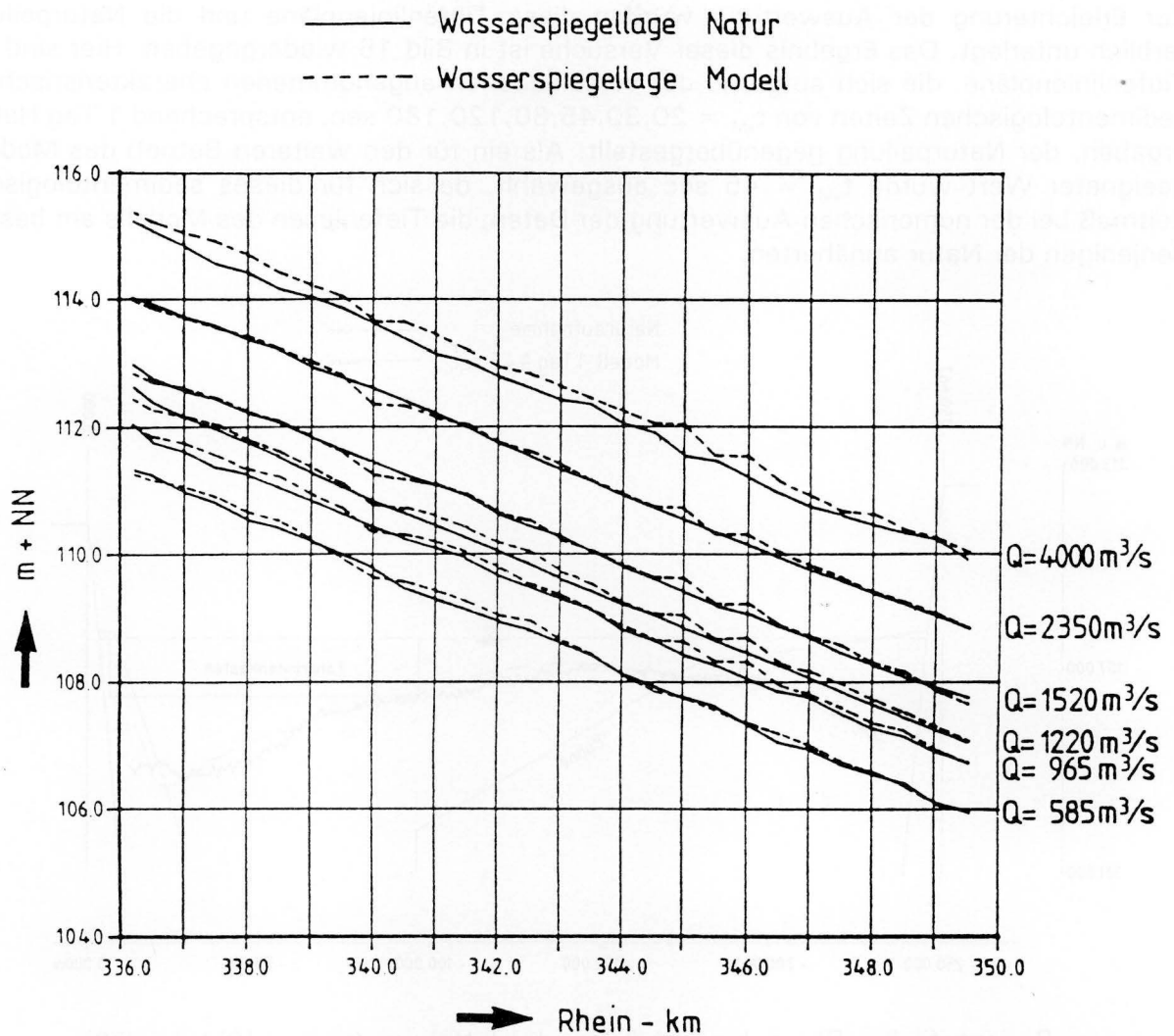


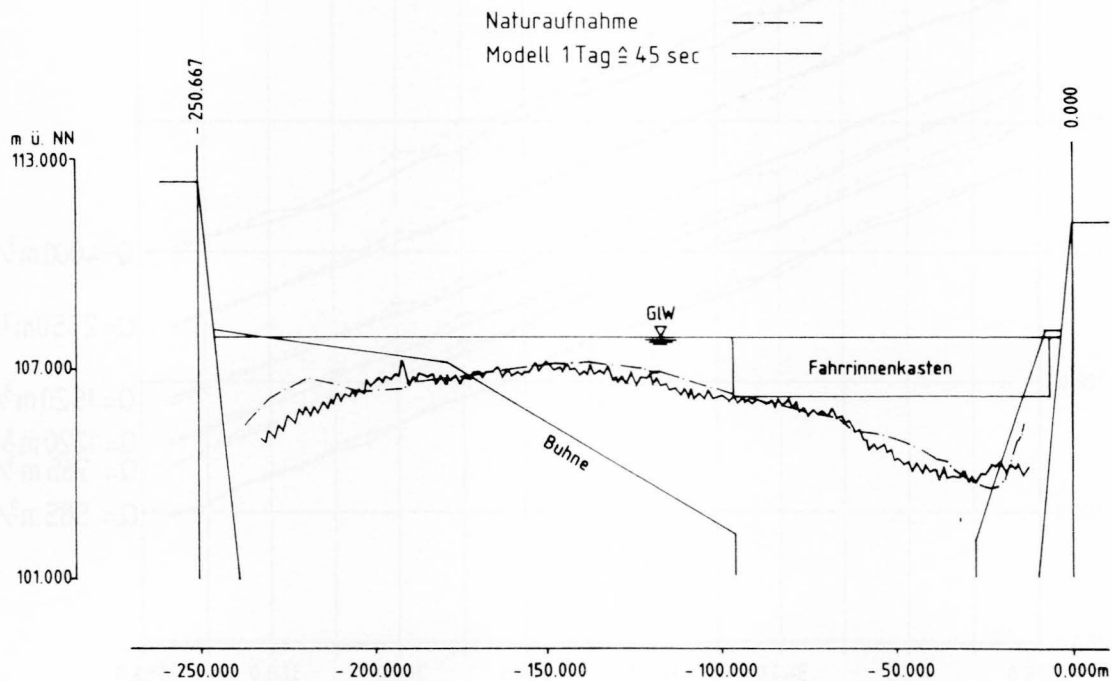
Bild 14 Wasserspiegel des Modells mit beweglicher Sohle vergleichend zur Natur aufgetragen

Die zweite Forderung verlangte die Übereinstimmung des Feststofftransportbeginns und des Feststofftransports zwischen Natur und Modell. Diese Bedingungen können durch die richtige Wahl des sedimentologischen Zeitmaßstabes eingehalten werden. Zur Ermittlung des Zeitmaßstabes wurde die quasifeste Sohle aus dem Modell entfernt und die bewegliche Braunkohlensohle im Sohlzustand der Natur vom August 1976 eingebaut. Als Zeitraum der Verifikationsversuche wurde der Abschnitt von März 1977 bis Oktober 1979 ausgewählt. Beim Nachfahren der Naturganglinie wurde als Diskretisierungsschrittweite $TM = 5$, also der Mittelwert von 5 Tagen, gewählt. Dem Modell wurden folgende Geschiebemengen zugegeben:

vom 18.04. bis 09.11.1978 158 373 m³ (Natur) = 317 l (Modell)
 vom 21.02. bis 25.07.1979 150 075 m³ (Natur) = 300 l (Modell)

Das Verhältnis von Naturvolumen zu Modellvolumen errechnet sich zu $V_N/V_M = (L_r^3/n)$, was in dem vorliegenden Modell einen Maßstab von $V_N/V_M = 50\ 000$ ergibt.

Zur Erleichterung der Auswertung wurden diese Tiefenlinienpläne und die Naturpeilung farblich unterlegt. Das Ergebnis dieser Versuche ist in Bild 15 wiedergegeben. Hier sind die Tiefenlinienpläne, die sich aufgrund der verschiedenen angenommenen charakteristischen, sedimentologischen Zeiten von $t_{SM} = 20, 30, 45, 60, 120, 180$ sec, entsprechend 1 Tag Natur, ergaben, der Naturpeilung gegenübergestellt. Als ein für den weiteren Betrieb des Modells geeigneter Wert wurde $t_{SM} = 45$ sec ausgewählt, da sich für dieses sedimentologische Zeitmaß bei der numerischen Auswertung der Daten, die Tiefenlinien des Modells am besten denjenigen der Natur annäherten.



Querprofil bei Rhein-km 344,8, Vergleich Naturaufnahme (Oktober '79) mit dem Modell (Simulationszeitraum März '77 bis Oktober '79)

Bild 15 Vergleich zwischen Natur und Modell-Bett Formation

In Bild 16 ist exemplarisch ein Modelltest abgebildet, der die Simulation eines Sohlenerosionsvorganges ohne Geschiebezugabe nach drei verschiedenen Zeiten, 5,5, 11 und 17 Jahren, vergleichend zeigt. Hierbei wurde wieder das Zeitmaß 45 s, was einem Tag entspricht, gewählt und das Modell wurde in Schritten gemäß den Ganglinien vom März 1977 bis zum Dezember 1982 betrieben. Die Diskretisierung der Ganglinien erfolgte in Zeitschritten $TM = 5$ Tage.

Der Vergleich der drei gegenübergestellten Versuchsabläufe veranschaulicht die nach unterstrom fortschreitende Sohlenerosion. Hierzu würde zwangsläufig ein Wasserspiegelverfall entstehen, der bei einem Wert größer als 0,5 m (bezogen auf GIW) den Dremmel der Schleuse Iffezheim unpassierbar machen würde /1/.

Alle Situationen, die im experimentellen Modell untersucht wurden, sind in fünf BAW-Berichten /13/ dokumentiert und beschrieben.

Zusätzlich wurde ein eindimensionales numerisches Modell mit Massentransport entwickelt und betrieben; diese Ergebnisse wurden von Siebert /14/ (1981) dokumentiert, wo auch der Massentransport und die Erosionstiefen vergleichend zu Naturdaten quantifiziert sind.

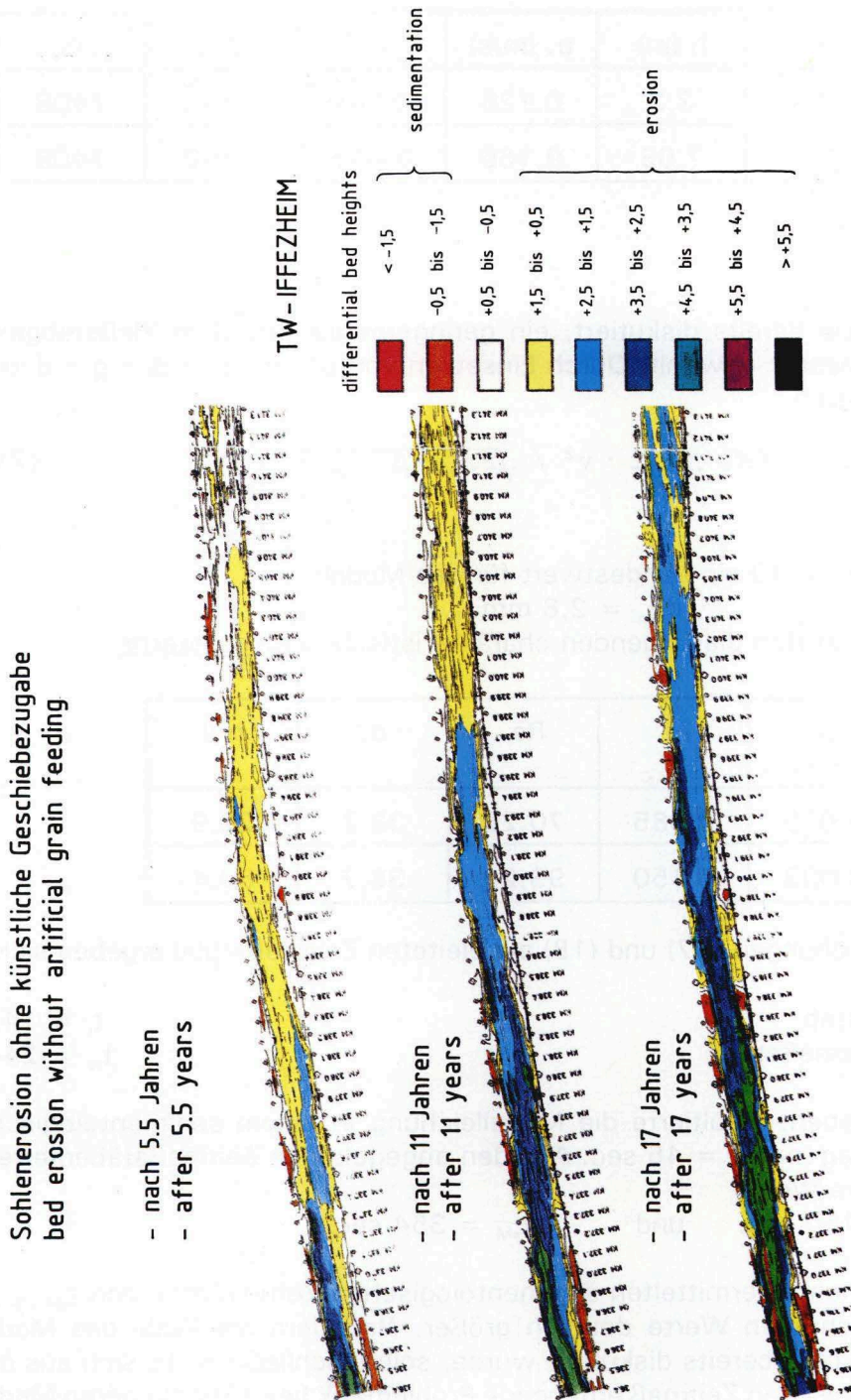


Bild 16 Simulation des Sohlenerosionsprozesses ohne Geschiebe

6 Besonderheiten des instationären Modellbetriebes

Für die Beschreibung des untersuchten Rheinabschnitts sind die folgenden Naturwerte charakteristisch:

	Q (m³/s)	l	h (m)	u. (m/s)	Fr.	Re.	d.
GIW	585	0,5 ‰	3,2	0,125	0,044	2750	1408
HW	4500	0,4 ‰	7,05	0,166	0,077	3652	1408

und mit $d_m = 22$ mm folgt
 $h/d_m = 145$ bzw. 320 .

Für das Modell wurde, wie bereits diskutiert, ein geringerer als aus dem Maßstabgesetz resultierender Korndurchmesser gewählt. Durch Einsetzen von $u^2 = Fr \cdot \Delta \cdot g \cdot d$ in die Beziehung von Re. ergibt sich

$$d_{\min} = (Re_{*grenz}^2 \cdot v^2 / \sqrt{Fr_* \cdot \Delta \cdot g})^{1/3} \quad (20)$$

Bei GIW ergibt sich für $Re. > 70$ ein Mindestwert für das Modell

$$d_{\min} = 2,8 \text{ mm.}$$

Durch diese Wahl errechnen sich die folgenden charakteristischen Modellwerte:

	Q (l/s)	u. (m/s)	Fr.	Re.	d.	h/d
GIW	16,6	0,025	0,085	70,28	38,7	22,9
HW	127,3	0,033	0,150	93,24	38,7	50,4

Die aus den Maßstabsbeziehungen (17) und (18) abgeleiteten Zeitmaßstäbe ergeben sich zu ($\Delta_r = 0,11$)

- hydraulischer Zeitmaßstab $t_r = 14,14$
- sedimentologischer Zeitmaßstab $t_{rs} = 244,4$

Wie im Kapitel 5 beschrieben, resultierte die Modelleichung in einem sedimentologischen Zeitmaß für einen Modelltage in $t'_{sm} = 45$ sec. Aus den angegebenen Zeitmaßstäben errechnen sich demgegenüber die Werte

$$t_{hyM} = 6110 \text{ sec.} \quad \text{und} \quad t_{sm} = 354 \text{ sec.}$$

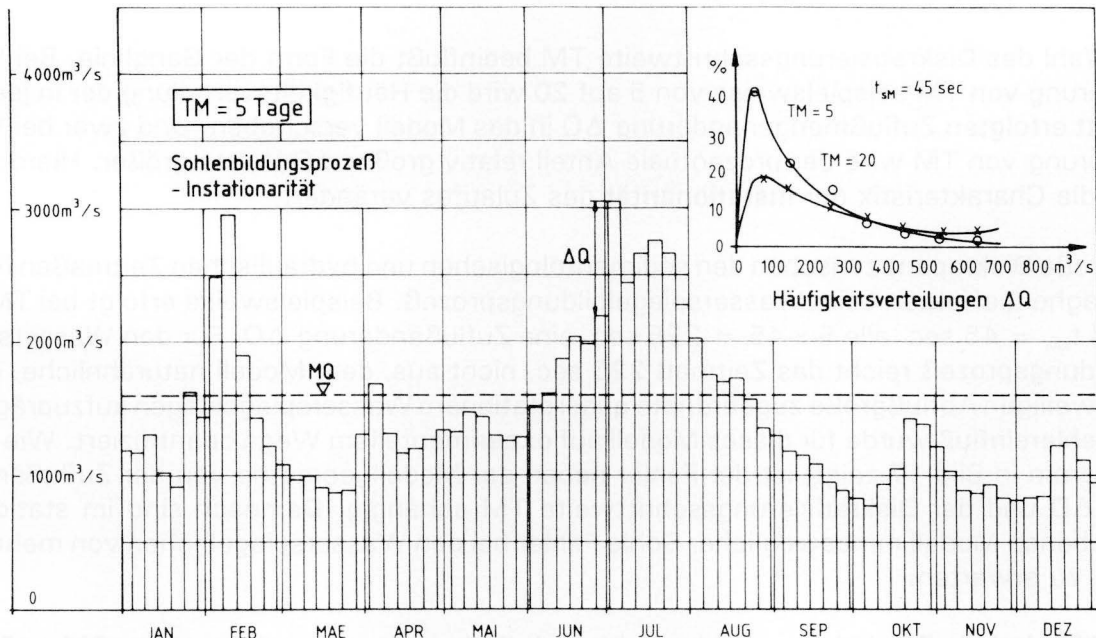
Vergleichend zum experimentell ermittelten sedimentologischen Zeitmaßstab von $t_{sm} = 45$ sec. sind die beiden errechneten Werte deutlich größer. Nachdem die Wahl des Modellgeschiebmaterials Braunkohle bereits diskutiert wurde, soll abschließend die sich aus dem relativ kleinen sedimentologischen Zeitmaß ergebende Problematik beim instationären Modellbetrieb diskutiert werden.

Wie in Bild 17 am Beispiel der Ganglinie 1980 dargestellt ist, wird die Ganglinie wie folgt regelungstechnisch in das Modell eingesteuert:

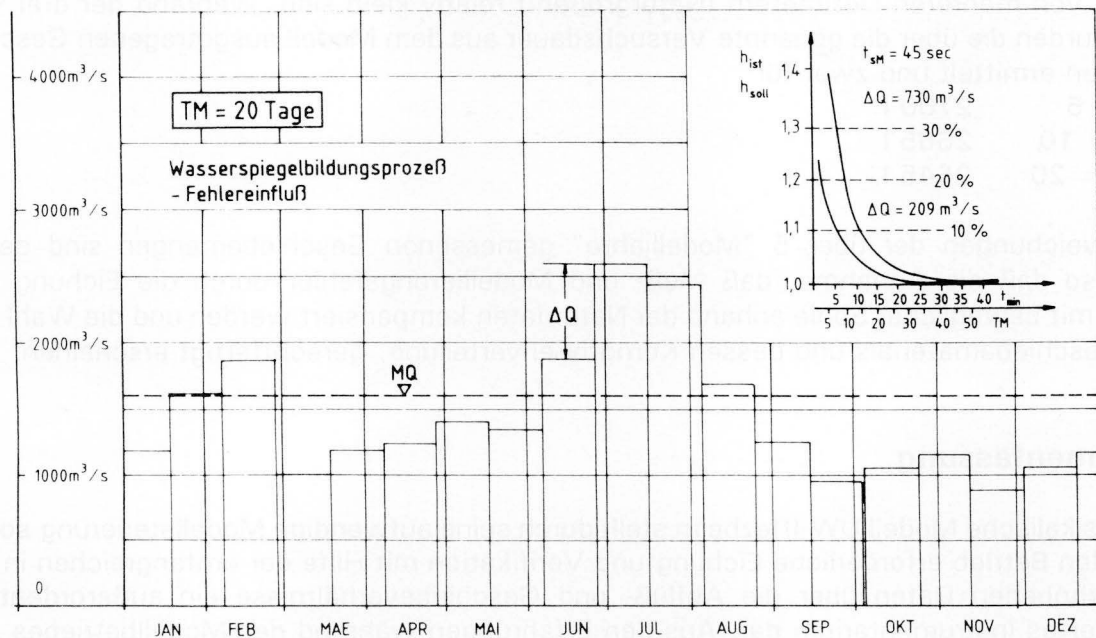
- die Abflußgröße wird nach dem Froude-Modellgesetz (hydraulisches Zeitmaß) und
- die Wirkungsdauer der Abflußgröße auf den Feststofftransportvorgang anhand des experimentell ermittelten sedimentologischen Zeitmaßes

bestimmt. Aus regelungstechnischen Gründen ist bei der meßtechnischen (induktiv) Ermitt-

lung des Abflusses infolge von Trägheitseffekten, eine Diskretisierung der analogen Ganglinie aus der Natur erforderlich. In Bild 17 sind zur Veranschaulichung dieses Vorgehens zwei diskretisierte Ganglinien für das Jahr 1980 für $t_{sM} = 45 \text{ sec}$ dargestellt. Vergleichend sind die Diskretisierungen über 5 (TM = 5) und 20 (TM = 20) Tageswerte dargestellt.



Instationärer Modellbetrieb II



Instationärer Modellbetrieb III

Bild 17 Einfluß der Ganglinieneinstuerung des Modells auf den Sohlenbildungsprozeß, vgl. auch Bild 6

Die Sohlen- und Wasserspiegelbildungsprozesse im Modell werden dabei durch folgende, aus der Gangliniensteuerung des Modells resultierenden Parameter zusätzlich zu den aus der

Dimensionsanalyse bekannten beeinflusst:

1. Infolge der Diskretisierung in Zeitschritten TM werden die Größen des Abflusses und dessen Wirkungsdauer beeinflusst, wovon die jedem Zeitschritt zuzuordnende **Transportmenge** des Geschiebes u.a. abhängig ist.
2. Die Wahl des Diskretisierungsschrittweite TM beeinflusst die Form der Ganglinie. Bei Vergrößerung von TM beispielsweise von 5 auf 20 wird die Häufigkeitsverteilung der in jedem Schritt erfolgten Zuflußmengenänderung ΔQ in das Modell verschoben. Und zwar bei Vergrößerung von TM wird der prozentuale Anteil relativ großer ΔQ -Werte größer. Hierdurch wird die Charakteristik der **Instationarität** des Zulaufes verändert.
3. Die große Diskrepanz zwischen den sedimentologischen und hydraulischen Zeitmaßen führt zu Trägheitseffekten beim Wasserspiegelbildungsprozeß. Beispielsweise erfolgt bei $TM = 5$ und $t_{sM} = 45$ sec. alle $5 \times 45 = 225$ sec. eine Zuflußänderung ΔQ . Für den Wasserspiegelbildungsprozeß reicht das Zeitmaß 225 sec. nicht aus, dem Modell naturähnliche, d.h. der jeweiligen Abflußgröße zugeordnete quasi stationäre Wasserspiegel-lagen aufzuprägen. Der **Fehlereinfluß** wurde für dieses Modell auf experimentellem Wege quantifiziert. Wie das Diagramm in Bild 17 zeigt, ist der Fehler neben der Modellgeometrie von der Zuflußänderung ΔQ und der Diskretisierungsschrittweite TM abhängig. Demnach sind im stationär betriebenen Modell mit beweglicher Sohle Fehler bei den Wasserspiegelhöhen von mehr als 10 % zu erwarten.

In Bild (18) sind die Ergebnisse von Versuchen mit Diskretisierungsschrittweiten $TM = 5, 10$ und 20 (Tage je ΔQ -Änderung) in Form von Differenzentiefenlinien dargestellt. Die Differenzentiefendarstellungen II und III veranschaulichen, daß unter Berücksichtigung der vielfältigen Fehlerquellen die ermittelten Abweichungen zum Bezugstiefenlinienplan I in einer Größenordnung von mehreren Dezimetern (Naturgrößen!) relativ klein sind. Während der drei Versuche wurden die über die genannte Versuchsdauer aus dem Modell ausgetragenen Geschiebemengen ermittelt und zwar für

I, $TM = 5$	2700 l
II, $TM = 10$	2665 l
III, $TM = 20$	2645 l.

Die Abweichungen der über 5 "Modelljahre" gemessenen Geschiebemengen sind derart gering, so daß die Annahme, daß Meß- und Modellierungsfehler durch die Eichung des Modells mit beweglicher Sohle anhand der Naturdaten kompensiert werden und die Wahl des Modellgeschiebematerials und dessen Korngrößenverteilung, gerechtfertigt erscheinen.

Zusammenfassung

Das physikalische Modell UW-Iffezheim stellt durch seine aufwendige Modellsteuerung sowie die für den Betrieb erforderliche Eichung und Verifikation mit Hilfe der umfangreichen in der Natur erhobenen Daten über die Abfluß- und Geschiebeverhältnisse ein außerordentlich kompliziertes Instrumentarium dar. Aus den Erfahrungen während des Modellbetriebes und aufgrund zusätzlicher Untersuchungen (Varianten 48 bis 63) konnten daher erweiterte Erkenntnisse über die Modelltechnik und Naturähnlichkeit für instationäre Modelle mit beweglicher Sohle gewonnen werden. Hierbei sind folgende Zusammenhänge besonders hervorzuheben:

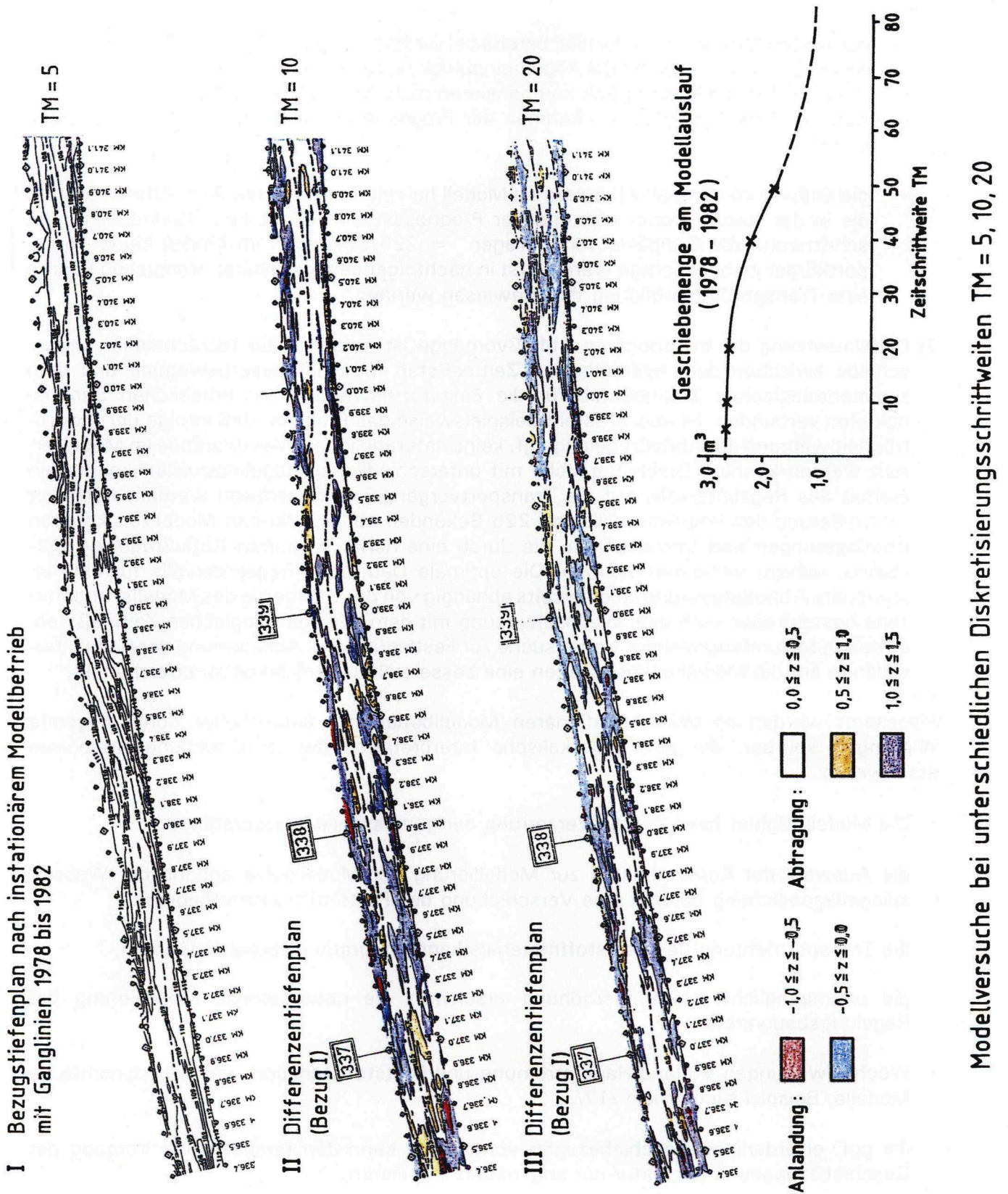


Bild 18 Modellversuche bei unterschiedlichen Diskretisierungsschrittweiten $TM = 5, 10, 20$

1) Notwendige Kompromisse in der Wahl der Maßstäbe wie beispielsweise die Verwendung eines relativ feineren Modellgeschiebematerials ergeben eine Verzerrung der Ähnlichkeitsbedingung für den Feststofftransport und den Feststofftransportbeginn. Diese Veränderung führte dazu, daß

- der Feststofftransport im Modell bereits bei wesentlich geringeren Abflüssen einsetzte als in der Natur und damit die Allgemeingültigkeit des sedimentologischen Zeitmaßstabes, der diese Unstimmigkeit kompensieren muß, stark einschränkte. Auf eine Variation der Abflußganglinie im Rahmen der Prognoseversuche mußte daher verzichtet werden;
 - die Bildung von Transportkörpern im Modell bei relativ geringeren Abflußtiefen auftritt als in der Natur, wobei während der Prognoseversuche mit einer Diskretisierungsschrittweite der Ganglinie von 5 Tagen = 225 Sekunden im Modell keine Transportkörper zu beobachten waren. Erst in nachfolgenden stationären Versuchen konnte eine Transportkörperbildung nachgewiesen werden.
- 2) Die Umsetzung der instationären Abflußvorgänge ist aufgrund der beträchtlichen Unterschiede zwischen dem hydraulischen Zeitmaßstab für die Wasserbewegung und dem sedimentologischen Zeitmaßstab für die Feststoffbewegung mit erheblichen Schwierigkeiten verbunden. Hierbei entsteht beispielsweise das Problem, daß infolge der Modellträgheit während der Abflußregelung ggf. keine naturähnlichen Wasserstände im Modell erzielt werden können. Durch Versuche mit unterschiedlichen Regelintervallen konnte ein Einfluß des Regelintervalls auf die Transportvorgänge nachgewiesen werden. Mit einer Vergrößerung des Regelintervalls von 225 Sekunden auf 15 Minuten Modellzeit konnten Überlagerungen und Verzerrungen, die durch eine höher frequente Abflußregelung entstehen, nahezu verhindert werden. Die optimale Dauer des Regelintervalls für eine instationäre Abflußsteuerung ist einerseits abhängig von der Geometrie des Modells, andererseits besteht aber auch eine Wechselwirkung mit dem sedimentologischen Zeitmaßstab, so daß durch umfangreichere Vorversuche zur Festlegung und Abstimmung der Regelintervalllänge auf die Modellreaktionszeiten eine bessere Naturähnlichkeit zu erreichen ist.

Insgesamt werden so beim instationären Modellbetrieb mit beweglicher Sohle folgende Wirkungen spürbar, die eine physikalische Interpretation der Untersuchungsergebnisse erschweren:

- Die Modellträgheit bewirkt eine Verzerrung der gemessenen Wasserstände,
- die Auswahl der Kornverteilung zur Modellierung der Modellsohle anhand der Wasserspiegellageneigung bewirkt eine Verschiebung des Feststofftransportbeginns,
- die Transportrichtung des Feststoffmaterials kann integrativ visualisiert werden,
- die unumgängliche Modellüberhöhung erschwert die naturähnliche Modellierung der Regelungsbauwerke,
- Wechselwirkungen Vorland/Hauptströmung und Feststofftransport, vgl. aerodynamische Modelle, Beispiel Niederrhein /17/,
- die ggf. erforderliche Geschiebezugabevorrichtung kann den tatsächlichen Vorgang der Geschiebezugabe in der Natur nur angenähert simulieren,
- während des instationären Modellbetriebs mit Geschiebetransport wirken mindestens zwei charakteristische, jedoch unterschiedlich große Zeitmaßstäbe auf die physikalischen Abläufe ein,
- der Modellbetrieb erfordert die simultane Überwachung vieler Meßeinrichtungen gleichzeitig, die räumlich oft sehr weit auseinander liegen,

- der instationäre Modellbetrieb mit Geschiebezugabe erfordert umfangreiche Voruntersuchungen in der Natur über einen möglichst großen Zeitraum von typisch mehreren Jahren.

Dennoch konnte trotz aller genannten Einflüsse durch die in Kapitel 6 diskutierten Untersuchungen gezeigt werden, daß sich die meisten Fehlereinflüsse infolge der Modelleichung anhand von Naturdaten und durch die relative, auf einen Ausgangszustand bezogene Auswertung kompensieren lassen.

Literaturangaben

- /1/ KUHL, Dietrich: 14 Jahre Geschiebezugabe im Rhein unterhalb der Staustufe Iffezheim. In: Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau (1993) Nr. 10
- /2/ HINRICH, H.: Gutachten über die Sohlhöhenveränderung des Rheins zwischen Plittersdorf und Bingen in der Zeit von 1880-1980. WSD-Südwest, Mainz, 1982, unveröffentlicht
- /3/ SHIELDS, A. Anwendung der Ähnlichkeitsmechanik und der Turbulenzforschung auf die Geschiebebewegung. In: Mitteilungsblatt der Preussischen Versuchsanstalt für Wasser-, Erd- und Schiffsbau, 26 (1936)
- /4/ DORER, Heinrich: Ähnlichkeit bei flußbaulichen Modellen. In: Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau, Nr. 54 (1984)
- /5/ NAUDASCHER, Eduard: Hydraulik der Gerinne und Gerinnebauwerke, Springer Verlag Wien, 1987
- /6/ MEYER-PETER, E. und MÜLLER, R.: Eine Formel zur Berechnung des Geschiebebetriebes. In: Schweizer Bauzeitung, 67, Nr. 3 (1949)
- /7/ GEHRIG, Wilhelm: Über die Frage der naturähnlichen Nachbildung der Feststoffbewegung in Modellen. In: Mitteilungsblatt des Franzius-Instituts der TH Hannover, Nr. 26 (1967)
- /8/ RAUDKIVI, A.: Grundlagen des Sedimenttransports. Forschungsbericht SFB 79, Universität Hannover, 1981
- /9/ GESSLER, J.: Der Geschiebebetrieb bei Mischungen untersucht an natürlichen Abpflasterungserscheinungen in Kanälen. In: Mitteilungsblatt der VAW, ETH Zürich, Nr. 69 (1965)
- /10/ KLINGEBIEL, Sven: Physikalische Charakteristika des Feststofftransports in Strömungen. Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) Karlsruhe/ TU Dresden, Diplomarbeit, 1992
- /11/ THEOBALD, Stephan: Ermittlung der Strömungscharakteristika von Transportkörpern unter Einsatz der LDV und fotografischer Visualisierung. Karlsruhe, Universität, Institut für Hydromechanik, Diplomarbeit, 1990
- /12/ KOBUS, Helmut, Hrsg.: Wasserbauliches Versuchswesen. Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kultur (DVWK)

- /13/ NESTMANN, Franz und DORER, Heinrich: Hydraulisches Modell UW Iffezheim, Volume I - V, Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), 1989, Versuchsberichte (unveröffentlicht)
- /14/ SIEBERT, Werner: Simulation von Erosion und Ablagerung von grobem Material unterhalb der Staustufe Iffezheim / Rhein. Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), 1981
- /15/ YALIN, M.S.: River Mechanics. In: Pergamon Press (1992)
- /16/ CHABERT, J., CHAUVIN, J.L.: Formation de dunes et ride dans de modèles fluviaux. In: Bulletin Centre des Recherches et d'Essais, EDF, No. 4 (1963)
- /17/ NESTMANN, Franz: Aerodynamische Modelle, Untersuchungsmethode zur Vorplanung flußbaulicher Maßnahmen, Vortrag am Franzius Tag 1992, Mitteilungen des Franzius-Instituts, Heft 73, 1992