

Dr.-Ing. K. F e l k e l

DIE GESCHIEBEZUGABE ALS FLUSSBAULICHE LÖSUNG
DES EROSIONSPROBLEMS DES OBERRHEINS

Solution of the erosion problem of the Upper
Rhine by adding sediment material

Zusammenfassung

Die vom Verfasser im Jahre 1970 in diesem Mitteilungsblatt im Rahmen einer Ideenstudie vorgeschlagene neuartige Lösung, die Sohlenerosion unterhalb der letzten Staustufe durch kontinuierliche maschinelle Zugabe von geeignetem Kies aus der Talaue ins Rheinbett zu verhüten, wurde im Jahre 1975 erstmals unterhalb der Staustufe Gamsheim und wird seit April 1978 unterhalb der Staustufe Iffezheim im Großversuch erprobt. Sie hat sich dabei als Alternative zum Bau weiterer Staustufen am Oberrhein erwiesen.

Summary

The novel solution which the author suggested in this periodical in 1970 was concerned with the prevention of the river-bed erosion downstream the last barrage by continuous addition of suitable gravel from the river bank into the bed of the Rhine. In a prototype model, this method was first tested downstream the barrage of Gamsheim in 1975 and since April 1978 downstream of Iffezheim. It was shown that this procedure could be used as an alternative to the construction of further barrages in the Upper Rhine.

I N H A L T

	Seite
1 Einleitung	3
2 Theoretische Überlegungen zur Geschiebezugabe	6
2.1 Die Mechanik der Sohlenerosion unterhalb von Staustufen	6
2.2 Zur morphologischen Geschichte des Oberrheins	17
2.3 Die flußbauliche Lösung "Geschiebezugabe"	18
2.4 Die Vor- und Nachteile der Geschiebezugabe gegenüber dem Bau weiterer Staustufen am Oberrhein	19
3 Der im Unterwasser der Staustufe Gamsheim durchgeführte erste Naturversuch	21
4 Der Naturversuch unterhalb der Staustufe Iffezheim	26
4.1 Beschreibung der Gegebenheiten	26
4.1.1 Die Staustufe Iffezheim	
4.1.2 Das Strombett	
4.1.3 Der Abfluß	
4.1.4 Das Sohlenkorn	
4.1.5 Die Schifffahrt	
4.1.6 Die Veränderungen der Sohle bis zum Beginn der Geschiebezugabe	
4.2 Versuchsdurchführung	37
4.3 Versuchsergebnisse	38
5 Theoretische Interpretation in der Natur gemessener Daten	42
5.1 Höhenänderungen der Sohle in der an den Erosionskeil talwärts anschließenden Strecke	42
5.2 Der Geschiebenachtransport aus der Stauhaltung Iffezheim	48
6 Zusammenfassende Beurteilung der Versuchsergebnisse	49
7 Schrifttum	51

1 Einleitung

An die von Frankreich mit 8 Staustufen übergreifend kanalisier- te Oberrheinstrecke zwischen Basel und Straßburg schließen sich stromabwärts die im Jahre 1974 in Betrieb genommene Stau- stufe Gamsbheim (Rhein-km 309) und die 1977 fertiggestellte Staustufe Iffezheim (Rhein-km 334) an (Bild 1).

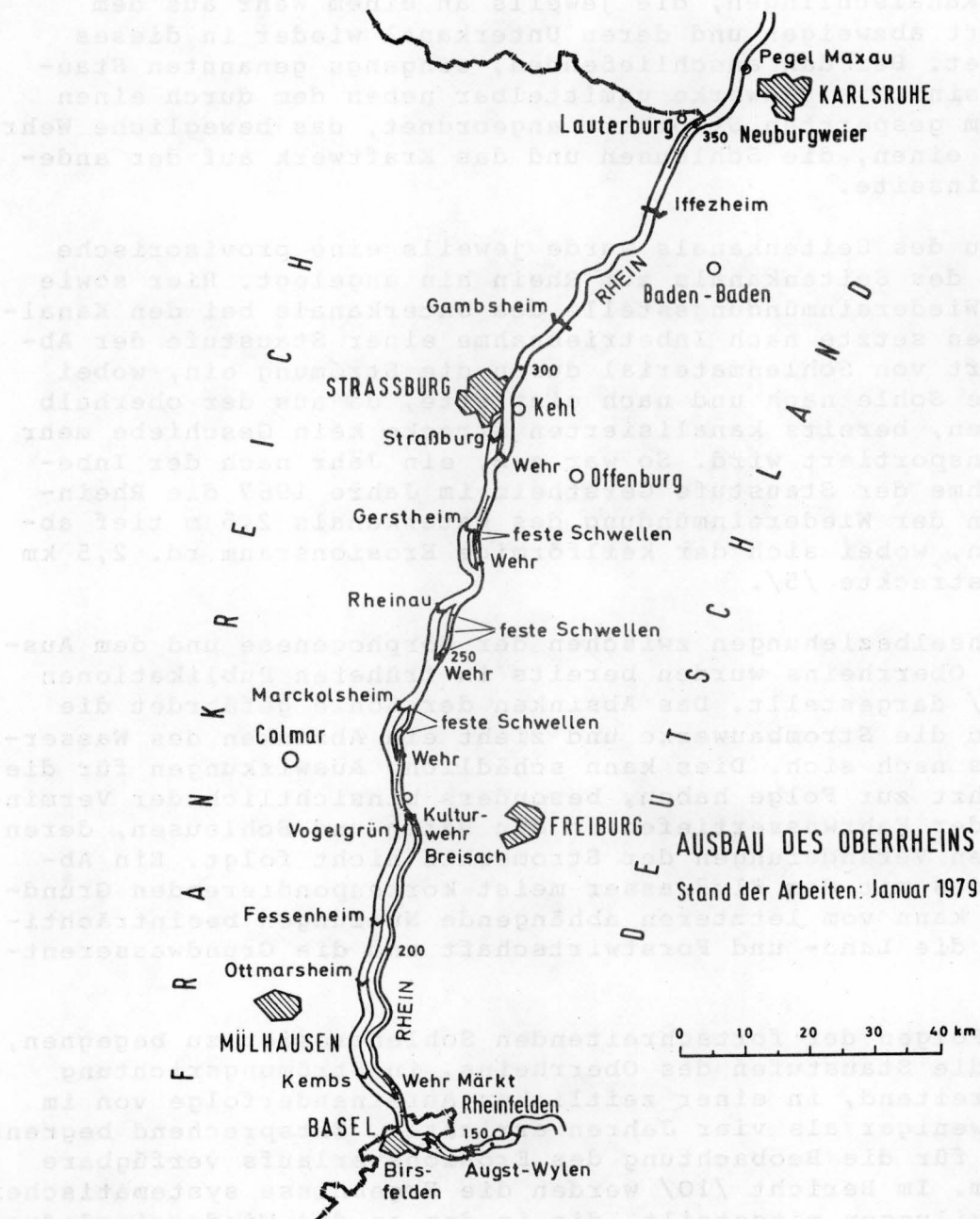


Bild 1 Lageskizze des Oberrheins zwischen Basel und Karlsruhe

Bei beiden handelt es sich um deutsch-französische Gemeinschaftsprojekte.

Die vier obersten Staustufen Kembs (Bauzeit 1928 - 1932), Ottmarsheim, (1948 - 1952), Fessenheim (1952 - 1956) und Vogelgrün (1955 - 1961) liegen am durchgehenden Elsäßischen Seitenkanal, die vier nächsten, nämlich Marckolsheim (1957-1961), Rheinau (1959 - 1963), Gerstheim (1963 - 1967) und Straßburg (1966 - 1970), an eigenen, je zwischen 5 und 11 km langen Kanalschlingen, die jeweils an einem Wehr aus dem Rheinbett abzweigen und deren Unterkanal wieder in dieses einmündet. Bei den anschließenden, eingangs genannten Staustufen sind die Bauwerke unmittelbar neben dem durch einen Querdamm gesperrten Strombett angeordnet, das bewegliche Wehr auf der einen, die Schleusen und das Kraftwerk auf der anderen Rheinseite.

Beim Bau des Seitenkanals wurde jeweils eine provisorische Mündung des Seitenkanals zum Rhein hin angelegt. Hier sowie an der Wiedereinmündungsstelle des Unterkanals bei den Kanalschlingen setzte nach Inbetriebnahme einer Staustufe der Abtransport von Sohlenmaterial durch die Strömung ein, wobei sich die Sohle nach und nach eintiefte, da aus der oberhalb liegenden, bereits kanalisierten Strecke kein Geschiebe mehr nachtransportiert wird. So war z.B. ein Jahr nach der Inbetriebnahme der Staustufe Gerstheim im Jahre 1967 die Rheinsohle an der Wiedereinmündung des Unterkanals 2,5 m tief abgesunken, wobei sich der keilförmige Erosionsraum rd. 2,5 km weit erstreckte /5/.

Die Wechselbeziehungen zwischen der Morphogenese und dem Ausbau des Oberrheins wurden bereits in früheren Publikationen /5/, /8/ dargestellt. Das Absinken der Sohle gefährdet die Ufer und die Strombauwerke und zieht ein Absinken des Wasserspiegels nach sich. Dies kann schädliche Auswirkungen für die Schifffahrt zur Folge haben, besonders hinsichtlich der Verminderung der Fahrwassertiefen in den Häfen und Schleusen, deren Sohle den Veränderungen der Stromsohle nicht folgt. Ein Absinken des mit dem Flußwasser meist korrespondierenden Grundwassers kann vom letzteren abhängende Nutzungen beeinträchtigen, so die Land- und Forstwirtschaft und die Grundwasserentnahmen.

Um den Folgen der fortschreitenden Sohlenerosion zu begegnen, wurden die Staustufen des Oberrheins, in Strömungsrichtung fortschreitend, in einer zeitlichen Aufeinanderfolge von im Mittel weniger als vier Jahren errichtet. Entsprechend begrenzt ist der für die Beobachtung des Erosionsverlaufs verfügbare Zeitraum. Im Bericht /10/ werden die Ergebnisse systematischer Sohlenpeilungen mitgeteilt, die in dem an die Wiedereinmündung des Unterkanals der Staustufe Straßburg nach unterstrom anschließenden, 5 km langen Stromabschnitt im Zeitraum zwischen der Betriebnahme dieser (März 1970) und der folgenden Staustufe Gamsheim (März 1974) ausgeführt wurden.

Geschieht der gemeinsame Ausbau des Rheins in der Grenzstrecke auf der Grundlage deutsch-französischer Staatsverträge, so wird über seine Fortführung unterhalb von Neuburgweier deutscherseits entschieden. Dabei erhebt sich die Frage, welche Alternativen es zu den Staustufen gibt.

Eine solche ist im deutsch-französischen Vertrag vom 04. Juli 1969 /21/ genannt, wo es im Artikel I, Absatz 3 heißt, daß die beiden Vertragsparteien bezüglich des Ausbaus des Rheins unterhalb der Staustufe Iffezheim eine fortschreitende Panzerung des Rheinbettes vorsehen und gemeinsam die technischen Möglichkeiten dazu untersuchen. Sollten diese Untersuchungen erweisen, daß das gesteckte Ziel nicht erreicht werden kann, so werden die Vertragsparteien andere geeignete Maßnahmen vereinbaren.

Im Rahmen dieser gemeinsamen Untersuchungen hat die Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) Natur- und Modelluntersuchungen über die Auswirkungen der Schiffe auf die aus einer Abdeckschicht aus größeren Steinen bestehende Sohlenpanzerung durchgeführt, worüber berichtet wurde /9/. Die Vertragsparteien gaben zunächst in einer Zusatzvereinbarung vom 16. Juli 1975 /22/ zum Vertrag vom 04. Juli 1969 dem Bau einer weiteren Staustufe bei Neuburgweier den Vorzug vor der Sohlenpanzerung. GRAEWE legte in einer Veröffentlichung /14/ die Gründe für diese Entscheidung dar.

Bereits im Jahre 1967 beauftragte der Bundesminister für Verkehr (BMV) die BAW, die mit der Rheinerosion zusammenhängenden morphologischen Gesetzmäßigkeiten zu erforschen und Empfehlungen auszuarbeiten für den weiteren Ausbau des Oberrheins einschließlich einer Prognose der sich aus den empfohlenen Ausbaumaßnahmen ergebenden voraussichtlichen weiteren Entwicklung der Rheinsohle. Im Rahmen dieser Untersuchungen, über die zusammenfassend in /10/ berichtet wird, legte FELKEL eine "Ideenstudie über die Möglichkeit der Verhütung der Erosion des Oberrheins durch maschinelle Kiesförderung aus der Talauflage ins Strombett" vor, die in etwas verallgemeinerter Form auch veröffentlicht wurde /6/. Das darin erstmals vorgeschlagene Verfahren, das als Alternative zur Fortsetzung der Kanalisierung oder als Mittel zur Verlängerung der bei der bisherigen Kanalisierung erforderlichen Zeitschritte von vier Jahren konzipiert ist, wird im folgenden Abschnitt 2 beschrieben.

Mit der Geschiebezugabe kann begonnen werden, wenn nach Schließung des Querdamms einer Staustufe die Erosion im Unterwasser eine Zeit lang gewirkt und sich ein Erosionskeil gebildet hat. Im Unterwasser von Gamsheim war dies ab Frühjahr 1975 der Fall. Der erste Großversuch mit der Geschiebezugabe wurde hier vom Juni 1975 bis Oktober 1975 im Rhein bei Freistett ausgeführt. Über seine Vorbereitung, Durchführung und Ergebnisse haben FELKEL, KUHL und STEITZ berichtet /13/. In der Versuchsstrecke wurde ab Spätherbst 1975 für den Bau der Seitendämme der Stauhaltung Iffezheim Kies aus Bühnenfeldern in erheblichem Umfang entnommen, so daß ab diesem Zeitpunkt die Auswirkungen einer Geschiebezugabe nicht mehr eindeutig von denen der Kiesentnahme

hätten getrennt werden können. Es war daher unzweckmäßig, die Geschiebezugabe im Unterwasser Gamsheim über diesen Zeitpunkt hinaus fortzusetzen.

Der im Jahre 1975 durchgeführte Großversuch in Verbindung mit begleitenden Berechnungen über die unterhalb der Staustufe Iffezheim voraussichtlich zu erwartenden Sohlen- und Wasserspiegelsenkungen führten im Jahre 1976 zu dem von Vertretern eines Untersuchungsbegleitenden Arbeitskreises, in dem die Länder Baden-Württemberg und Rheinland-Pfalz, die Gebietskörperschaften und die betroffenen Gemeinden über die Abfluß- und Geschiebeuntersuchungen am Oberrhein unterrichtet werden, gebilligten Ergebnis, daß es voraussichtlich möglich ist, mit Hilfe der Geschiebezugabe als vorübergehender Maßnahme die Erosion unterhalb der Staustufe Iffezheim so weit einzudämmen, daß weder schädliche Auswirkungen für Landeskultur und Wasserwirtschaft noch unzumutbare Behinderungen der Schifffahrt entstehen und daß deshalb der etwaige Baubeginn für die Staustufe Neuburgweier bis zum Abschluß der Oberrheinuntersuchungen im Jahr 1980 ausgesetzt werden kann.

Am 18. April 1978 begann im Unterwasser der Staustufe Iffezheim der zweite Naturversuch mit der Geschiebezugabe. Seine praktische Durchführung ist eine Aufgabe der Wasser- und Schifffahrsdirektion Südwest und ihres Wasser- und Schifffahrtsamtes Freiburg. Auch bei diesem zweiten Naturversuch ist die BAW wiederum mit der beratenden Mitwirkung bei der Planung, Durchführung und Auswertung der Versuche und mit der theoretischen Verarbeitung der Versuchsergebnisse beauftragt, ferner mit Spezialmessungen und allen EDV-Arbeiten. BAW und WSA Freiburg haben über die bis Februar 1979 durchgeführten Versuche und deren Ergebnisse einen gemeinsamen Versuchsbericht /2/ vorgelegt.

2 Theoretische Überlegungen zur Geschiebezugabe

Der Gedanke, die Sohlenerosion unterhalb der letzten Staustufe des Oberrheins durch Geschiebezugabe zu verhindern, geht von der Mechanik der Sohlenerosion unterhalb von Staustufen aus sowie von den geologisch-morphologischen Voraussetzungen des Oberrheins.

2.1 Die Mechanik der Sohlenerosion unterhalb von Staustufen

Als Beitrag der Bundesrepublik Deutschland legte FELKEL zum XXII. Internationalen Schifffahrtskongreß Paris 1969 eine theoretische Arbeit vor zum Thema I5 "Problem der Geschiebeführung in kanalisiertem Flüssen und in den Abschnitten eines teilweise kanalisiertem Wasserlaufs, vor allem an den Einmündungen der Nebenflüsse" /4/. Diese Arbeit enthält theoretische Überlegungen zur Erosionsbildung talwärts der in Strömungsrichtung letzten Staustufe eines teilkanalisiertem Flusses mit alluvialer

Sohle. LEBRETON, Leiter des Laboratoire National d'Hydraulique de Chatou, nahm in einem Diskussionsbeitrag zu dieser Arbeit Stellung (Kongreßberichte, Seite 306 bis 308) /17/.

Die entscheidende Frage, ob sich eine alluviale Flußsohle bei Geschiebeführung im Laufe der Zeit aufhöht oder eintieft, oder ob sie ihre Höhe beibehält, hängt demnach nicht von der Größe des Geschiebetriebes ab. Auch bei sehr starkem Geschiebetrieb bleibt die Sohlenhöhe dann stabil, wenn in einem betrachteten Stromabschnitt, dessen Geometrie derjenigen der beiderseits anschließenden Stromstrecken entspricht, je Zeiteinheit die gleiche Masse eintreibt, die ihn durchwandert und nach unterstrom hin wieder verläßt. Allein das Ergebnis dieser Bilanz zwischen Nachschub und Abgang der Sohlenmassen ist für die mittleren Höhenveränderungen der Sohle ausschlaggebend.

Das Transportvermögen der Strömung hängt bei gegebenen physikalischen Eigenschaften des Sohlenkorngemisches (hauptsächlich Korngröße und -gestalt und Dichte) von der auf die Sohle wirkenden Schleppspannung ab, die sich aus der Wassertiefe und dem Gefälle bzw. damit zusammenhängend, aus den Strömungsgeschwindigkeiten ergibt. Diesen Größen ist somit in ungestörten, sich höhenmäßig nicht verändernden Stromabschnitten eine bestimmte Geschiebefracht zugeordnet.

Treibt in einem Zeitintervall von oberstrom her mehr Geschiebe in eine Teilstrecke ein, als auf Grund der vorstehend genannten Gegebenheiten in ihr und an ihrem unteren Ende auf Grund der hier vorhandenen Schleppspannung weitertransportiert werden kann, dann muß sich die Differenz in dieser Teilstrecke ablagern. Treibt umgekehrt von oben zu wenig Geschiebe ein, dann wird die Differenz dieser Teilstrecke entnommen werden und ihre Sohle sich somit eintiefen.

Das letztere ist regelmäßig unterhalb der jeweils letzten Staustufe des Oberrheins der Fall, da hier aus der oberhalb liegenden, bereits kanalisierten Strecke kein Geschiebe nachtransportiert wird. Als Folge der Sohleneintiefung sinkt auch der Wasserspiegel ab. Dies wiederum hat eine Verminderung der Sohlenschleppspannung zur Folge, so daß aus dem obersten Abschnitt immer weniger abtransportiert wird, wodurch sich im unterstrom anschließenden Abschnitt ein Geschiebedefizit zwischen Zu- und Abgang ergibt. Die Erosion unterhalb der letzten Staustufe schreitet also in Strömungsrichtung fort, wobei sich ein immer tiefer und länger werdender Erosionskeil ausbildet. Das Ergebnis der theoretischen Überlegungen wird durch die Naturbeobachtungen an den Rheinstaustufen bestätigt.

Im folgenden Bilde ist schematisch ein Längsprofil eines Flußabschnittes dargestellt und in mehrere Teilstrecken unterteilt, die sich zwischen $E, i + 1, i, i - 1$ usw., z.B. vom Hektometerpunkt zu Hektometerpunkt, erstrecken mögen.

Zu Beginn der Betrachtung (zur Zeit $T = 0$) sind ein bestimmter Wasserspiegel und damit bestimmte Tiefen t und Gefälle I vorhanden, wobei sich eine auf die Sohle wirkende Schleppspannung er-

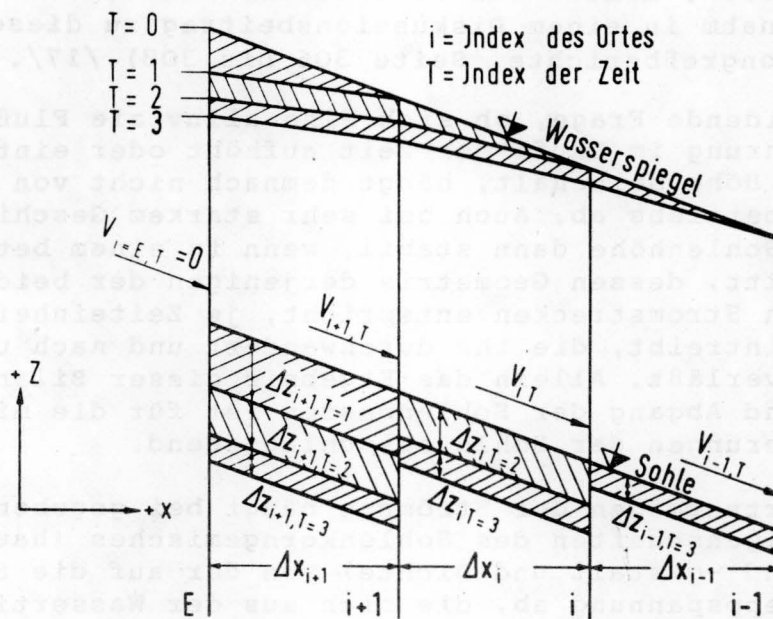


Bild 2 Schematischer Längsschnitt einer Flußstrecke, in der die Sohlenerosion in Fließrichtung fortschreitet

gibt. Ihr entspricht bei geschiebeführenden Abflüssen eine mit steigendem Abfluß zunehmende Geschiebefracht.

In einen räumlichen Abschnitt Δx_i , der vom Profil $i + 1$ bis zum Profil i reichen möge, tritt je Zeiteinheit (z.B. Tag) die Geschiebemenge $V_{i+1,T}$ ein und die Geschiebemenge $V_{i,T}$ aus. Solange $V_{i,T} = V_{i+1,T}$ ist, verändert sich die Sohlenlage des Abschnittes Δx_i nicht. Wird in einem Intervall $V_{i,T} < V_{i+1,T}$ oder $V_{i,T} > V_{i+1,T}$, dann muß die Differenz $V_{i+1,T} - V_{i,T}$ im Abschnitt abgelagert beziehungsweise aus ihm entnommen werden. Dabei verändert sich die Höhenlage der Sohle im Abschnitt Δx_i im Mittel um den Betrag

$$\Delta z_{i,T} = \frac{V_{i+1,T} - V_{i,T}}{\Delta x_i \cdot B_{i,T}}$$

wobei Δx_i die Länge des Abschnittes und $B_{i,T}$ seine momentane mittlere Sohlenbreite ist, innerhalb welcher das Geschiebe transportiert wird.

Gelangt nun in den Abschnitt Δx_{i+1} gar kein Geschiebe hinein, etwa deshalb, weil an seiner oberen Grenze E eine Staustufe den Geschiebetrieb unterbindet ($V_i = E = 0$), dann muß im ersten Zeitintervall das gesamte Volumen V_{i+1} dem Abschnitt Δx_{i+1} entnommen werden. Am Ende des ersten Zeitintervalls liegt die Sohle somit hier tiefer als vorher. Dies wiederum hat ein Absinken des Wasserspiegels im Abschnitt Δx_{i+1} zur Folge, so daß zu Beginn des nächsten Zeitintervalls ($T = 2$) in diesem Abschnitt auch eine andere (nämlich eine geringere) Schleppspannung auftritt als vorher.

Herrschte zur Zeit $T = 1$ im benachbarten Abschnitt Δx_i Gleichgewicht (d.h. war $V_{i,T} = V_{i+1,T}$), so ist nun, während der Zeit $T = 2$, $V_{i,T} > V_{i+1,T}$ und die Erosion und in ihrem Gefolge das Absinken des Wasserspiegels greift in den Abschnitt Δx_i über. Die Erosion unterhalb der letzten Staustufe schreitet also von der obersten Teilstrecke aus, in die kein Geschiebe hineingetragen wird, nach unterstrom hin fort, wobei die relative Eintiefung je Zeiteinheit (bei entsprechendem Abfluß) in der obersten Teilstrecke immer geringer wird und die Länge der keilförmig nach unterstrom auslaufenden Erosion mit der Zeit wächst.

Wird umgekehrt der obersten Teilstrecke mehr Geschiebe zugeführt als den Erosionskeil verläßt, so ist zu erwarten, daß die Sohle in ihm wieder aufgehört wird, daß also die eingetretene Erosion wieder ganz oder teilweise rückgängig gemacht wird.

Mit den Bezeichnungen der Bilder 2 bis 6 und der Tafeln III und IV enthalten die Tafeln I und II das Strukturdiagramm der Mechanik der von den Abflußverhältnissen und der Geometrie des Flußbettes einerseits und andererseits von den Eigenschaften des Geschiebes abhängenden Veränderung der Sohle und des Wasserspiegels.

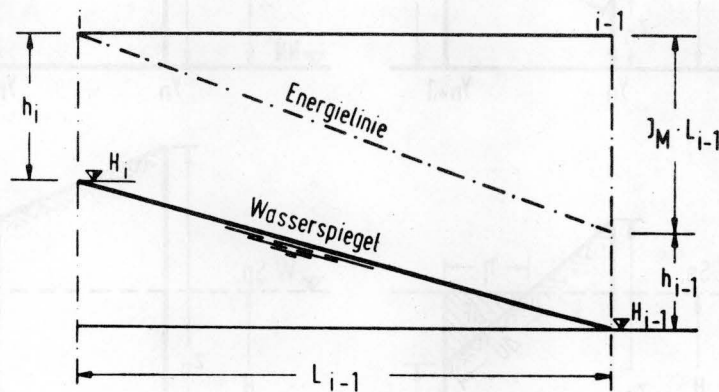


Bild 3 Schematischer Längsschnitt des Wasserspiegels und der Energielinie zwischen zwei benachbarten Berechnungsquerschnitten

Felkel: Die Geschiebezugabe als flußbauliche Lösung

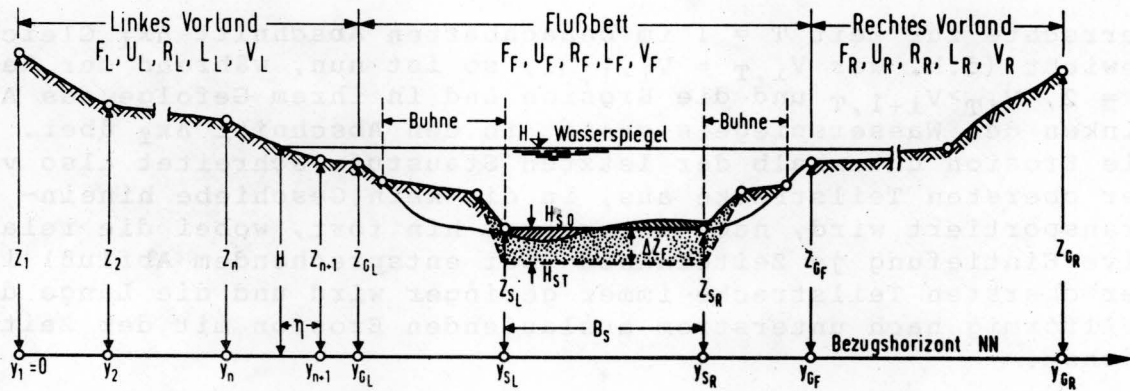


Bild 4 Skizze eines Berechnungsquerschnittes mit Sohlenerosion

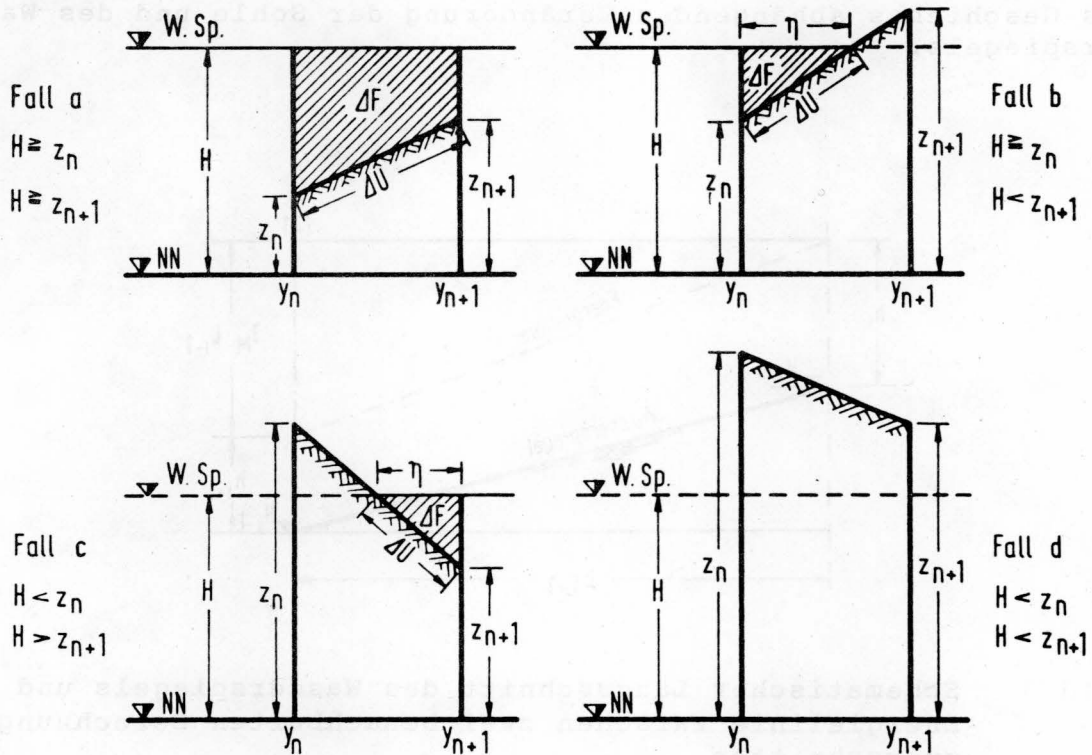
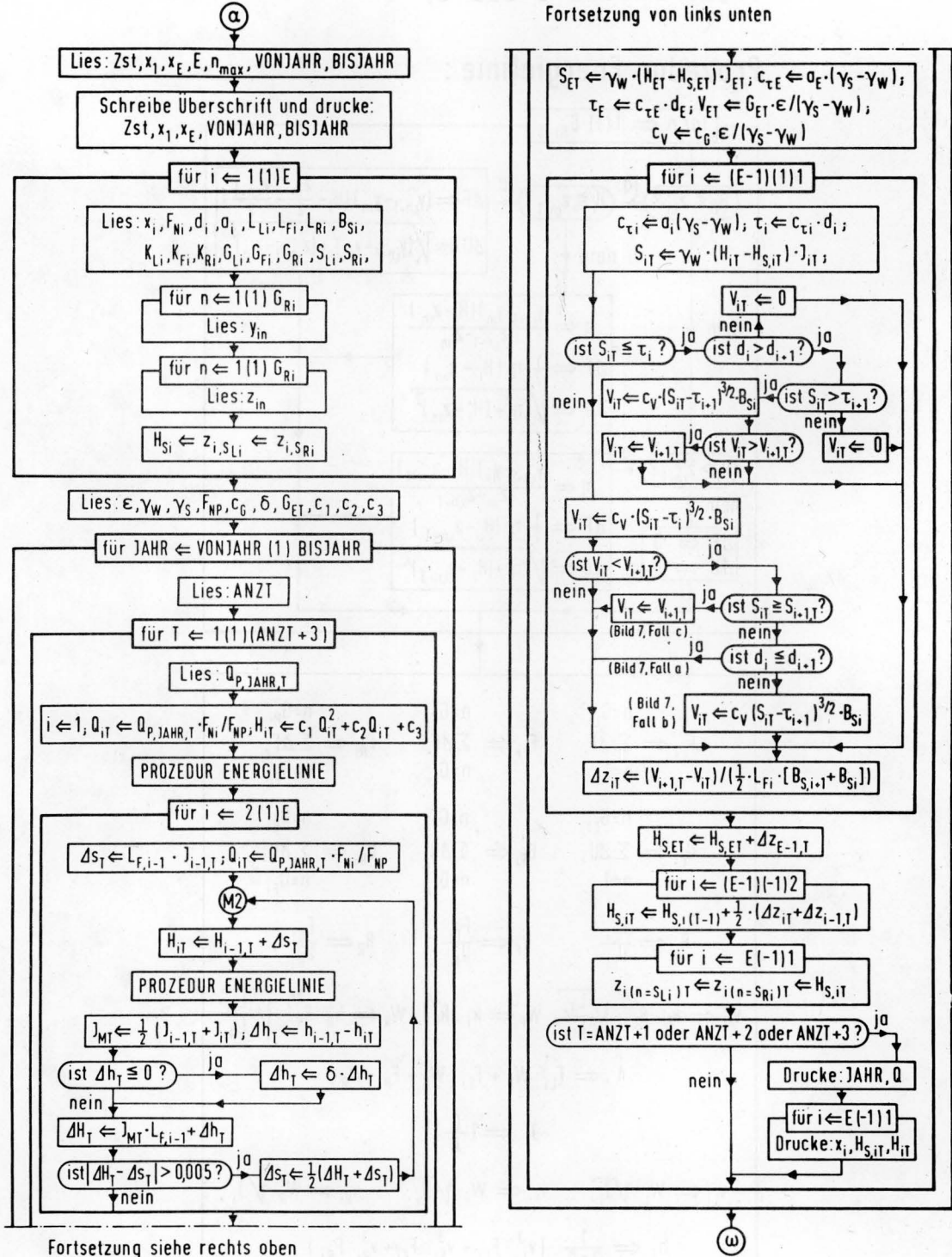


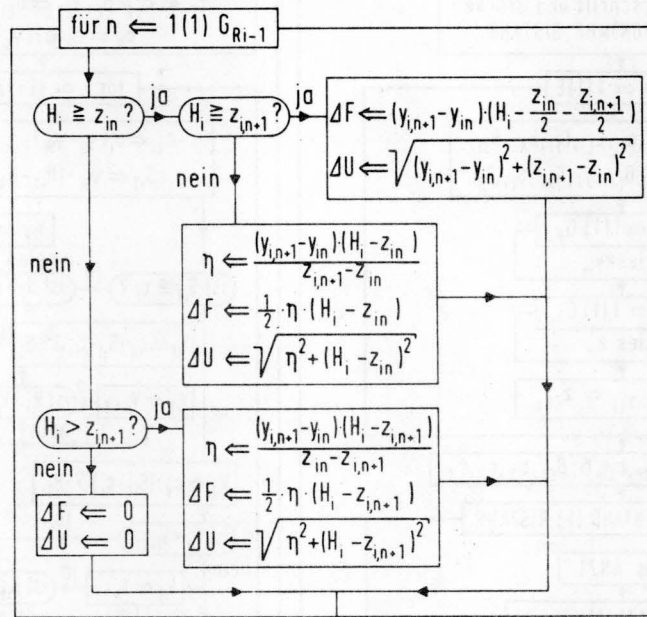
Bild 5 Die vier möglichen Fälle bei der Berechnung des Abflußquerschnitts und des benetzten Umfangs aus Horizontal- und Vertikalkoordinaten

Tafel I Strukturdiagramm der Mechanik der Veränderungen der Stromsohle und des Wasserspiegels



Tafel II Strukturdiagramm zur Berechnung der Energielinie und des Wasserspiegels bei Beschreibung der Querprofile durch Koordinaten einzelner Punkte (vgl. Bilder 3 bis 5)

Prozedur Energielinie :



$$\begin{aligned}
 & n = G_{L_i} & n = G_{F_i} & n = G_{R_i} \\
 F_{L_i} & \leftarrow \sum_{n=1} \Delta F, & F_{F_i} & \leftarrow \sum_{n=G_{L_i}} \Delta F, & F_{R_i} & \leftarrow \sum_{n=G_{F_i}} \Delta F, \\
 & n = G_{L_i} & n = G_{F_i} & n = G_{R_i} \\
 U_{L_i} & \leftarrow \sum_{n=1} \Delta U, & U_{F_i} & \leftarrow \sum_{n=G_{L_i}} \Delta U, & U_{R_i} & \leftarrow \sum_{n=G_{F_i}} \Delta U, \\
 & n = G_{L_i} & n = G_{F_i} & n = G_{R_i} \\
 R_L & \leftarrow \frac{F_{L_i}}{U_{L_i}}, & R_F & \leftarrow \frac{F_{F_i}}{U_{F_i}}, & R_R & \leftarrow \frac{F_{R_i}}{U_{R_i}}, \\
 W_L & \leftarrow k_L \cdot R_L^{2/3} \cdot \sqrt{\frac{L_{F_i}}{L_{L_i}}}, & W_F & \leftarrow k_F \cdot R_F^{2/3}, & W_R & \leftarrow k_R \cdot R_R^{2/3} \cdot \sqrt{\frac{L_{F_i}}{L_{R_i}}}, \\
 A & \leftarrow F_{L_i} \cdot W_L + F_{F_i} \cdot W_F + F_{R_i} \cdot W_R, \\
 J_i & \leftarrow \left(\frac{Q}{A} \right)^2, \\
 v_{L_i} & \leftarrow W_L \cdot \sqrt{J_i}, & v_{F_i} & \leftarrow W_F \cdot \sqrt{J_i}, & v_{R_i} & \leftarrow W_R \cdot \sqrt{J_i}, \\
 h_i & \leftarrow \frac{1}{2gQ} \cdot (v_{L_i}^3 \cdot F_{L_i} + v_{F_i}^3 \cdot F_{F_i} + v_{R_i}^3 \cdot F_{R_i})
 \end{aligned}$$

Felkel: Die Geschiebezugabe als flußbauliche Lösung

Tafel III Bedeutung der Formelzeichen

Name im ALGOL-Programm	Name im Text und im Struktur-Diagramm	Bedeutung	Einheit
AI	A	$Q / \sqrt{J[I]}$ bzw. $Q / \sqrt{J_i}$	m ³ /s
A[I]	a _i	Beiwert in Gleichung (13)	
ANZT		Anzahl der in die Rechnung eingeführten Tage eines Jahres	
BIS JAHR		Jahreszahl des Jahres, mit dem die Berechnung endet	
BS[I]	B _{Si}	Sohlenbreite, innerhalb der im Querprofil I bzw. i Geschiebetransport stattfindet	m
C1, C2, C3	c ₁ , c ₂ , c ₃	Koeffizienten in der Gleichung der Abflußkurve des untersten Querschnittes der Berechnungsstrecke	
CGT	c _G	Beiwert in der Geschiebetriebformel, bezogen auf die je Tag transportierten Geschiebemassen	
CV	c _v	Beiwert in der Geschiebetriebformel, bezogen auf das je Tag transportierte Volumen	
DELTA	δ	Abminderungsfaktor für die Geschwindigkeitshöhen bei verzögerter Fließbewegung	
DF	ΔF	Teilflächen zwischen zwei aufeinanderfolgenden Koordinaten	m ²
DH	ΔH	Errechnete Differenz zwischen dem Wasserspiegel im oberen und im unteren Querschnitt eines Rechenschrittes von der Länge LF[I] bzw. L _{F_i}	m
DHV	Δh	Differenz zwischen den Geschwindigkeitshöhen im oberen und im unteren Querprofil eines Rechenschrittes von der Länge LF[I] bzw. L _{F_i}	m
DM[I]	d _i	Maßgebender (Mittlerer) Durchmesser des Geschiebekorns	m
DS	Δs	Angenommene Differenz zwischen den Wasserspiegelhöhen im oberen und im unteren Querprofil eines Rechenschrittes von der Länge LF[I] bzw. L _{F_i}	m
DU	ΔU	Teil des benetzten Umfangs zwischen zwei aufeinanderfolgenden Koordinaten	m
DZ[I]	Δz _i	Tägliche Veränderung der Höhenlage der Sohle im Abschnitt zwischen zwei benachbarten Querprofilen I und I + 1 bzw. i und i + 1	m
E	E	Anzahl der Querprofile eines Berechnungsabschnittes	
EPSILON	ε	Verhältnis des spezifischen Gewichtes des Geschiebes zu seinem Raumbgewicht, beides im Trockenen	
F	ΣΔF	Fortlaufende Summe der Teilflächen DF	m ²
FE[I]	G _{F_i}	Zahlenwert, den der Index N bzw. n für denjenigen Geländepunkt des Querprofils I bzw. i annimmt, der die Grenze zwischen Fluß und rechtem Vorland bildet	
FFLUSS	F _{F_i}	Abflußquerschnitt des Flußbettes	m ²
FLINKS	F _{L_i}	Abflußquerschnitt des linken Vorlandes	m ²
FNP	F _{N_P}	Größe des Einzugsgebietes des Stromes an derjenigen Pegelstelle, für die Abflußmengen eingelesen werden	km ²
FN[I]	F _{N_i}	Größe des Einzugsgebietes des Stromes bis zum Querprofil I bzw. i	km ²

noch: Tafel III

Name im ALGOL-Programm	Name im Text und im Struktur-Diagramm	Bedeutung	Einheit
FRECHTS	FRi	Abflußquerschnitt des rechten Vorlandes	m ²
GIT'	GiT	Die im Laufe eines Tages T durch das Querprofil I bzw. i transportierten Geschiebemassen	kg
GIT1	GET	In die zu untersuchende Flußstrecke von oben je Tag einwandernde Geschiebemasse	kg
GS	γ_s	Spezifisches Gewicht des Sohlengeschiebes	kp/m ³
GW	γ_w	Spezifisches Gewicht des Wassers	kp/m ³
H[I]	H _i	Höhenlage des Wasserspiegels im Querprofil I bzw. i	(NN+)m
HV[I]	h _i	Geschwindigkeitshöhe im Querschnitt I bzw. i	m
I	i	Feldindex der aufeinanderfolgenden Querprofile, mit Schritten der Größe 1 entgegen der Fließrichtung von 1 bis E ansteigend	
JAHR		Jahreszahl	
J[I]	J _i	Energieliniengefälle im Querprofil I bzw. i	
JM	JM	Mittleres Energieliniengefälle zwischen zwei benachbarten Querprofilen	
KF[I]	kFi	Abflußbeiwert des Flußbettes im Querprofil I bzw. i	} m ¹ /s s
KL[I]	kLi	Abflußbeiwert des linken Vorlandes im Querprofil I bzw. i	
KR[I]	kRi	Abflußbeiwert des rechten Vorlandes im Querprofil I bzw. i	
LE[I]	GLi	Zahlenwert, den der Index N bzw. n für denjenigen Geländepunkt des Querprofils I bzw. i annimmt, der die Grenze zwischen linkem Vorland und Flußbett bildet.	
LF[I]	LFi	Abstand zweier benachbarter Querprofile, in der Achse des Flußbettes gemessen. Schrittweite der Rechnung	m
LL[I]	LLi	Abstand zweier benachbarter Querprofile, in der Achse des linken Vorlandes gemessen	m
LR[I]	LRi	Abstand zweier benachbarter Querprofile, in der Achse des rechten Vorlandes gemessen	m
LS[I]	SLi	Zahlenwert, den der Index N bzw. n im Querprofil I bzw. i für die linke Grenze derjenigen Sohlenbreite annimmt, innerhalb der Geschiebetransport stattfindet	
MAXN	n _{max}	Der größte innerhalb eines Berechnungsabschnittes auftretende Zahlenwert von RE[I] bzw. GRi	
N	n	Feldindex der durch Koordinaten gegebenen Punkte eines Querprofils, mit Schritten der Größe 1 von links nach rechts von 1 bis RE[I] bzw. GRi ansteigend	
Q[I]	QiT	Gesamtabfluß durch ein Querprofil I bzw. i	m ³ /s
QPJT	QP, Jahr, T	Stationärer Gesamtabfluß am Pegel an einem bestimmten Tag	m ³ /s
RE[I]	GRi	Zahlenwert, den der Index N bzw. n für den Endpunkt des rechten Vorlandes im Querprofil I bzw. i annimmt	

Felkel: Die Geschiebezugabe als flußbauliche Lösung

noch: Tafel III

Name im ALGOL-Programm	Name im Text und im Struktur-Diagramm	Bedeutung	Einheit
RFL	R _F	Hydraulischer Radius des Flußbettes	m
RLI	R _L	Hydraulischer Radius des linken Vorlandes	m
RRE	R _R	Hydraulischer Radius des rechten Vorlandes	m
RS[I]	S _{Ri}	Zahlenwert, den der Index N bzw. n im Profil I bzw. i für die rechte Grenze derjenigen Sohlenbreite annimmt, innerhalb der Geschiebetransport stattfindet	
S[I]	S _{iT}	Mittlere, das Geschiebekorn angreifende Schleppspannung im Querprofil I bzw. i	kp/m ²
SH[I]	H _{Si}	Mittlere Höhenlage der beweglichen Flußsohle im Querprofil I bzw. i	
T	T	Feldindex, der in die Berechnung eingeführten Tage eines Jahres, von 1 bis ANZT ansteigend	NN + m
TAU[I]	τ _i	Grenzspannung, bei der die Geschiebebewegung beginnt	kp/m ²
U	ΣΔU	Fortlaufende Summe der Teile des benetzten Umfanges DU	m
UFLUSS	U _{Fi}	Benetzter Umfang des Flußbettes	m
ULINKS	U _{Li}	Benetzter Umfang des linken Vorlandes	m
URECHTS	U _{Ri}	Benetzter Umfang des rechten Vorlandes	m
VFL	v _{Fi}	Mittlere Fließgeschwindigkeit im Flußbett	m/s
VLI	v _{Li}	Mittlere Fließgeschwindigkeit über dem linken Vorland	m/s
VOLUMEN[I] VON JAHR	V _{iT}	Geschiebevolumen, das innerhalb eines Tages durch den Querschnitt I bzw. i transportiert wird Jahreszahl des Jahres, mit dem die Berechnung beginnt	m ³
VRE	v _{Ri}	Mittlere Geschwindigkeit über dem rechten Vorland	m/s
X[I]	x _i	Ortspunkt der Flußachse im Querprofil I bzw. i	km
XE	x _E	Kilometerpunkt des oberen Endes der Berechnungsstrecke	km
XX	x ₁	Kilometerpunkt des unteren Endes der Berechnungsstrecke	km
Y[I, N]	y _{in}	Horizontalkoordinaten eines Geländepunktes im Querprofil I bzw. i	m
Z[I, N]	z _{in}	Vertikalkoordinaten eines Geländepunktes im Querprofil I bzw. i	(NN+)m
ZST	Z _{st}	Fortlaufende Nummer des Strombett- oder Abflußzustandes	m

Tafel IV Bedeutung der Symbole der Strukturdiagramme

Symbol	Bezeichnung (und Bemerkung)
	Anfang der Rechnung
	Anweisung (Rechteckiges Kästchen mit nur einem Eingang und einem Ausgang)
	Laufanweisung (Bedeutung: Die Anweisung D wird erst für V=A ausgeführt, anschließend für V=A+B, für V=A+2B,----- usw., bis der letzte Wert von V die Schranke C überschritten hat)
	Bedingung (Kästchen mit abgerundeten Seiten einem Eingang und zwei Ausgängen. Ist die Bedingung erfüllt („ja“), so geht es waagrecht, wenn nicht („nein“), senkrecht weiter)
	Marke (Kreis mit mehreren Eingängen aber nur einem Ausgang)
	Ende der Rechnung
$y \leftarrow x$	Ergibt-Pfeil (Bedeutung: „y ergibt sich aus x“ oder „y wird ersetzt durch x“)

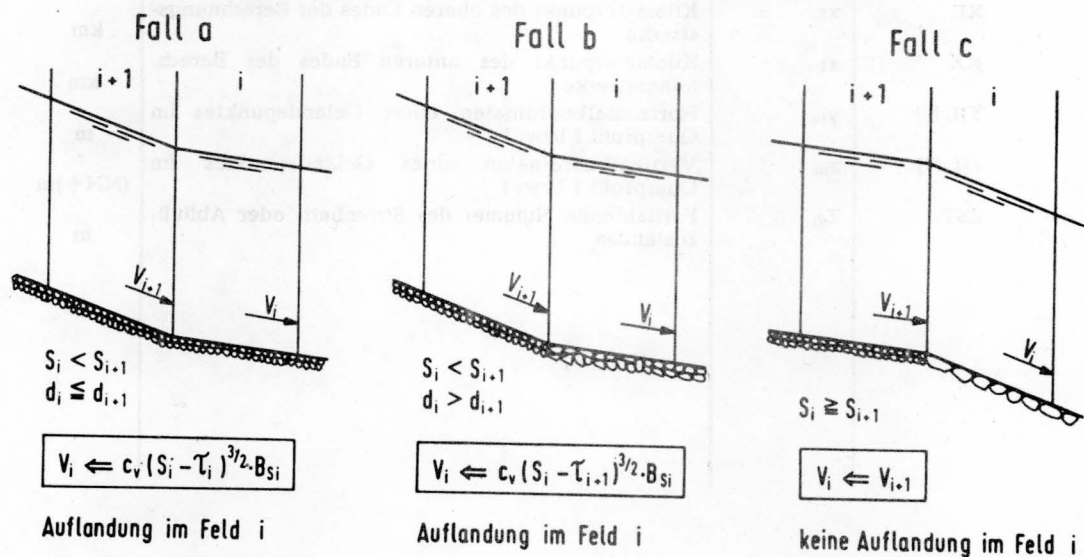


Bild 6 Schematische Längsprofile für die 3 möglichen Fälle bei der Bedingung $V_{iT} < V_{i+1,T}$

2.2 Zur morphologischen Geschichte des Oberrheins

Der Alpen-Rhein durchfließt den als Absetzbecken wirkenden Bodensee, den er bar von Feststoffen verläßt. In der anschließenden, rd. 170 km langen Strecke zwischen Konstanz und Basel erreichte die Sohlenerosion schon vor langen Zeiten den Felsuntergrund, so daß der hier Hochrhein genannte Strom seither kaum bewegliches Sohlenmaterial vorfindet. Zudem ist der Hochrhein heute, ebenso wie sein größter Nebenfluß, die Aare, weitgehend kanalisiert.

Bei Basel ändert der nun als Oberrhein bezeichnete Strom seine Fließrichtung nach Norden und tritt in die als geologischer Grabenbruch entstandene Oberrheinebene ein. In sie schütteten am Ende einer jeden der vier diluvialen Eiszeiten die Schmelzwässer des zurückgehenden Eises große Geröllemassen. Nachdem der Abfluß der eiszeitlichen Schmelzwasser zurückgegangen war, diente die stellenweise bis zu 40 km breite und mehr als 300 m tiefe Diluvialschicht als Geschiebedepot, aus dem heraus sich der Strom mit der seiner Schleppkraft entsprechenden Geschiebemasse sättigte und sie abtransportierte.

Dabei tiefte sich das Strombett ein. Der etwa bis zur Lautermündung (bei Karlsruhe) vor der Korrektur in viele Arme zerfaserte Strom änderte mit jedem Hochwasser seinen Lauf, so daß sich die Erosion auf einer großen, im Mittel etwa 4 km betragenden Breite auswirkte (Bild 7). Die seitliche Grenze der erodierten Fläche tritt in der Landschaft des Oberrheins als sogenanntes Hochgestade in Form eines ausgeprägten, stellenweise bis zu 30 m hohen Steilabfalls von der diluvialen Niederterrasse zu der im Alluvium ausgebildeten Rheinniederung in Erscheinung.

Die nach ihrem Initiator TULLA benannte, im vorigen Jahrhundert als eine der ersten großen zusammenhängenden Flußbaumaßnahmen ausgeführte Oberrheinkorrektur faßte die zahlreichen Rheinarme in ein einheitliches Flußbett zusammen, dessen befestigte Ufer den Angriffen der Strömung standhalten. Die in der Zeit seit der Korrektur des Oberrheins durchgeführten Beobachtungen beharrender Niedrigwasserstände ließen erkennen, daß als Folge der Korrektur die Breitenerosion durch eine Eintiefung der Sohle abgelöst wurde, die innerhalb von 100 Jahren zwischen Rheinweiler und Neuenburg den Niedrigwasserspiegel um rd. 7 m absinken ließ.

Die in der ersten Hälfte dieses Jahrhunderts zur Verbesserung der Fahrwasserverhältnisse durchgeführte Niedrigwasserregulierung verringerte im rd. 250 m breiten Korrektionsbett die Niedrigwasserrinne auf rd. 170 m. Dies trug zur Vergrößerung der Erosionsgeschwindigkeit in vertikaler Richtung und nach unterstrom hin bei.

Die eingangs behandelte, in Strömungsrichtung fortschreitende Kanalisierung bewirkte eine Verlagerung der Erosion in das Unterwasser der jeweils letzten fertiggestellten Staustufe.



Bild 7 Blick vom Isteiner Klotz rheinaufwärts gegen Basel. Ölgemälde von P. Birmann um 1810. Basel. Kopie von H. Otto. (Rheinmuseum e.V. Koblenz)

Hinsichtlich der Verteilung der mittleren Durchmesser des Sohlenkorns besteht dahingehend eine Gesetzmäßigkeit, daß die Korngrößen im Rheinabschnitt Straßburg-Oppenheim in Strömungsrichtung kontinuierlich abnehmen (näheres in /7/). Aus der Entstehungsgeschichte des Oberrheintales kann geschlossen werden, daß mit Einschränkungen ähnliche Sand-Kies-Gemische wie unter der Rheinsohle auch seitlich davon in der Talniederung anstehen. Probebohrungen im Rheinvorland sowie der Betrieb der Kieswerke bestätigen dies mit der Einschränkung, daß der Untergrund der Talaue etwas feineres Korn mit einem größeren Sandanteil aufweist als das benachbarte Rheinbett.

2.3 Die flußbauliche Lösung "Geschiebezugabe"

Aus den vorstehenden Darlegungen schloß der Verfasser, daß das weitere Fortschreiten der Erosion dadurch vermieden werden kann und daß man eine bereits eingetretene Sohleneintiefung dadurch wieder rückgängig machen kann, daß man dem Strom die abgängige Kies- und Sandmasse in der gleichen Qualität am Ort der Entstehung der Erosion wieder ersetzt.

Dies erfordert eine maschinelle Entnahme des Kieses aus dem nahen Vorland, wo ähnliche Körnungen zu erwarten sind, andernfalls die gewünschte Kornzusammensetzung hier durch Sieben und Mischen erreicht wird, ferner den Antransport des Materials an die Einbaustelle im Rhein und den Einbau daselbst. Als Förder-, Transport- und Einbaugeräte kommen Bagger, Rohrleitungen, Transportbänder, Klappschuten und andere herkömmliche Mittel in Frage.

Der Kies kann jeweils unabhängig von der Wasserführung so lange kontinuierlich am oberen Ende des Erosionskeils eingebaut werden, bis die alte Sohlenhöhe hier annähernd wieder erreicht ist. In Abhängigkeit von der Wasserführung wird die Strömung von dem auf der Rheinsohle abgelagerten Material laufend einen solchen Anteil abtransportieren, wie er auch vor dem Ausbau hier von ihr fortbewegt wurde. Damit aber wird die Geschiebebilanz wieder ausgeglichen. Dies kann durch die Weiterführung der Kanalisierung nicht erreicht werden, da hierbei das Geschiebedefizit nicht behoben wird, so daß die Erosion unterhalb der jeweils letzten Staustufe zwangsweise neu einsetzen muß.

Wenn mit Hilfe der kontinuierlich weiter durchzuführenden Geschiebezugabe die Stromsohle auf ihrer Ausgangshöhe gehalten wird, dann hat dies auch die Beibehaltung der ursprünglichen Wasserspiegellagen zur Folge.

2.4 Die Vor- und Nachteile der Geschiebezugabe gegenüber dem Bau weiterer Staustufen am Oberrhein

Um den Folgen der fortschreitenden Erosion zu begegnen, wurden die Staustufen des Oberrheins, in Fließrichtung fortschreitend, in einer zeitlichen Aufeinanderfolge von im Mittel weniger als vier Jahren errichtet. Gegenüber dem Bau weiterer Staustufen verspricht die Geschiebezugabe folgende Vorteile:

- Die Geschiebezugabe verhütet die Sohlenerosion.
Sie ist das einzige Mittel, um den durch die Kanalisierung unterbundenen Geschiebenachschub, dessen Fehlen die Erosion verursacht, wieder zu erreichen. Da bei der Weiterführung der Stauregelung das Geschiebedefizit nicht behoben wird, muß die Erosion auch unterhalb einer jeden weiteren Staustufe neu einsetzen.
- Die Geschiebezugabe ist wirtschaftlicher.
Während die Investitionskosten für eine Staustufe ohne Kraftwerk derzeit rd. 450 Mio. DM betragen und daneben laufende Betriebs- und Unterhaltungskosten anfallen, verursacht der im Jahresdurchschnitt erforderliche Einbau von ca. 170 000 m³ Geschiebematerial (Einheitspreis rd. 10 DM/m³) einschließlich Transport und Überwachung durch laufende Peilungen usw. Jahreskosten von derzeit etwa 5 bis 7 Mio. DM. Das sind also weniger als 2 % der Kosten einer einzigen Staustufe, wobei bisher spätestens alle vier Jahre eine weitere errichtet werden mußte.

- Die Geschiebezugabe verbraucht weniger Bodenfläche als eine Staustufe.
Um den Kiesbedarf für 100 Jahre Geschiebezugabe aus einem hierfür im Rheinvorland anzulegenden, rd. 30 m tiefen Baggersee zu decken, müßte dieser einschließlich Betriebsflächen eine Grundrißausdehnung von maximal rd. 150 ha aufweisen. Die Staustufen Gamsheim und Iffezheim nahmen demgegenüber außerhalb des alten Strombettes je rund das Doppelte an Bodenfläche in Anspruch.
- Die Geschiebezugabe verändert die Grundwasserstände nicht und beeinflußt somit nicht die damit in Verbindung stehenden Nutzungen wie Trinkwasserentnahmen, Land- und Fortwirtschaft.
- Die Geschiebezugabe bewirkt keine Vergrößerung der Hochwassergefahr in der talwärtigen Stromstrecke. Durch die entlang der Ufer errichteten Dämme der Stauhaltung entfallen die seitlichen, mehrere hundert Meter breiten, bis zu den Hochwasserdämmen reichenden, bei Hochwasser überschwemmten Abflußgebiete und damit die entsprechenden Rückhalteräume. Auch der vor der Stauregelung innerhalb des Strombettes vorhandene Retentionsraum zwischen Niedrigwasser und Hochwasser entfällt größtenteils, da das Stauziel an der Sperrstelle über dem HHW liegt. Der Fortfall der Hochwasserrückhalteräume bei der Stauregelung führt zu einem schnelleren Hochwasserabfluß und zu einer Erhöhung der Hochwasserspitzen und somit der Hochwassergefahr talwärts der Staustufe.
- Die Geschiebezugabe verändert die Stromlandschaft und ihren Erholungswert nicht oder nur durch einen etwaigen Baggersee. Sie beeinträchtigt nicht die Entwicklung der Gemeinden der betroffenen Rheinstrecke. Diese Beeinträchtigung bewirkt eine Staustufe vor allem durch ihre hohen Seitendämme.
- Die Geschiebezugabe beeinflußt die Ökologie am Oberrhein nicht oder nur gering, nämlich durch den etwaigen Baggersee. Bei der Errichtung von Staustufen wird durch die Seitendämme der Austausch von Oberflächenwasser vom Fluß zur Talaue unterbunden. Dies kann eine weitreichende Veränderung des Biotops und damit der Ökologie der letzteren bewirken. Die seltene Flora und Fauna der schutzwürdigen Au Landschaft /18/ verliert dadurch ihren Lebensraum.
- Durch die Geschiebezugabe wird nicht, wie durch eine Staustufe, eine praktisch irreparable Veränderung geschaffen, sondern die Geschiebezugabe kann ohne Schaden jederzeit durch einen anderen Ausbau abgelöst werden. Der Einsatz der Geschiebezugabe in der Zwischenzeit ist dann schon allein durch die Einsparung der Kapitalzinsen für den zurückgestellten Staustufenbau gerechtfertigt.
- Die Geschiebezugabe ist mit einem geringeren Risiko des Eintretens von Katastrophen verbunden.

Eventuelle Nachteile der Geschiebezugabe im Vergleich zu Staustufen können darin erblickt werden, daß

- nur die Stauregelung ganzjährig die volle Schifffahrtstiefen gewährleistet. Da jedoch die Mindestfahrrentiefen unterhalb der kanalisierten Strecke nicht mehr betragen als 2,10 m, bezogen auf den Gleichwertigen Wasserstand GlW, ist dieser Vorteil nicht durchschlagend.
- Die Geschiebezugabe bietet keine Voraussetzungen für eine Wasserkraftgewinnung.
- Mit der Geschiebezugabe lagen, als sie konzipiert wurde, keine Erfahrungen vor. Um sie erstmals zu erproben, wurden daher zunächst großangelegte Naturversuche sowie begleitende Untersuchungen für erforderlich gehalten.

3 Der im Unterwasser der Staustufe Gamsheim durchgeführte erste Naturversuch

Im Jahre 1974 erteilte der Bundesminister für Verkehr den Auftrag zur Vorbereitung eines Naturversuchs mit Geschiebezugabe unterhalb der Staustufe Gamsheim, um Aufschlüsse über die Realisierbarkeit dieser Lösung zu gewinnen, insbesondere Antworten auf die vier folgenden Hauptfragen.

1. Kann der NW-Spiegel im Unterwasser der letzten Staustufe nach Einsetzen der Erosion wieder auf die Ausgangshöhe angehoben werden?
2. Mit welchen technischen Methoden kann das Kiesmaterial genau und wirtschaftlich eingebaut werden?
3. Wie wirkt sich die Geschiebezugabe auf die Sicherheit und Leichtigkeit des Verkehrs aus, und zwar unmittelbar an der Einbaustelle und weiter unterstrom?

4. Treten in der unterstrom anschließenden Strecke Veränderungen gegenüber dem natürlichen Geschiebetrieb auf?

Mit dem Großversuch, der sich über fünf Monate erstreckte, wurde im Juni 75 begonnen. Er war eine Aufgabe der WSD Freiburg und ihres WSA Offenburg, wobei die BAW bei der Vorbereitung und Durchführung mitwirkte und die Versuchsergebnisse theoretisch verarbeitete. Sie führte ferner Spezialmessungen durch sowie alle in diesem Rahmen anfallenden EDV-Arbeiten, besonders das Plotten von gepeilten Querprofilen und das Berechnen von Sohlenmassenbilanzen.

Ähnlich wie seinerzeit unterhalb der Staustufe Straßburg /10/, wurden auch unterhalb der im März 1974 in Betrieb gegangenen Staustufe Gamsheim wiederholt Sohlenpeilungen ausgeführt, um die Auswirkungen der Sohlenerosion zu erfassen. Das dabei eingesetzte Meßschiff "Walter Türk" der WSD Südwest lieferte die Ergebnisse der Echolotpeilungen auf Lochstreifen als Horizontal- und Vertikalkoordinaten von Querprofilen. Mit Hilfe der elektronischen Datenverarbeitung wurden die Peilerggebnisse in der BAW weiterverarbeitet. Die aus den ersten sieben dieser im Durchschnitt etwa ein Vierteljahr auseinander liegenden Peilungen errechneten mittleren Sohleneintiefungen und -aufhöhungen sind im unteren Teil des Bildes 8 eingetragen. Sie wurden berechnet als Quotient aus der Veränderung der Querschnittsfläche geteilt durch den jeweiligen Streichlinienabstand.

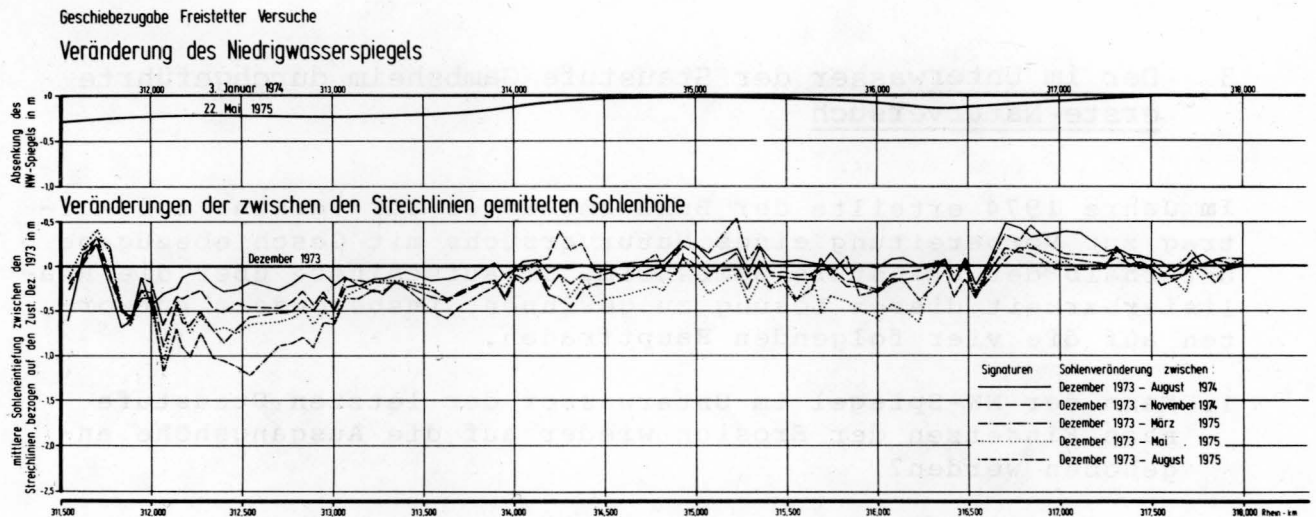


Bild 8 Veränderungen des Niedrigwasserspiegels und der zwischen den Streichlinien gemittelten Sohlenhöhe im Unterwasser der Staustufe Gamsheim bis August 1975

Die Wiedereinmündung des Kraftwerks- und Schleusenunterkanals in das Rheinbett liegt bei Rhein-km 311,700 (Kanalachse). Es hat sich von hier aus bis August 1975 eine etwa 3 bis 4 km weit reichende, annähernd keilförmige Sohlenvertiefung ausgebildet, wie sie in ähnlicher Form auch unterhalb der Staustufen Straßburg und Gerstheim beobachtet worden war. Die größte Sohlenveränderung dieses Zeitraumes trat etwa bei Rhein-km 312,5 auf, wo sich die Stromsohle im Mittel rd. 1,20 m eingetieft hat. Die erodierten Massen hängen von der Wasserführung des entsprechenden Zeitraumes ab. Die Monatsmittel der Wasserstände am Richtpegel Maxau sind im oberen Teil des Bildes 9 aufgetragen, darunter mit gleichen Zeitabszissen die Ergebnisse der berechneten Massenbilanz, und zwar getrennt für eine an die Wiedereinmündung des Unterkanals anschließende 3,5 km lange Stromsohle, ferner für die ersten 6,5 km und für die gesamte, rd. 20 km lange Beobachtungsstrecke. Bis August 1975 sind aus dem Erosionskeil zwischen Rhein-km 311,5 und 315,0 rd. 180 000 m³ erodiert worden.

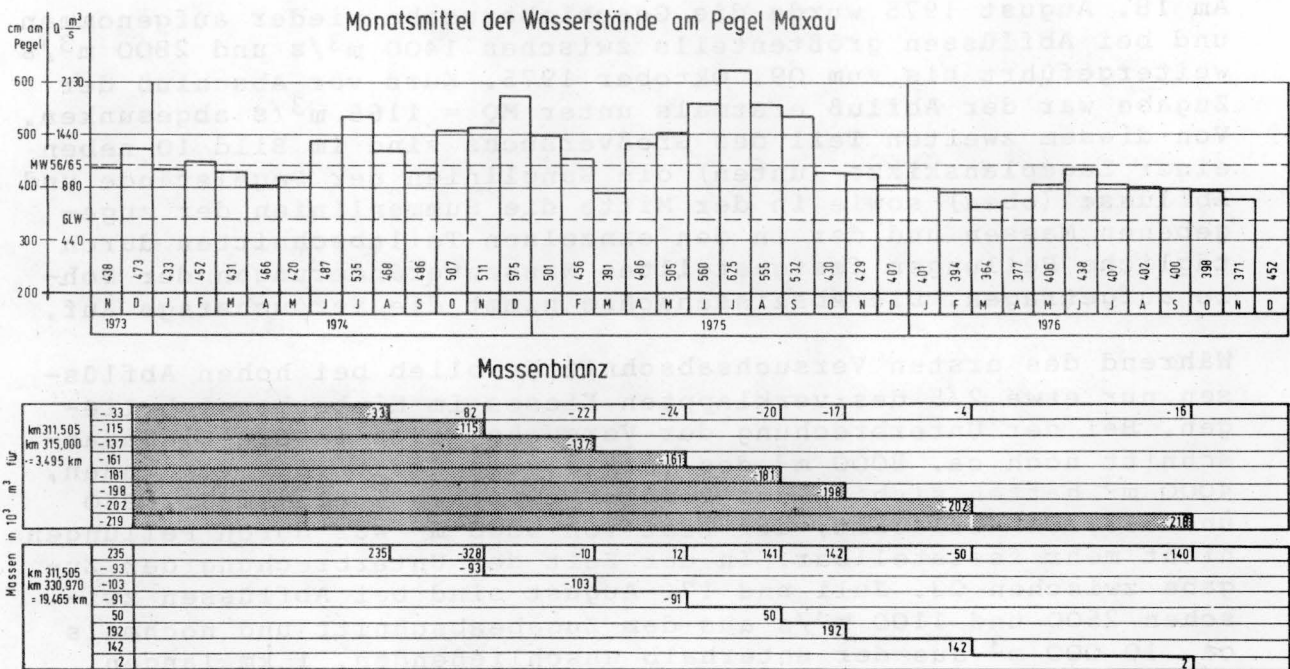


Bild 9 Monatsmittel der Wasserstände am Pegel Maxau und Sohlenmassenbilanz im Unterwasser der Staustufe Gamsheim bis September 1976

Über den bei Freistett im Unterwasser der Staustufe Gamsheim im Jahre 1975 durchgeführten Naturversuch liegt eine Veröffentlichung vor /13/, auf die hier verwiesen wird. Als Ergebnis von Vorversuchen zur Ermittlung des anzuwendenden Einbauverfahrens, entschloß man sich, den Kies aus fahrenden Klappschuten zu verklappen, wobei es gelingt, auf der Stromsohle flächenhafte Aufhöhungen von, je nach Fahrgeschwindigkeit, jeweils 40 bis 220 m Länge, 7 bis 15 m Breite und 0,1 bis 0,6 m Höhe herzustellen.

Als Einbaustelle im Rhein wurde die Strecke zwischen Rhein-km 312,650 und 312,950 gewählt, wobei die für den Einbau erforderliche Sohlenvertiefung sowie die Verkehrssicherung und örtliche Besonderheiten zu berücksichtigen waren.

Nach den notwendigen Vorarbeiten, wie z.B. Peilungen des Ausgangszustandes, konnte am 06. Juni 1975 mit der Geschiebezugabe begonnen und bis zum 03. Juli 1975 eine Kiesmenge von 21 000 m³ verklappt werden bei Abflüssen von zunächst 1300 bis 2400 m³/s. Als hierauf der Abfluß auf 2700 m³/s stieg, wurde die Kieszugabe eingestellt, da das Risiko einer Ablagerung des zugegebenen Materials in der Fahrrinne unterhalb des Einbauabschnittes nicht beurteilt werden konnte. Es traten jedoch weder bei diesem Hochwasser noch später Schifffahrtsbeeinträchtigungen auf.

Am 18. August 1975 wurde die Geschiebezugabe wieder aufgenommen und bei Abflüssen größtenteils zwischen 1400 m³/s und 2800 m³/s weitergeführt bis zum 09. Oktober 1975. Kurz vor Abschluß der Zugabe war der Abfluß erstmals unter $MQ = 1165 \text{ m}^3/\text{s}$ abgesunken. Von diesem zweiten Teil des Großversuchs sind im Bild 10 neben einer Lageplanskizze (unten) die Ganglinien der Pegelstände und Abflüsse (oben) sowie in der Mitte die Summenlinien der zugegebenen Massen und der in den einzelnen Teilabschnitten durch tägliche Peilungen festgestellten Massenveränderungen der Sohle aufgetragen. Die Abszissenachse nimmt die Versuchstage auf.

Während des ersten Versuchsabschnittes blieb bei hohen Abflüssen nur etwa 2/5 des verklappten Kieses im Einbaubereich liegen. Bei der Unterbrechung der Versuche waren in dem Einbauabschnitt noch ca. 8000 m³ des verklappten Geschiebes vorhanden, 4000 m³ hatten sich in den Bereich zwischen Rhein-km 312,950 und 313,300 verlagert, der Rest von 9000 m³ war durch Peilungen nicht mehr feststellbar. In der Zeit der Unterbrechung der Zugabe zwischen 03. Juli und 17. August sind bei Abflüssen zwischen 2500 und 1100 m³/s aus dem Zugabeabschnitt und nochmals ca. 10 000 m³ aus der unterhalb anschließenden, 1 km langen Strecke abtransportiert worden. Die weitere Entwicklung bis zum Ende des Jahres 1975 kann dem Bild 10 entnommen werden.

In Bild 11 ist in einem Querprofil aus der Einbaustrecke die Rheinsohle für die Zeit vor der Errichtung des Staus der Staustufe Gamsheim (für den 14.12.1974), für einen Zeitpunkt, zu dem sich die Erosion voll ausgewirkt hatte (19.08.1975) und für eine Peilung nach Abschluß des Großversuches (29.10.1975) dargestellt.

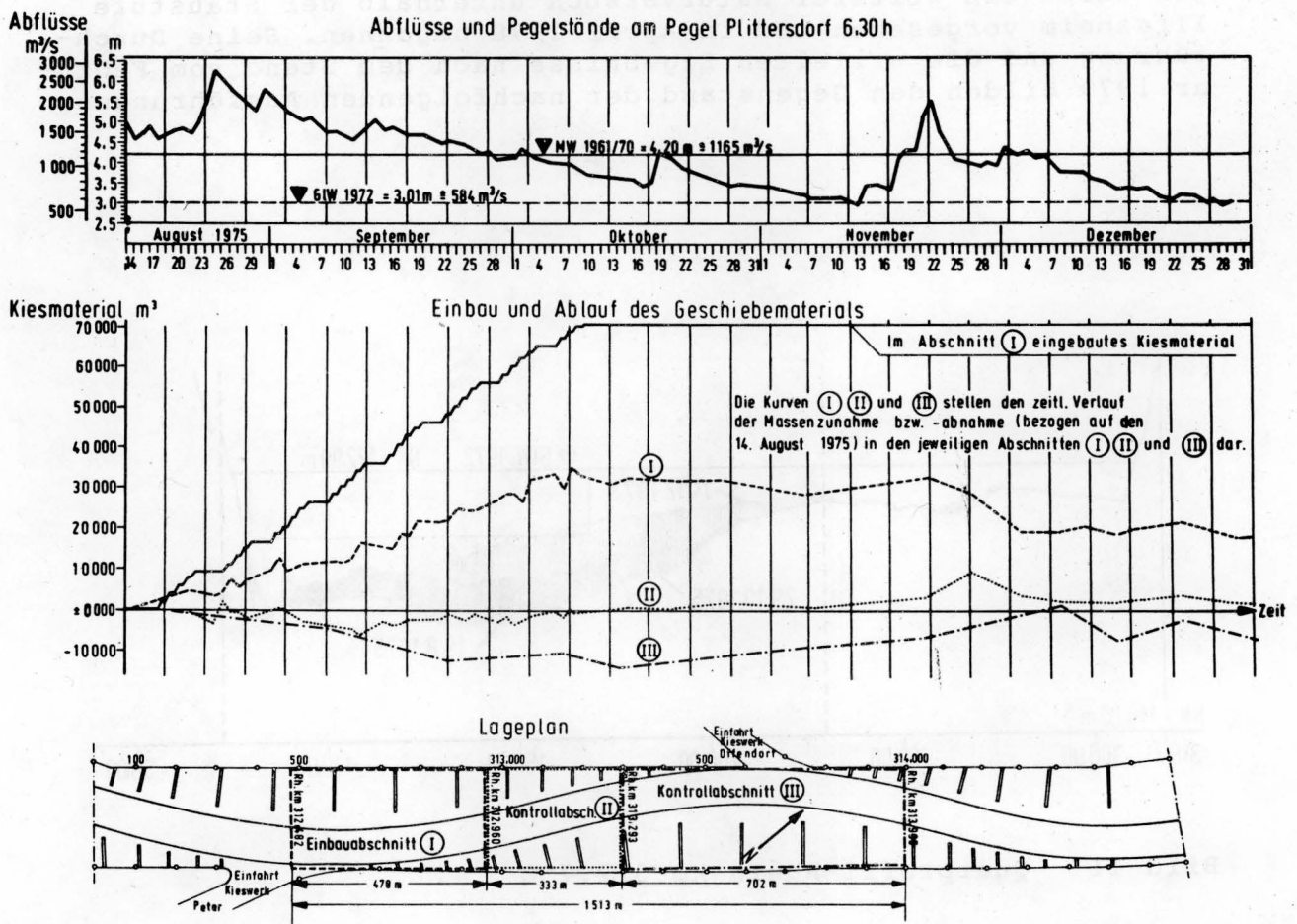


Bild 10 Freistetter Versuch. Ganglinie der Abflüsse und Pegelstände (oben), Massensummenbilanzen (Mitte) und Lageskizze (unten), aufgestellt vom WSA Of-fenburg

Mit der angewendeten Methode des Verklappens des Kieses aus fahrenden Klappschuten konnte das Material hinreichend genau eingebaut werden, ohne die Sicherheit und Leichtigkeit des Schiffsverkehrs nennenswert zu beeinträchtigen. Das Verhalten des Zugabematerials bei größeren Abflüssen und die Übertragung der Versuchsergebnisse auf andere örtliche Verhältnisse konnten dabei nicht erprobt und geklärt werden. Auch Erkenntnisse über die Anhebung des Niedrigwassers am unteren Schleusendempel in Gamsheim konnten wegen des fortgeschrittenen Baus der Staustufe Iffezheim nicht gewonnen werden.

Durch den Freistetter Naturversuch konnten somit nicht alle Fragen, die im Zusammenhang mit einer Geschiebezugabe stehen, beantwortet werden. Der Versuchsverlauf und seine Ergebnisse gaben jedoch keinen Anlaß, die praktische Durchführbarkeit der Geschiebezugabe für ähnliche örtliche Verhältnisse infrage

zu stellen, insbesondere, wenn vergleichbare Abflüsse vorherrschen. Zur endgültigen Beantwortung der noch ungeklärten Fragen wurde ein weiterer Naturversuch unterhalb der Staustufe Iffezheim vorgesehen und im April 1978 begonnen. Seine Durchführung und die erzielten Ergebnisse nach dem Stand vom Februar 1979 bilden den Gegenstand der nachfolgenden Ausführungen.

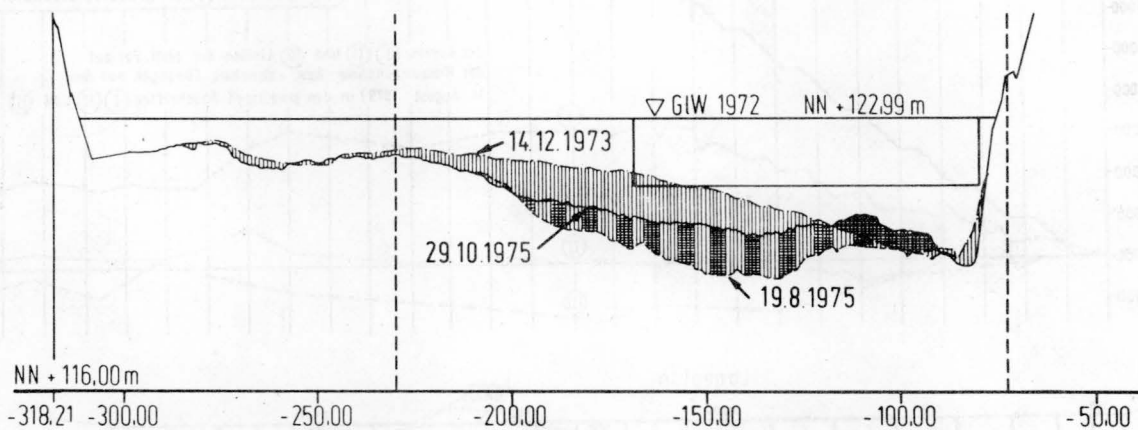


Bild 11 Querprofil Rhein-km 312,700

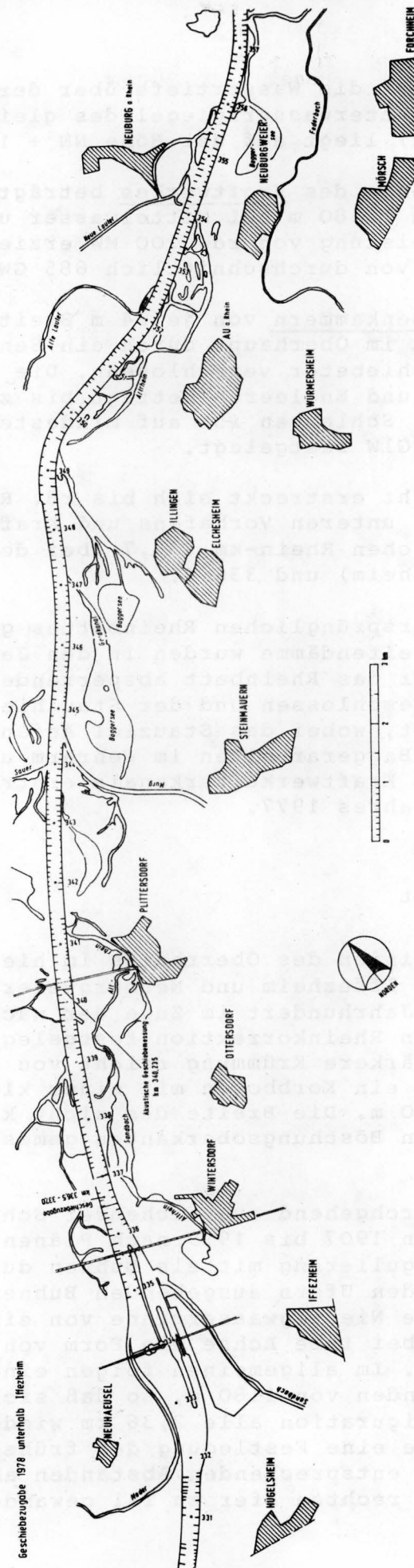
4 Der Naturversuch unterhalb der Staustufe Iffezheim

4.1 Beschreibung der Gegebenheiten

4.1.1 Die Staustufe Iffezheim

Die Staustufe Iffezheim, talwärts welcher der zweite Naturversuch mit Geschiebezugabe durchgeführt wird, ist derzeit die in Strömungsrichtung gesehen letzte der Staustufen des Oberrheins. Ihre Wehrachse liegt bei Rhein-km 334,000 (Bild 12). Die Staustufe besteht im wesentlichen aus einem das ursprüngliche Strombett transversierenden Querdamm, dem daran auf der linken (westlichen) Rheinseite anschließenden Wehr, einem Kraftwerk und zwei Schleusen auf der rechten (östlichen) Seite sowie den Seitendämmen längs der Stauhaltung mit landseitigen Sickergräben.

Das Wehr weist 6 Öffnungen von je 20 m lichter Weite auf, die durch Drucksegmente mit Aufsatzklappen verschlossen werden. Es vermag $7500 \text{ m}^3/\text{s}$ abzuführen. Das Stauziel liegt auf der Höhe



Geschiebezugabe 1978 unterhalb Iffezheim

Bild 12 Lageskizze des Rheins zwischen Iffezheim und Neuburgweier

NN + 123,60 m, wobei die Wassertiefe über der Wehrschwelle rd. 13 m beträgt. Der Unterwasserspiegel des gleichwertigen Wasserstandes (GlW 72) liegt auf der Höhe NN + 111,10 m.

Die Ausbauwassermenge des Kraftwerkes beträgt $1100 \text{ m}^3/\text{s}$ bei einer Fallhöhe von 10,80 m bei Mittelwasser und freiem Abfluß. Bei einer Ausbauleistung von rd. 100 MW erzielt es eine Jahresnettoerzeugung von durchschnittlich 685 GWh.

Die beiden Schleusenkammern von je 24 m Breite und 270 m nutzbarer Länge werden im Oberhaupt durch ein Senktor, im Unterhaupt durch ein Schiebeter verschlossen. Die Betriebswassermenge beim Füllen und Entleeren beträgt bis zu $165 \text{ m}^3/\text{s}$. Die Wassertiefe in den Schleusen ist auf mindestens 3,50 m bei freiem Abfluß bei GlW festgelegt.

Die untere Wehrbucht erstreckt sich bis rd. Rhein-km 335,0, die Einmündung des unteren Vorhafens und Kraftwerkskanals in das Rheinbett zwischen Rhein-km 335,7 (bei der Rheinbrücke Wintersdorf-Roppenheim) und 336,2.

Die seitlich des ursprünglichen Rheinbettes gelegenen Hauptbauwerke und die Seitendämme wurden in den Jahren 1974 bis 1977 errichtet. Der das Rheinbett absperrende Querdamm wurde am 26. März 1977 geschlossen und der Stau hierauf in mehreren Etappen hergestellt, wobei das Stauziel Anfang September 1977 erreicht war. Die Baggararbeiten im Wehrarm und an der Mündung des Schleusen- und Kraftwerkunterkanals erstreckten sich noch bis zum Ende des Jahres 1977.

4.1.2 Das Strombett

Die heutigen Uferlinien des Oberrheins im hier betrachteten Abschnitt zwischen Iffezheim und Neuburgweier (vgl. Bild 12) wurden im vorigen Jahrhundert im Zuge der nach ihrem Initiator TULLA benannten Rheinkorrektion festgelegt. Sie verlaufen gestreckt. Eine stärkere Krümmung reicht von Rhein-km 348,55 bis 350,0. Sie ist ein Korbbogen mit einem kleinsten Krümmungsradius von $R = 1410 \text{ m}$. Die Breite des nicht kanalisierten Rheinbetts, zwischen den Böschungsoberkanten gemessen, beträgt rd. 250 m.

Zur Herstellung durchgehend ausreichender Schifffahrtstiefen wurde in den Jahren 1907 bis 1919 nach Plänen von HONSELL eine Niedrigwasserregulierung mittels Buhnen durchgeführt. Die Längen der von beiden Ufern ausgehenden Buhnen wechseln in der Weise, daß sich die Niedrigwasserrinne von einem Ufer zum anderen schlängelt, wobei ihre Achse die Form von Lemniskatenabschnitten aufweist. Im allgemeinen folgen einander die Talwegsübergänge in Abständen von 1180 m, so daß sich die grundsätzliche Grundrißkonfiguration alle 2,36 km wiederholt. Durch diese Ausbildung wurde eine Festlegung der früheren Kiesbänke erreicht, die in den entsprechenden Abständen abwechselnd am linken und hierauf am rechten Ufer zu Tal gewandert waren. Eine

Variation der genannten Bühnenanordnung wird in dem genannten Rechtsbogen des Mittelwasserbettes zwischen Rhein-km 348,55 und 350,0 angetroffen, wo die Niedrigwasserrinne durchgehend am einbuchtenden linken Ufer entlang führt.

Der Abstand zwischen den Streichlinien, also den beiden Verbindungslinien der Bühnenköpfe, schwankt etwa zwischen 169 und 177 m. Die angestrebte Breite der Fahrrinne beträgt 88 m oberhalb der Murgmündung (Rhein-km 344,5) und 92 m unterhalb davon.

Die Bühnenwurzeln an den Korrektionsufer liegen durchweg 0,5 m über dem "normalen Niedrigwasserspiegel nNW", der dem Pegelstand + 2,00 m am Straßburger und + 3,00 m am Maxauer Pegel entsprach. Die Bühnenrücken sind zwischen dem Uferbau und dem Niedrigwasserbett im Scheitel der Konvexen 1:70 und im Übergangspunkt 1:100 geneigt mit allmählichen Übergängen. Für die Kopfböschungen der Bühnen wurde im Scheitel der Konvexen das Steigungsverhältnis 1:20, im Übergang beiderseits 1:10 und im Scheitel der Konkaven 1:2 gewählt mit entsprechend interpolierter, allmählicher Überleitung der Neigungen in den Zwischenprofilen /19/.

Die Böschungsoberkanten des Mittelwasserbettes liegen im allgemeinen ca. 2,5 bis 3,0 m höher als der Regulierungswasserspiegel, so daß das Hochwasser auszufern beginnt, wenn Abflüsse etwa 2100 m³/s überschreiten. Ein mit der Größe des Abflusses zunehmender Anteil strömt dann über die beiderseitigen Vorländer ab, die sich bis zu den Hochwasserdämmen erstrecken. Die letzteren weisen unterschiedliche Abstände vom Strombett auf, zwischen Iffezheim und Plittersdorf etwa rd. 150 m als Minimum (am linken Ufer) und rd. 900 m als Maximum (am rechten Ufer).

4.1.3 Der Abfluß

Richtpegel für die hier betrachtete Oberrheinstrecke ist der Pegel Maxau bei Rhein-km 362,327 (Einzugsgebiet 50 343 km², Pegelnullpunkt = NN + 97,79 m). Für diesen Pegel können dem Deutschen Gewässerkundlichen Jahrbuch /16/ für die Zeit bis einschließlich Oktober 1975 folgende kennzeichnende Werte entnommen werden:

Pegelstände am Pegel Maxau

NNW	216 cm	am 16.02.1858
MNW	345 cm	(1966/75)
MW	472 cm	(1966/75)
MHW	699 cm	(1966/75)
HHW	838 cm	am 17.01.1955 (HHW seit der Durchführung der Rheinkorrektion)

Abflüsse am Pegel Maxau

NNQ	335 m ³ /s	am 26.11.1907
MNQ	562 m ³ /s	(1931/75)
MQ	1240 m ³ /s	(1931/75)
MHQ	2880 m ³ /s	(1931/75)
HHQ	4550 m ³ /s	am 31.12.1882

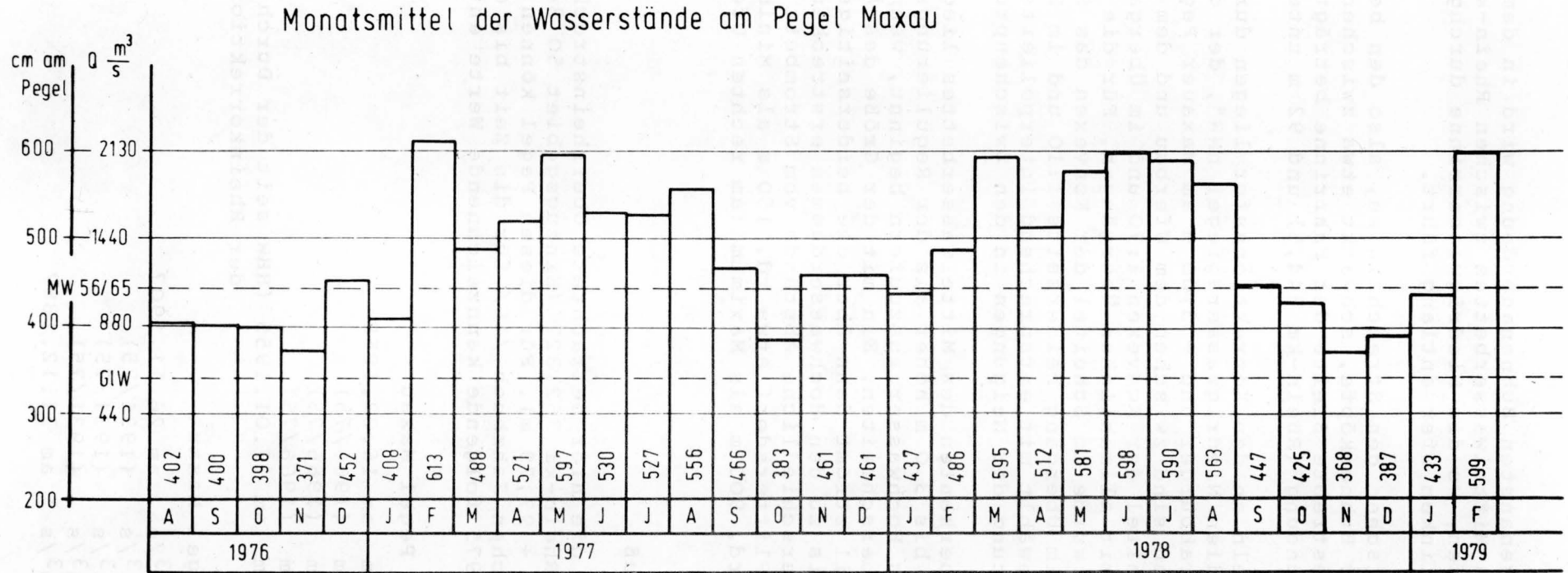


Bild 13 Monatssmittel der Wasserstände am Pegel Maxau für die Zeit vom August 1976 bis Februar 1979

Dem Gleichwertigen Wasserstand GlW 72 entspricht am Pegel Maxau ein Pegelstand von 340 cm und ein Abfluß von 585 m³/s.

Weitere Rheinpegel befinden sich bei Plittersdorf, Rhein-km 340,215 (Einzugsgebiet 48 354 km², Pegelnullpunkt = NN + 106,67) und bei Neuburgweier, Rhein-km 354,112 (Einzugsgebiet 50 226 km², Pegelnullpunkt = NN + 100,69).

Bild 13 enthält die Monatsmittel der Wasserstände am Pegel Maxau für die Zeit vom August 1976 bis Februar 1979.

4.1.4 Das Sohlenkorn

Der Oberrhein fließt auf in großer Mächtigkeit anstehenden eiszeitlichen Geröllen und Sanden. Auch das Strombett selbst besteht aus Kies und Sand. Aufschlüsse über seine Kornzusammensetzung erbrachten in den Jahren 1967 bis 1969 durchgeführte in /7/ beschriebene Aufschlußbohrungen. Ihren in Form von Geschiebemischungsbändern der Deckschicht und der Unterschicht zwischen 0,20 m und 2,00 m Tiefe dargestellten Ergebnissen kann für die Geschiebezugabestelle bei Rhein-km 337,0 die im nachstehenden Bild 14 wiedergegebene mittlere Kornverteilung der Unterschicht entnommen werden :

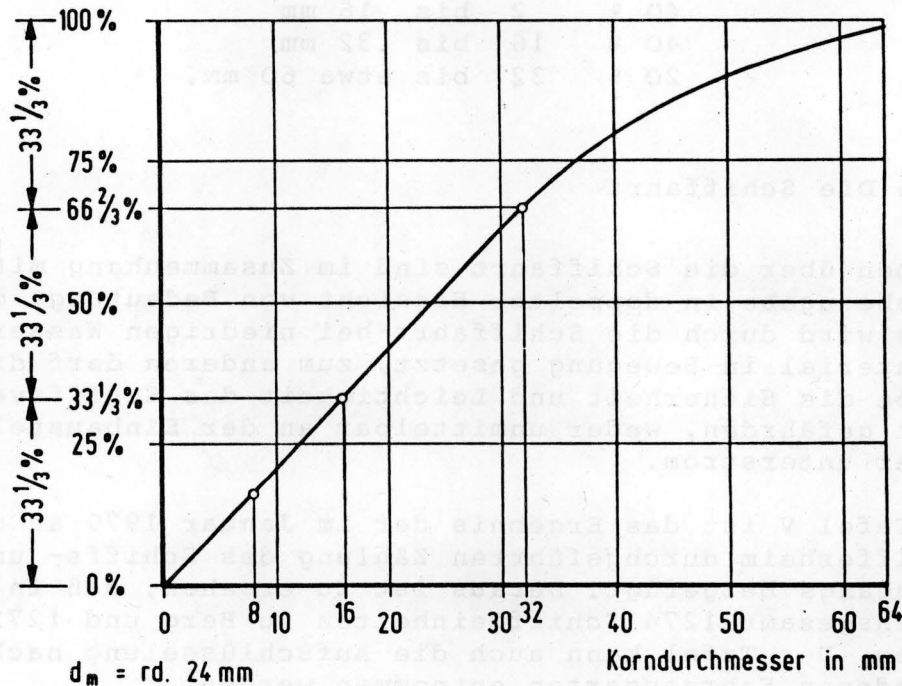


Bild 14 Kornverteilung bei Rhein-km 337 in der Schicht zwischen 20 cm und 200 cm Tiefe (Abszisse und Ordinate linear geteilt wie im Kiesbaggergeschäft üblich)

Die Geschiebezugabe soll die Bilanz des Geschiebetriebes wieder ausgleichen und demnach laufend das abtransportierte Sohlenmaterial in der gleichen Beschaffenheit ersetzen. Das Gros dieses Materials stammt aus dem von der Erosion betroffenen Teil der Stromsohle, also im wesentlichen aus ihrer Unterschicht zwischen den Streichlinien. Aus diesem Grunde wurde für die Geschiebezugabe in der Hauptsache die in Bild 14 gekennzeichnete Kornmischung gewählt. Sie besteht zu gleichen Teilen (zu je 33,33 %) aus den Kornfraktionen

2 bis 16 mm,
16 bis 32 mm und
32 bis etwa 60 mm.

Das Sandkorn unter 2 mm Korndurchmesser wurde für die Zugabe aus praktischen Gründen möglichst vermieden, da es beim Gamsheimer Versuch zu Schwierigkeiten beim Verklappen geführt hatte.

Im Hinblick auf den Umstand, daß in Randbereichen des Flußbettes feinkörnigere Mischungen anstehen, bestanden keine Bedenken dagegen, in geringerem Umfang auch ein insgesamt etwas feinkörnigeres Kiesgemisch zuzugeben. Es weist folgende Anteile auf:

40 % 2 bis 16 mm
40 % 16 bis 32 mm
20 % 32 bis etwa 60 mm.

4.1.5 Die Schifffahrt

Angaben über die Schifffahrt sind im Zusammenhang mit der Geschiebezugabe in doppelter Hinsicht von Bedeutung, denn einerseits wird durch die Schifffahrt bei niedrigen Wasserständen Sohlenmaterial in Bewegung gesetzt, zum anderen darf die Geschiebezugabe die Sicherheit und Leichtigkeit des Schiffsverkehrs nicht gefährden, weder unmittelbar an der Einbaustelle noch weiter unterstrom.

Als Tafel V ist das Ergebnis der im Januar 1979 an den Schleusen Iffezheim durchgeführten Zählung des Schiffs- und Güterdurchgangs beigefügt. Daraus ist zu ersehen, daß in diesem Monat insgesamt 1274 Schiffseinheiten zu Berg und 1272 zu Tal führen. Der Tafel kann auch die Aufschlüsselung nach den verschiedenen Fahrzeugarten entnommen werden.

Tafel V Schiffs- und Güterdurchgang bei Iffezheim im Januar 1979

Fahrzeugart		Durchgang zu Berg				Durchgang zu Tal			
		Anzahl	PS	Tragf.in T	Ladng.in T	Anzahl	PS	Tragf.in T	Ladng.in T
1 Güter-Motorschiff	leer	288	183421	337666	0	150	94325	150283	0
	beladen	427	263584	441635	268548	588	370320	635495	455160
11 Tank-Motorschiff	leer	35	26735	43946	0	219	199118	320224	0
	beladen	246	220554	360672	228557	57	45240	74229	50703
2 Güter-Küstenmotorsch.	leer	0	0	0	0	0	0	0	0
	beladen	0	0	0	0	0	0	0	0
3 Güter-Schubmotorschiff	leer	0	0	0	0	11	14180	15923	0
	beladen	14	16725	21701	11954	6	7990	10759	4202
31 Tank-Schubmotorschiff	leer	0	0	0	0	34	36580	53494	0
	beladen	37	43552	59634	48813	1	1600	1501	939
4 Güterschleppkahn	leer	0	0	0	0	0	0	0	0
	beladen	1	0	2695	1373	0	0	0	0
41 Tankschleppkahn	leer	0	0	0	0	1	0	1780	0
	beladen	0	0	0	0	1	0	2220	1425
5 Güter-Schubleichter	leer	1	0	702	0	46	0	77822	0
	beladen	83	0	152624	68474	29	0	63404	29595
51 Tank-Schubleichter	leer	0	0	0	0	61	0	127127	0
	beladen	72	0	145817	74970	1	0	1970	1026
6 Lashleichter	leer	0	0	0	0	0	0	0	0
	beladen	0	0	0	0	0	0	0	0
7 Schubboot		37	86900	0	0	35	85700	0	0
71 Schlepper		11	3800	0	0	7	2250	0	0
8 Fahrgastschiff	leer	1	250	0	0	1	250	0	0
	beladen	0	0	0	0	0	0	0	0
81 Fahrgast-Kabinenschiff	leer	0	0	0	0	0	0	0	0
	beladen	0	0	0	0	0	0	0	0
9 Sonstiges Fahrzeug	leer	21	4714	0	0	24	4320	0	0
	beladen	0	0	0	0	0	0	0	0
Insgesamt		1274	850235	1567092	702689	1272	861873	1536231	543050

4.1.6 Die Veränderungen der Sohle bis zum Beginn der Geschiebezugabe

Die in der BAW ausgeführten EDV-Arbeiten zur weiteren Verwertung der in der Natur gewonnenen Peilerggebnisse erstreckten sich u.a. auf das Plotten von Querprofilen, von Lageplänen mit auf GlW 72 bezogenen Tiefenlinien, Lagepläne mit auf NN bezogenen Höhenlinien der Sohle und auf das programmgesteuerte Berechnen von Sohlenmassenbilanzen.

Aus den Ergebnissen der letzteren kann man das Fortschreiten der Sohlenerosion erkennen. Für die Zeit bis Ende des Jahres 1977 enthält die folgende Tabelle eine diesbezügliche Darstellung.

Tafel VI Veränderungen der Massen in Tausend m³, bezogen auf den Zustand vom August 1976

Rhein-km	Oktober 1977			Januar 1978		
	je 500 m	insgesamt einschl. Baggerung	Erosion insges.	je 500 m	insgesamt einschl. Baggerung	Erosion insges.
1	2	3	4	5	6	7
336,0	- 42,4			- 50,1		
336,5	- 33,4	- 42,4	-	- 37,2	- 50,1	-
337,0	- 19,6	- 75,8	- 33,4	- 27,2	- 87,3	- 37,2
337,5	- 8,4	- 95,4	- 53,0	- 16,7	- 114,5	- 64,4
338,0	- 0,8	- 103,8	- 61,4	- 5,1	- 131,2	- 81,1
338,5	+ 6,8	- 104,6	- 62,2	- 9,3	- 136,3	- 86,2
339,0	- 2,4	- 97,8	- 55,4	- 17,3	- 145,6	- 95,1
339,5	+ 5,4	- 100,2	- 57,8	- 8,0	- 162,9	- 112,8
340,0	- 8,7	- 94,8	- 52,4	- 6,6	- 170,9	- 120,8
340,5		- 103,5	- 61,1		- 177,5	- 126,4

Die Berechnung beginnt bei Rhein-km 336,0. In der Strecke von hier bis Rhein-km 336,5 trat kaum eine natürliche Erosion auf; hingegen wurden hier sehr umfangreiche Sohlenvertiefungen durch das Ausbaggern der Schleusenzufahrten erzeugt. Diese Baggerungen wurden erst zu Weihnachten 1977 beendet.

Während die Spalten 3 und 6 der Tabelle die Gesamtveränderung zwischen dem Profil Rhein-km 336,0 und dem jeweiligen Rhein-km enthalten, sind in den Spalten 4 und 7 die Baggermassen davon abgezogen. Im Oktober 1977 nahm die fortlaufende Massensumme der Erosion (Spalte 4) bis Rhein-km 338,5 zu und blieb anschließend nach unterstrom annähernd konstant; die Sohle veränderte sich hier nicht mehr wesentlich.

Die Bilanz für den Januar 1978 zeigt hingegen auch noch unterstrom von Rhein-km 338,5 Sohlenvertiefungen. Sie sind jedoch nicht auf die natürliche Erosion zurückzuführen, sondern auf Bühnenverlängerungen auf der rechten Rheinseite zwischen Rhein-km 338,435 und 339,05 i.d. Zeit vom 20.10. bis 26.10.1977 und auf die Baggerung von 7200 m³ zwischen Rhein-km 338,9 und 339,2.

Für einen Vergleich hinsichtlich des Fortschreitens der natürlichen Erosion eignet sich somit nur die Stromsohle bis Rhein-km 338,5. Hier läuft der Erosionskeil aus, aus dem durch die Strömung bis Oktober 1977 rd. 62 000 m³ und bis Januar 1978 rd. 86 000 m³ abtransportiert wurden. Angaben dieser Art können nur mit einer gewissen Schwankungsbreite von vielleicht ± 10 bis 15 % gemacht werden.

Da somit im Januar 1978 einer durch die Rheinströmung erodierten Masse von 86 000 m³ eine gebaggerte Masse von 57 000 m³ gegenübersteht, ist es auch nicht möglich, die auf die natürliche Erosion zurückzuführende Absenkung des Niedrigwasserspiegels von der durch den Ausbau an sich bewirkten Veränderung des Wasserspiegels zuverlässig zu trennen.

Die Sohlen- und damit auch die Wasserspiegelveränderungen unterhalb der Staustufe Iffezheim resultierten demnach bis Ende des Jahres 1977 aus den gleichzeitigen und voneinander nicht eindeutig abgrenzbaren Wirkungen der Erosion infolge der Strömung, der durch Baggerungen hervorgerufenen Sohlenveränderungen sowie der durchgeführten Strombaumaßnahmen (Buhnenverlängerungen). Es wurde daher als zweckmäßig erachtet, die weitere Entwicklung auf den Zustand vom Januar 1978 zu beziehen, da von diesem Zeitpunkt ab keine Baggerungen und Baumaßnahmen mehr durchgeführt wurden.

Am 24. April 1978 wurde mit der Geschiebezugabe begonnen. Die zwischen Januar 1978 und diesem Zeitpunkt vor sich gegangene weitere Veränderung der Sohlenmassen geht aus den ersten Spalten der Tafel VII hervor. Die darin gewählte Unterteilung in acht Teilstrecken wurde dabei in Übereinstimmung mit den Grenzen der vom WSA überwachten Kontrollabschnitte gewählt. Die Tabelle enthält auch die Fortführung der Sohlenmassenbilanz über den April 1978 hinaus bis Februar 1979, so daß sie dem Abschnitt 4.3 dieses Berichtes zugeordnet ist.

Bild 15 zeigt die bis April 1978 eingetretenen Veränderungen der mittleren Sohlenhöhen in der Strecke zwischen Rhein-km 336,21 und 339,705, bezogen auf den Zustand vom August 1976. Dargestellt ist der Quotient aus der zwischen den Streichlinien liegenden Differenz der Querschnittsflächen der verglichenen Peilungen und dem jeweiligen Streichlinienabstand. Die Darstellung entspricht der als Bild 8 auch für die Sohlenentwicklungen unterhalb der Staustufe Gamsheim vorgelegten. Bild 15 läßt erkennen, daß rd. ein Jahr nach Schließung des Querdammes der Staustufe Iffezheim und unmittelbar vor Beginn der Geschiebezugabe, sich die Sohle am unteren Ende der Zusammenführung des Wehrrarms mit dem Schiffahrts- und Kraftwerkkanal im Mittel um etwa 50 cm eingetieft hat. Größere örtliche Eintiefungen im oberstromigen Teil sind z.Tl. auch durch Baggerungen verursacht. Der sich anschließende Erosionskeil ist rd. 2,0 km lang. An ihn schließt sich eine kurze Strecke mit geringer Sohlenaufrhöhung an. Die Sohlenveränderungen talwärts davon sind hauptsächlich auf die hier durchgeführten Bagger- und Buhnenbauarbeiten zurückzuführen, die sich bis Ende des Jahres 1977 hingen.

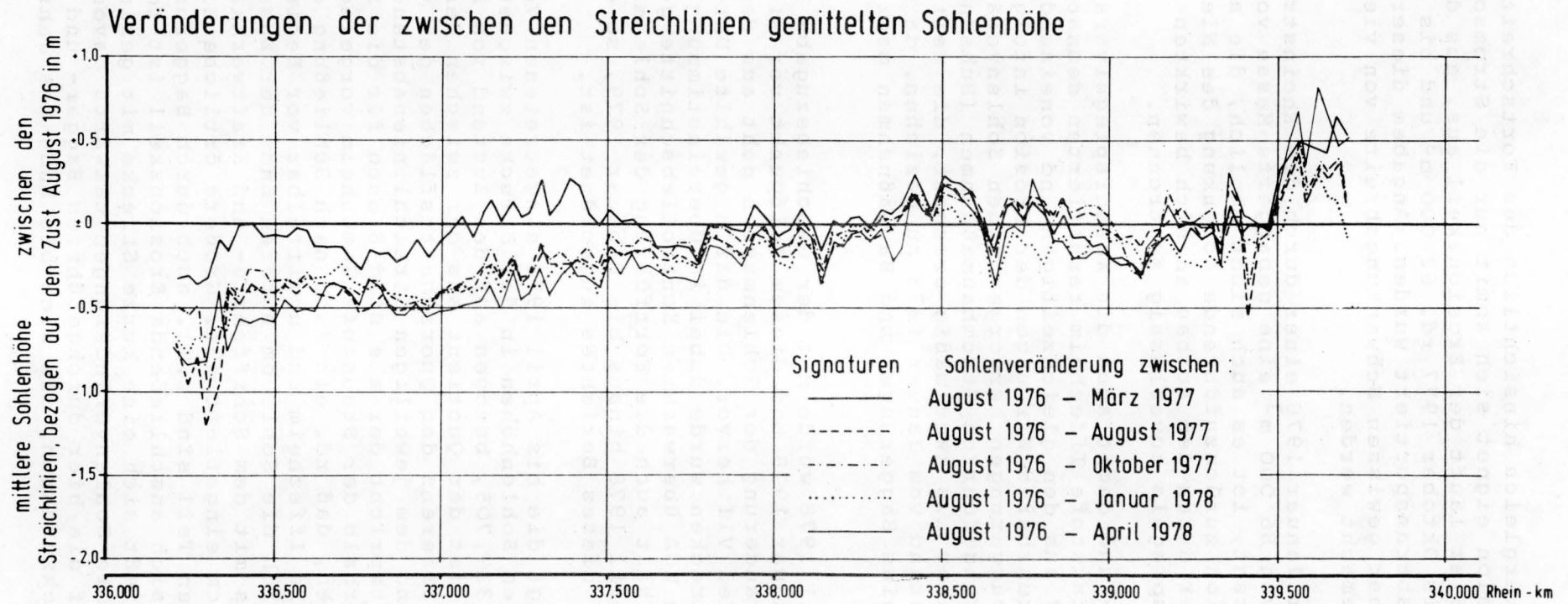


Bild 15 Veränderungen der zwischen den Streichlinien gemittelten Sohlenhöhen von August 1976 bis April 1978

Wie sich der Spiegel des gleichwertigen Wasserstandes mit einem Abfluß von $570 \text{ m}^3/\text{s}$ zwischen Rhein-km 334,000 und 343,00 bis Januar 1978 verändert hat, konnte nicht unmittelbar gemessen werden, da weder im Jahre 1977 noch im ersten Halbjahr 1978 bei Iffezheim ein GlW aufgetreten ist. Aus der Umrechnung aus beobachteten höheren Wasserständen ergibt sich, daß bei Rhein-km 336,5 am unteren Ende der Wiedereinmündung des Kraftwerk- und Schleusenunterkanals, insgesamt bis Januar 1978 eine Absenkung des GlW um ca. 20 cm auftrat.

4.2 Versuchsdurchführung

Mit der auch beim ersten Naturversuch angewandten Methode des Kieseinbaus aus fahrenden Klappschuten (Bild 16) wurden im Unterwasser der Staustufe Iffezheim zwischen Rhein-km 336,2 und 337,0 (zeitweise auch 337,5) im Jahre 1978 in der Zeit von April bis Juni rd. $62\,000 \text{ m}^3$, in der Zeit von August bis September rd. $88\,000 \text{ m}^3$ und im Oktober und bis 09. November weitere rd. 8000 m^3 , insgesamt also $158\,000 \text{ m}^3$ Kies der Stromsohle zugeführt.



Bild 16 Blick in eine Klappschute kurz vor Abschluß des Verklappens

Durch Peilungen von zwei Meßschiffen des WSA Freiburg aus wird das eingebaute Material unverzüglich nach Lage und Höhe überwacht, ferner werden in der anschließenden Strecke bis Rhein-km 339,7 je nach Situation täglich oder in Abständen von wenigen Tagen maßstäbliche Querprofile aufgenommen und in etwa vierteljährigen Abständen in der Strecke zwischen Rhein-km 334,190 und 352,00 insgesamt jeweils 337 Querprofile gewonnen. Die Wasserspiegellagen werden wöchentlich durch Fixierungen an 26 Latten- und 4 Schreibpegeln erfaßt.

4.3 Versuchsergebnisse

Die auf den Zustand vom Januar 1978 bezogenen Veränderungen der Sohlenmassen sind in Tafel VII in Tabellenform zusammengestellt. Zwischen Januar 78 und April 78 hatte sich demnach zwischen Rhein-km 336,2 und 337,9 die Sohle weiter eingetieft, während sie von hier aus bis Rhein-km 339,7 eine Massenzunahme erfahren hat, so daß die Bilanz für den betrachteten Abschnitt annähernd ausgeglichen ist.

Die Peilung vom 29./30. Mai 1978, die unmittelbar nach dem Auftreten des höchsten am Pegel Maxau beobachteten Hochwassers ausgeführt wurde, läßt erkennen, daß, vor allem durch dieses verursacht, trotz der inzwischen seit rd. einem Monat vor sich gegangenen Geschiebezugabe, insgesamt ein weiterer Abtrag stattgefunden hat.

Nach der einmonatigen Unterbrechung der Geschiebezugabe im Juli 1978 bei weiterhin hohen Abflüssen ist am 31. Juli praktisch in allen Teilabschnitten eine Abnahme der Sohlenmassen festzustellen.

Am 05./06. Oktober weist nur der erste, oberstrom der Zugabestelle liegende Teilabschnitt eine Massenverminderung gegenüber dem Januar 1978 auf. Die Massenbilanz der anderen Teilabschnitte ist ausgeglichen oder schließt mit einer Massenzunahme ab, so vor allem in der Zugabestrecke Rhein-km 336,6 bis 337,0 mit + 20 700 m³.

Die Veränderungen der zwischen den Streichlinien gemittelten Sohlenhöhen, bezogen auf den Zustand vom 18./19. Januar 1978, sind im unteren Teil des Bildes 17 einander gegenübergestellt und zwar für die Zeit vom 12./13. Juni 78 bis 05./06. Oktober 78. Bild 17 zeigt im Hinblick auf die Höhenänderungen der Stromsohle im wesentlichen die vorstehend hinsichtlich der Massenveränderungen diskutierte Tendenz, was besonders in Bezug auf die letzte dargestellte Peilung, diejenige vom 05./06. Oktober 1978, von entscheidender Bedeutung ist. Die mittlere Stromsohle zwischen den Streichlinien im Abschnitt Rhein-km 336,4 bis 337,6 liegt etwa 10 bis 40 cm höher als im Januar 1978 und in der übrigen aufgetragenen Strecke, mit Ausnahme ihres Beginns, ist die Höhenlage vom Januar 78 wieder erreicht oder geringfügig überschritten, nachdem sie sich bis August 78 über weite Strecken hinweg um ca. 10 bis 20 cm eingetieft hatte.

Tafel VII Veränderungen der Massen in Tausend m³, bezogen auf den Zustand vom 18./19. Januar 1978

Rhein- km	4./13.4.1978		29./30.5.1978		12./13.6.1978		10./12.7.1978		31.7./1.8.1978		7./8.8.1978		21./22.8.1978		5./6.10.1978		15./31.1.1979		15./22.2.1979	
	je Teil- strecke	ins- gesamt	je Teil- strecke	ins- gesamt	je Teil- strecke	ins- gesamt	je Teil- strecke	ins- gesamt	je Teil- strecke	ins- gesamt	je Teil- strecke	ins- gesamt	je Teil- strecke	ins- gesamt	je Teil- strecke	ins- gesamt	je Teil- strecke	ins- gesamt	je Teil- strecke	ins- gesamt
336,210																				
	-8,1		-11,6		-15,4		-22,4		-21,7		-13,5		-22,8		-2,3		-6,8		-23,7	
336,615		-8,1		-11,6		-15,4		-22,4		-21,7		-13,5		-22,8		-2,3		-6,8		-23,7
	-6,7		+3,1		+8,8		-1,3		-6,1		-4,5		-4,0		+20,7		+16,8		+0,1	
337,065		-14,8		-8,5		-6,6		-23,7		-27,8		-18,0		-26,8		+18,4		+10,0		-23,6
	-3,3		-0,3		+2,8		-2,7		-6,4		-6,7		-7,2		+6,6		+1,1		+7,3	
337,505		-18,1		-8,8		-3,8		-26,4		-34,2		-24,7		-34,0		+25,0		+11,1		-16,3
	-5,2		-10,3		-8,2		-12,2		-14,3		-14,2		-17,2		-0,7		-7,6		-7,9	
337,940		-23,3		-19,1		-12,0		-38,6		-48,5		-38,9		-51,2		+24,3		+3,5		-24,2
	-0,6		-2,8		+0,4		-7,5		-8,7		-8,4		-12,9		-0,9		-7,4		-4,0	
338,380		-23,9		-21,9		-11,6		-46,1		-57,2		-47,3		-64,1		+23,4		-3,9		-28,2
	+6,2		+3,2		+3,5		-3,2		-5,2		-7,2		-6,5		+2,5		-6,2		+1,3	
338,835		-17,7		-18,7		-8,1		-49,3		-62,4		-54,5		-70,6		+25,9		-10,1		-26,9
	+1,2		-7,5		-1,4		-1,6		+2,5		+0,5		-4,6		+4,2		±0		-0,1	
339,275		-16,5		-26,2		-9,5		-50,9		-59,9		-54,0		-75,2		+30,1		-10,1		-27,0
	+18,8		+17,1		+14,9		+7,3		+12,0		+10,2		+8,5		+11,9		-5,9		+19,6	
339,705		+2,3		-9,1		+5,4		-43,6		-47,9		-43,8		-66,7		+42,0		-16,0		-7,4

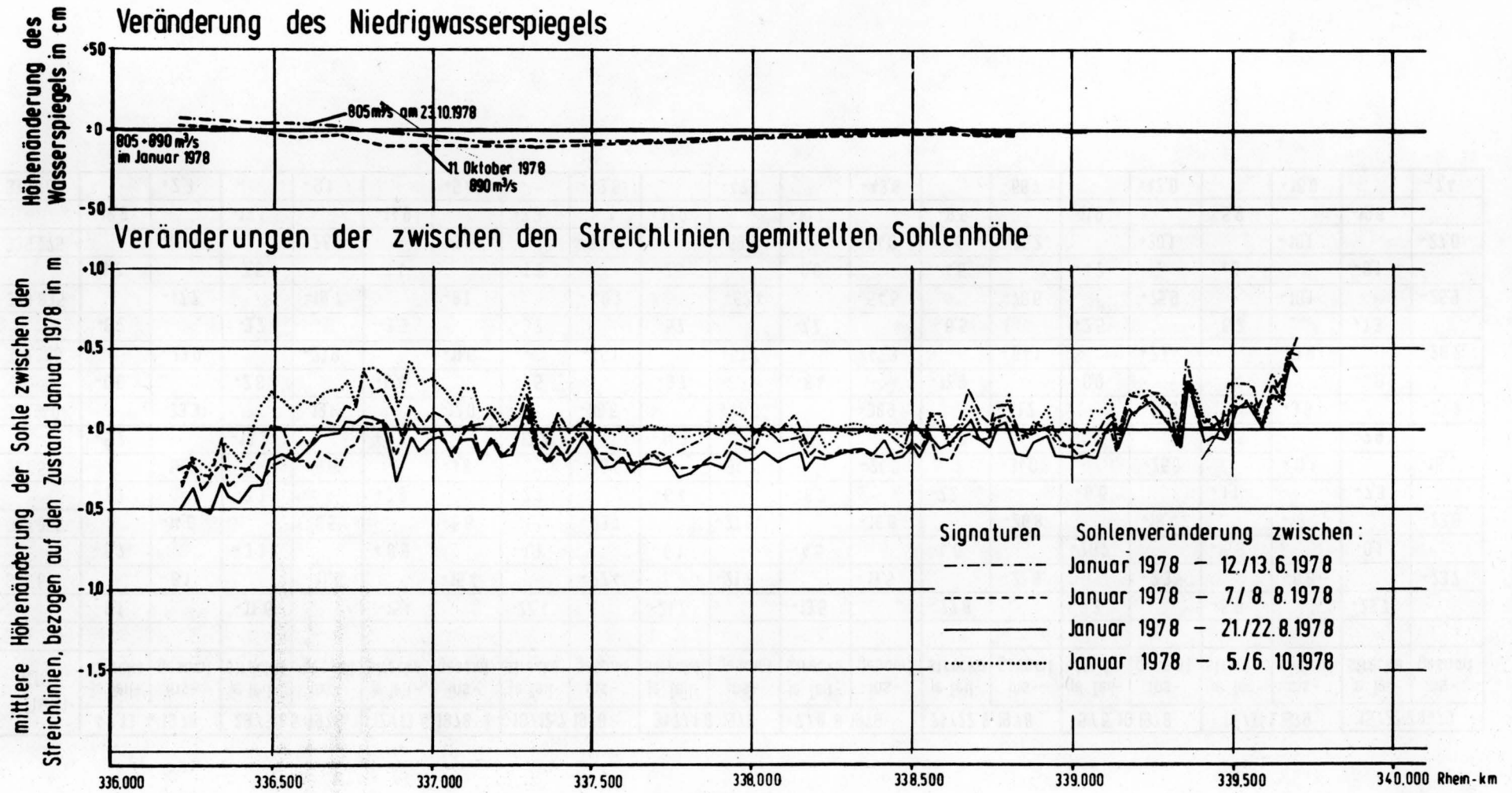
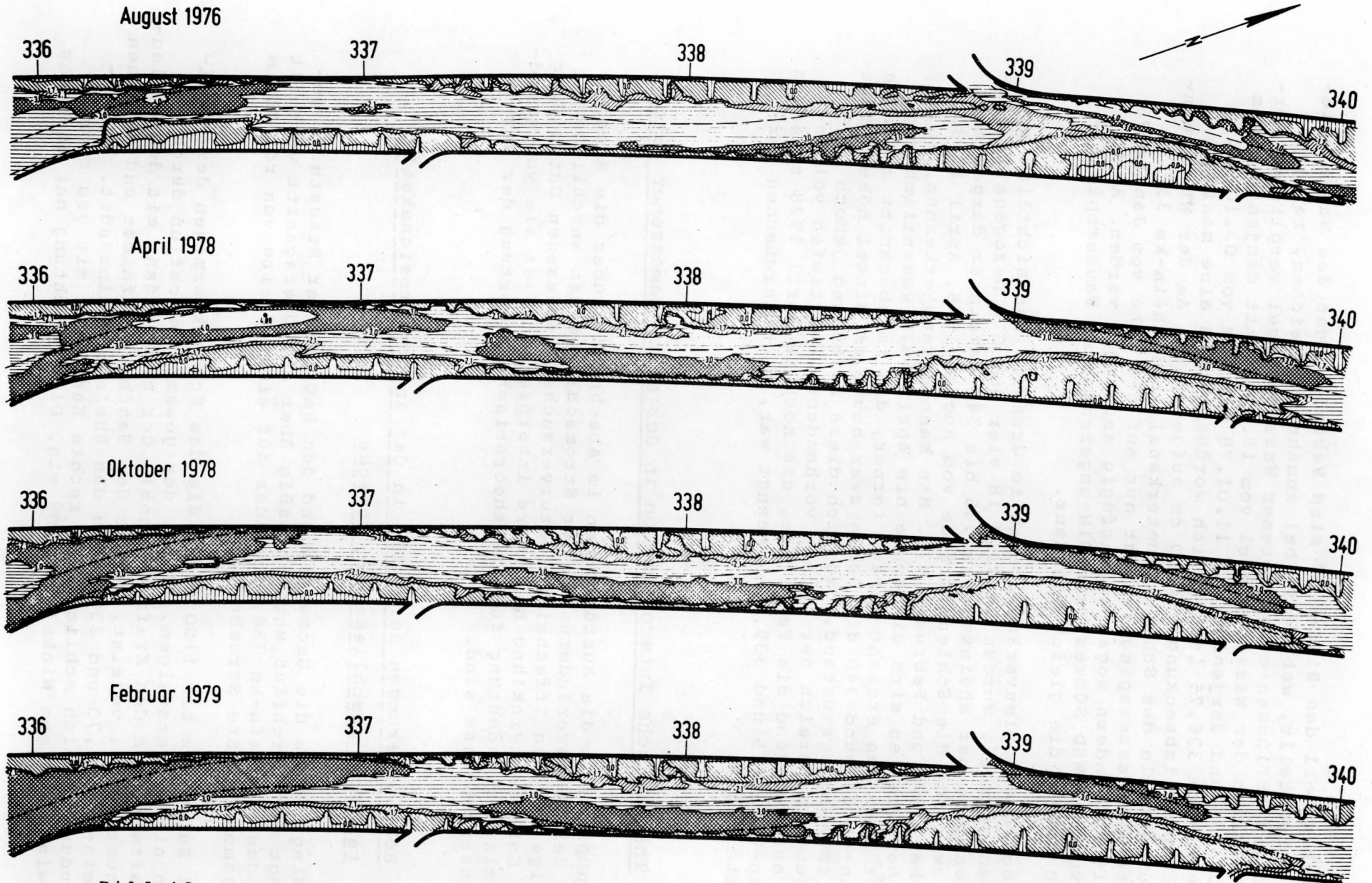


Bild 17 Veränderungen des Niedrigwasserspiegels und der zwischen den Streichlinien gemittelten Sohlenhöhe zwischen Januar 1978 und Oktober 1978



Felkel: Die Geschiebezugabe als flubauliche Lösung

Bild 18 Gegenüberstellung der Tiefenlinienpläne des Rheins zwischen Rhein-km 336 und 340 für die Zustände vom August 1976, April 1978, Oktober 1978 und Februar 1979

Im oberen Teil des Bildes 17 sind Veränderungen des Wasserspiegels dargestellt, wobei die bei annähernd gleichen, relativ niedrigen Abflüssen eingetretenen Wasserspiegel verglichen wurden, nämlich der Wasserspiegel vom 18.01.78 mit demjenigen vom 23.10.1978 und derjenige vom 11.01.78 mit dem vom 03.10.78. Bei Rhein-km 336,75 ist örtlich vorübergehend eine maximale Wasserspiegelabsenkung von 10 cm aufgetreten. An der Wiedereinmündungsstelle des Schleusenunterkanals bei Rhein-km 336,2 konnte der Wasserspiegel nicht nur auf der Höhe vom Januar 78 gehalten, sondern sogar geringfügig angehoben werden. Auch die von der WSD Südwest auf GlW umgerechneten Wasserspiegel-lagen zeigen die gleiche Tendenz.

Um auch die Sohlenveränderungen im Grundriß übersichtlich zusammenzufassen, wurden in Bild 18 vier auf GlW bezogene Tiefenlinienpläne der Rheinstrecke 336 bis 340 gemeinsam dargestellt und zwar für die Sohlenzustände vom August 1976, April 1978, Oktober 1978 und Februar 1979. Man kann daraus erkennen, an welchen Stellen sich die Sohle bis April 1978 wesentlich vertieft hat. Man ersieht daraus ferner, daß im Abschnitt zwischen Rhein-km 339 und 340 die Sohle zwar heute im Mittel höher liegt als im Ausgangszustand, daß sich diese Aufhöhung jedoch vorwiegend im Bereich der früher vorhandenen Übertiefen vollzogen hat, während die Fahrrinne, die noch im April 1978 zwischen Rhein-km 339,5 und 339,9 eingeengt war, sich inzwischen verbreitert hat.

5 Theoretische Interpretation in der Natur gemessener Daten

Anknüpfend an die Ausführungen im Abschnitt 2 über die Mechanik der Höhenveränderungen der Stromsohle werden anschließend einige bei den Iffezheimer Naturversuchen gemessenen Daten über die Sohlenentwicklung besonders interpretiert, da sie von grundsätzlicher Bedeutung für die theoretische Bewertung der Versuchsergebnisse sind.

5.1 Höhenänderungen der Sohle in der an den Erosionskeil talwärts anschließenden Strecke

Bedingt durch die Geometrie und den Betrieb der Staustufe, gelangt der Durchfluß ungleichmäßig über den Querschnitt verteilt in das ab Rhein-km 336,15 wieder auf einer Breite von rd. 250 m zusammengefaßte Strombett.

Bei Zuflüssen bis $1100 \text{ m}^3/\text{s}$, die das Schluckvermögen der Turbinen nicht übersteigen, fließt der gesamte Durchfluß durch das Kraftwerk und den Kraftwerkkanal, der sich sodann mit dem Schleusenunterkanal vereint, rechts den Sandbach aufnimmt und zwischen Rhein-km 335,70 und 336,15 in das Rheinbett einmündet. Im Einmündungsbereich schließt das rechte Kanalufer mit dem rechten Rheinufer einen Winkel von 20° ein. Diese Richtung hat auch das

aus dem Unterkanal ausströmende Wasser, wobei es tangential in das geschlängelte Niedrigwasserbett eingeleitet wird und das gegenüberliegende, linke Rheinufer etwa zwischen Rhein-km 336,5 und 337,0 trifft. In dieser Strecke wird bei den genannten Abflüssen der rechte Teil des Rheinbettes wesentlich weniger durchströmt. Dies wird auch durch die am seinerzeitigen Modell der Staustufe Iffezheim gemachten Strömungsaufnahmen deutlich, von denen als Bild 19 hier eine für den genannten Abflußzustand charakteristische beigelegt ist (vgl. DIETZ und PULINA /3/).

Mit zunehmendem Abfluß strömt der das Schluckvermögen der Turbinen übersteigende Durchfluß über das Wehr ab. Das linke Ufer der Wehrbucht schließt im Grundriß mit dem alten Rheinufer einen Winkel von bis zu 20° ein. Der in diese Richtung gelenkte Abfluß in der Wehrbucht stößt an die bis zur Wintersdorfer Brücke reichende Trennmole und wird hier nach links umgelenkt, bevor er sich mit dem aus dem Unterkanal ausströmenden Wasser vereint, wobei, je nach dem Verhältnis der beiden Teilabflüsse zueinander, auch bei diesen Abflüssen die linke Stromhälfte zwischen Rhein-km 336,5 und 337,0 mehr oder weniger größere Fließgeschwindigkeiten aufweist als die rechte. Dementsprechend ist die Sohlenerosion dieser Strecke auf die linke Stromhälfte konzentriert.

Mit der Pendelung der Niedrigwasserrinne verlagert sich auch der Stromstrich, wobei etwa zwischen Rhein-km 337,5 und 338,3 die Erosion von der linken zur rechten Stromhälfte hin wechselt.

Etwa bei Rhein-km 339 verläuft hierauf die Niedrigwasserrinne wiederum auf der linken Stromseite. Gegenüber den Strömungsverhältnissen bei Rhein-km 337, wo dies auch der Fall ist, hat sich nun aber folgendes geändert:

- Die durch die Grundrißgeometrie der Staustufe bedingte strahlähnliche Vergrößerung der örtlichen Strömungsgeschwindigkeiten in der linken Stromhälfte ist nunmehr abgeklungen; ausgeglichene und damit im Maximum kleinere Strömungsgeschwindigkeiten mit geringeren maximalen Schleppspannungen sind die Folge.
- Die Strömung weist bei Rhein-km 339 kein Geschiebedefizit mehr auf. Auf Grund der gleichmäßigeren Verteilung der Fließgeschwindigkeiten über den Querschnitt gibt es im Gegenteil nunmehr Abflußzonen, in denen die örtlichen Geschwindigkeiten gegenüber denjenigen bei Rhein-km 337 so stark vermindert sind, daß sich antransportierter Kies abzulagern beginnt.
- Auch die Verlängerung der Buhnen am rechten Ufer zwischen Rhein-km 338,435 und 339,050 in der Zeit vom 20.10.1977 bis 26.10.1977 trugen zu Umlagerungen von Sohlenmaterial aus der so nachregulierten Strecke in die Übertiefen der anschließenden Strecke hinein bei.

Felkel: Die Geschiebezugabe als flubbauliche Lösung

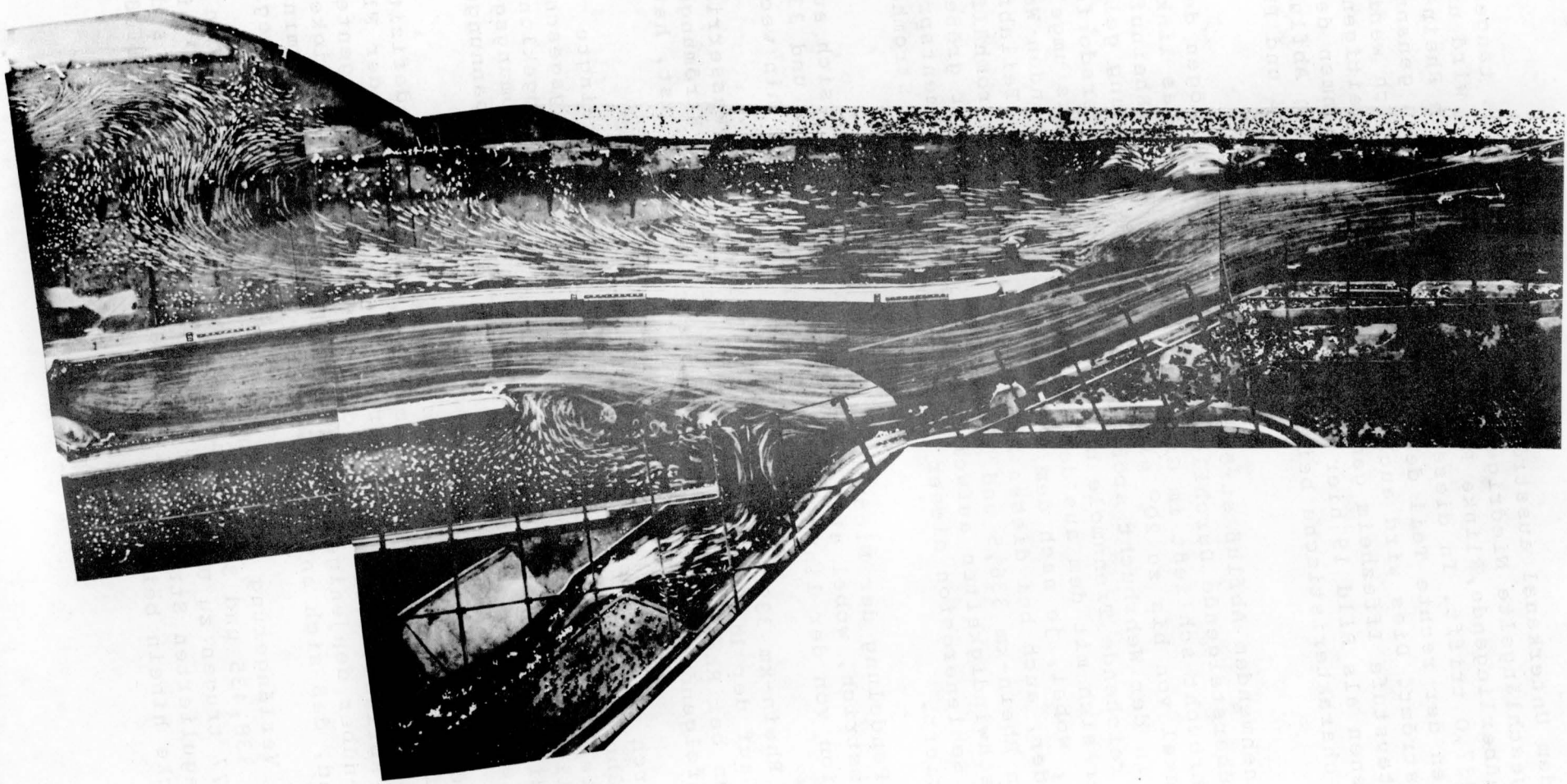


Bild 19 Verlauf der Oberflächenströmung im Unterwasser der Staustufe Iffezheim /3/.
Abfluß durch das Kraftwerk: 1100 m³/s

Mitt.-Bl. d. BAW (1980) Nr. 47

- In der Nähe des linken Ufers sind zwischen Rhein-km 339,0 und 339,7 bereits bei der Rheinpeilung des Jahres 1966 Tiefen von mehr als 4,50 m unter GlW festgestellt worden. Sie wurden auch bei der Ausgangspeilung vom August 1976 nachgewiesen. Damit aber hat diese Strecke insgesamt erheblich größere Abflußquerschnitte als sie im davor liegenden, rd. 3 km langen Abschnitt ursprünglich auftraten.

Die durch die größeren örtlichen Querschnitte bewirkte Verzögerung der Strömungsgeschwindigkeiten zieht so lange die Tendenz zur Sedimentation nach sich, bis sich durch die Sohlenaufhöhung diese Querschnitte so weit verringert haben, daß auf Grund der neuen Strömungsgeschwindigkeiten genau diejenige Feststoffmenge weitertransportiert wird, die in die betrachtete Strecke von oberstrom eintreibt.

Durch das Aufhohen der Sohle in einem Abschnitt mit einem kleineren Transportvermögen, als es die Teilstrecke davor aufweist, wird Feststoff zurückgehalten, der im talwärts anschließenden Abschnitt in der Geschiebebilanz zunächst fehlt, so daß hier zusätzlich Sohlenmaterial aufgenommen wird und zwar so lange, bis durch die Sohlenveränderung das neue momentane Transportvermögen hier dem aus dem oberen Abschnitt eintretenden Geschiebetrieb entspricht. Da sich jedoch auch dann, wenn dieser Fall eingetreten ist, die Intensität des letzteren u.U. weiter verändert, z.B. sich als Folge der noch nicht beendeten Querschnittszunahme weiterhin vergrößert, kann anschließend eine Phase eintreten, während der in den talwärtigen der beiden benachbarten Abschnitte mehr Geschiebe eintreibt, als hier unter Berücksichtigung der inzwischen vergrößerten Abflußquerschnitte weitertransportiert wird, so daß hier auf die Sohleneintiefung vorübergehend eine Anlandung folgt. Der dargestellte Rückkopplungsprozeß verhindert ein unbeschränktes Anwachsen oder Abnehmen der Größe der Fließquerschnitte.

Dieser Mechanismus bewirkt somit, daß sich die Geschiebebewegung nicht streng stationär vollzieht, sondern durch Pulsationen gekennzeichnet ist, die umso stärker sind, je bedeutender die sie initiierenden Störungen sind. Zu diesen zählt im vorliegenden Falle der Wechsel in der Größe von aufeinanderfolgenden Abflußquerschnitten sowie stark unterschiedliche Geschwindigkeitsverteilungen innerhalb der Querschnitte.

Dadurch, daß bei der Geschiebezugabe der Erosionskeil aufgefüllt und hier eine im Querschnitt annähernd horizontale Sohle hergestellt und beibehalten wird, tritt insoweit eine Verbesserung gegenüber dem vorangegangenen Zustand mit stark eingetieftem Erosionskeil auf.

Im oberen Teil des Bildes 20 sind für die gesamte Strecke von Rhein-km 336,0 bis 352,0 die unter dem GlW 72 zwischen den Streichlinien liegenden Querschnittsflächen für die drei Peilungen vom August 1976, April 1978 und Februar 1979 aufgetragen. Der untere Teil des Bildes enthält die mittlere Höhenänderung der Sohle zwischen den Streichlinien, bezogen auf den Zustand vom August 1976. Dabei ist ein annähernd korrespondierender

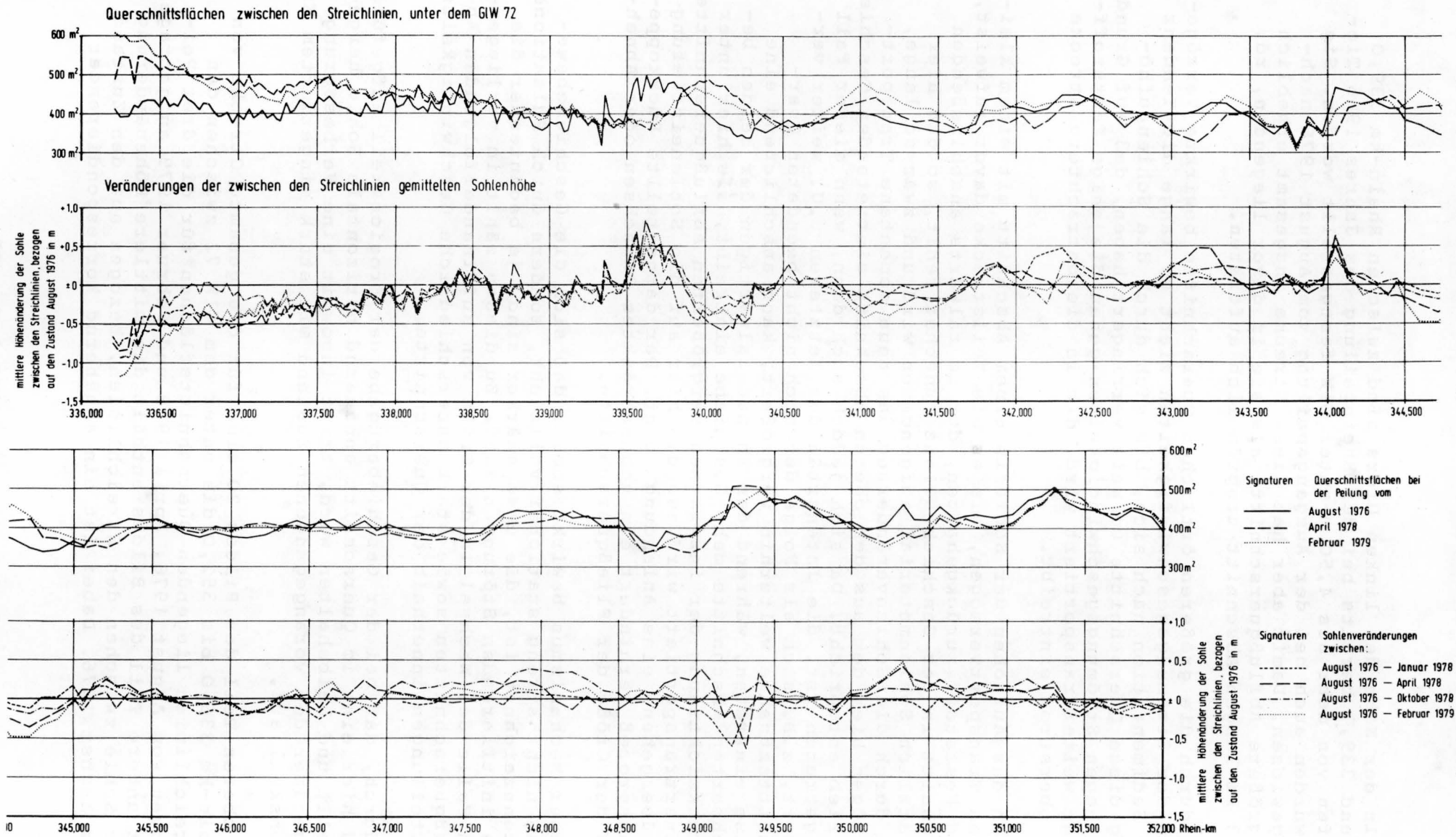


Bild 20 Querschnittsflächen und Veränderungen der mittleren Sohlenhöhen im Rheinabschnitt Rhein-km 336,0 bis 352,0 zwischen August 1976 und Februar 1979

Verlauf der absoluten Querschnittsgrößen vom August 1976 und der Veränderungen zwischen August 1976 und April 1978 zu beobachten. Das heißt, daß sich auf der ganzen Strecke talwärts des Erosionskeils die Sohle bis April 1978 in Übereinstimmung mit den vorstehenden Überlegungen im wesentlichen überall dort aufgehöhht hat, wo im Ausgangszustand überdurchschnittlich große Abflußquerschnitte auftraten und umgekehrt.

Zwischen dem Ende des Erosionskeils bei ca. Rhein-km 339,0 und der bei Rhein-km 348,5 beginnenden Krümmung, die eine andere Grundrißgeometrie aufweist, zeigt jede der drei im oberen Teil von Bild 20 aufgetragenen Linien der Querschnittsflächen eine wellenförmige Gestalt. Die Rhein-km, an denen, bei Vernachlässigung kleinerer Schwankungen, Hoch- und Tiefpunkte der Wellenlinien auftreten, sind in der folgenden Tafel VIII zusammengestellt:

Tafel VIII

August 76		April 78		Februar 79	
Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.
339,7	340,2	340,0	340,6	339,9	340,5
340,8	341,5	341,1	341,7	341,0	341,7
341,9	342,7	342,5	343,2	342,5	343,1
343,3	343,8	343,5	344,0	343,4	343,8
344,2	344,7	344,4	345,2	344,6	345,2
345,3	346,0	345,6	345,8	345,5	346,0
346,4	347,4	346,6	347,6	346,8	347,5
347,8	348,7	348,2	348,7	348,2	348,7

Die Wellenlinien weisen auf der durchschnittlich 8,25 km langen Strecke acht Maxima auf, wobei sich die mittlere Wellenlänge zu $8250 : 7 = \text{rd. } 1180 \text{ m}$ ergibt. Diese Distanz entspricht dem Regelabstand der Talwegsübergänge (vgl. Seite 26, letzter Absatz).

Durch den vorstehend beschriebenen Mechanismus bedingt, verlagerten sich zwischen August 76 und April 78 die Wellen der im oberen Teil von Bild 20 dargestellten Linien der Querschnittsflächen durchschnittlich rd. 270 m talwärts.

Um eine möglichst weitgehende Stabilisierung der Sohle zu erreichen, sollte bei der etwaigen Nachregulierung zwecks Herstellung einer Tiefe von mindestens 2,10 m unter GlW auf die Herstellung äquivalenter Abflußquerschnitte geachtet werden.

5.2 Der Geschiebenachtransport aus der Stauhaltung Iffezheim

Zur Klärung der für die Geschiebebilanz der Rheinstrecke talwärts der Staustufe Iffezheim bedeutsamen Frage, ob bzw. wieviel Geschiebe die Stauhaltung Iffezheim verläßt, können die zwischen den Jahren 1972 und 1977 täglich bei Söllingen durchgeführten akustischen Messungen an der Stromsohle herangezogen und ihre Ergebnisse nachstehend durch theoretische Überlegungen ergänzt werden. Die ersteren sind im Bericht "Akustische Geschiebemessung im Rhein bei Söllingen (Rhein-km 327,315)" /1/ vom November 1978 eingehend behandelt.

Demnach kam die Geschiebebewegung mit der Stauerrichtung zur Ruhe und es wurden an den fünf im Meßquerschnitt über die Rheinsohle verteilten akustischen Detektoren seither praktisch keine Steinanschläge mehr registriert. Dies trifft auch für die beiden Hochwässer des ersten Halbjahres 1978 zu, während denen die Meßstelle vorübergehend wieder in Betrieb genommen worden war. Daß es sich dabei um keine Fehlmessung handelt, geht aus nachstehender Berechnung hervor:

Der Abfluß beim GlW 72 beträgt $570 \text{ m}^3/\text{s}$, der dabei zwischen den Streichlinien im Meßquerschnitt liegende Abflußquerschnitt rd. 380 m^2 und somit die mittlere Fließgeschwindigkeit $v_m = 570/380 = \text{rd. } 1,5 \text{ m/s}$. Bei diesem Abfluß trat keine wesentliche Geschiebebewegung auf.

Die Hochwasserspitze vom 24.05.1978 wies am Pegel Maxau einen Abfluß von $4230 \text{ m}^3/\text{s}$ auf. Der Abflußquerschnitt in der Stauhaltung Iffezheim im Meßquerschnitt bei Rhein-km 327,315 unter dem bei Hochwasser auf NN + 123,15 m abgesenkten Stauziel ist rd. 2700 m^2 groß, so daß die mittlere Fließgeschwindigkeit während der Hochwasserspitze hier rd. $4150/2700 = \text{rd. } 1,5 \text{ m/s}$ betrug, also etwa die mittlere Geschwindigkeit bei GlW vor dem Ausbau erreichte. Dabei ist noch zu beachten, daß für die Geschiebebewegung nicht die mittlere, sondern die sohlennahe Geschwindigkeit maßgebend ist, diese aber, bei der gleichen mittleren Geschwindigkeit beim früheren Niedrigwasser mit rd. 2,5 m Wassertiefe erheblich größer war als in der Stauhaltung mit rd. 11 m Wassertiefe.

Auch aus diesen Überlegungen folgt, in Übereinstimmung mit den Meßergebnissen, daß in der Stauhaltung rd. 7 km oberhalb des

bei Rhein-km 334,00 angeordneten Wehres auch bei extremem Hochwasser kein Geschiebe bewegt wird. Da sich gegen das Wehr hin die Wassertiefe und schließlich auch die Wasserspiegelbreite und damit der Fließquerschnitt laufend weiter vergrößert und folglich die mittlere Fließgeschwindigkeit verringert, kann als gesichert angesehen werden, daß auch bei Hochwasser kein durchgehender Geschiebetrieb im unteren Teil der Stauhaltung Iffezheim auftritt.

Ein Geschiebetransport durch das Wehr, der nur bei angehobenen Segmentverschlüssen stattfinden könnte, müßte somit durch Feststoffaufnahme aus dem Sohlenbereich unmittelbar vor der befestigten Wehrsohle gespeist werden. Es soll nun abgeschätzt werden, welche mittleren Fließgeschwindigkeiten hier auftreten:

Das Wehr weist 6 Wehröffnungen von je 20 m lichter Weite auf, dazwischen 5 je 4 m breite Pfeiler, so daß vor deren Köpfen zwischen den Wehrwangen eine 140 m breite Wasserfläche vorhanden ist. Die Wehrsohle liegt auf der Höhe NN + 110,50 m, der Normalstau auf NN + 123,60 m; bei $HQ = 4200 \text{ m}^3/\text{s}$ wird das Oberwasser auf NN + 123,0 m abgesenkt. Unmittelbar vor den Köpfen der Wehrpfeiler trat somit eine mittlere Fließgeschwindigkeit von $4200/140 \cdot 12,5 = 2,4 \text{ m/s}$ auf. Die Sohle ist hier durch Betonplatten und davor durch Bruchsteine und Steinmatten gesichert. Im Bereich der beiderseitigen Wehrwangen verbreitert sich der Abflußquerschnitt nach oberstrom hin. In einem Abstand vor der Wehrachse, die etwa der Wehrbreite entspricht, hat der Abflußquerschnitt etwa die doppelte Breite erreicht (vgl. /3/, Bild 23), so daß hier nur noch die halbe mittlere Fließgeschwindigkeit, somit rd 1,2 m/s auftritt.

Wenn somit auch nicht ausgeschlossen werden kann, daß bei Hochwasser und bestimmten Betriebsfällen, vor allem dann, wenn die Wehrverschlüsse nicht in gleicher Weise betätigt werden, örtliche Sohlenangriffe auftreten, so ist doch mit Sicherheit auszuschließen, daß sich diese Erscheinungen auf einen längeren Bereich als etwa bis 100 oder höchstens 200 m vor dem Wehr erstrecken. Eine große praktische Bedeutung für die Geschiebebilanz des Rheins talwärts der Staustufe ist dieser etwaigen örtlichen Kolkbildung auf die Dauer daher nicht beizumessen.

6 Zusammenfassende Beurteilung der Versuchsergebnisse

Die Entwicklung der Sohlenerosion unterhalb der Staustufe Iffezheim und die Ergebnisse der bisherigen Geschiebezugabe zeigten insgesamt das theoretisch erwartete Verhalten.

Es bestätigte sich, daß die Strömung dann denjenigen Anteil des zugegebenen Materials, der dem natürlichen Geschiebetrieb entspricht, aufnimmt und talwärts weitertransportiert, wenn das zugegebene Material annähernd die gleiche Kornverteilung, Kornform und Dichte wie das an der Rheinsohle unter der Deckschicht natürlich anstehende Kies-Sand-Gemisch aufweist.

Wie durch die außerordentlich umfangreichen Peilungen nachgewiesen werden konnte, sind weder an der Einbaustelle noch innerhalb der über rd. 15 km langen anschließenden Strecke nachteilige Sohlenveränderungen eingetreten. Die Geschiebezugabe bewirkte vielmehr den erwarteten Ausgleich der Geschiebebilanz. Beim Einbau von geeignetem Zugabematerial sind theoretisch keine Gründe dafür zu erkennen, daß sich das Geschiebe im Rhein weiter talwärts anders verhalten könnte, als es beim natürlichen Geschiebetrieb ohne Zugabe geschieht.

Um mit Rücksicht auf die Sicherheit des Schiffsverkehrs bei der Fortführung der Geschiebezugabe möglichst geringe Höhenschwankungen der Sohle und des Wasserspiegels zu erreichen, wird bei Bedarf eine möglichst kontinuierliche Zugabe des einzubringenden Kiesel im Rheinbett unmittelbar unterhalb der Wiedereinmündungsstelle des Schiffahrts- und Kraftwerksunterkanals in einer Länge zwischen ca. 500 und 1000 m empfohlen.

Nachdem es gelungen ist, die ursprünglichen Sohlenhöhen annähernd wieder herzustellen und beizubehalten, war theoretisch zu erwarten, daß sich auch die alten Niedrigwasserstände wieder einstellen. Die Ergebnisse der Wasserstandsbeobachtungen haben dies bestätigt. Es ist keine bleibende Absenkung des Niedrigwasserspiegels eingetreten, da die Abflußquerschnitte gegenüber dem Ausgangszustand insgesamt nicht vermindert wurden. Obwohl überall dort, wo sie vorher stellenweise höher lag, die Sohle nur bis auf 2,30 m unter GlW wieder aufgefüllt wurde, so wurden die Gesamtquerschnitte meist insoweit beibehalten, als im allgemeinen an anderen Stellen zunächst tiefer liegende Querschnittsteile entsprechend höher aufgefüllt wurden.

Das Hochwasser vom 24. Mai 1978 erreichte am Pegel Maxau mit 846 cm den höchsten Pegelstand seit der Rheinkorrektion durch TULLA vor rd. 100 Jahren. Wenngleich ein Hochwasserereignis, wie es 1882/83 aufgetreten ist, im heutigen, bis Iffezheim kanalisierten Rhein, ohne die geplanten Gegenmaßnahmen noch höhere Wasserstände in Maxau zur Folge hätte, schmälert dieser Umstand nicht die Bedeutung des Hochwassers vom 24. Mai 1978 als Kriterium für die Beurteilung der Geschiebezugabe, denn es besteht kein Grund zu der Annahme, daß ein noch etwas höheres Hochwasser zu einem grundsätzlich anderen Verhalten der Stromsohle führen könnte, als es im Jahre 1978 beobachtet wurde. Es bereitete keine besonderen Schwierigkeiten, die dabei eingetretene Sohlenvertiefung trotz weiterhin hoher Abflüsse wieder rückgängig zu machen, so daß keine Bedenken hinsichtlich der Durchführbarkeit und Wirksamkeit der Geschiebezugabe zu Zeiten extrem hoher Abflüsse bestehen.

Aufgrund der Versuchsergebnisse und ihrer theoretischen Beurteilung lassen sich die vier an den Naturversuch gestellten Hauptfragen (vgl. Abschnitt 3) wie folgt beantworten:

1. Durch die Geschiebezugabe im Unterwasser der Staustufe Iffezheim ist es im Jahre 1978 gelungen, den Wasserspiegel trotz zeitweise hoher Abflüsse sowohl an der Einmündung des Schleu-

senunterkanals bei Rhein-km 336,0 als auch über dem Schleusendempel bei Rhein-km 334,0 auf der Höhe vom Januar 1978 zu halten.

2. Mit der Methode des Verklappens des Kiesel aus fahrenden Klappschuten konnte das Material mit einer den Anforderungen voll entsprechenden Genauigkeit in Schichten flächenhaft eingebaut werden.
3. Der Schiffsverkehr wurde durch die Geschiebezugabe nicht beeinträchtigt und zwar weder unmittelbar an der Einbaustelle noch weiter unterstrom.
4. In der bis Rhein-km 352 regelmäßig gepeilten, unterhalb anschließenden Rheinstrecke sind keine Veränderungen gegenüber dem Geschiebetrieb, wie er auch ohne Geschiebezugabe auftritt, beobachtet worden.

Nachteilige Folgen der Geschiebezugabe sind bisher nicht erkennbar. Die Geschiebezugabe bildet somit eine Alternative zum Bau weiterer Staustufen am Oberrhein.

Nach einer rd. vier Monate dauernden Unterbrechung während des Winters wird die Geschiebezugabe seit dem 21. Februar 1979 fortgesetzt.

7 Schrifttum

- /1/ Bundesanstalt für Wasserbau : Akustische Geschiebemessungen im Rhein bei Söllingen (Rhein-km 327,15). Karlsruhe, November 1978. IX + 29 S., 33 Anl. (unveröffentlicht)
- /2/ Bundesanstalt für Wasserbau und Wasser- und Schifffahrtsamt Freiburg : Naturversuch mit Geschiebezugabe unterhalb der Rheinstaustufe Ifezheim (Stand: Februar 1979). Versuchsbericht. Karlsruhe und Freiburg, 30. März 1979. VIII + 68 S., 48 Anl. (unveröffentlicht)

- /3/ Dietz, J.W. und Pulina, B. : Modelluntersuchungen zur Gestaltung der Hauptbauwerke an der Rheinstaustufe Iffezheim. Mitteilungsblatt der BAW (1976) Heft 39, S. 3 - 81
- /4a/ 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^e Congrès International de Navigation Paris 1969, Section I, Sujet 5, pp 5 - 23
- /4b/ Felkel, K. : Rechenautomatenprogramm zur Berechnung der als Folge der Geschiebebewegung eintretenden Veränderungen der Höhenlage der Flußsohle und des Wasserspiegels. Deutsche Berichte zum XXII Internat. Schiffahrtskongreß Paris 1969. Bonn 1969. S. 122 - 144
- /5/ Felkel, K. : Die Erosion des Oberrheins zwischen Basel und Karlsruhe. GWF (Wasser-Abwasser) 110 (1969) H. 30, S. 801 - 810
- /6/ Felkel, K. : Ideenstudie über die Möglichkeit der Verhütung von Sohlenerosionen durch Geschiebezufuhr aus der Talau in das Flußbett, dargestellt am Beispiel des Oberrheins. Mitteilungsblatt der BAW (1970), H. 30, S. 21 - 29
- /7/ Felkel, K. : Das Sohlenkorn des Rheins zwischen Straßburg und Bingen. Mitteilungsblatt der BAW (1972), H. 32, S. 75 - 87
- /8/ Felkel, K. : Die Wechselbeziehung zwischen der Morphogenese und dem Ausbau des Oberrheins. Jahresberichte und Mitteilungen des Oberrheinischen Geologischen Vereins (N.F.) 54 (1972), S. 23 - 44
- /9/ Felkel, K. und Steinweller, H. : Natur- und Modellversuche über die Wirkung der Schiffe auf Flußsohlen aus Grobkies (Breisacher Versuche). Wasserwirtschaft 62 (1972) H. 8, S. 243 - 249

- /10/ Felkel, K. : Untersuchungen der Veränderungen der Höhenlage der Sohle des Oberrheins. Mitteilungsblatt der BAW (1975), H. 38, S. 11 - 49
- /11/ Felkel, K. : Die Problematik der Sohlenerosion des Oberrheins. Zeitschrift für Binnenschifffahrt und Wasserstraßen 104 (1977) Nr. 8, S. 363 - 375
- /12/ Felkel, K. : Comme moyen de prevention a l'abaissement du fond du Rhin Superieur: l'apport continu de graviers. XVII^e Congrès de l'Association Intern. de Recherches Hydrauliques Baden-Baden 1977, Sujet Ca, volume 4, pp 213 - 219
- /13/ Felkel, K., Kuhl, D. und Steitz, K. : Naturversuche mit künstlicher Geschiebezuführung zwecks Verhütung der Sohleneintiefung des Oberrheins (Freistetter Versuche). Wasserwirtschaft 67 (1977) H. 5, S. 119 - 125
- /14/ Graewe, H. : Die Notwendigkeit einer Rheinstau-
stufe bei Neuburgweier. Wasserwirtschaft 65 (1975) H. 9, S. 233 - 238
- /15/ Hinrich, H. : Geschiebetrieb und Geschiebefracht des Rheins im Abschnitt Freistett-
Worms in den Jahren 1968 - 1971. Deutsche Gewässerkundliche Mit-
teilungen 16 (1972) H. 2, S. 29-41
- /16/ Landesanstalt für Deutsches Gewässerkundliches Jahr-
Umweltschutz buch. Sonderheft Baden-Württemberg.
Baden-Württemberg : Abflußjahr 1975. Karlsruhe 1978
- /17/ Lebreton, J.C. : Diskussionsbeitrag zum Thema I/5:
The problem of bed-load in cana-
lised rivers and in sections of
a partially canalised waterway,
in particular at the mouths of
tributaries.
Report of Proceedings XXIInd Intern.
Navigation Congress Paris 1969.
S. 306 - 308
- /18/ Rat von Sachver- Umweltprobleme des Rheins,
ständigen für 3. Sondergutachten März 1976.
Umweltfragen : Verlag W. Kohlhammer GmbH,
Stuttgart und Mainz

- /19/ Schneider A. : Die Regulierung der korrigierten Oberrheinstrecke Sondernheim (Speyer) - Straßburg und die dabei angewandten Bauweisen. Die Bautechnik 3 (1925) H. 12, S. 129 - 141
- /20/ Tippner, M. : Über den Umfang der Sohlenerosion in großen Gewässern. Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen 17 (1973) H. 5, S. 125 - 130
- /21/ Vertrag zwischen der Bundesrepublik Deutschland und der Französischen Republik über den Ausbau des Rheins zwischen Kehl/Straßburg und Neuburgweier/Lauterburg. Vom 04. Juli 1969. Bundesgesetzblatt 1970, Teil II, S. 721 - 740
- /22/ Zusatzvereinbarung zum Vertrag vom 04. Juli 1969 zwischen der Bundesrepublik Deutschland und der Französischen Republik über den Ausbau des Rheins zwischen Kehl/Straßburg und Neuburgweier/Lauterburg. Vom 16. Juli 1975. Bundesgesetzblatt 1976, Teil II, S. 1723 - 1727