Abt. I Frage 2b

Gestalt und Richtung der Hafeneinfahrten insbesondere bei Flüssen mit starker Geschiebeführung.

Von Prof. Dr.-Ing. H. Wittmann, Technische Hochschule Karlsruhe.

Zusammenfassung: Hafenbecken stellen seitliche Erweiterungen eines Flußbettes dar. Die Diskontinuität der Linienführung verändert die Strömung in beiden Gebieten. Es entsteht aus den Ablösungsvorgängen am oberen und dem Staudruck am unteren Hafenufer eine Drehwalze, durch die Geschiebe, Sand und Schwebstoffe in die Hafeneinfahrt gezogen und dort abgelagert werden. Die Richtung der Hafeneinfahrten ist meist durch die örtlichen Verhältnisse bedingt, so daß die Gestalt der Hafeneinfahrt durch besondere Maßnahmen verbessert werden muß. Sie zielen darauf ab, die Strömungsverhältnisse so umzubilden, daß sich Geschiebe und Schwebstoffe nur in geringem Umfang und in einer für die Schiffahrt unschädlichen Form ablagern. Das schwere an der Sohle wandernde Geschiebe kann durch einen Abweiser an der oberen Trennspitze abgelenkt werden. Wegen der Schwebstoffe muß aber auch der Wasseraustausch zwischen Hafen und Flußwasser durch Erzeugung einer rasch drehenden Vorwalze vermindert werden.

1. Strömungsvorgänge in seitlichen Erweiterungen.

Hafenbecken stellen seitliche Erweiterungen eines Flußbettes dar. Die Diskontinuität der Linienführung ruft Veränderungen der Strömungen in beiden Gebieten, dem des Flusses und dem der seitlichen Erweiterung, dem Hafen, hervor. Es entsteht zwischen den Punkten C und D eine Trennfläche (Abb. 1). Infolge

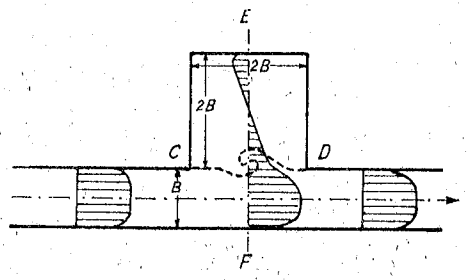


Abb. 1.

des größeren Durchflußquerschnittes EF in der Erweiterung werden die Größe der Geschwindigkeiten im Fluß vermindert und ihre Verteilung gegenüber dem parallel geführten Fluß verändert. Die Druckhöhe im Sinne der Bernoullischen Gleichung wird im Schnitt EF vergrößert. Die mit geringer Bewegungsenergie versehenen Wasserteile der Trennfläche müssen, um abfließen zu können, aus dem Gebiet niederen Druckes bei C kommend, das Gebiet höheren Druckes zwischen C und D durchdringen. Sie gelangen nur so weit in die Erweiterung, bis ihre Energie aufgezehrt ist und sie durch das Druckgefälle zur Umkehr gezwungen werden. Der Strömungsvorgang ist nicht stationär. Nach dem Druckausgleich zwischen der Trennfläche und der Erweiterung gerät die Trennfläche in Wellung, rollt zu einem Wirbel auf und schwimmt talwärts.

Bei D prallt jeder abschwimmende Wirbel auf und erzeugt im gleichen Rhythmus einen Staudruck. Er facht die bei C, an der Ablösungsstelle sich neu bildenden Wirbel an, wobei aus dem Gebiet des Staudruckes Wirbelballen nach C gelangen. Der Wirbel nimmt von beiden Seiten der Trennfläche Wasserteile auf, mischt sie durch die Aufrollung, und aus Gründen der Kontinuität

kommt die Hälfte des Gemisches in die Erweiterung, in die Walze und das Totwassergebiet des Hafenbeckens. Auf diese Weise bewirkt der Wirbel den Austausch der Wasserteile zwischen dem Fluß und der Erweiterung.

Die Wirbelablösungen erfolgen in ganz bestimmten Zeitintervallen, die abhängig sind vom Verhältnis der Flußbreite B zur Hafenbreite x · B und der Abflußmenge. Mit steigender Wasserführung des Flusses, also mit zunehmenden Strömungsgeschwindigkeiten nehmen diese Zeitintervalle, die Schwingungszeiten, ab. Die kürzere Zeit, die der Wirbel zum Überqueren der Trennfläche von C nach D benötigt, erzeugt rascher aufeinanderfolgende Wirbelstöße auf das Hafenwasser. Die Schwingungshöhe im Hafenbecken nimmt dagegen zu und wirkt mit zunehmenden Geschwindigkeiten auf die Wassermasse des Hafenbeckens. Die Erscheinung manifestiert sich in den oft bis an das Ende langer Hafenbecken reichenden wechselnden Strömungsrichtungen des Hafenwassers.

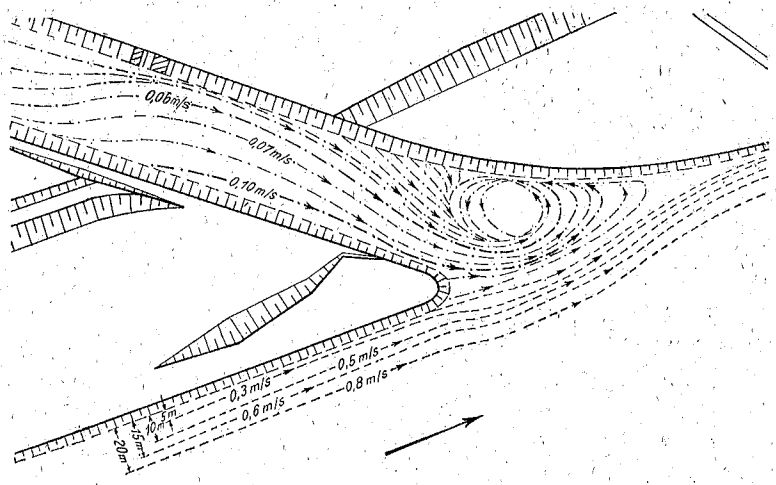


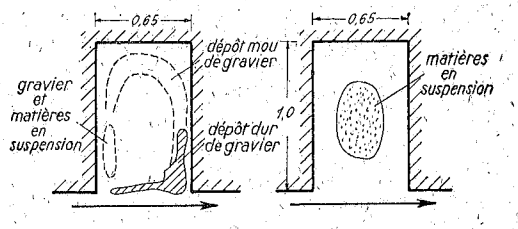
Abb. 2.

2. Verlandung der Hafeneinfahrt.

Die Summe der einzelnen Wirbelablösungen und -ballen erzeugt in der Hafeneinfahrt die Walze, deren Form und Ausdehnung von der Gestalt der Hafeneinfahrt sowie von den Abflußmengen und Wasserständen abhängig ist. Die in einem Hafenmund gemessenen Strömungsrichtungen und -geschwindigkeiten eines Zustandes (Abb. 2) beweisen die obengenannten Vorgänge, insbesondere die schwingende und drehende Bewegung der Wassermasse nicht nur in der Hafeneinfahrt, sondern auch im Hafenbecken. An den äußeren Rändern der Walze wurden die größten, im Innern die kleinsten Strömungsgeschwindigkeiten gemessen. An der Oberfläche besteht für Schwimmkörper die Tendenz, in spiralförmigen Bewegungsbahnen in die äußeren Teile der Walze zu gelangen, auf der Sohle hingegen werden Sinkstoffe vom Rande nach der Mitte der Walze geführt. Gelöste Schwebstoffteile steigen in der Mitte der Walze von unten nach oben und gelangen von hier aus wieder in die Bewegungsbahnen der Oberfläche.

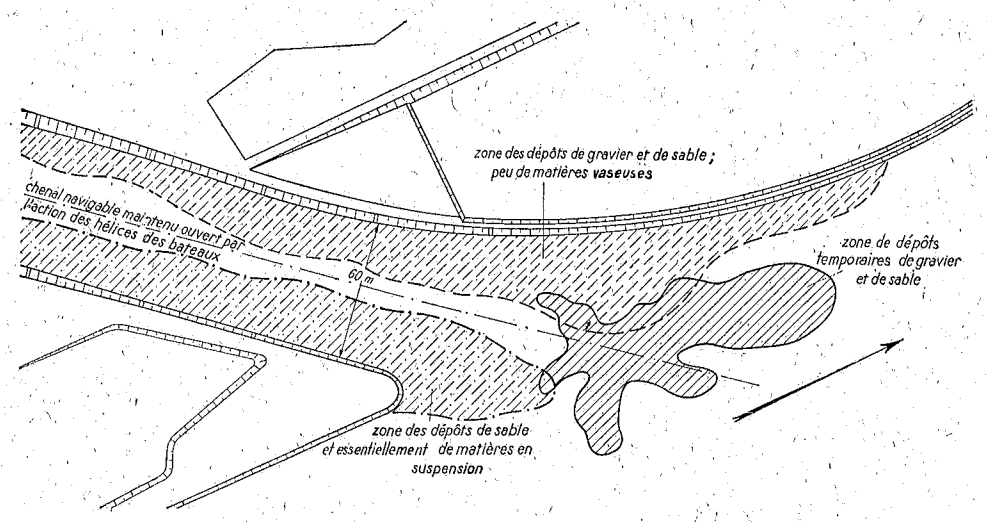
Die mit dem Austausch der Wasserteile aus dem Fluß entnommenen Schwerstoffe — Geschiebe, Sand und Schwebstoffe — lagern sich in einem rechtwinklig vom Fluß abzweigenden Hafenbecken grundsätzlich in der in den Abb. 3a und b

dargestellten Form ab, wobei Abb. 3a die Ablagerungen von Geschiebe und Sand und Abb. 3b die Ablagerungsfläche von Schwebstoffen darstellt. Der Wechsel der Wasserstände und die Vermischung von Geschiebe, Sand und Schwebstoffen läßt diese Formen in der Natur selten rein erkennen. Jedoch beweisen die Abb. 4 und 5, daß auch in Hafenbecken, bei denen die Achse der Einfahrt mit der Achse des Flusses einen spitzen Winkel bildet, ähnliche Ablagerungsflächen auftreten.



gravier et matières en suspension — Geschiebe und Schwebstoffe
dépôt mou de gravier — lockeres Geschiebe
dépôt dur de gravier — festes Geschiebe
matières en suspension — Schwebstoffe

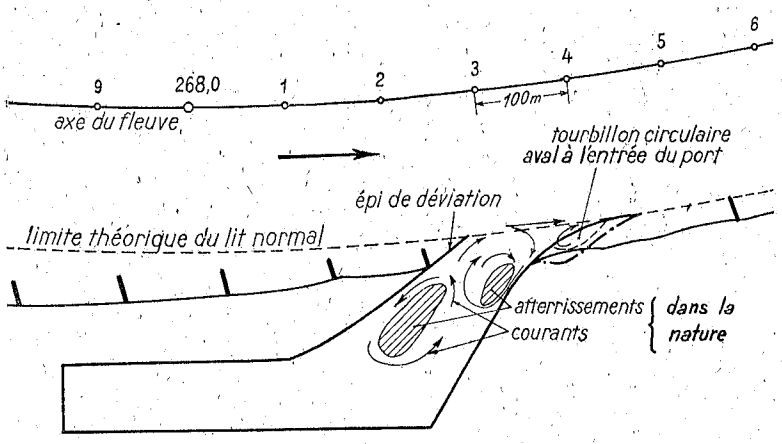
Abb. 3.



zone des dépôts de gravier et de sable; peu de matières vaseuses — Bereich der Geschiebe und Sandablagerungen; wenig Schwebstoffe
chenal navigable maintenu ouvert par l'action des hélices des bateaux — Durch Schraubeneinwirkung der Schifffahrt offene Fahrwasserrinne
zone des dépôts de sable et essentiellement de matières en suspension — Bereich der Ablagerungen von Sand und im wesentlichen Schwebstoffen
zone des dépôts temporaires de gravier et de sable — Bereich zeitweiliger Ablagerungen von Geschiebe und Sand

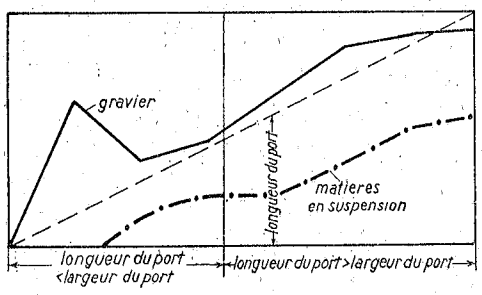
Abb. 4.

Bei Hafenbecken, deren Achse senkrecht zur Achse eines Flusses mit starker Geschiebe- und Schwebstofführung steht, ist die Größe der abgelagerten Teile vom Verhältnis der Breite des Hafenmundes zur Länge des Hafenbeckens abhängig (Abb. 6). Die Geschiebeablagerung nimmt bei kurzen Hafenbecken, bei denen die Hafenlänge kleiner als die Hafenbreite ist, rasch zu. Wird die Hafen-



axe du fleuve	Stromachse
tourbillon circulaire aval à l'entrée du port	Vorwalze
limite théorique du lit normal	Streichlinie
épi de déviation	Abweisbuhne
atterrissements } dans la nature	Verlandung } in Natur
courants } dans la nature	Strömung } in Natur

Abb. 5.



gravier	Geschiebe
longueur du port — largeur du port —	Hafenlänge — Hafenbreite —
matières en suspension	Schwebstoffe

Abb. 6.

länge größer als die Hafenbreite, ist der Zuwachs geringer, bis er sich einem Grenzwert nähert. Bei der Schwebstoffablagerung ist ein gleicher Vorgang zu erkennen, jedoch dringt die Menge der Schwebstoffe tiefer in das Hafenbecken ein und vermag die Hafeneinfahrt von innen nach außen zu verlanden. Die Unstetigkeiten im Verlauf der beiden Linienzüge sind verursacht durch die mit der Hafenlänge sich ungleichmäßig ändernde Geschwindigkeitsverteilung im Hafenmund und im Hafenbecken.

Von besonderer Bedeutung für die Ausdehnung der Ablagerungen kann die Hauptwindrichtung werden. Sie erzeugt bei Einfall des Windes parallel zur Hafenlängsachse an der Oberfläche eine Strömung nach dem Innern. An der Sohle strömt das am Hafenende gestaute Wasser nach dem Fluß zu ab. Es erfolgt ein Abwandern der noch nicht fest gewordenen Schwebstoffablagerungen aus dem Hafen nach dem Fluß. Eine Windrichtung von 45° stromabwärts zur Hafenlängsachse vermindert die Ablagerungsmenge durch Beschleunigung der Strömung in Richtung des Flusses. Die Windrichtung von 45° stromaufwärts zur Hafenlängsachse vermehrt das Einwandern der Geschiebe- und Schwebstoffteile durch Stauung des am Hafenmund vorbeiströmenden Flußwassers.

3. Lage und Richtung der Hafeneinfahrten.

Nur in wenigen Fällen ist es möglich, Lage und Richtung der Hafeneinfahrten so zu wählen, daß bei den günstigsten Schiffahrtsbedingungen auch die strömungstechnischen Voraussetzungen erfüllt sind. Eine wesentliche Bedingung ist es, die Hafeneinfahrt an einen von Anlandungen freien Ort des Flusses zu legen, bei dem ständig die genügende Fahrwassertiefe vorhanden ist.

In Flüssen mit starker Geschiebebewegung entspricht dem Kolk an einem Ufer die Anlandung am gegenüberliegenden Ufer. Bei wandernden Geschiebebänken wird selbst in Krümmungen das System von Kolk und Anlandung nahezu unverändert talwärts verschoben, so daß an einem Ort des rechten oder linken Ufers sich zeitweise ein Kolk, zeitweise eine Verlandung befindet. Für die ständige Freihaltung der Hafeneinfahrt ist es erforderlich, die wandernden Geschiebebänke flußaufwärts und flußabwärts der Hafeneinfahrt auf eine genügende Flußlänge durch Buhnen so festzulegen, daß die Hafeneinfahrt stets an einer Kolkstrecke liegt.

Bei einer durchlaufenden Geschiebebewegung zwischen parallelen Ufern ändern sich die großen Formen des Sohlenreliefs wenig. Aber auch hier bedarf es der Lenkung des Talwegs oberhalb und unterhalb der Hafeneinfahrt durch den Einbau von Buhnen. In Krümmungen mit einem Verhältnis des Radius r zur Breite des Flusses b bis etwa $r/b = 5$ wird im allgemeinen nur ein stabiler Kolk und eine korrespondierende Geschiebebank, wenn auch, durch die wechselnden Wasserstände verursacht, in unterschiedlichen Formen, Höhen und Tiefen sich einstellen. Die beste Lage einer Hafeneinfahrt ist in diesem Fall eindeutig am Orte des stabilen Kolkes gegeben. Bei Verhältnissen $r/b = 5$ können sich in Krümmungen mehrere unstabile Kolke und Anlandungen bilden. Die Form der Sohle muß auch hier durch Einbauten so festgehalten werden, daß die Zufahrt zum Hafenmund bei allen Wasserständen gesichert ist.

Für die Hafeneinfahrt wünscht die Schiffahrt eine möglichst große Breite. Die Voraussetzung für die wirtschaftliche Nutzung des Hafens ist die Offenhaltung der Hafeneinfahrt. Sie kann in geschiebeführenden Flüssen nur dadurch erreicht werden, daß die Verlandungen in der Hafeneinfahrt vermieden oder vermindert werden. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit, die Breite auf das äußerst notwendige Maß einzuschränken, das für ungehinderten zweischiffigen Verkehr mindestens 45 m beträgt. Jede Baggerung in einer Hafeneinfahrt bedeutet ein Schiffahrthindernis und schadet dem Hafenverkehr.

Das theoretische Optimum des Winkels zwischen Hafenlängsachse und Flußachse oder der Tangente am Schnittpunkt von Hafen und Flußachse soll etwa 30° sein. In den meisten Fällen wird der Abzweigwinkel aber durch andere Bedingungen, etwa wegen der Sicht oder wegen in der Nähe befindlicher Brücken und

Anlegestellen größer (nicht größer als 45°) oder kleiner gewählt werden müssen. In allen Fällen ist eine besondere Ausbildung der Hafeneinfahrt nicht zu umgehen, wobei die beiden Verkehrsrichtungen, zu Berg und zu Tal, für aus- und einfahrende Einzelfahrer oder Schleppzüge zu berücksichtigen sind.

4. Gestalt der Hafeneinfahrten und Maßnahmen gegen ihre Verlandung.

Die Gestalt der Hafeneinfahrten hängt bei geschiebeführenden Flüssen von den Maßnahmen gegen ihre Verlandung ab. Führt der Fluß nur Geschiebe ohne nennenswerte Schwebstoffmengen, so werden bei richtiger Lage der Hafeneinfahrt zu den stabilen tiefen Stellen des Talwegs nur wenige Teile des Geschiebes in die Drehwalze des Hafenmundes eingerissen. Das Geschiebe wandert an der Sohle in einer Spirale mit der Längsachse etwa parallel zur Flußachse vom tiefen Kolk seitlich ab nach der Anlandung des gegenüberliegenden Ufers. Es genügt in den meisten Fällen, den Hafenmund schmal zu halten. Durch zeitweise, nicht zu häufige Baggerungen läßt sich das grobe Sohlenmaterial entfernen.

Dieser Fall tritt selten ein. Meistens führt der Fluß besonders bei mittleren und höheren Wasserständen, außer dem sich an der Sohle bewegenden Geschiebe, Sand, der auch schwimmend bewegt werden kann, noch große Mengen von Schwebstoffen, die durch die Turbulenz der Flußströmung nahezu über die ganze Höhe des Flußquerschnittes verteilt sind. Sie kommen erst bei Verminderung der auf- und seitwärts gerichteten Vektoren der Turbulenz zur Ablagerung.

Die Maßnahmen zur Verbesserung der Hafeneinfahrt zielen darauf ab, die Strömungsverhältnisse so umzubilden, daß sich Geschiebe und Schwebstoffe nur in geringem Umfang und in einer für die Schiffahrt unschädlichen Form ablagern. Dies kann durch eine Ablenkung des schwereren Sohlengeschiebes mittels eines Abweisers an der oberen Trennspitze erfolgen. Es wird wegen der Schwebstoffe aber noch nötig, den Wasseraustausch zwischen Hafen- und Flußwasser durch Erzeugung einer rasch drehenden Vorwalze zu vermindern. Die Ausbildung solcher Hafeneinfahrten sei an folgenden Beispielen erörtert:

Abb. 7. Bei einer am inneren konvexen Ufer gelegenen Hafenmündung, bei der also schon ihre Anlage die starken Verlandungen der Abb. 4 erwarten ließ, wurde der Aufprall der Strömung auf das untere Ufer dadurch vermindert, daß das obere Stromufer auf eine Länge von 200 m und um 12 m am Hafenmund zurückverlegt, sowie die Winkelhalbierende zwischen Strom und Hafenufer als nach beiden Seiten lotrecht begrenzte Wand bis in Höhe des etwas über mittleren Abfluß liegenden Vorlandes ausgebildet wurde. Am unteren Ufer wird durch einen Sporn und eine Uferausbuchtung eine Vorwalze erzeugt, in der sich die festen und schwebenden Schwerstoffe ablagern und ohne Störung des Schiffahrtbetriebes entfernt werden können. Wegen der starken zu Berg und zu Tal gehenden Schiffahrt durfte der Hafenmund nicht weiter eingeengt werden, und der Abweiser an der oberen Trennspitze mußte in ganzer Ausdehnung bis nahe an den höchsten Schiffahrtswasserstand sichtbar sein.

Abb. 8. In einer scharfen Stromkrümmung mit $r = 750$ m und $b = 300$ m, also einem Verhältnis $r/b = 2{,}5$, liegt der Talweg fest an der linken Stromseite. Bei höheren Wasserständen wurden die ausgelegten Schiffahrtzeichen wegen der sehr großen Strömungsgeschwindigkeit oft abgetrieben oder unter den Wasserspiegel gedrückt. Die Hafeneinfahrt verlandete stark und nötigte zu häufigen Baggerungen.

Nach Modellversuchen im Flußbaulaboratorium Karlsruhe wurde die Form der Hafeneinfahrt durch eine 116 m lange Mole mit der Krone auf MW + 0,70 m und eine Veränderung des Leitwerks auf der linken Stromseite geändert. Hierbei wurde dieses Leitwerk auf eine Länge von 100 m unterbrochen, um in dem offenen Feld eine schwerstoffanziehende Vorwalze auszubilden. Die Form der Hafeneinfahrt bietet den ein- und ausfahrenden Schleppzügen keine Schwierigkeit mehr. In der 120 m breiten Hafeneinfahrt kann der bergwärts ausfahrende Schleppzug genügend aufdrehen, um stevenrecht auf den Strom zu treffen. Ein Ausscheren in den Strom ist kaum vorhanden. Die Verlandung in der Hafeneinfahrt ist gering geworden. Der weitaus größte Teil des Geschiebes, der Sand- und Schwebstoffe bleibt im Buhnenfeld liegen und kann ohne Störung der Schifffahrt entfernt werden.

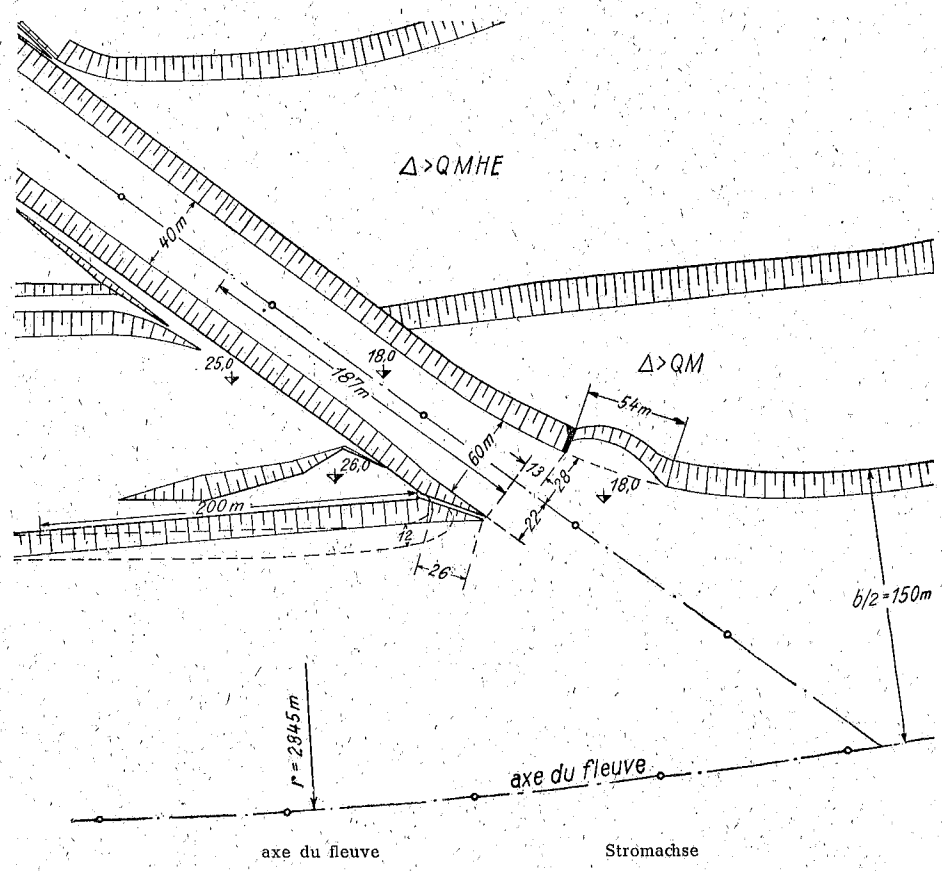
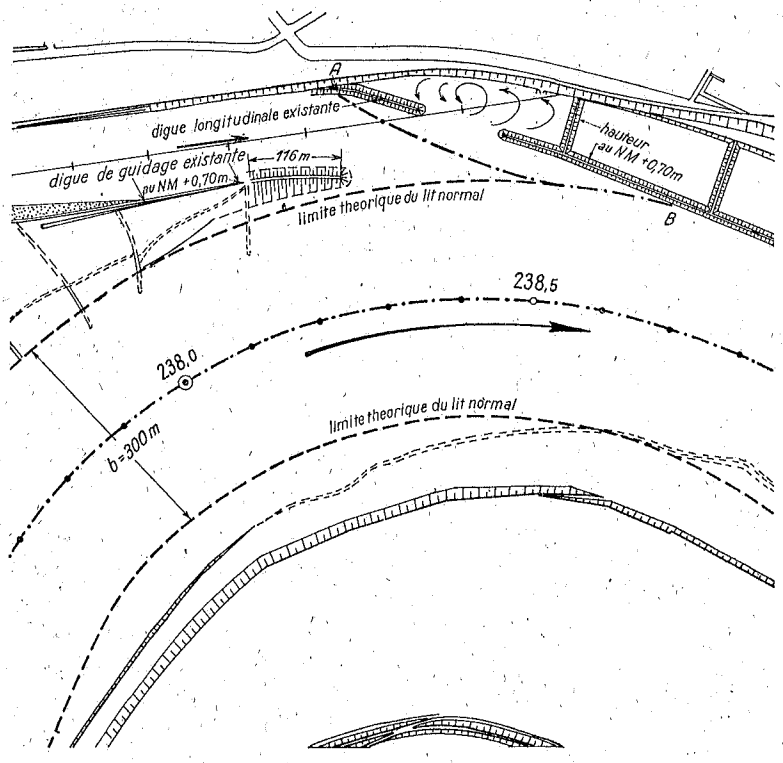


Abb. 7.

Abb. 9. In eine Krümmung vom Halbmesser r = 1370 m (r/b = 4,5) mündet ein Hafen in sehr spitzem Winkel ein. Die Einfahrt stromaufwärts ist durch die Brücke erschwert. Bei der Ausfahrt bergwärts wird der Schleppzug von der starken Strömung erfaßt und talwärts getrieben. Der Anhangkahn schießt weit in den Strom hinaus. Die Verlandung der Hafeneinfahrt ist besonders mit Schwebstoffen sehr störend. Die Breite des Hafenmundes darf wegen der Auf-

drehbewegung des Schleppzuges nicht unter 115 bis 120 m betragen. Dem Bergzug soll schon innerhalb des Totwassers möglich sein, stevenrecht in den Strom ausfahren zu können.

Aus diesen schiffahrtbetrieblichen Gesichtspunkten ergab sich die Grundrißform der Abb. 9 durch Modellversuche des Flußbaulaboratoriums Karlsruhe, wobei die Vorgänge bei der Ausfahrt eines Modellschleppzuges mit den Filmaufnahmen des Naturvorganges verglichen werden konnten und im Modell die Zeitweglinie am Bug und Heck des ausfahrenden Anhangkahnes festgestellt wurde.

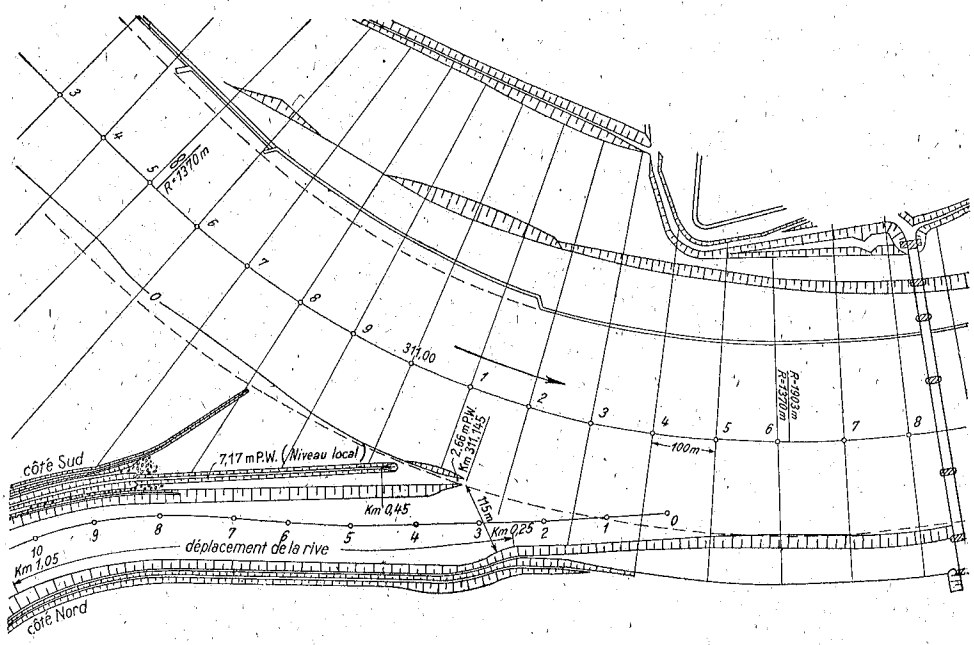


digue longitudinale existante	Vorhandenes Leitwerk
digue de guidage existante au NM	Vorhandenes Leitwerk auf MW
hauteur NM	Höhe auf MW
limite théorique du lit normal	Streichlinie

Abb. 8.

Die Grundrißform kam der Forderung nach geringer Verlandung entgegen. Die Abweisbuhne der stromaufwärts gelegenen Trennspitze mit der Krone auf + 2,66 a. P. (am Pegel) = MW + 1,36 m lenkt den Schwebstoffstrom ab und führt die Schwebstoffe einer langgestreckten Vorwalze zwischen Streichlinie und Ufer zu. Um die Verlandungen der Hafeneinfahrt durch Querströmungen bei den große Schwebstoffmengen führenden Hochwassermengen zu vermindern, wird der vorhandene Hochwasserdeich auf der Südseite bis nahe an die Trennspitze vorgezogen. Seine Krone liegt so hoch, daß sie nur bei den größten, etwa 50jährigen

Hochwassermengen überströmt wird. Auch bei Wasserständen zwischen + 2,66 m und 7,17 m a. P. werden die das Vorland überflutenden Wassermengen nach dem Strom abgelenkt und dadurch der ungünstige Einfluß der sehr breiten Hafeneinfahrt auf die Verlandung wesentlich vermindert.



Côté sud
déplacement de la rive
Côté nord

Südseite
Verlegung des Ufers
Nordseite

Abb. 9.