

PIANC•AIPCN
Schifffahrt, Häfen, Wasserstraßen



20.
Internationaler Schifffahrtskongress

Baltimore / USA (1961)
Deutsche Beiträge

Abteilung I — Binnenschifffahrt

Frage 1

Unter welchen Bedingungen ist der Bau neuer oder die Verbesserung bestehender Binnenschiffahrtstraßen wirtschaftlich gerechtfertigt? — Gesichtspunkte für die Wahl eines neuen Verkehrsweges: Wasserstraße, Eisenbahn, Straße und Rohrleitungen. — Auswirkungen auf das Hervorrufen neuer Wirtschaftstätigkeit unter Berücksichtigung der verschiedenen in Betracht kommenden Interessen. — Berücksichtigung des Falles, in dem die neue Wasserstraße dazu bestimmt ist, Gebiete zu erschließen, in denen die Verkehrsmöglichkeiten wenig entwickelt sind

Von Dipl.-Ing. Erich Seiler, Ministerialrat, Bundesministerium für Verkehr, Bonn, Dr. Arthur Birkendahl, Geschäftsführendes Präsidialmitglied des Zentral-Vereins für deutsche Binnenschifffahrt e. V., Beuel, Dr. Karl Förster, Professor, Universität München, Alfred Lange, Regierungsdirektor, Bundesministerium für Verkehr, Bonn, Dr. Gerhard Meyer-Osterkamp, Regierungsdirektor, Wasser- und Schifffahrtsdirektion Hamburg, Dr. Franz-Joseph Schroiff, Professor, Universität Münster/Westf.

Zusammenfassung

In der Einleitung wird darauf hingewiesen, daß sich die im Thema gestellten Fragen in allgemeiner Form nicht beantworten lassen. Dazu sind die mit dem Bau von Binnenschiffahrtstraßen verbundenen Verhältnisse zu verschiedenartig. Jeder Einzelfall muß besonders untersucht werden. In der Abhandlung kann daher nur die Problematik aufgezeigt werden, die mit dem Bau oder der Verbesserung von Binnenschiffahrtstraßen verbunden ist.

Im zweiten Abschnitt wird dazu auf die Abhängigkeit der Wasserstraßen und damit auch der Binnenschifffahrt von den natürlichen Gegebenheiten hingewiesen und auf die vielfältigen — auch außerverkehrlichen — Funktionen aufmerksam gemacht, die die Wasserstraßen im Gegensatz zu den Wegen anderer Verkehrsträger im Wirtschaftsleben zu erfüllen haben. Anschließend wird angedeutet, in welcher Weise durch technische Maßnahmen die wirtschaftliche Produktivität der Binnenschiffahrtstraßen verbessert werden kann.

Im dritten Abschnitt werden die ökonomischen Voraussetzungen und Grenzen für den wirtschaftlichen Einsatz der Binnenschifffahrt erläutert. Diese Voraussetzungen sind: Massenhaftigkeit des Verkehrs und große Transportentfernungen. Unter diesen Voraussetzungen ist die Binnenschifffahrt auf Grund ihrer arteigenen Bedingungen den anderen Verkehrsträgern gegenüber wirtschaftlich überlegen. Wasserstraßenbau und Binnenschifffahrt verstanden es, sich den Forderungen der Wirtschaft, die mit dem Aufschwung der Industrie und des Welthandels verbunden waren, anzupassen und auf diese Weise den obigen Voraussetzungen gerecht zu werden. Dadurch konnte die Binnenschifffahrt ihre Leistungen ständig steigern. Wasserstraßenbau und Binnenschifffahrt sind bestrebt, diese Entwicklung durch Rationalisierung, Typisierung und Klassifizierung weiter zu fördern. Wenn es gelingen würde, durch internationale Verbindungen die nationalen Wasserstraßennetze zu einem einheitlichen Netz internationaler Wasserstraßen zu verbinden, könnten die Voraussetzungen für den wirtschaftlichen Einsatz der Binnenschifffahrt und für die Produktivität der Wasserstraßen erneut wesentlich gesteigert werden.

Die ökonomischen Grenzen der Binnenschifffahrt liegen in der Fixkostenstruktur und der damit verbundenen starken Kostendegression des Schifffahrtsbetriebes. Es spricht viel dafür, daß der Bau von Rohrleitungen für den Mineralöltransport und die Ent-

wicklung der Atomenergie in begrenztem Umfange den Wasserstraßenverkehr zwar strukturell beeinflussen, eine Verminderung der Transportleistungen der Binnenschiffahrt jedoch nicht zur Folge haben werden. Es dürfte im Gegenteil mit der sich weiterhin steigenden Wirtschaftstätigkeit auch der Bedarf an Verkehrsleistungen für Massenguttransporte zunehmen.

Im vierten Abschnitt wird der vielfältige Einfluß der Binnenschiffahrtstraßen auf die wirtschaftliche Entwicklung der von ihnen berührten Räume untersucht. Die entscheidenden Faktoren der raumfüllenden Kraft der Binnenschiffahrtstraßen sind dabei neben dem Verkehr die außerverkehrlichen Faktoren Wasserwirtschaft und Energieerzeugung. Diesen beiden Faktoren haben die anderen Verkehrsträger nichts Gleichwertiges gegenüberzustellen. Dies ist der Grund, warum auch in Gebieten, die durch Eisenbahn und Straße bereits erschlossen sind, durch den Bau von Binnenschiffahrtstraßen latent vorhandene Ansatzpunkte neuer industrieller Entwicklung geweckt und zur Entfaltung gebracht werden können. Da das Zusammenwirken der drei Faktoren die Standortbedingungen der von Binnenschiffahrtstraßen berührten Räume in der vielfältigsten Weise verbessert, wird heute gerade in wirtschaftlich bereits entwickelten Staaten dem Bau von Binnenschiffahrtstraßen erhöhte Beachtung geschenkt. Dabei gelangt man zu der Erkenntnis, daß die ökonomische Belebung, die von der Binnenschiffahrtstraße ausgeht, durch das Zusammenwirken der drei Gestaltungsfaktoren nicht nur kumulativ, sondern progressiv vervielfältigt wird, d. h. auf der Multiplikatorwirkung der einzelnen Faktoren beruht.

Nach diesem Überblick über die Bedingungen, die für die wirtschaftliche Rechtfertigung des Baues neuer oder der Verbesserung bestehender Binnenschiffahrtstraßen berücksichtigt werden müssen, wird im fünften Abschnitt der rechnerische Nachweis der Wirtschaftlichkeit behandelt. Dabei wird zwischen volkswirtschaftlicher Produktivität und betriebswirtschaftlicher Rentabilität unterschieden. Bei der Ermittlung der volkswirtschaftlichen Produktivität sind alle Faktoren zu berücksichtigen, die eine Veränderung im Wirtschaftsgefüge des von der neuen Binnenschiffahrtstraße berührten Raumes hervorrufen. Für die Ermittlung der betriebswirtschaftlichen Rentabilität muß man sich dagegen, dem Prinzip der Eigenwirtschaftlichkeit der Verkehrsträger entsprechend, auf diejenigen Rechnungsgrößen konzentrieren, die sich aus der Verkehrsbedeutung der Wasserstraße ergeben. Hierbei kommt es entscheidend darauf an, den Anteil der Binnenschiffahrt an den Jahreskosten möglichst zutreffend zu ermitteln und unter Anwendung des Globalprinzips den zu erwartenden Mehreinnahmen an Schiffsabgaben gegenüberzustellen.

Werden jedoch durch den Ausbau der Binnenschiffahrtstraße gleichzeitig mehrere Interessen mit wirtschaftlichem Ertrag befriedigt, dann ist es angebracht, die Wasserstraße als wirtschaftliches Kuppelprodukt zu betrachten und die Ertragskraft der verschiedenen Interessen in einer Hand zu vereinigen. Hierfür hat sich die Gründung von Aktiengesellschaften als zweckmäßigste Lösung erwiesen.

In einem sechsten Abschnitt wird darauf hingewiesen, daß sich das Prinzip der Eigenwirtschaftlichkeit der Verkehrsträger nur bei kostendeckenden Frachten durchführen läßt. In einer wettbewerbsorientierten Verkehrswirtschaft kann dabei die regelnde Hand des Staates nicht entbehrt werden. Im übrigen aber erfassen die Ermittlungen der wirtschaftlichen Rentabilität von Binnenschiffahrtstraßen nur ein Teilproblem im Rahmen verkehrswirtschaftlicher Untersuchungen. Auch zahlreiche weitere Probleme üben auf die verkehrspolitischen Entscheidungen des Staates einen bestimmenden Einfluß aus. Der Bau einer Binnenschiffahrtstraße ist letzten Endes von einer verkehrspolitischen Entscheidung des Staates abhängig. Diese Entscheidung kann durch wirtschaftswissenschaftliche Untersuchungen zwar erleichtert, aber nicht ersetzt werden.

Inhalt

	Seite
I. Einleitung	12
II. Binnenschiffahrtstraßen und Binnenschiffahrt in ihrer Abhängigkeit von Natur und Technik	
1. Abhängigkeit von den natürlichen Gegebenheiten	12
2. Die technisch-wissenschaftliche Entwicklung des Wasserbaues und ihr Einfluß auf die wirtschaftliche Bedeutung der Wasserstraßen	
a) Die technisch-wissenschaftliche Entwicklung des Wasserbaues als eine Voraussetzung für die Entwicklung der Binnenschiffahrt zum Massengutverkehrsmittel	13
b) Regulierung von Flüssen	14
c) Kanalisierung von Flüssen	15
d) Bau von Kanälen	15
III. Die verkehrswirtschaftliche Bedeutung der Binnenschiffahrtstraßen	
1. Die Voraussetzungen für den wirtschaftlichen Einsatz der Binnenschiffahrt; ihre arzeigenen Bedingungen im Verhältnis zu denen der anderen Verkehrsträger	16
2. Die Verbesserung der Einsatzmöglichkeit der Binnenschiffahrt durch Rationalisierung, Typisierung und Klassifizierung sowie durch den Bau internationaler Verbindungen zwischen den nationalen Wasserstraßennetzen	16
3. Die ökonomischen Grenzen der Binnenschiffahrt und des Wasserstraßenbaues	18
4. Der Einfluß von Rohrleitungen und Atomenergie auf die Verkehrsleistungen der Binnenschiffahrt	19
IV. Die raumfüllende Kraft der Binnenschiffahrtstraßen	
1. Die Faktoren der raumfüllenden Kraft der Binnenschiffahrtstraßen	
a) Der Verkehr	20
b) Die Wasserwirtschaft	21
c) Die Energieerzeugung	22
2. Das Ausmaß der raumfüllenden Kraft der Binnenschiffahrtstraßen	23
3. Die wirtschaftsbelebende Kraft der Binnenschiffahrtstraßen als Folge der Multiplikatorwirkung der einzelnen Faktoren	24
V. Rechnerischer Nachweis der Wirtschaftlichkeit des Baues neuer oder der Verbesserung bestehender Binnenschiffahrtstraßen	
1. Allgemeines	25
2. Volkswirtschaftliche Produktivität	26
3. Betriebswirtschaftliche Rentabilität	28
a) Das Prinzip der Eigenwirtschaftlichkeit der Verkehrsträger	28
b) Die Jahreskosten	28
c) Der Ermittlung des Anteils der Binnenschiffahrt an den Jahreskosten einer Wasserstraße und deren Deckung	28
4. Die Binnenwasserstraße als wirtschaftliches Kuppelprodukt	29
VI. Die Binnenschiffahrt im Wettbewerb mit den anderen Verkehrsträgern	30
Schrifttumsverzeichnis	31

I. Einleitung

Die Frage, unter welchen Bedingungen der Bau neuer oder die Verbesserung bestehender Binnenschiffahrtstraßen wirtschaftlich gerechtfertigt ist, läßt sich nicht allgemein beantworten. Dazu sind die Verhältnisse in jedem Einzelfall zu verschieden. Der Zweck der vorliegenden Abhandlung wird es daher sein, die Problematik aufzuzeigen, die mit der Beurteilung der Wirtschaftlichkeit von Binnenschiffahrtstraßen verbunden ist. Dabei werden auch die Gesichtspunkte erörtert werden, die für die Wahl eines neuen Verkehrsweges maßgebend sein können. Es werden die Auswirkungen auf das Hervorrufen neuer Wirtschaftstätigkeit unter Berücksichtigung der verschiedenen in Betracht kommenden Interessen behandelt und es wird auch der Fall berücksichtigt werden, in dem die neue Wasserstraße dazu bestimmt ist, Gebiete zu erschließen, in denen die Verkehrsmöglichkeiten wenig entwickelt sind. Darüber hinaus aber werden zahlreiche weitere Fragen angeschnitten werden, um die Bedingungen für die wirtschaftliche Rechtfertigung von Binnenschiffahrtstraßen erschöpfend darzustellen. Dabei wird es sich zeigen, daß Wasserstraßen eine viel stärkere wirtschaftliche Strahlungskraft besitzen als andere Verkehrswege.

Das Verkehrswesen bildet eine der wesentlichen Komponenten jeder wirtschaftlichen Tätigkeit. Es befindet sich ebenso wie die Produktion selbst in ständiger Entwicklung. Es genügt daher nicht, sich auf die Betrachtung eines vorhandenen Zustandes zu beschränken, man wird sich vielmehr einer dynamischen Denkweise befleißigen müssen, um die Wandlungstendenzen auf den verschiedenen Gebieten des Verkehrs zu erkennen. Dabei werden die Gründe sichtbar werden, warum die Wasserstraßen in zunehmendem Maße gerade in industriell hochentwickelten und mit Eisenbahnen und Straßen wohl versehenen Gebieten an Bedeutung gewinnen und warum in unserem Zeitalter des Düsenflugzeugs und der Erdsatelliten auch der langsamste Verkehrsträger, die Binnenschiffahrt, in seinen Verkehrsleistungen zunimmt.

Der Verkehr ist kein Zweig der Produktion im üblichen Sinne. Marktwirtschaftliche Prinzipien lassen sich daher auf ihn nur bedingt anwenden. Ohne die regelnde Hand des Staates wird er nicht auskommen. Dies gilt auch für den Bau neuer und den Ausbau bestehender Binnenschiffahrtstraßen, deren Durchführung daher letzten Endes von einer politischen Entscheidung des Staates abhängig bleibt.

II. Binnenschiffahrtstraßen und Binnenschiffahrt in ihrer Abhängigkeit von Natur und Technik

1. Abhängigkeit von den natürlichen Gegebenheiten

Die Wasserstraßen und mit ihnen die Binnenschiffahrt sind von den natürlichen Gegebenheiten stärker abhängig als jede andere Verkehrsart. (1) Sie sind an bestimmte geographische Bedingungen gebunden, an das Vorhandensein von Flüssen und Seen und an die Eignung des Geländes für den Kanalbau. Es gibt Regionen, die mit natürlichen Wasserstraßen nicht bedacht sind, und es gibt Gebiete, deren natürliche Beschaffenheit den Kanalbau entweder technisch unmöglich macht oder aber ihn ökonomisch unsinnig werden läßt.

Die entscheidende Voraussetzung für den Bau einer Wasserstraße sind ausreichende Wassermengen, die entweder von Natur aus vorhanden sein müssen oder mit wirtschaft-

lich vertretbaren Mitteln beschafft werden können. Wasser ist aber gleichzeitig die Grundvoraussetzung für jedes Leben und für jede wirtschaftliche Tätigkeit des Menschen. Ist es daher vorhanden, dann beeinflusst es das Wirtschaftsleben in der mannigfachsten Weise. Daraus ergibt sich, daß es müßig ist, theoretische Vergleiche zwischen der wirtschaftlichen Zweckmäßigkeit verschiedener Verkehrswege anzustellen, ohne zu berücksichtigen, daß für die Anlage von Wasserstraßen Voraussetzungen gegeben sein müssen, die für andere Verkehrswege nicht erforderlich sind. Sind dagegen diese Voraussetzungen vorhanden, dann bietet eine Wasserstraße dank des Elementes Wasser wirtschaftliche Entwicklungsmöglichkeiten, die andere Verkehrswege zu bieten nicht in der Lage sind und die bei wirtschaftlichen Betrachtungen nicht außer Acht gelassen werden dürfen.

Auch Eisgang, Hochwasser und Nebel sind natürliche Gegebenheiten. Flüsse mit langen Eisperioden werden daher nur bedingt als Binnenschiffahrtstraßen geeignet sein. Andererseits bestehen meist übertriebene Vorstellungen über die Dauer der Behinderung, der die Schiffahrt in Westeuropa dadurch ausgesetzt ist. So haben z. B. langjährige Beobachtungsreihen ergeben, daß die Schiffahrt wegen Hochwasser, Eis oder Nebel am unteren Rhein im Durchschnitt nur 2 Tage/Jahr, am mittleren Rhein 11 Tage/Jahr und auf den westdeutschen Kanälen und dem Mittellandkanal 14—21 Tage/Jahr zum Erliegen kam.

In industriereichen Gebieten wird das Wasser durch die Einleitung industrieller Brauchwässer erwärmt. Dies führt zu einer erheblichen Verminderung der Eisbildung. Auch die anderen Verkehrsmittel werden durch die Unbilden der Witterung — allerdings soweit sie Verkehrsträger des Massenverkehrs sind, in einem geringeren Umfange — behindert. Außerdem fallen diese Behinderungen bei allen Verkehrsträgern im allgemeinen in Zeiten geringerer Beanspruchung. Diese relativ geringen Einflüsse sollen daher bei wirtschaftlichen Vergleichen unberücksichtigt bleiben. (1) (2)

Die Bindung an die Wasserläufe bringt es mit sich, daß sich die Binnenschiffahrt — von den Mündungsgebieten großer Ströme abgesehen — auf wenige Linien beschränken muß. Sie bedieht dabei von der Natur begünstigte und besonders bedeutsame Verkehrsbeziehungen. Sie ist daher ein ausgesprochenes Streckenverkehrsmittel. Trotzdem vermag sie dank ihres niedrigen Kostenniveaus eine Flächenwirkung zu entfalten, wie im Abschnitt IV dargelegt werden wird. Sie entwickelte sich zunächst in den Talebenen der Flüsse und Ströme, an denen von altersher die wirtschaftlichen, kulturellen und politischen Zentren entstanden sind.

2. Die technisch-wissenschaftliche Entwicklung des Wasserbaues und ihr Einfluß auf die wirtschaftliche Bedeutung der Wasserstraßen

a) Die technisch-wissenschaftliche Entwicklung des Wasserbaues als eine Voraussetzung für die Entwicklung der Binnenschiffahrt zum Massengutverkehrsmittel

Schon frühzeitig hat die Menschheit die Flüsse und Ströme als die von der Natur selbst dargebotenen Verkehrswege bevorzugt. (1) Dabei gaben sich die Schiffahrt-treibenden ursprünglich damit zufrieden, daß der Naturzustand der Flüsse die Grenzen ihrer Benutzbarkeit bestimmte. Auch Erfindungen, wie die der Kammerschleuse und Regulierungsmaßnahmen von lokaler Bedeutung, konnten diese Verhältnisse nicht entscheidend ändern. Unter diesen Umständen war es nicht verwunderlich, daß mit der Erfindung der Eisenbahn die damals kleineren Wasserstraßen ihre Bedeutung als Verkehrswege fast völlig verloren.

Diese technische Entwicklung hatte jedoch zur Folge, daß sich ebenso wie auf zahlreichen anderen Gebieten so auch im Verhältnis des Menschen zum Fluß ein grundlegender Wandel abzuzeichnen begann. Während sich der Mensch bisher vor dem Strom fürchtete und seine Maßnahmen sich in der Abwehr drohender Gefahren erschöpften, begann er nunmehr, sich mit den Gesetzen des strömenden Wassers zu beschäftigen. Dadurch gelang es ihm, dem Strom gegenüber zum Angriff vorzugehen, die lebendigen Kräfte des Wassers in feste Bahnen zu leiten und sie zum Segen der Menschheit dienstbar zu machen.

Mit den dazu erforderlichen Baumaßnahmen, die sich auf den Flußlauf in seiner ganzen Länge erstreckten, konnten die von der Natur für die Nutzungsmöglichkeit der Flüsse bisher gesetzten Grenzen in einem nicht für möglich gehaltenen Umfange erweitert werden. Dabei wurden die vielseitigen Aufgaben und Nutzungsmöglichkeiten der Wasserläufe im Rahmen des allgemeinen Wirtschaftsprozesses erkannt: Ihre überragende Funktion als Vorfluter, ferner neben ihrer Aufgabe als Verkehrsweg ihre Bedeutung für die Siedlungswasserwirtschaft, für Landwirtschaft und Industrie. Dazu trat später die Möglichkeit der Energieerzeugung. Erst dieser Entwicklung ist es zu verdanken, daß die Flüsse im Laufe der Zeit in den Zustand versetzt wurden, den wir heute an ihnen kennen und der sie zu einem Zivilisationsfaktor ersten Ranges für die Menschen gemacht hat. Diesen Weg ist der Wasserbau in allen zivilisierten Staaten der Welt gegangen. Auch in Gebieten, in denen er noch wenig entwickelt ist, wird er den gleichen Weg gehen müssen.

Durch die Reguliermaßnahmen an Strömen und Flüssen wurden gleichzeitig grundlegend neue Bedingungen für den wirtschaftlichen Einsatz der Binnenschifffahrt geschaffen. Sie konnte mit wesentlich größeren Schiffsgefäßen als früher verkehren und fand gleichmäßigere Fahrwasserverhältnisse vor. Da zur gleichen Zeit der Aufschwung der Industrie und des Seehandels nach einem billigen Transportmittel für Massengüter verlangte, eröffneten sich der Binnenschifffahrt neue Einsatzmöglichkeiten, die sie der Eisenbahn gegenüber wieder konkurrenzfähig machten. Seit dieser Zeit hat sich die Binnenschifffahrt in der Verkehrswirtschaft einen bedeutenden Platz erobert. Es gelang ihr, der wirtschaftlichen und industriellen Entwicklung zu folgen und ihre Verkehrsleistungen stetig zu steigern, obwohl auch die Netze der anderen Verkehrsträger inzwischen ausgebaut worden waren.

Die Erkenntnis der überragenden Funktion des Flusses als Vorfluter seines Einzugsgebietes zwang dazu, die mit dem Wasserlauf verbundenen zahlreichen Nutzungsmöglichkeiten dieser Grundfunktion des Flusses unterzuordnen. Auch die Aufgabe des Flusses, der Binnenschifffahrt als Fahrzeug zu dienen, wurde dabei nur als eine — wenn auch sehr bedeutende — Nutzungsart des Flusses erkannt. Die Sicherung der Vorflut aber ist eine echte Hoheitsaufgabe des Staates. Er mußte daher den Ausbau der Flüsse in seine Hand nehmen und dabei im Interesse der Allgemeinheit um einen möglichst harmonischen Ausgleich der verschiedenen Interessen am Wasserlauf bemüht bleiben.

b) Regulierung von Flüssen

In fast allen Ländern, in denen die Binnenschifffahrt entwickelt ist, bilden die Ströme und Flüsse die wichtigsten Binnenschifffahrtstraßen. Diese müssen zunächst unabhängig von den Belangen der Schifffahrt im Interesse der Vorflut auf Mittelwasser reguliert werden. Dadurch werden auch ihre Ufer einer industriellen Besiedlung erst erschlossen. Es gibt Ströme, die dank der Größe ihres Abflußprofils und der Mächtigkeit ihrer Wasserführung weitergehender Maßnahmen im besonderen Interesse der Schifffahrt nicht mehr bedürfen. Sind jedoch die Wasserverhältnisse sehr ungleichmäßig und verlangt die

Schiffahrt auch bei niedrigen Wasserständen ein gleichmäßiges und ausreichend tiefes Fahrwasser, dann ist es am billigsten und für die Schiffahrt am vorteilhaftesten, das Fahrwasser innerhalb des Mittelwasserbettes auch für niedrige Wasserstände durch Buhnen und Längswerke zu regulieren, dadurch Engstellen und Versandungen zu beseitigen und das Fließgefälle zu vergleichmäßigen. Für diese Methode des Flußausbaues bieten im allgemeinen die Flußniederungen der Ströme die besten Bedingungen. An ihren Oberläufen und ihren Nebenflüssen werden die Möglichkeiten jedoch geringer, mit diesen Maßnahmen die für die Großschiffahrt erforderlichen Fahrwasserverhältnisse zu schaffen.

c) Kanalisierung von Flüssen

Wenn das Fließgefälle zu groß ist oder die Wasserführung nicht mehr ausreicht, muß man daher zum Mittel der Kanalisierung greifen, um dadurch auch Wasserläufe geringerer Mächtigkeit der Großschiffahrt als Verkehrswege zu erschließen. Gleichzeitig wird es dadurch möglich, an den Staustufen Wasserkraftanlagen zur Energieerzeugung zu errichten. Außerdem können durch die Stauhaltungen die Grundwasserstände im Flußtal günstig beeinflußt werden. Die Kanalisierung eines Flusses ist daher geeignet, zugleich den Interessen der Schiffahrt, der Energieerzeugung und der Landwirtschaft zu dienen.

In neuerer Zeit können wir beobachten, daß das Interesse an Energie aus Wasserkraft so groß ist, daß auch Ströme, die der Schiffahrt im freien Zustand ausreichende Fahrwasserverhältnisse bieten (wie z. B. die Wolga, die Donau u. a.), allein im Interesse der Energieerzeugung durch Einbau von Stauwerken kanalisiert werden.

d) Bau von Kanälen

Wenn es gilt, Wirtschaftszentren, die nicht durch eine natürliche Wasserstraße begünstigt sind, an das Binnenwasserstraßennetz anzuschließen oder mit der Meeresküste zu verbinden, muß man zum Bau von Kanälen schreiten. Außerdem dienen Kanäle dazu, natürliche Wasserstraßen und deren Wirtschaftsgebiete miteinander zu verbinden. Mit relativ kurzen Kanälen können dabei mehrere Wirtschaftsräume zusammengeschlossen und das Betätigungsfeld der Binnenschiffahrt kann dadurch außerordentlich erweitert werden. Das beste Beispiel im deutschen Raum bildet hierfür der Mittellandkanal, der die Stromgebiete des Rheins, der Weser und der Elbe und im Zusammenhang mit den Wasserstraßen östlich Berlins auch das der Oder miteinander verbindet. Das klassische Beispiel im europäischen Sinne bildet ferner die Rhein-Main-Donau-Großschiffahrtstraße. Hier würde durch den Bau eines Kanals von nur 166 km Länge das Rheinstromgebiet mit dem Donaunraum verbunden und dadurch eine durchgehende Wasserstraße von 3400 km Länge geschaffen werden können. Kanäle sind daher in ihrer wirtschaftlichen Bedeutung niemals isoliert, sondern stets nur im Zusammenhang mit dem Wasserstraßennetz zu betrachten, das zu befruchten ihre Aufgabe ist.

Auch Kanäle sind geeignet, nicht nur den Interessen der Schiffahrt zu dienen. Sie bilden gleichzeitig ein gewaltiges Wasserreservoir, das in großem Umfange zur Wasserversorgung der an ihren Ufern angesiedelten Industrie und Siedlungen herangezogen wird, (3)

Bei der Anwendung jeder der drei technischen Methoden für den Ausbau oder die Verbesserung einer Binnenschiffahrtstraße sind daher neben der Funktion als Verkehrsweg zahlreiche unmittelbare Wirkungen auf Wirtschaft und Industrie zu berücksichtigen, die für die Beurteilung der Wirtschaftlichkeit der Infrastrukturmaßnahmen von großer Bedeutung sein können.

III. Die verkehrswirtschaftliche Bedeutung der Binnenschiffahrtstraßen

1. Die Voraussetzungen für den wirtschaftlichen Einsatz der Binnenschiffahrt; ihre arteilgenen Bedingungen im Verhältnis zu denen der anderen Verkehrsträger

Jeder Verkehrsträger ist ökonomischen Bedingungen unterworfen, die ihm arteilgen sind. Durch diese Bedingungen werden die Grenzen bestimmt, innerhalb deren sein Einsatz wirtschaftlich gerechtfertigt ist. Für die Binnenschiffahrt und für den Bau von Binnenschiffahrtstraßen ist in der Verkehrswirtschaft dort Raum, wo über größere Entfernungen überragende Verkehrsspannungen an Massengütern bestehen. (4) Bei solchem massenhaften Verkehr über weite Entfernungen ist die Binnenschiffahrt den anderen Verkehrsmitteln dann wirtschaftlich überlegen, wenn es der verladenden Wirtschaft bei der Transportdurchführung weniger auf die Erreichung eines Zeitminimums als auf die Erreichung des Kostenminimums ankommt, d. h. wenn die Transporte nicht besonders eilig sind, aber billig durchgeführt werden sollen; denn die Binnenschiffahrt ist den Verkehrsträgern Schiene und Straße gegenüber ein relativ langsames Verkehrsmittel.

Im allgemeinen wird dem Verkehr die Aufgabe gestellt, den Raum mit einem Minimum an Zeit und Kosten zu überwinden. Wenn es dabei gilt, Verkehrsbedürfnisse zu befriedigen, bei denen die Beschleunigung der Transportdurchführung so hoch bewertet wird, daß man bereit ist, das Zeitminimum unter Inkaufnahme erhöhter Kosten zu erreichen, scheidet die Binnenschiffahrt aus. Sie bietet sich dagegen um so mehr an, je mehr es der verladenden Wirtschaft auf das Kostenminimum ankommt und das Zeitmoment bei guter Bevorratung und bei Disposition auf lange Sicht eine relativ untergeordnete Rolle spielt. Es gibt Fälle, in denen der Wirtschaft sogar an einer möglichst langsamen Beförderung gelegen ist, wo das Schiff während der Reise ein schwimmendes Lager darstellt, in dem die Ware ohne besondere Lagerkosten zu verursachen während der Reise sicher aufbewahrt ist. Überall ferner, wo es in der Produktion oder in den Seehäfen große Verkehrsstöße und Verkehrszusammenballungen aufzufangen oder zu entwirren gilt, wird von der Wirtschaft die langsame Binnenschiffahrt mit ihren großen Transportgefäßen und ihren langen Lade- und Löschriften als elastisches Glied in dem Transportmechanismus bevorzugt. In allen diesen Fällen kann die Binnenschiffahrt dank ihrer arteilgenen Bedingungen mit niedrigen Kosten arbeiten und deshalb die billigste Beförderungsart für die Wirtschaft sein.

Die arteilgenen Bedingungen der Binnenschiffahrt im Verhältnis zu denen der anderen Verkehrsträger sind die folgenden:

Beim Binnenschiff ist das Verhältnis zwischen Nutzlast zu Totlast am günstigsten. Das Binnenschiff erfordert den geringsten Kapitalaufwand und die geringsten Unterhaltungskosten je Ladungseinheit bei erheblich höherer Lebensdauer. Die Binnenschiffahrt hat den geringsten Brennstoffverbrauch je Leistungseinheit wegen der geringsten Reibungswiderstände der Schiffsgefäße im Wasser und der besonders günstigen Ausnutzung der Zugkraft. Ebenso ist der Personalaufwand im Schiffsverkehr am geringsten. Schließlich kann auf vergleichbaren Strecken die Binnenschiffahrt überwiegend mit geringeren Wegekosten je Leistungseinheit infolge der geringeren Kapitalintensität des Fahrweges und seiner niedrigen Kosten für Unterhaltung und Erneuerung rechnen. (5) (2) (4)

2. Die Verbesserung der Einsatzmöglichkeit der Binnenschiffahrt durch Rationalisierung, Typisierung und Klassifizierung sowie durch den Bau internationaler Verbindungen zwischen den nationalen Wasserstraßennetzen

Je stärker sich ein Land industriell entwickelt, je intensiver seine Handelsbeziehungen werden und je mehr sich der Produktionsprozeß in der Industrie differenziert, um so größer wird der Bedarf an Massengütern und an Transportleistungen. Es ist daher nicht

verwunderlich, daß allenthalben in der Welt — besonders aber bei den Ländern, deren industrielle Entwicklung rasche Fortschritte macht — dem Ausbau von Wasserstraßen und der Entwicklung der Binnenschifffahrt erhöhte Aufmerksamkeit zugewendet wird. (6) So sind z. B. in den letzten Jahrzehnten in den Vereinigten Staaten von Amerika große Aufwendungen für den Ausbau und die Verbesserung künstlicher Wasserstraßen und in gleicher Weise für Flußregulierungsarbeiten gemacht worden. Insgesamt verfügen die Vereinigten Staaten heute über 28 950 Meilen ausgebauter Wasserwege. Der Verkehr auf diesen Wasserstraßen ist enorm gestiegen, nämlich von rd. 96 Md. t-Meilen in 1939 auf 217 Md. t-Meilen in 1955. Diese 217 Md. t-Meilen stellten aber nur 28 % der Güterbeförderung der Eisenbahn dar, d. h. also, die Bahnen erfüllen nach wie vor eine gewaltige Aufgabe und werden dies auch in Zukunft tun.

Rußland hat von 1913 bis 1956 die Länge seiner schiffbaren Flüsse und Kanäle von 64 600 km auf 132 300 km verdoppelt. Die gewaltigen Anstrengungen auf diesem Gebiet sowohl im europäischen wie im asiatischen Teil dieses Reiches sind bekannt.

Die Länge des Wasserstraßennetzes in der Bundesrepublik Deutschland beträgt 4300 km. Die Bundesbahn verfügt dagegen über ein Schienennetz von 30 500 km und der Kraftwagen über ein Straßennetz (einschl. der Landstraßen 2. Ordnung) von 131 500 km. Das sind große Unterschiede. Die Leistungen hingegen, die auf diesen Verkehrswegen erbracht werden, verhalten sich völlig anders.

Im Jahre 1959 wurden von den 3 Verkehrsträgern Binnenschifffahrt, Schiene und Straße insgesamt 113,506 Milliarden tkm an Verkehrsleistungen vollbracht. Davon leisteten	
die Binnenschifffahrt	33,098 Milliarden tkm = 29,2 %
die Bundesbahn	59,856 Milliarden tkm = 52,7 %
der gewerbliche Güterfernverkehr	
einschl. Werkfernverkehr	20,552 Milliarden tkm = 18,1 %

Fast ein Drittel der gesamten Verkehrsleistung entfällt somit auf die Binnenschifffahrt, die mehr als die Hälfte der Bundesbahn und fast das Doppelte des Kraftwagens im Fernverkehr leistete.

Wegen der geringeren Gesamtlänge der Binnenschifffahrtstraßen ist die durchschnittliche Verkehrsdichte je Streckeneinheit des Verkehrsnetzes im Güterverkehr auf den Binnenschifffahrtstraßen mindestens 3,5mal so hoch wie bei der Bundesbahn. (1)

Dieser Aufschwung und diese großen Verkehrsleistungen wurden nur möglich, weil man es im Wasserstraßenbau und bei der Binnenschifffahrt verstanden hat, sich den wachsenden Anforderungen der Wirtschaft anzupassen.

Längst hat die Binnenschifffahrt den Zustand überwunden, daß sie sich in ihren Schiffsgefäßen und Verkehrsbeziehungen auf bestimmte Flußgebiete beschränkt. Durch die Schaffung zusammenhängender Wasserstraßennetze konnte sie ihre Transportentfernungen erheblich vergrößern. Die Verbesserung des Ausbauzustandes der Wasserstraßen gestattete ihr ferner den Einsatz größerer Transportgefäße. Dadurch konnte den für die Wirtschaftlichkeit des Binnenschifffahrtsverkehrs unerläßlichen Voraussetzungen entsprochen werden: Massenhaftigkeit des Verkehrs und ausreichende Transportentfernung.

Nach dem zweiten Weltkrieg ist ferner bei der Schifffahrt im Zuge der Motorisierung zu dem Schleppkahn in zunehmendem Maße der Selbstfahrer getreten. (7) Dadurch stieg z. B. die spezifische jährliche Verkehrsleistung der deutschen Binnenflotte in der Zeit von 1927 bis 1957 von 2594 tkm je t Tragfähigkeit auf annähernd 5000 tkm je t Tragfähigkeit, sie hat sich also im Laufe dieser Zeit verdoppelt. (2) Gleichzeitig konzentriert sich die Binnenschifffahrt bei ihren Neubauten auf wenige Schiffstypen, die den Fahrbedingungen der Wasserstraßen möglichst günstig angepaßt sind. Neuerdings beginnt

sich auf den europäischen Wasserstraßen auch die Schubschiffahrt zu entwickeln, die in Amerika und Rußland schon seit langem angewendet wird. Mit der Einführung der Schubschiffahrt bzw. des schiebenden Selbstfahrers können weitere Rationalisierungserfolge erreicht werden: Eine Verminderung der Besatzungsstärke bei Verbesserung der sozialen Bedingungen, verminderter Kraftstoffverbrauch, bessere Manövrierfähigkeit und im Zusammenhang mit Radar die Einführung der Nachtschiffahrt. Die Unabhängigkeit des Schubbootes von den Leichtern gestattet es, das Schubboot wirtschaftlicher auszunutzen und die Verladerschaft individueller zu bedienen. Unter entsprechenden Bedingungen ist daher die Schubschiffahrt geeignet, die Produktivität der Binnenschiffahrt zu erhöhen und die Selbstkosten zu senken. Diejenigen Länder, in denen sich eine organisierte Frachtschiffahrt neu entwickeln soll, sollten daher bei Vorhandensein entsprechender Bedingungen den schiebenden Selbstfahrer oder die Schubschiffahrt mit berücksichtigen.

Ebenso wie sich die Binnenschiffahrt auf diese Weise durch Rationalisierung und Typisierung der Entwicklung im Verkehrswesen anzupassen vermochte, konnten auch auf dem Gebiete des Wasserstraßenbaues in Europa in den letzten Jahren große Fortschritte im Hinblick auf die Schaffung eines nach einheitlichen Grundsätzen ausgebauten Wasserstraßennetzes erzielt werden. Die Konferenz der Europäischen Verkehrsminister hat hierzu eine Klasseneinteilung der Wasserstraßen durchgeführt und Mindestnormen für den künftigen Ausbau von Wasserstraßen von europäischem Interesse beschlossen. (8) Außerdem hat diese Konferenz eine Liste von 12 Wasserstraßenprojekten aufgestellt, deren Verwirklichung als im europäischen Interesse gelegen bezeichnet wurde.

Mit diesen Maßnahmen wurden zum ersten Male in der Geschichte der europäischen Wasserstraßen international anerkannte einheitliche Grundsätze für diese Wasserstraßen aufgestellt. Im Zusammenhang mit der Festlegung bestimmter Schiffstypen ist damit die Möglichkeit geboten, ein nach einheitlichen Grundsätzen ausgebautes europäisches Wasserstraßennetz zu entwickeln, das von Schiffsgefäßen befahren wird, die den dadurch gebotenen Bedingungen des Fahrweges wirtschaftlich möglichst günstig angepaßt sind.

Bei den 12 Projekten von europäischem Interesse handelt es sich größtenteils um die noch fehlenden Verbindungen zwischen den Wasserstraßennetzen der westeuropäischen Länder und zwar insbesondere um die Verbindung zwischen den Stromgebieten des Rheins, der Rhone und der Donau. Dieses Netz der europäischen Wasserstraßen würde die wichtigsten Rohstoff- und Industriegebiete, die Seehäfen und die Zentren des Konsums miteinander verbinden und jenen internationalen Charakter erhalten, der im Interesse eines vereinigten europäischen Wirtschaftsgebietes für erforderlich gehalten wird. Auch bei der Wirtschaftskommission für Europa sind Verhandlungen darüber eingeleitet worden, unter Anwendung der gleichen Prinzipien die osteuropäischen Wasserstraßen zu entwickeln und ebenfalls an das westeuropäische Netz anzuschließen.

Mit der Verwirklichung auch nur eines Teiles dieser Projekte würden sich der Binnenschiffahrt abermals eine gewaltige Erweiterung ihres Wegenetzes und die Bedienung neuer Transportverbindungen für Massengüter bieten. Dies würde erneut zu einem erheblichen Aufschwung ihrer Transportleistungen führen und ihre Produktivität weiterhin verbessern.

Aber selbst ohne die Verwirklichung dieser Projekte werden der Binnenschiffahrt für die nächste Zukunft günstige Prognosen gestellt. (9)

3. Die ökonomischen Grenzen der Binnenschiffahrt und des Wasserstraßenbaues

Mit den Voraussetzungen für den wirtschaftlichen Einsatz der Binnenschiffahrt werden gleichzeitig auch deren ökonomische Grenzen angedeutet.

Die Massenhaftigkeit führt bei den hohen, vom Verkehrsumfang unabhängigen fixen Kosten zur Ausnutzung der Kostendegression. Nur bei Massengütern fallen so große Mengen an, daß die Kapazität der Schiffsgefäße ausgenutzt wird. Bei zu geringer Verkehrsdichte ist die Kostenverteilung auf die Leistungseinheit dagegen zu ungünstig. Mit zunehmender Ausnutzung sinken jedoch die dem Einzeltransport anzulastenden überwiegend festen Kosten. Daher können die Frachten bei gleicher Rentabilität mit jeder Steigerung des Verkehrs ermäßigt werden. Dies wirkt sich günstig auf die Nachfrage nach massenhaft anfallenden Gütern aus, weil diese Massengüter wegen ihres niedrigen Preises je Mengeneinheit, also ihres hohen Frachtkostenanteils am Preis des Bestimmungsortes, besonders auf die Höhe der Transportpreise reagieren.

Zu dieser Fixkostenstruktur und der damit verbundenen starken Kostendegression des eigentlichen Schiffahrtsbetriebes kommt nun noch die Fixkostenstruktur der Binnenschiffahrtstraße als Verkehrsweg hinzu. Die Kosten des Betriebes, der Unterhaltung und Erneuerung der Wasserstraßen sowie die Kosten der Kapitalverzinsung sind zu einem ganz erheblichen Teil unabhängig von der Ausnutzung der Wasserstraße. Der Anteil der fixen Kosten und damit die Kostendegression der Wasserstraße ist sehr groß. Nur bei hoher Verkehrsfrequenz kommt wegen dieser doppelten Kostendegression die Überlegenheit der Binnenschiffahrt zur Geltung.

Zur vollen Wirkung kommt diese ökonomische Überlegenheit gegenüber anderen Verkehrsmitteln, wenn zur Massenhaftigkeit noch die zweite Voraussetzung, die ausreichende Transportentfernung, gegeben ist. Diese macht die Umlegung der relativ hohen, von der Transportweise unabhängigen Kosten der Be- und Entladung sowie der Transportvorbereitung auf möglichst viele Leistungseinheiten (tkm) möglich. Sowohl die Kosten des Binnenschiffahrtsbetriebes als auch die Wegekosten sinken bei gegebenen Anlagen nicht nur mit zunehmender Verkehrsdichte, sondern auch mit zunehmender Entfernung. Die Kosten werden auf die Leistungseinheit bezogen immer geringer, je größer die Transportentfernung ist. Die umladefreie Verlängerung der Transportwege der Binnenschiffahrt wirkt sich daher zu Gunsten des ökonomischen Einsatzes der Binnenschiffahrt aus, sei es nun, daß diese Verlängerung der Transportwege durch die Kanalisierung der Oberläufe der Flüsse oder durch den Bau von künstlichen Wasserstraßen als Anschluß- und Verbindungsstrecken zu den natürlichen Wasserstraßen als Anschluß- und Verbindungsstrecken zu den natürlichen Wasserstraßen erfolgt. Besonders günstig würde sich daher die Verwirklichung internationaler Projekte auswirken, die die Verbindung der nationalen Wasserstraßennetze zu einem zusammenhängenden Netz internationaler Wasserstraßen zum Ziele haben.

4. Der Einfluß von Rohrleitungen und Atomenergie auf die Verkehrsleistungen der Binnenschiffahrt

In jüngster Zeit wird in der verkehrspolitischen Diskussion die Frage erörtert, ob die mit dem Bau von Rohrleitungen oder der Entwicklung von Atomkraftwerken verbundenen strukturellen Veränderungen in der Nachfrage nach Massengütern die Entwicklung der Verkehrsleistungen der Binnenschiffahrt ungünstig beeinflussen könnten. Eingehende Untersuchungen haben jedoch gezeigt, daß sich dadurch zwar in der Zusammensetzung der von der Binnenschiffahrt zu befördernden Güter möglicherweise gewisse Änderungen ergeben könnten, das Güteraufkommen insgesamt aber nicht abnehmen, sondern im Gegenteil weiterhin zunehmen dürfte. Bei kluger Organisation sollte es der Binnenschiffahrt dabei auch möglich sein, sich der Veränderung der Verhältnisse anzupassen und einen entsprechenden Ausgleich zu verschaffen.

Gerade bei der Beurteilung der mit diesen Problemen zusammenhängenden Verhältnisse zeigt es sich wieder, daß eine statische Betrachtungsweise leicht zu falschen Schlußfolgerungen führen kann, weil es sich hier um einen dynamischen Wirtschaftsprozeß

handelt. Es spricht manches dafür, daß die Entwicklung ähnlich verlaufen wird, wie in den zwanziger Jahren, als die großen Überlandleitungen und Ferngasleitungen gebaut wurden und man um das Verkehrsgut der Massengutverkehrsträger bangte. Genau das Gegenteil ist eingetreten. Im Zuge der wirtschaftlichen Weiterentwicklung stieg die Nachfrage nach Massengutverkehrsleistungen. In diesem Zusammenhang ist das Ergebnis der Untersuchungen des Ifo-Instituts beachtlich. (9) Unter Berücksichtigung der Pipeline-Entwicklung kommt dieses Institut zu dem Ergebnis, daß die Transportleistung der drei Binnenverkehrsträger auch in Zukunft um jährlich mehr als 2% zunehmen wird. Dabei wird sich interessanterweise der Anteil der Binnenschifffahrt am gesamten Transportvolumen noch vergrößern.

Zweifellos ist der Transport von Mineralölen durch Rohrleitungen jeder anderen binnenländischen Transportart dieses Gutes wirtschaftlich überlegen. Die Binnenschifffahrt wird daher in absehbarer Zeit den größten Teil der Rohöltransporte von den Seehäfen zu den Raffinerien verlieren. Andererseits werden die Transportmengen an für den Pipelinetransport weniger geeigneter sog. „weißer Ware“ erheblich zunehmen und wegen des wahrscheinlich ständig steigenden Mineralölbedarfs dadurch einen gewissen Ausgleich schaffen.

Nach bisher durchgeführten Untersuchungen wird ferner der Bau von Atomkraftwerken in absehbarer Zeit keinen Einfluß auf die Energieerzeugung aus den klassischen Energieträgern ausüben und somit insbesondere nicht zu einer Verminderung der Kohlentransporte führen. Vielmehr wird sich die Atomenergie erst langsam entwickeln. (10) Außerdem ist zu bedenken, daß nur ein verhältnismäßig geringer Teil der transportierten Kohlenmengen zur Erzeugung elektrischer Energie in den an Wasserstraßen gelegenen Dampfkraftwerken benötigt wird, der weitaus größte Teil jedoch für die Haushalte, die Gaswerke, den industriellen Produktionsprozeß und für die chemische Industrie auch weiterhin unentbehrlich ist.

Mit der raschen Steigerung der Einfuhr an Mineralölen und der noch immer stetig wachsenden Zunahme des Energiebedarfs wird aber eine weitere Steigerung der industriellen Produktion Hand in Hand gehen. In der Intensivierungsperiode der Weltwirtschaft, in der wir uns jetzt befinden, wird daher auch in Zukunft die Dichte des Verkehrs an Massengütern zunehmen. Damit treten zu den Relationen, die wegen ihrer schon vorher erreichten Verkehrsdichte für den Wasserstraßenverkehr bereits reif waren, neue Relationen, die nun in eine solche Verkehrsdichte hineinwachsen, daß sie nach dem Ausbau von Binnenschifffahrtstraßen verlangen und diesen ökonomisch auch rechtfertigen. Es wäre daher gänzlich verfehlt, auf Grund der sicherlich großen Zukunftsbedeutung der Atomenergie und der Errichtung von Pipelines die weitere Entwicklung der Binnenschifffahrtstraßen zu vernachlässigen. Der strukturelle Wirtschaftsaufstieg wird vielmehr von einem Wachstum auch des Verkehrsbedarfs, und insbesondere des Verkehrsbedarfs an Massengütern, begleitet sein, zu dessen Bewältigung erhöhte Anstrengungen, nicht zuletzt der Binnenschifffahrt selbst, geboten sind. (10)

IV. Die raumfüllende Kraft der Binnenschifffahrtstraßen

1. Die Faktoren der raumfüllenden Kraft der Binnenschifffahrtstraßen

a) Der Verkehr

Ihren arteilgenen Bedingungen entsprechend ist der günstigste Boden für den wirtschaftlichen Einsatz der Binnenschifffahrt überall dort zu finden, wo es gilt, Verkehrsspannungen für den Transport von Massengütern auszugleichen. Diese Spannungen kön-

nen offen zutage liegen wie z. B. in den Verkehrsrelationen zwischen den Seehäfen und den Agglomerationszentren der Industrie und des Konsums. Hier entfaltet die Binnenschifffahrt ihre volle Stärke, auch wenn sie dabei — den natürlichen Gegebenheiten entsprechend — im Gegensatz zu Schiene und Straße auf einen Linienverkehr und auf die Bedienung nur einer verhältnismäßig geringen Anzahl von Plätzen angewiesen ist.

Verkehrsspannungen für Massengüter können aber auch latent oder nur in Ansatzpunkten vorhanden sein. Werden Gebiete dieser Art durch den Bau von Binnenschiffahrtstraßen dem Binnenschiffsverkehr erschlossen, dann ist ein plötzliches Aufbrechen dieser Spannungen zu beobachten. Diese Erscheinung ist bei allen bisher in der Bundesrepublik Deutschland gebauten Binnenschiffahrtstraßen immer wieder beobachtet worden. Die Folge davon ist, daß nach der Fertigstellung neuer Großschiffahrtstraßen — oder auch nur von Teilstrecken — jedes Mal die tatsächlich eingetretene Verkehrsentwicklung die Vorausschätzungen um ein Mehrfaches übertroffen hat. Dabei sind neue Agglomerationszentren industrieller Entwicklung entstanden: Der Industrieraum um Frankfurt a. M. durch die Kanalisierung des Untermains und das Industriegebiet bei Peine und Salzgitter durch den Mittellandkanal sind hierfür die besten Beispiele. Ebenso aber beobachten wir, daß der gesamte der Großschiffahrt nunmehr geöffnete Raum erst dank dieser neuen Verkehrsmöglichkeit der industriellen Besiedlung erschlossen wurde. So sind z. B. nach der Fertigstellung der Neckarkanalisation auf der Strecke zwischen Mannheim und Stuttgart außerhalb der großen Häfen Heilbronn und Stuttgart in kurzer Zeit 35 neue Umschlagstellen entstanden, die zusammen einen Verkehr aufweisen, der fast dem des Hafens Heilbronn entspricht. Ebenso beobachten wir am Main auf der 75 km langen Flußstrecke Würzburg—Schweinfurt, die erst vor kurzem für die Großschiffahrt eröffnet wurde, die Errichtung von 49 Umschlagstellen, die vorher nicht vorhanden waren. Diese Erscheinung ist in Gebieten zu beobachten, die durch Schiene und Straße bereits voll erschlossen waren. Trotzdem bedurfte es erst der Binnenschiffahrtstraße, diese latent vorhandenen Ansatzpunkte einer neuen industriellen Entwicklung zur Entfaltung zu bringen.

So wird eine neue Binnenschiffahrtstraße sehr schnell zu einem untrennbaren Bestandteil der von ihr berührten Landschaft. Als Beispiele in der Bundesrepublik Deutschland sei für Kanäle nur auf den Rhein-Herne-Kanal oder den Dortmund-Ems-Kanal hingewiesen und für Flüsse auf Neckar und Main. Auch im Ausland ließen sich für diese immer wieder beobachtete Entwicklung zahlreiche Beispiele anführen.

b) Die Wasserwirtschaft

Trotz seiner großen Bedeutung stellt der Binnenschiffsverkehr beim Bau oder Ausbau von Binnenschiffahrtstraßen nicht den einzigen Faktor der raumbildenden Kraft der Wasserstraße dar.

Einen zweiten — außerverkehrlichen — Faktor bildet die mit dem Ausbau der Wasserstraße untrennbar verbundene Verbesserung der wasserwirtschaftlichen Verhältnisse. Jede mit dem Ausbau eines Flusses oder mit dem Bau von Kanälen verbundene Maßnahme beeinflusst die Grundwasserstände der Tallandschaft und verbessert die Möglichkeiten zur Wasserentnahme für Landwirtschaft, Industrie und Siedlungen. Der stärkste Eingriff in die Grundwasserverhältnisse läßt sich dabei durch die Kanalisierung eines Flusses erreichen. Durch die Stauhaltungen können die Grundwasserstände völlig beherrscht werden. Fast alle frei fließenden Flüsse haben die Tendenz, sich einzutiefen (Erosionserscheinungen). Ein entsprechendes Absinken der Grundwasserstände ist die Folge. Diese Erscheinung kann so stark werden, daß schon deshalb allein der Einbau von Stauhaltungen erforderlich wird. Gleichzeitig bietet eine Flußkanalisierung die Möglichkeit einer entscheidenden Verbesserung der Hochwasserabflußverhältnisse. So wurden

z. B. durch die Neckarkanalisation rd. 20 000 000 m² Land vor Überschwemmung geschützt, einer besseren Ertragsfähigkeit zugeführt und für Industrie- und Wohnsiedlungen verwendbar gemacht. (11)

Mit der Vergleichmäßigung der Wasserstände durch Regulierung, mit der Errichtung von Stauhaltungen durch Kanalisation und mit dem Bau von Kanälen werden gleichzeitig die Möglichkeiten zur Wasserentnahme für die Landwirtschaft, sowie für die Wasserversorgung von Industrie und Siedlungen entscheidend verbessert. Diese Möglichkeiten zusammen mit dem Schutz vor Hochwasser verbessern die Standortbedingungen, insbesondere für die industrielle Besiedlung. Dabei wird die Wasserentnahme aus Kanälen von Städten und von der Industrie zu Gebrauchs- und Verbrauchszwecken besonders bevorzugt, weil in Kanäle kein Abwasser eingeleitet werden darf, das Kanalwasser daher verhältnismäßig sauber ist. So dienen drei Viertel des Speisungswassers des Rhein-Herne-Kanals der dortigen Industrie zur Wasserversorgung. Überhaupt stellen die westdeutschen Kanäle gleichzeitig die größte Wasserversorgungsanlage Deutschlands dar. Bei dem Bau neuer Kanäle wird diese Funktion von vornherein berücksichtigt, wie z. B. beim Kanal Bamberg—Nürnberg der Rhein-Main-Donau-Großschiffahrtstraße, dessen Bau geradezu die Voraussetzung für eine weitere industrielle Entwicklung des wasserarmen Nürnberger Raumes darstellt. (3)

Mit der Zunahme der Bevölkerungsdichte und der Industrialisierung wächst der Wasserbedarf weiterhin rasch an. Die Aufgabe der Flüsse und Kanäle als Wasserspender wird daher von Jahr zu Jahr wichtiger. Hierin liegt einer der Gründe, warum gerade in einer hochindustrialisierten und durch sonstige Verkehrsmittel bereits erschlossenen Landschaft die Bedeutung leistungsfähiger Wasserstraßen in zunehmendem Maße erkannt wird.

Diese Funktion der Binnenschiffahrtstraßen ist neben ihrer Verkehrsaufgabe von außerordentlich großer ökonomischer Bedeutung. Eisenbahn und Straße haben dem nichts Gleichartiges entgegenzusetzen. Dabei ist der zusätzliche Kostenaufwand zur Erfüllung dieser Funktion im allgemeinen sehr gering (z. B. beim Kanal Bamberg—Nürnberg etwa 10 % der Bausumme), sein ökonomischer Wert dagegen um ein Vielfaches höher.

Diese Verbesserung der Standortbedingungen als Folge wasserwirtschaftlicher Maßnahmen findet in einer Erhöhung der Grundstückspreise an der Wasserstraße ihren wirtschaftlichen Ausdruck. So belaufen sich z. B. die durch die Neckarkanalisation hervorgerufenen Wertsteigerungen der Grundstücke auf über 200 Millionen DM. (11) Mit dieser Wertsteigerung allein sind mehr als die halben Baukosten der Neckarkanalisation volkswirtschaftlich kompensiert.

Als eine Nebenwirkung im Zusammenhang mit der Verbesserung der wasserwirtschaftlichen Verhältnisse ist ferner die Verbesserung des Landschaftsbildes zu betrachten. Wenn sie auch ökonomisch nicht erfaßbar ist, darf sie doch nicht unerwähnt bleiben.

c) Die Energieerzeugung

Einen weiteren ökonomisch wichtigen Faktor der raumfüllenden Kraft der Binnenschiffahrtstraßen haben wir bei der Kanalisation von Flüssen in der damit verbundenen Möglichkeit der Energieerzeugung zu erblicken.

Früher beschränkte sich die Kraftwasserwirtschaft darauf, Wasserwerke an nicht schiffbaren Nebenflüssen zu errichten oder bei der Kanalisation von Flüssen im Interesse der Schifffahrt das Gefälle an den dabei errichteten Stauanlagen gewissermaßen als Nebenprodukt noch zur Energieerzeugung auszunutzen. Unabhängig von den Interessen der Schifffahrt, der bei großen Flüssen auch ohne den Einbau von Staustufen aus-

reichende Verkehrsmöglichkeiten geboten werden, besteht heute in der Welt die Tendenz, vielfach gerade bedeutende Flüsse (wie z. B. Wolga, Donau u. a., siehe Abschnitt II 2. c) durch Errichtung von Stauanlagen zur Energiegewinnung auszunutzen. Es ist ein Irrtum zu glauben, daß mit der Entwicklung der Atomenergie die Energieerzeugung aus Wasserkraft an Wert verlieren würde. Eine Sachverständigengruppe der OEEC kommt vielmehr bei der Untersuchung des Energiebedarfs Europas zu der Schlußfolgerung, daß „zusätzliche Anstrengungen der Nutzbarmachung noch nicht entwickelter Wasserkräfte“ gewidmet werden müßten. (12)

Dabei ist man heute auch bei Laufwasserkraftanlagen an Flüssen in zunehmendem Maße bestrebt, die aus Wasserkraft gewinnbare Energie zur Deckung von Bedarfsspitzen heranzuziehen und dadurch ihren Verkaufswert zu erhöhen. Aus diesem Grunde geht man verschiedentlich bereits dazu über, die Laufwasserkraftwerke bei niedrigen Wasserständen im Schwellbetrieb fahren zu lassen, wenn die Anlage von Kraftwerksketten diese Betriebsart gestattet. Die beste Methode der Stromveredelung aber bietet die Anlage von Pumpspeicherwerken, deren Entwicklung im Rahmen der modernen Energiewirtschaft unentbehrlich wird. An geographisch günstigen Stellen kann eine solche Anlage mit der Kanalisierung eines Flusses verbunden werden, wobei die Stauhaltung als Gegenbecken benutzt wird. Als Beispiel dafür sei das Pumpspeicherwerk bei Geesthacht genannt.

Unabhängig von den Interessen des Verkehrs gewinnt somit auch die Energieerzeugung beim Ausbau von Binnenschiffahrtstraßen im Zusammenhang mit der allgemeinen Entwicklung der Wirtschaft mehr und mehr an Bedeutung.

2. Das Ausmaß der raumfüllenden Kraft der Binnenschiffahrtstraßen

Auf dieser Vielseitigkeit der wirtschaftlichen Aufgaben beruht die raumfüllende Kraft der Wasserstraßen. Welchem der drei Aufgabenkreise — Verkehr, Wasserwirtschaft, Energieerzeugung — dabei im Verhältnis zueinander das größte Gewicht zukommt, ist sehr verschieden. (13) Es gibt Binnenschiffahrtstraßen, bei denen die Verkehrsaufgabe weitaus im Vordergrund steht, wie bei den westdeutschen Kanälen; bei anderen wiederum dominiert die Energieerzeugung, wobei die Verkehrsaufgabe zwar wichtig ist, aber doch mehr zurücktritt, wie dies beim Tennessee-Unternehmen der Fall ist. Aber fast überall fällt der allgemeinen Wasserwirtschaft ein erheblicher Anteil am Gesamtprojekt zu. Im großen und ganzen geht die Entwicklung dahin, daß die Bedeutung des Wasserstraßenverkehrs zwar zunimmt, aber die der anderen Funktionen der Wasserstraßen in noch höherem Grade wächst.

Mit dieser dreifachen Funktion bieten die Binnenschiffahrtstraßen der Industrie besonders günstige Standortbedingungen und rufen in der verschiedenartigsten Weise neue Wirtschaftstätigkeit hervor. Einige Beispiele aus der Bundesrepublik Deutschland mögen die wirtschaftliche Bedeutung der Wasserstraßen für eine Reihe wichtiger Industrien unterstreichen:

74 v. H. der Steinkohlenförderung des Bundesgebietes erbringen die sog. nassen Zechen, d. h. die Zechen mit Wasserstraßenanschluß. 75 v. H. der Gesamtstahlproduktion werden in Hütten erzeugt, die an Wasserstraßen liegen. Besonders deutlich zeigt sich das Zusammenwirken der verschiedenen Vorteile der Wasserstraße für die Industriebelegung in der Ansiedlung von Wärmekraftwerken, weil diese sowohl auf billige Brennstoffzufuhr als auch auf die Bereitstellung von großen Kühlwassermengen angewiesen sind. So verfügen die an Wasserstraßen errichteten Wärmekraftwerke über etwa ein Drittel der Wärmekraftwerksleistungen der Bundesrepublik Deutschland.

Ebenso bevorzugt die Großchemie bei ihrer Standortwahl leistungsfähige Wasserstraßen. Die gewaltigen Industrieanlagen am Rhein und am Main mögen hierfür als Beispiel genannt sein. Das Gleiche gilt für Mühlen und für die Zementindustrie.

Auch viele andere Industrien wie die Natursteinindustrie, die Kies- und Sandgewinnungsbetriebe, die Bims Kiesverarbeitenden Werke, die Gaswerke, der Fahrzeugbau, die metallverarbeitende Industrie, die Stahlbauwerke, die Zellstoff- und Papierindustrie, die Mälzereien und selbstverständlich die Werftindustrie siedeln sich mit Vorliebe an den Wasserstraßen an.

Ebenso ist die Entwicklung der Seehäfen weitgehend von einem leistungsfähigen Anschluß an das Binnenschiffahrtsnetz ihres Hinterlandes abhängig. Diese Tatsache übte schon früher — soweit die geographischen Verhältnisse dies gestatteten — auf den Ausbau der Binnenwasserstraßen einen entscheidenden Einfluß aus. Auch heute ist dieses Faktum unverändert gültig.

Führt die Wasserstraße durch Gebiete intensiver landwirtschaftlicher Nutzung, so entstehen an ihren Ufern Fabriken, die landwirtschaftliche Erzeugnisse wie z. B. Zuckerrüben und Milch verarbeiten. Ein gutes Beispiel hierfür ist der Main in Bayern. Die Landwirtschaft wird dadurch erheblich gefördert.

Es ist daher auch kein Wunder, daß die Zahl der Erwerbstätigen je Quadratkilometer in den an Wasserstraßen gelegenen Kreisen wesentlich größer ist als in den übrigen Kreisen. Nach einer statistischen Arbeit des Ifo-Instituts für Wirtschaftsforschung, München, zur „industriellen Struktur der Bundesrepublik, der Bundesländer und zugehörigen Stadt- und Landkreise mit und ohne Wasserstraßenanschluß, abgestellt auf Industrieumsätze, Industriebeschäftigte und Fläche im September 1955“ werden an den Wasserstraßen je Quadratkilometer in der Industrie 2,7 mal so viel Personen beschäftigt wie in den übrigen Kreisen. Die Industrieumsätze liegen sogar 3,8 mal so hoch. Außerdem zeigt es sich noch, daß an den Wasserstraßen auf den einzelnen Beschäftigten im Durchschnitt ein wesentlich höherer Umsatz und somit auf den einzelnen Arbeitsplatz auch eine erheblich höhere Produktion entfällt als in den übrigen Gebieten. Weiterhin wird nachgewiesen, daß sich diese Wirtschaftsbelebung an den Kanälen und an den kanalisierten Flüssen in fast der gleichen Weise bemerkbar macht wie bei der Gesamtheit aller Großschiffahrtsstraßen. Schließlich zeigt die Statistik gerade für Gebiete mit überwiegender Fertigwarenindustrie, wie z. B. Hessen und Baden-Württemberg, die hohe wirtschaftsbelebende Kraft der Wasserstraßen.

3. Die wirtschaftsbelebende Kraft der Binnenschiffahrtsstraßen als Folge der Multiplikatorwirkung der einzelnen Faktoren

Aus diesen Gründen ist es kein Zufall, daß alle 23 Großstädte der Bundesrepublik Deutschland (einschl. Berlin) mit mindestens 200 000 Einwohnern, mit alleiniger Ausnahme von München, Nürnberg, Wuppertal und Augsburg, an Binnenschiffahrtsstraßen liegen. (14)

Im Zusammenhang mit der Wirtschaftsbelebung durch Binnenschiffahrtsstraßen steht die bevölkerungspolitisch wichtige Erfahrungstatsache, daß die Binnenschiffahrtsstraßen einen erheblichen Beitrag zum teilweisen Ausgleich der einseitigen Ballungen in großen Industriegebieten leisten. (14) Sie lassen entfernt von den zentralen Schwerpunkten der gewerblichen Gütererzeugung zahlreiche kleinere und auch größere Betriebe an ihren Ufern entstehen oder bestehende sich besser entwickeln; sie verlagern auf diese Weise die Gewichte der Produktion und des Konsums und erschließen einen gegenüber dem früheren Zustand weit vergrößerten Raum einer intensiven Nutzung (hierzu siehe auch Abschnitt IV 1. a)). Dadurch werden Agglomerationspunkte abseits der großen industriell-

len Kerngebiete und doch in enger Verbindung mit diesen geschaffen. Die Binnenschiffahrtstraßen üben damit eine kräftige dezentralisierende Wirkung aus.

Die wirtschaftsbelebende Kraft der Binnenschiffahrtstraße beruht weiterhin darauf, daß sich ihre verschiedenartigen Nutzungsmöglichkeiten den jeweiligen Bedürfnissen der Wirtschaft elastisch anpassen lassen. Ein zutreffendes Bild über die wirtschaftliche Bedeutung der Wasserstraßen in der heutigen Zeit gewinnt man jedoch erst dann, wenn man die Förderung des Verkehrs, der Elektrizitätsgewinnung und der Wasserwirtschaft nicht für sich getrennt betrachtet oder sich gar auf die Errechnung der Frachtersparnisse der betreffenden Wasserstraße gegenüber anderen Verkehrswegen, der jährlich erzeugten Kilowattstunden und der dem betreffenden Gebiete zur Verfügung gestellten Wassermengen beschränkt. Auch das ist wertvoll. Volkswirtschaftlich noch viel wichtiger aber ist die ökonomische Belebung, welche von der Wasserstraße dank ihrer „Mehrzweckhaftigkeit“ ausgeht und durch das Zusammenwirken der vorgenannten drei Gestaltungsfaktoren nicht nur kumulativ, sondern auch progressiv vervielfältigt wird. Die verkehrs-, wasser- und energiewirtschaftlichen Faktoren dürfen also nicht nur getrennt, müssen vielmehr, und zwar hauptsächlich, in ihrem Zusammenspiel betrachtet werden. Auf der dabei zutage tretenden Multiplikatorwirkung der einzelnen Faktoren beruht die volle raumfüllende Kraft der Wasserstraßen. (13) Erst dadurch wird die dynamische Kraft ganz erkennbar, die den Wasserläufen von Natur aus innewohnt und die in gleicher Weise ihre Wandlungsfähigkeit für die Benutzung durch den Menschen wie ihre Unwandelbarkeit als Naturphänomen bestimmt.

V. Rechnerischer Nachweis der Wirtschaftlichkeit des Baues neuer oder der Verbesserung bestehender Binnenschiffahrtstraßen

1. Allgemeines

In den vorstehenden Ausführungen wurde dargelegt, welche ökonomischen Wirkungen berücksichtigt werden müssen, wenn man ein Wasserstraßenprojekt wirtschaftlich rechtfertigen will. Wirtschaftswissenschaftliche Untersuchungen können sich jedoch mit allgemeinen Feststellungen nicht begnügen, sie müssen vielmehr durch Berechnungen untermauert werden. Jeder Einzelfall wird dabei anders gelagert sein. Im Folgenden kann daher nur auf die mit der Durchführung solcher Berechnungen verbundene Problematik kurz eingegangen werden.

Man muß zunächst grundsätzlich zwischen der volkswirtschaftlichen Produktivität und der betriebswirtschaftlichen Rentabilität unterscheiden. Es gibt Investitionen, die betriebswirtschaftlich betrachtet rentabel, aber volkswirtschaftlich nicht vertretbar sind, wie z. B. Raubbau an Bodenschätzen. Umgekehrt gibt es Investitionen, die betriebswirtschaftlich betrachtet Zuschüsse erfordern, aber volkswirtschaftlich großen Nutzen bringen, ja sogar lebensnotwendig sind, wie z. B. die Versorgung von Großstädten mit Trinkwasser, der Bau von Deichen etc. Insbesondere auf dem Gebiete des Verkehrs hat man schon immer große Investitionen lediglich unter dem Blickwinkel der volkswirtschaftlichen Produktivität vorgenommen, ohne eine betriebswirtschaftliche Rentabilität zu fordern. Dies ist heute nicht anders als früher.

Am wünschenswertesten sind selbstverständlich Investitionen, die nicht nur volkswirtschaftlich produktiv sind, sondern auch noch betriebswirtschaftlich rentabel oder zum mindesten ohne Verlust arbeiten. (14) Entscheidend über Wert und Unwert jeglicher der Produktion im weiteren Sinne des Wortes dienenden Investitionen bleibt aber doch die Bejahung der Frage, ob sie der Volkswirtschaft von Nutzen sind. Deshalb soll zunächst auf die Errechnung der volkswirtschaftlichen Produktivität näher eingegangen werden.

2. Volkswirtschaftliche Produktivität

Für die Berechnung der volkswirtschaftlichen Produktivität einer Binnenschiffahrtstraße müssen folgende Tatbestände ermittelt werden:

Der Bauaufwand

Die durchschnittliche Frachtersparnis je geleisteten Tonnenkilometer (tkm)

Das wahrscheinliche Verkehrsaufkommen

Der Einfluß auf die Rentabilität anderer Verkehrsträger

Die Erhöhung der industriellen Umsätze

Die Ertragssteigerung der Landwirtschaft

Die Steigerung der Steuereinnahmen auf Grund der mit der Wirtschaftsbelebung verbundenen Erhöhung des Volksvermögens

Die Erträge aus der Energieerzeugung

Sonstige Einflüsse und Erträge.

Hierzu ist im einzelnen folgendes auszuführen:

Der Bauaufwand ist abhängig von den örtlichen Verhältnissen, den angewandten Baumethoden, der Art der Finanzierung und der Höhe der Bauzinsen. Auf Grund von Erfahrungen, die bei Bauausführungen in jüngster Zeit in der Bundesrepublik Deutschland gemacht wurden, sind nach dem Preisstand von 1958 etwa folgende mittlere Baukostenwerte (ohne Bauzinsen) anzusetzen:

Für die Niederwasserregulierung eines Flusses: 200 000 DM/km.

Für die Kanalisierung eines Flusses: 2,5 Millionen DM/km.

Für einen Kanal: 3—6 Millionen DM/km, je nach der Beschaffenheit des Geländes.

Daraus ist zu ersehen, daß die Niederwasserregulierung eines Flusses im Interesse der Verbesserung seiner Schiffbarkeit innerhalb eines auf Mittelwasser bereits regulierten Flußbettes außergewöhnlich geringe Kosten verursacht. Auch die Kosten einer Flußkanalisierung werden nicht höher, meist sogar niedriger sein als die Herstellungskosten für eine zweigleisige elektrifizierte Eisenbahnstrecke. Und ein moderner Schiffahrtskanal kostet mit allen Kunstbauten nicht mehr als eine moderne Autobahn in vergleichbarem Gelände.

Wenn auch die Frachten der Eisenbahn und der Binnenschiffahrt stets mehr oder weniger in Bewegung sind, bleiben die Frachtrelationen zwischen den einzelnen Verkehrswegen und damit auch die prozentualen Frachtvorteile erfahrungsgemäß aus kaufmännischen Wettbewerbserwägungen, die auch den unterschiedlichen Wert der Leistungen der verschiedenen Verkehrsträger berücksichtigen, ziemlich konstant. Die Frachtersparnisse für die wichtigsten Güterarten durch die neue Binnenschiffahrtstraße lassen sich daher meist aus diesen Relationen ermitteln.

Aus den Frachtvorteilen, die sich dabei für die einzelnen Güterarten ergeben, läßt sich der Einflußbereich des neuen Verkehrsweges auf die bisherigen Verkehrsmengen, ebenso aber auch der Einflußbereich für die Bildung neuen Verkehrs ermitteln, der durch die Förderung der industriellen und wirtschaftlichen Entwicklung infolge der Verbesserung der Standortbedingungen entstehen wird. Hierzu sind die in den Einflußbereichen vorhandenen Ansatzpunkte wirtschaftlicher Entwicklung sorgfältig zu prüfen.

Aus diesen Einflußbereichen läßt sich das wahrscheinliche Verkehrsaufkommen der wichtigsten Güterarten auf der neuen Binnenschiffahrtstraße berechnen. Wenn man dabei auch vorsichtig vorgehen soll, so konnte bei den Wasser-

straßen in der Bundesrepublik Deutschland doch die Erfahrung gemacht werden, daß die auf diese Weise ermittelten Verkehrsschätzungen in der Wirklichkeit sehr bald um ein Mehrfaches übertroffen wurden (siehe Abschnitt IV 1. a)).

Zweifellos beeinflußt der neue Schiffahrtsweg das Verkehrsaufkommen der bisher vorhandenen Verkehrsträger. Soweit dabei deren Rentabilität verändert wird, ist dies in der gleichen Weise wie oben zu ermitteln. Von interessierter Seite wird dabei immer nur von Einbußen gesprochen, die mit dem Bau einer neuen Wasserstraße verbunden seien. Hieraus wird die Forderung hergeleitet, daß Rentabilitätsverschlechterungen dem neuen Schiffahrtsweg anzulasten seien. Nach den Erfahrungen an ausgebauten Wasserstraßen hatten diese Wasserstraßen jedoch in aller Regel die Wirkung, neuen Verkehr zu erschließen, der durch den allgemeinen wirtschaftlichen Aufschwung im Einflußbereich der neuen Wasserstraße hervorgerufen wurde und auch den anderen Verkehrsträgern zugute kam. Es wäre daher nur folgerichtig, wenn man die damit verbundene Rentabilitätsverbesserung der anderen Verkehrsträger dem neuen Schiffahrtsweg ebenfalls gutschreiben würde.

Statistische Vergleiche über die Wirtschaftsbelebung ähnlicher Einflußbereiche bereits ausgeführter Wasserstraßen im Zusammenhang mit der Beurteilung der Ansatzpunkte der industriellen Entwicklung in dem zu untersuchenden Gebiet geben einen Anhalt für die voraussichtliche Erhöhung der industriellen Umsätze.

Ebenso kann aus der Verbesserung der Grundwasserverhältnisse im Einflußbereich der neuen oder ausgebauten Wasserstraße und der mit der neuen Wasserstraße geschaffenen Möglichkeit künstlicher Beregnung die voraussichtliche Ertragssteigerung der landwirtschaftlichen Erzeugung errechnet werden. (3)

Mit der Umsatzerhöhung der Industrie und der Landwirtschaft werden entsprechend auch das Volkseinkommen, die Steuerkraft und die Steuereinnahmen erhöht. Hieraus läßt sich auf Grund der Steuergesetze der jährliche Mehreingang an Umsatzsteuern, Besitz- und Verkehrssteuern, Gewerbesteuern und Einkommensteuern ermitteln. (14)

Sofern der Ausbau der Wasserstraße gleichzeitig die Möglichkeit zur Energieerzeugung bietet, ist deren jährlicher Ertrag in einer besonderen Rentabilitätsberechnung nachzuweisen.

Nach Durchführung aller dieser Berechnungen läßt sich nunmehr die volkswirtschaftliche Produktivität der neuen Binnenschiffahrtstraße dadurch ermitteln, daß man alle jährlichen Erträge zusammenzählt. Der dadurch erhaltene Jahresbetrag ist zu kapitalisieren. Überschreitet der auf diese Weise ermittelte Wert den Bauaufwand, dann ist damit die volkswirtschaftliche Produktivität des Gesamtprojektes erwiesen und gleichzeitig ihrer Höhe nach festgestellt.

Nach den obigen Ausführungen sind mit dem Ausbau von Wasserstraßen noch weitere Wirkungen und Nutzungsmöglichkeiten verbunden. Diese lassen sich jedoch zahlenmäßig nicht erfassen. Dazu ist insbesondere auf den Fall hinzuweisen, daß mit den Ausbaumaßnahmen gleichzeitig eine Regelung des Flußregimes im Interesse der Vorflut und des Hochwasserschutzes verbunden ist. Die Durchführung dieser dem allgemeinen Wohl dienenden Arbeiten ist eine Hoheitsaufgabe des Staates. Die dafür aufzuwendenden Kosten sind zu ermitteln und der in die vorstehende Berechnung der volkswirtschaftlichen Produktivität einzuführende Bauaufwand ist von vornherein um diesen Betrag zu vermindern. Es wird jedoch häufig sehr schwierig sein, den dafür aufzuwendenden Baukostenanteil festzustellen und zu eliminieren. Auf die dabei auftretende Problematik wird im folgenden Abschnitt näher eingegangen.

3. Betriebswirtschaftliche Rentabilität

a) Das Prinzip der Eigenwirtschaftlichkeit der Verkehrsträger

In der verkehrspolitischen Diskussion beginnt sich der Grundsatz der Eigenwirtschaftlichkeit der Verkehrsträger mehr und mehr durchzusetzen, (16) (17) d. h., daß die Verkehrsträger auch die Kosten ihrer Wege selbst aufzubringen haben. Für die Beurteilung der damit zusammenhängenden Verhältnisse sind die strukturellen Unterschiede zu beachten, die in dieser Hinsicht zwischen Eisenbahn, Straße und Wasserstraße bestehen. Im Gegensatz zur Eisenbahn haben Straße und Wasserstraße auf den Ausbau ihres Wegenetzes im allgemeinen wenig Einfluß. Deshalb bleibt umstritten, ob die Verkehrsträger zur Aufbringung der in ihre Wege investierten Kapitalien heranzuziehen sind. (6)

Auf jeden Fall jedoch ist für die Berechnung der betriebswirtschaftlichen Rentabilität des Baues einer neuen oder des Ausbaues einer bestehenden Binnenschiffahrtstraße ausschließlich das Globalprinzip anzuwenden, d. h. ein neues Projekt ist betriebswirtschaftlich gesehen dann rentabel, wenn es zu einer Verbesserung der Rentabilität des Gesamtnetzes beiträgt. Bei der Ermittlung der betriebswirtschaftlichen Rentabilität einer neuen Strecke sind daher ihre Wirkungen auf das Gesamtnetz zu berücksichtigen.

b) Die Jahreskosten

Ein Wasserstraßennetz ist in seiner Funktion als Verkehrsweg der Binnenschiffahrt dann rentabel, wenn die Jahreskosten, soweit sie der Binnenschiffahrt anzulasten sind, durch Jahreseinnahmen mindestens gedeckt werden.

Die Jahreskosten bestehen aus

1. den Jahreskosten für die Verzinsung des Anlagekapitals und
2. den Jahreskosten für Betrieb, Unterhaltung und Erneuerung.

Dabei sind die Erneuerungskosten gleich der Abschreibung im privatwirtschaftlichen Sinne, also streng genommen auch Kapitalkosten.

Eine Amortisation des Anlagekapitals wird dagegen nur dann verlangt werden können, wenn der Staat bereit sein dürfte, die Wasserstraßen in das Privateigentum der Binnenschiffahrt zu überführen und die verkehrspolitischen Möglichkeiten der Abgabepolitik einzuschränken oder auf diese ganz zu verzichten. Beides dürfte unwahrscheinlich sein.

c) Die Ermittlung des Anteils der Binnenschiffahrt an den Jahreskosten einer Wasserstraße und deren Deckung

Im Gegensatz zur Ermittlung der volkswirtschaftlichen Produktivität einer Wasserstraße kommt es bei dem Nachweis der betriebswirtschaftlichen Rentabilität seiner Eigenschaft als Verkehrsweg der Binnenschiffahrt entscheidend darauf an, den Anteil an den gesamten Jahreskosten möglichst zutreffend zu ermitteln, der der Binnenschiffahrt anzulasten ist.

Während jedoch Schiene und Straße einen Weg besitzen, der ausschließlich diesem Verkehr dient, liegt bei der Binnenschiffahrt die besondere Problematik für die Ermittlung der Wegekosten darin, daß sie einen Weg benutzt, der gleichzeitig noch mehrere andere außerverkehrliche Aufgaben zu erfüllen hat. Diese Tatsache macht das Problem der Wegekosten der Binnenschiffahrt den beiden anderen Verkehrsträgern gegenüber besonders kompliziert. (siehe Abschnitt IV)

Um die Gesamtkosten einer Wasserstraße auf die verschiedenen Interessen aufzuteilen, die mit ihrem Bau oder Ausbau gleichzeitig gefördert werden, besteht die Möglichkeit,

- a) das Veranlassungs- bzw. das Verursachungsprinzip oder
 - b) das Nutzungsprinzip
- anzuwenden.

Die bei der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung in der Bundesrepublik Deutschland hierüber durchgeführten Untersuchungen haben jedoch gezeigt, daß es bei Anwendung nur eines dieser Prinzipien nicht möglich ist, zu einer den wirklichen Verhältnissen nahekommenden möglichst gerechten Zuteilung der Wegekosten zu gelangen. (18) Man kann daher bei der Entscheidung über die Anwendung dieser Prinzipien nicht dogmatisch verfahren, muß vielmehr auf Grund von Erfahrungen die bei jedem Wasserlauf tatsächlich vorhandenen Verhältnisse berücksichtigen, um zu größtmöglicher Objektivität zu gelangen. Hierzu ist im einzelnen auf die angegebene Literatur zu verweisen.

Die auf diese Weise ermittelten anteiligen Jahreskosten der Binnenschifffahrt an der neuen Wasserstraße sind in die Jahreskosten des Gesamtnetzes einzuführen.

Wird der Grundsatz der Eigenwirtschaftlichkeit der Verkehrsträger bejaht, dann sind unter Beachtung des Globalprinzips diese Gesamtkosten durch Schifffahrtsabgaben zu decken. Dabei wird es sich zeigen, ob die zu erwartende Einnahmesteigerung an Schifffahrtsabgaben mindestens der Erhöhung der Jahreskosten durch den neuen Wasserweg entspricht, und zwar möglichst ohne Absenkung der Durchschnittseinnahmen je tkm in dem zusammenhängenden Wasserstraßennetz. Dadurch werden gleichzeitig der wirtschaftliche Einfluß der neuen Wasserstraße auf das Gesamtnetz erfaßt und die Auswirkungen der Verkehrsschwankungen in den einzelnen Jahren weitestgehend eliminiert. Ist dies der Fall, dann ist das neue Projekt auch im betriebswirtschaftlichen Sinne rentabel.

Die der Binnenschifffahrt nicht anzulastenden Jahreskosten wären durch entsprechende Abgaben der anderen Nutzer zu decken bzw. von der Allgemeinheit zu tragen, wenn es sich um Aufwendungen handelt, die im öffentlichen Interesse liegen.

4. Die Binnenwasserstraße als wirtschaftliches Kuppelprodukt

Man kann jedoch bei der Beurteilung der wirtschaftlichen Rentabilität eines Wasserstraßenprojekts noch einen Schritt weitergehen, wenn man sich nicht darauf beschränkt, die einzelnen Interessen in ihrer Kostenstruktur für sich zu betrachten, sondern die Wasserstraße vielmehr in der gegenseitigen Verflechtung der Interessen als wirtschaftliches Kuppelprodukt ansieht. Dies wird regelmäßig dann der Fall sein, wenn es möglich ist, mit dem Ausbau der Wasserstraße im Interesse der Verbesserung ihrer Schifffahrtsfähigkeit gleichzeitig außerverkehrliche Interessen in einem solchen Umfange zu fördern, daß daraus über die volle Kostendeckung hinaus noch Gewinne bei den außerverkehrlichen Nutzern der Wasserstraße entstehen. Hierfür ist in der Praxis die Kanalisierung von Flüssen am besten geeignet. Dabei ist es möglich, den Ausbau des Wasserlaufs zur Schifffahrtsstraße gleichzeitig mit der Errichtung von Wasserkraftanlagen zu verbinden. Wenn dabei die Wasserführung des Flusses so günstig ist, daß sich aus der Energieerzeugung Reingewinne erzielen lassen, dann sind diese Beträge dem Gesamtprojekt wieder zugute zu bringen, wenn man das Gesamtprojekt als wirtschaftliche Einheit betrachtet. Um diesen Grundsatz praktisch zu verwirklichen, hat man in verschiedenen Ländern Gesellschaften gegründet, denen man den Ausbau des Flusses zur Schifffahrtsstraße unter Überlassung der Ausnutzung der Wasserkräfte zur Auflage gemacht hat.

Die bedeutendste Gesellschaft dieser Art in der Bundesrepublik Deutschland ist die Rhein-Main-Donau AG. In Frankreich besteht als eine Gründung ähnlicher Art die Société Nationale du Rhône. Die größte Gesellschaft dieser Art in einem viel umfassenderen Sinne, doch auf dem gleichen Prinzip beruhend, ist die Tennessee-Valley-Authority in den Vereinigten Staaten von Amerika.

Abschließend sei darauf hingewiesen, daß sich der Ministerrat der Europäischen Verkehrsminister-Konferenz mit diesen Problemen ebenfalls beschäftigt hat. Auf der Konferenz in Bern am 19./20. Oktober 1955 hat er Richtlinien für die Ausarbeitung von Wasserstraßenprojekten von europäischem Interesse angenommen, die von einer Sachverständigengruppe ausgearbeitet wurden und in denen alle oben behandelten Fragen angesprochen sind. (19)

VI. Die Binnenschifffahrt im Wettbewerb mit den anderen Verkehrsträgern

Die Schiffsabgaben zur Deckung der auf die Binnenschifffahrt entfallenden Wegekosten sind ein Bestandteil der Binnenschiffsfrachten. Wenn man den Grundsatz der Eigenwirtschaftlichkeit der Verkehrsträger vertreten will, d. h. von der Binnenschifffahrt verlangen will, daß sie global durch Schiffsabgaben die auf sie entfallenden Wegekosten deckt, muß man ihr die Möglichkeit geben, Frachtsätze festzulegen, welche die vollen speziellen Kosten der entsprechenden Verkehrsverbindungen decken. Sie kann dies jedoch nur dann, wenn auch die anderen Verkehrsträger, mit denen sie im Wettbewerb steht, ebenfalls dazu angehalten werden, in Wettbewerbsrelationen mit der Binnenschifffahrt den Grundsatz der Deckung der vollen speziellen Selbstkosten bei der Frachtenbildung einzuhalten; denn es ist zu berücksichtigen, daß die Binnenschifffahrt auf Grund ihrer Abhängigkeit von den natürlichen Gegebenheiten nur wenige von der Natur begünstigte und besonders bedeutsame Verkehrsbeziehungen bedient. Außerdem besteht sie im Gegensatz zur Eisenbahn aus einer Vielzahl privatwirtschaftlicher Betriebe, die zudem noch untereinander im Wettbewerb stehen. Sie ist daher bei der Frachtenbildung viel stärker auf die volle Kostendeckung in den einzelnen Verkehrsverbindungen angewiesen, als dies bei Flächenverkehrsmitteln der Fall ist. Diese könnten in ihrem Gesamtnetz auf Strecken ausweichen, an denen sie keine Konkurrenz zu fürchten haben, wenn sie in denjenigen Strecken, in denen sie im Wettbewerb mit der Binnenschifffahrt liegen, zu Ausnahmetarifen greifen, in denen die gesamten speziellen Kosten der Relation nicht gedeckt werden. Eine solche Ausweichmöglichkeit ist bei der Binnenschifffahrt nicht vorhanden. Die Folge wäre daher ein ruinöser Wettbewerb aller Verkehrsträger, der letzten Endes niemanden Nutzen bringen kann. Da jedoch eine gesunde Verkehrswirtschaft im allgemeinen Interesse liegt und dazu alle drei Verkehrsträger nicht entbehrt werden können, vielmehr ihren arteigenen Bedingungen entsprechend einzusetzen sind, kann der Staat seine regelnde Hand nicht zurückziehen.

Im übrigen muß man sich bewußt bleiben, daß die Untersuchungen über die wirtschaftliche Rentabilität von Binnenschiffsstraßen im Rahmen verkehrswirtschaftlicher Untersuchungen nur ein Teilproblem behandeln.

Ein anderes Teilproblem ist z. B. die Untersuchung der verschiedenartigen Besteuerung der Verkehrsträger. Weiterhin sind bei einem ökonomischen Vergleich der Verkehrsträger alle die Unterschiede und Verschiedenheiten zu berücksichtigen, die mit der Gegenüberstellung von Staatsbetrieb und Privatbetrieb (d. h. mit dem Unterschied zwischen den Betrieben, deren finanzielle Sicherheit durch die Öffentliche Hand gewährleistet wird, und den Privatbetrieben, die im Gegensatz dazu gezwungen sind, ihr Risiko selbst zu tragen), mit den technischen und ökonomischen Verschiedenheiten der Trans-

portgefäße, Transportbedingungen und Marktverhältnisse, mit dem verschiedenartigen Verhältnis von Personen- zu Güterverkehr sowie mit den völlig unterschiedlichen Bedingungen im Rahmen der internationalen Zusammenarbeit nur angedeutet sein können.

Zweifellos sind dazu die Ergebnisse der im Vorstehenden behandelten volks- und betriebswirtschaftlichen Überlegungen sehr wertvoll. Trotzdem bleibt letzten Endes der Entschluß, vorhandene Wasserläufe zu Binnenschiffahrtsstraßen auszubauen oder neue Binnenschiffahrtsstraßen anzulegen, ein verkehrspolitischer Entschluß des Staates, bei dem wegen der engen Verflechtung mit den vielseitigen Interessen der Allgemeinheit auch andere Gesichtspunkte als die der verkehrlichen Rentabilität berücksichtigt werden müssen.

Schriftumsverzeichnis

1. Most, O., Prof. Dr. Dr. h. c.: Die deutsche Binnenschifffahrt, Eine Gemeinschaftsarbeit. Heft 38 der Verkehrswissenschaftlichen Mitteilungen des Ministeriums für Wirtschaft und Verkehr des Landes Nordrhein-Westfalen.
hier: Seiler, E.: Die Binnenwasserstraßen als technisches und finanzielles Problem. S. 39—54 der obigen Veröffentlichung.
— Düsseldorf: Droste-Verlag 1957
2. Seiler, E.: Superfrachter und Hinterlandverbindungen — Eine Entgegnung —. Internationales Archiv für Verkehrswesen, 1958. Nr. 5/6
3. Rhein-Main-Donau AG: Großschiffahrtsstraße Rhein—Main—Donau: Die wasserwirtschaftliche Bedeutung der Kanalstrecke Bamberg—Nürnberg für Landwirtschaft und Industrie. — München: Selbstverlag der Rhein-Main-Donau AG, 1960
4. Schroiff, F. J., Dr.: Entwicklungen und Wandlungen im Deutschen Wasserstraßenverkehr. Heft 55 des Wissenschaftlichen Vereins für Verkehrswesen e. V. in Essen
5. Binnenschifffahrt: Was sie ist — was sie leistet — was sie bedeutet. Broschüre, herausgegeben vom Zentralauschuß der deutschen Binnenschifffahrt e. V., Beuel/Rh.
6. Beyer, P., Dr. jur.: Wasserstraßen aus der Sicht der Verkehrs- und Wirtschaftspolitik. Heft 88 der Schriftenreihe des Zentral-Vereins für deutsche Binnenschifffahrt e. V. — Duisburg-Ruhrort: Binnenschiffahrts-Verlag GmbH. 1960
7. Renner, E.: Der Strukturwandel des Binnenschiffsverkehrs nach dem Kriege, seine Folgen für die Bundeswasserstraßen und deren Anpassung an die veränderten Verhältnisse. II. Aufl. Heft 73 der Schriftenreihe des Zentral-Vereins für deutsche Binnenschifffahrt e. V. — Beuel/Rh. 1955
8. Seiler, E.: Die Klasseneinteilung der europäischen Wasserstraßen und ihre Bedeutung für die Binnenschifffahrt. — Die Wasserwirtschaft 1954/55. H. 10
9. Ifo-Institut für Wirtschaftsforschung, München: Die Entwicklungstendenzen des Güterverkehrs in der Bundesrepublik Deutschland bis zum Jahre 1970. — Berlin/München: Duncker & Humblot, 1960
10. Förster, K., Prof. Dr.: Atomenergie und Verkehr. — Internationales Archiv für Verkehrswesen, 1956. Nr. 16
11. Die Neckarkanalisation, Abschnitt Marbach—Stuttgart, 31. März 1958. — Stuttgart: Neckar AG, 1958
12. Der Europäische Wirtschaftsrat in Paris (OEEC): Europas Energie-Bedarf. Sein Anwachsen — Seine Deckung. Bericht einer Sachverständigengruppe. 2. verbesserte Auflage. Herausgegeben vom Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit. — Bonn: Deutscher Bundes-Verlag, 1956
13. Förster, K., Prof. Dr.: Die raumfüllende Kraft der Wasserstraßen. — Raumforschung und Raumordnung, 1959. H. 2

14. Rhein-Main-Donau-Großschiffahrtstraße: Bedeutung und Bauwürdigkeit der Kanalstrecke Bamberg—Nürnberg. — Nürnberg: Deutscher Kanal- und Schiffahrtsverein Rhein-Main-Donau e. V. 1959
15. Ifo-Institut für Wirtschaftsforschung, München: Die wirtschaftliche Bedeutung der Rhein-Main-Donau-Großschiffahrtstraße. — München: Schriftenreihe des Ifo-Instituts für Wirtschaftsforschung, 1951. Nr. 10
16. Grundsätze für die Aufbringung der Kosten der Verkehrswege. Schriftenreihe des Wissenschaftlichen Beirats beim Bundesverkehrsministerium, Heft 3. — Bielefeld: Kirschbaum-Verlag
17. Kapteyn, P. J.: Bericht im Namen des Ausschusses für Verkehrsfragen über die Koordinierung des europäischen Verkehrs. — Europäische Gemeinschaft für Kohle und Stahl, Gemeinsame Versammlung. Dokument Nr. 6, erste außerordentliche Sitzungsperiode des Haushaltsjahres 1957—1958
18. Seiler, E.: Zum Problem der Wegekosten der Binnenschiffahrt. Heft 87 der Schriftenreihe des Zentral-Vereins für deutsche Binnenschiffahrt e. V. — Duisburg-Ruhrort: Binnenschiffahrts-Verlag GmbH. 1959
19. Directives élaborées par le Groupe d'Experts pour l'établissement des projets de voies d'eau d'intérêt européen. Dok. CS (55) 40 (Révisé) du Conseil des Ministres de la Conférence Européenne des Ministres des Transports, Berne, 19./20. Octobre 1955

Abteilung I — Binnenschifffahrt

Frage 2

Bautechnische Probleme, die sich auf die Binnenschifffahrt auf Wasserstraßen mit Mehrzweck-Stauanlagen beziehen:

- a) Gestaltung der Schiffsöffnungen, ihre Bezeichnung und Beleuchtung
- b) Auswirkung des Schwellbetriebes und der Betätigung der Verschlussorgane bei Hochwasser auf die Schifffahrt
- c) Lage und Gestaltung der Schleusen und ihrer Zufahrten
- d) Füll- und Entleerungsvorrichtungen
- e) Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen bei der Bemessung der Schleusenkammer und der Leit- und Schutzmauern
- f) Automatischer Betrieb

von Dr.-Ing. E. h. Dr.-Ing. Heinrich Wittmann, Professor, Technische Hochschule Karlsruhe, Dr.-Ing. Martin Eckoldt, Oberregierungsbaurat, Wasser- und Schiffsdirektion Stuttgart, Dr.-Ing. E. h. Dr.-Ing. Heinz Fuchs, Direktor, Rhein-Main-Donau AG, München, Dipl.-Ing. Ernst Gamber, Direktor, Neckar AG, Stuttgart, Dr.-Ing. Franz Jambor, Oberregierungsbaurat, Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe, Dr.-Ing. Rudolf Kuhn, Rhein-Main-Donau AG., München, Dr.-Ing. E. h. Heinrich Waas, Ministerialrat, Bundesministerium für Verkehr, Bonn, Dr.-Ing. Gerhard Wiedemann, Ministerialrat, Bundesministerium für Verkehr, Bonn

Zusammenfassung

- a) *Die Gestaltung von Schiffsdurchlässen an Stauwehren, ihre Bezeichnung und Beleuchtung*

Die lichte Weite der Schiffsdurchlässe ist so zu bemessen, daß zwischen Schiff und Wehrpfeilern reichlicher Spielraum vorhanden ist. Wehrschwellen, Tosbecken und abgesenkte Verschlusssteile dürfen nicht über die Flußsohle herausragen; die Unterkante der hochgezogenen Verschlüsse und der Wehrbrücke muß in ausreichender Höhe über dem höchsten schiffbaren Wasserstand liegen.

Für die Bezeichnung der Schiffsdurchlässe ist ebenso wie für die Schleusen eine Tragweite von 500 bis 1500 m ausreichend. Das in Genf 1957 vorgeschlagene einheitliche System zur Bezeichnung der Binnenschiffahrtstraßen hat sich bewährt. Lichttagessignale verdienen gegenüber Formsignalen den Vorzug. Für die Beleuchtung hat das Bundesverkehrsministerium 1952 Richtlinien aufgestellt, die sich ebenfalls bewährt haben. Als Lichtquellen eignen sich Natriumdampflampen besonders gut.

- b) *Auswirkung des Schnellbetriebes und der Betätigung der Verschlussorgane bei Hochwasser auf die Schifffahrt*

Am Neckar ist Schwellbetrieb bei gleichzeitig stattfindender Schifffahrt in einer Kette von 9 Kraftwerken mit gutem Erfolg ausgeführt worden. Als oberes Speicherbecken wurde eine der Stauhaltungen verwendet. Die beim Schwellbetrieb entstehenden Wasserspiegelschwankungen halten sich im Rahmen der ohnehin durch Schleusenbetrieb und

Schiffahrt verursachten Schwankungen und lassen sich durch geeignete Handhabung beherrschen. Die Vorgänge werden anhand einer graphischen Darstellung der Kraftwerksleistungen und der Wasserstände im einzelnen verfolgt.

c) Lage und Gestaltung der Schleusen und ihrer Zufahrten

Für eine Staustufe als Mehrzweckanlage wird nach Erörterung einer günstigen Anlage im Zuge der allgemeinen Flußgestaltung im besonderen auf die Einfahrtverhältnisse in den Schleusenvorhafen eingegangen; die dort herrschenden Quergeschwindigkeiten werden als Ursache von Schiffahrtsschwierigkeiten bei höheren Wasserführungen herausgestellt. Das hierfür noch zulässige Maß von 0,20 m/s vor dem Schleusenoberhafen und 0,30 m/s vor dem Schleusenunterhafen wird durch Vergleiche von Einfahrtverhältnissen an 5 Abzweigungen von Schiffahrtskanälen vom Fluß in der Natur mit den entsprechenden Ergebnissen von Modellversuchen im Maßstab 1:25 bis 1:35 gefunden, wobei einschließlich der Untersuchungen für St. Aldegund/Mosel durch gleichzeitige Ermittlung der Schiffsverdrehungsmomente und der Quergeschwindigkeitsfelder auch die Beziehung zwischen Schiffsverdrehungsmoment und Quergeschwindigkeit angegeben wird. Anhand der Modelluntersuchungen für St. Aldegund/Mosel werden die zusätzlichen Baumaßnahmen — eine vorgesezte, durchbrochene und mehrmals abgewinkelte Molenverlängerung — entwickelt, die im Stande sind, auch bei sehr ungünstigen Ausgangsverhältnissen die Quergeschwindigkeiten vor dem Schleusenoberhafen auf das zulässige Maß herabzumindern. Über die Ermittlung des Verhältnisses zwischen Quergeschwindigkeit und Flußwasserführung für den Vorhafen Müden/Mosel kann nachgewiesen werden, daß ohne Ausführung dieser zusätzlichen Baumaßnahmen die Schiffahrtszeit auf der Mosel für zwei Monate im Jahre eingestellt werden müßte.

d) Füll- und Entleerungseinrichtungen

Die hydraulischen Vorgänge beim Füllen sind das entscheidende Merkmal für die Sicherheit der Schiffsbewegungen in der Schleusenkammer. Die Füllzeit ist eine Funktion der zulässigen Trossenkraft. Sie darf bestimmte Werte nicht überschreiten, wodurch die Steiggeschwindigkeit des Wasserspiegels in der Kammer und die Füllwassermenge bestimmt werden. Von den verschiedenen Arten der Füllung werden die Füllungen vom Oberhaupt aus, durch Längskanäle und Grundläufe einer Betrachtung unterzogen, wobei auch eine kombinierte Füllung, sowie die Füllung gleichzeitig vom Oberhaupt und Unterhaupt erörtert wird. Bei Mehrzweck-Stauanlagen sind es vielfach wasserwirtschaftliche Gesichtspunkte, die die Konstruktion der Verschlüsse entscheidend beeinflussen.

e) Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen bei der Bemessung der Schleusenkammer und der Leit- und Schutzmauern

Bei einzelnen Staustufen in wasserreichen, aber gefällearmen Flüssen sind die Schiffahrtsanlagen so groß zu bemessen, daß die verschiedenartigen Formen der Fahrzeuge und Schiffszüge ohne Gefahr und rasch durchgeschleust werden können. Einer betriebswirtschaftlichen Rechnung eher zugänglich sind kanalisierte Flußstrecken von etwa 100 km Länge, einheitlicher Ausbaugröße und Ausbautart. Da der Bauvollzug erfahrungsgemäß lange dauert und während der Bauzeit solcher Kraftwasserstraßen sich das Verkehrsbedürfnis, die Gütermenge und die Verkehrsart ändern, sind anfängliche Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen beim Vollausbau meist in positivem Sinne überholt.

Die Uferbegrenzungen im Bereich einer Schleuse können wirtschaftlich bemessen werden, wenn es gelingt, die angreifenden Kräfte günstig zu beeinflussen. Es wird die Wirkung besprochen, die eine Erhöhung der Wandrauigkeit auf den Erddruck ausübt. Als

wirksamste Maßnahme wird dann die Absenkung des Grundwasserspiegels behandelt und am Beispiel der Staustufe Jochenstein erläutert. Es folgt ein Hinweis auf baubetriebliche Maßnahmen, die geeignet sind, die Sohlenpressungen in der Gründungsfuge günstig zu beeinflussen.

f) *Automatischer Betrieb*

Die Schifffahrt kann schneller und gefahrloser durch Mehrzwecke-Stauanlagen geführt werden, wenn der Schleusenbetrieb zum Teil automatisiert und die Stellung der Wehrverschlüsse vollautomatisch geregelt wird.

Am Beispiel der Moselkanalisierung wird gezeigt, welche Aufgaben eine solche Automatisierung übernehmen kann und welche Einrichtungen dazu nötig sind.

Dadurch, daß Maschinen menschliche Arbeit und Überlegungen übernehmen, läßt sich bei den hohen Lohnkosten eines hochindustrialisierten Landes auch bei Mehrzwecke-Stauanlagen die Wirtschaftlichkeit steigern.

Inhalt

	Seite
Einleitung	35
a) Die Gestaltung von Schiffsdurchlässen an Stauwehren, ihre Bezeichnung und Beleuchtung	37
b) Auswirkung des Schwellbetriebes und der Betätigung der Verschlußorgane bei Hochwasser auf die Schifffahrt	41
c) Lage und Gestaltung der Schleusen und ihrer Zufahrten	46
d) Füll- und Entleerungseinrichtungen	52
e) Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen bei der Bemessung der Schleusenkammer und der Leit- und Schutzmauern	61
f) Automatischer Betrieb	65

Einleitung

Mehrzwecke-Stauanlagen haben die Aufgabe, den Stau auszunutzen für die Schifffahrt, die Wasserkraftnutzung, die Bewässerung und die Reinhaltung des Gewässers. Der Stauraum kann zugunsten von Ober- und Unterlieger, zur Wasserabgabe für Bewässerung, sowie zur Wasserentnahme für Hochspeicherwerke bewirtschaftet werden. Das Stauziel ist dann veränderlich. Die Aufgaben der Mehrzwecke-Stauanlagen werden um so komplexer, je mannigfaltiger die Nutzungen des Flusses sind. Ihre Koordinierung erfordert besondere technische Vorrichtungen für alle Zwecke.

Wird die Kombination Schifffahrt und Wasserkraftnutzung — Laufkraftstufe und Hochspeicherwerk — betrachtet, so ergeben sich für die drei Teile der Gesamtanlage, das Stauwehr, die Schifffahrts- und die Anlage zur Erzeugung elektrischer Energie, besondere Einrichtungen, die insbesondere der störungsfreien Abwicklung der Schifffahrt dienen. Wird das Beispiel auf einen Fluß bezogen, bei dem der Wert der Wasserkraftnutzung in einem Energie-Verbundnetz die verkehrswirtschaftliche Bedeutung der Wasserstraße einengt, kann es möglich sein, daß die Schifffahrtsanlagen gewisse Konzessionen zugunsten

der Wasserkraftnutzung machen müssen, selbst wenn sich dies nur in einer Beschränkung der für die Kammerfüllung verfügbaren Wassermenge äußert. Besondere Schwierigkeiten entstehen, wenn die Anlagen für die Wasserkraftnutzung der Entwicklung eines Schiffahrtsweges Jahre und Jahrzehnte vorausgegangen sind.

Im normalen Betrieb ist der Vorgang wasserwirtschaftlicher Natur derart, daß die Nutzung der Wasserkraft einem Optimum zustrebt, ohne die Häufigkeit und Geschwindigkeit der Schleusenfüllungen zu beeinträchtigen. Im Schwellbetrieb läßt sich eine Kette von Laufkraftstufen auch bei beschränkten Speicherräumen zur Deckung von Energiespitzen in Starklastzeiten und dadurch zur Ergänzung der Hochspeicherwerke heranziehen. Dieser Art von Energieerzeugung ist durch die von der Schiffahrt verlangte Fahrwassertiefe eine Grenze gesetzt. Es sei denn, daß von vornherein eine Stauhaltung am Anfang der Kette als Schwellbecken und eine zweite, am Ende der Kette, als Ausgleichbecken angelegt sind und die Fahrwassertiefen durch die Schwankungen der Wasserstände nicht eingeschränkt werden.

Im anomalen Betrieb, besonders beim Extrem des plötzlichen Ausfalles der Wasserkraftanlage, treten im Ober- und Unterwasser der Stauanlage Schwall- und Sunkerscheinungen auf, die ohne sofort wirkenden Gegenmaßnahmen die Schiffahrt stören. Die Maßnahme im Krafthaus einer Laufkraftstufe bezieht sich nach den neuesten theoretischen und praktischen Untersuchungen und Erfahrungen auf die Regeltechnik der Turbinen. Während es bisher beim plötzlichen Ausfall der elektrischen Anlage an besonders wasserreichen Flüssen und Strömen üblich war, die Kaplanturbinen etwa nach der Linie a von Bild 1 zu schließen, die einen erheblichen Schwall im Oberwasser, im oberen Vor-

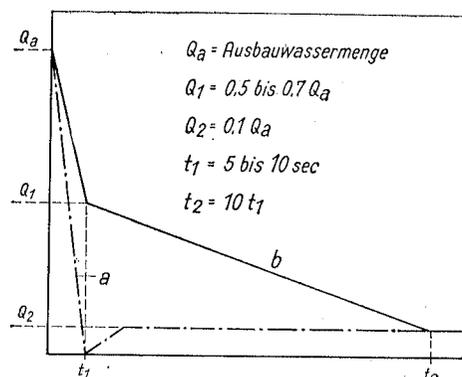


Abb. 1. Schließgesetz für Kaplanturbinen
in Mehrzweck-Stauanlagen

hafen und bei offenem Obertor in der Schleuse, sowie den entsprechenden Sunk im Unterwasser mit seinen Nachteilen für die Schiffahrt erzeugt, wird neuerdings für solche Mehrzweck-Laufkraftstufen ein Schließgesetz entwickelt, das im Prinzip dem Druckstoß bei Hochdruckleitungen entspricht. Es fehlt diesem Schließgesetz jedoch die Einfachheit der allseitigen, nahezu gleichbleibenden Umgrenzung, weil die freie Oberfläche des Wasserspiegels den durch die Topographie, die örtlich wechselnden Strömungsgeschwindigkeiten und die Stauvorgänge erzeugten Veränderungen unterworfen ist. Von Wasserwiderständen, besonderen Entlastungsbauwerken, sich sehr schnell senkenden Wehrverschlüssen kann abgesehen werden, wenn ein Schließgesetz in der Form der Linie b von Bild 1 bei den Turbinen angewendet wird. Der Anfangsschwall und -sunk werden erheblich gedämpft, so daß er und seine Reflexionen schadlos für die Schiffahrt verlaufen.

Die nicht stationären Strömungen beim Schwellbetrieb, bei den Schwall- und Sunkerscheinungen bedürfen sorgfältigster hydraulischer Prüfung. Während z. B. die Entnahme für Hochspeicherwerke und die Rückgabe der genutzten Wassermenge bei genügend großen, sorgfältig geregelten Stauräumen der Schiffahrt keine Schwierigkeiten bereiten, kann durch stromaufwärts fortschreitende Sunkwellen der unterhalb liegenden Laufkraftstufe auch die einem Schwall nachfolgenden, und die Sunkwelle des Primärwerkes ein kurzfristiger Mangel an Fahrwassertiefe eintreten, dem durch eine über das übliche Maß hinausgehende Austiefung der Schleusensole, des unteren Vorhafens und des Unterwassers im Primärwerk in gleicher Weise wie bei einem kontinuierlichen Schwellbetrieb vorgebeugt werden muß. Öffnungen in den Leitmolen der oberen und unteren Vorhäfen vermögen nicht nur die Ein- und Ausfahrt zu den Schleusenkammern zu erleichtern, sondern auch die Schwall- und Sunkwirkungen zu dämpfen. Bei dem durch Bewirtschaftung des Stauraumes veränderlichen Stauziel müssen diese Öffnungen jedoch tief unter das unterste Stauziel hinabreichen. Eine einwandfreie Nutzung des Zuflusses zur Füllung der Kammerschleuse, zur Energieerzeugung im Kraftwerk und zur Stauhaltung der Wehrverschlüsse läßt sich nur durch umfassende Automation des gesamten Betriebes einer Mehrzwecke-Stauanlage erreichen. Die Schiffahrt hat erkannt, daß bei einem derartig sorgfältigen Betrieb der Aufenthalt in den Schleusen weder die Schiffe gefährdet, noch die Verkehrsleistung der Wasserstraße herabsetzt, weil auch die geringe Strömungsgeschwindigkeit in den Stauhaltungen die Bergfahrt wesentlich erleichtert und den Zeitverlust in den Schleusen ausgleicht.

Während des Baues einer Mehrzwecke-Stauanlage sind ihre Benutzer bestrebt, baldmöglichst in den Genuß ihrer Nutzung zu kommen: Die Schiffahrt dadurch, daß sie entweder durch bereit gehaltene Wehröffnungen verkehren, oder schon vor der Errichtung des Staues die Schleusanlagen benutzen kann, das Kraftwerk dadurch, daß es einzelne Maschineneinheiten frühzeitig zum Betrieb bereitstellt. Voraussetzung ist das Vorhandensein des Stauwerkes, auch wenn im Anfangsstadium des Betriebes nur ein Teilstau erzeugt werden kann. Bautechnische, betriebstechnische und kostenmäßige Überlegungen führen zu einem sorgfältig ausgedachten Bauausführungsplan, der sich besonders auch der Arbeiten im Stauraum anzunehmen hat.

a. Die Gestaltung von Schiffsdurchlässen an Stauwehren, ihre Bezeichnung und Beleuchtung.

Stauwehre müssen schiffbar sein oder wenigstens eine Schiffahrtsöffnung erhalten, wenn

1. der Stau nur bei geringer Wasserführung gehalten werden, im übrigen aber die Schiffahrt den freien, genügend tiefen Fluß benutzen soll,
2. die Schiffahrt auf einem ständig aufgestauten Fluß in gewissem Umfang auch für den Fall möglich sein soll, daß
 - a) die mit dem Wehr verbundene Schleusenanlage unbenutzbar ist oder
 - b) der Stau vorübergehend gelegt werden muß und der Oberkanal und der Oberdremmel der Schleuse nicht so tief liegen, daß die Schiffe ohne Stau durch die Schleuse fahren können,
3. die Schiffahrt aus besonderen Gründen während des Baues durch das Wehr geführt werden muß.

Bei einer Niederwasser-Stauregelung nach Fall 1 sind die Anforderungen an die Ausmaße und die Gestaltung der Schiffahrtsöffnungen eines Wehres besonders hoch,

weil es sich bei der Durchfahrt durch das Wehr um einen normalen, dem Ausbauziel entsprechenden Vorgang handelt. Es müssen daher folgende Bedingungen erfüllt sein:

1. Der Schiffahrtsdurchlaß muß so weit sein, daß für die größten Schiffe und die breitesten Schiffszüge genügend Spielraum vorhanden ist und daß der Pfeilerstau die Durchfahrt nicht beeinträchtigt.
2. Im Bereich des Schiffsdurchlasses darf das Wasser weder beschleunigt noch verzögert werden und es dürfen sich keine Grund- und Deckwalzen einstellen. Deshalb darf die Wehrschwelle des Schiffsdurchlasses keinen Höcker erhalten und sie muß mit dem unteren Wehrboden bündig mit der Flußsohle liegen; das Tosbecken muß in die Flußsohle versenkt werden.
3. Verschlüsse, die abgesenkt oder umgelegt werden, dürfen in dieser Lage nicht wesentlich über die Flußsohle hinausragen.
4. Hebbare Verschlüsse müssen so hoch gezogen werden können, daß die für den HSW übliche Durchfahrtshöhe gewahrt ist, ohne daß die Schiffe ihre Aufbauten zu verändern brauchen.
5. Wenn mehrere Wehrfelder vorhanden sind, müssen bei allen die Wehrschwelle und der untere Wehrboden gleich tief liegen, weil sonst im Bereich des Schiffsdurchlasses oberhalb und unterhalb des Wehres Querströmungen entstehen, die die Schiffahrt, wenn nicht gefährden, so doch behindern.

Stauregelungen dieser Art sind in Deutschland mit der Entwicklung der Großschiffahrt im allgemeinen außer Gebrauch gekommen. Soweit entsprechend eingerichtete Schiffsdurchlässe vorhanden sind, werden sie nur noch ausnahmsweise benützt. Dies ist z. B. der Fall am Untermain zwischen Mainz und Aschaffenburg, wo besonders erfahrene Schiffer durch die Schiffsdurchlässe der Wehre fahren, wenn bei hohen Wasserständen die Schleusen überflutet sind, die Schiffahrt im Fluß aber gerade noch möglich ist.

Neue Anlagen dieser Art sind nur an zwei Stellen geplant. Das kommt einmal daher, daß die in letzter Zeit durch Aufstau geregelten Flüsse, wie z. B. der Main, der Neckar und die Weser von Natur aus nicht sehr wasserreich und daher nicht so tief sind, daß für die Großschiffahrt zeitweise auf den Stau verzichtet werden könnte. Zum anderen wird der Aufstau fast immer auch zur Energieerzeugung benutzt; das ist aber in wirtschaftlicher Weise nur möglich, wenn der Stau ständig gehalten und nur vorübergehend bei Hochwasser oder bei Reparaturen gelegt wird. Geplant ist eine auf die Niederwasserzeit beschränkte Stauregelung in der Elbe beim Magdeburger Domfelsen. Auch in der Strecke Regensburg—Kelheim der Rhein-Main-Donau-Großschiffahrtstraße ist eine derartige Stauregelung vorgesehen. Dort soll bei Sinzig eine Staustufe gebaut werden, die nur 2,2 m hydrostatische Fallhöhe besitzt und daher nicht zur Wasserkraftnutzung herangezogen werden kann. Der Stau soll bei Eintritt von Mittelwasser, sobald die natürliche Wassertiefe für die Großschiffahrt ausreicht, gelegt werden. Die Wassergeschwindigkeit im Bereich des Wehres ist dabei nur 0,9 m/s. Der Schiffsdurchlaß soll in der Mitte des dreifeldrigen Wehres liegen und 30 m breit werden. Die lichte Höhe über HSW soll 6,4 m betragen.

In den Fällen 2 und 3 sind die Anforderungen an die Ausmaße des Schiffsdurchlasses geringer, weil das Wehr höchstens für die Fahrzeuge schiffbar zu sein braucht, die verkehren konnten, ehe der Fluß durch Aufstau geregelt und für größere Schiffe befahrbar wurde. So hat man beim Staffelausbau des Mains*) in der Strecke Aschaffenburg—Würzburg die dreifeldrigen Wehre so eingerichtet, daß die 300—500 t großen Schiffe der

*) Der Ausbau erfolgt nach Klasse IV der internationalen Binnenwasserstraßen, d. h. für Schiffe von 1350 t Tragfähigkeit

vordem üblichen Kleinschiffahrt eine der 3 Wehröffnungen auch bei gelegtem Stau durchfahren können. Dabei wurde nach folgenden Grundsätzen verfahren:

1. Lichtweite des Schiffsdurchlasses: 30 m
2. Wassertiefe über der Wehrschwelle bei NSW und aufgehobenem Stau unter Berücksichtigung der Wasserspiegelabsenkung, die sich dadurch ergibt, daß oberhalb und unterhalb des Wehres notfalls eine besondere Kleinschiffahrtsrinne ausgebaggert wird: 1,10 m
3. Lichte Höhe über dem höchsten Schiffahrtswasserstand: 5,40 m

Das Einbinden der Wehrschwelle, des Tosbeckens und des unteren Wehrbodens in der Flußsohle zeigt der beigegebene Schnitt durch das Wehr der Mainstaustufe Rothenfels, die 1933 bis 1937 gebaut wurde. Wehrschwelle, Tosbecken und unterer Wehrboden liegen in allen drei Wehröffnungen auf gleicher Höhe (Bild 2).

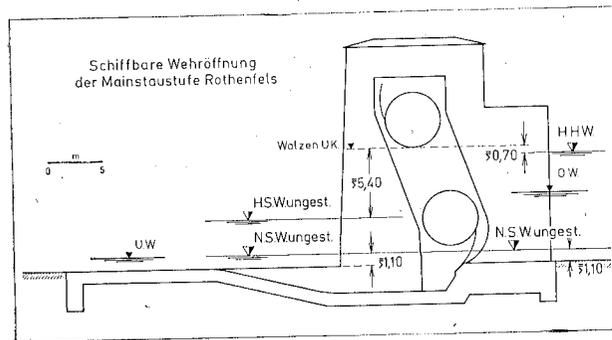


Bild 2

Schiffbare Wehröffnung der Mainstufe Rothenfels

Da mit dem fortschreitenden Ausbau des Mains die Kleinschiffahrt mehr und mehr zurückging, hat man in der Strecke Würzburg—Bamberg auf die Schiffbarkeit des Wehres und die dazu notwendige Kleinschiffahrtsrinne ganz verzichtet. Der Entschluß dazu war um so leichter, als die Kleinschiffahrt die Schiffsdurchlässe so gut wie nie benutzt hat. Lediglich während des Baues mußte sie in einigen Fällen durch das Wehr geleitet werden. Das läßt sich aber vermeiden, wenn man der Schleuse einen ausreichend tiefen Drempe gibt und den Bau so einteilt, daß die Schleuse rechtzeitig vor dem Wehr fertig wird. Im übrigen hat die Schiffahrt erkannt, daß die geringe Wassergeschwindigkeit in den Stauseen die Bergfahrt wesentlich erleichtert und den Zeitverlust in den Schleusen ausgleicht.

Die Bezeichnung und Beleuchtung der Schiffsdurchlässe, zu denen im Endzustand der Mehrzwecke-Stauanlagen auch die Schleusen, die oberen und unteren Vorhäfen sowie die Liegeplätze gehören, sind bedingt durch die Forderung, daß der Schiffsführer für seine Fahrt rechtzeitig die richtigen Informationen bekommt, entweder in der bestimmten Form der Zeichen oder durch die allgemeine Unterrichtung, die die Beleuchtung am Fahrwasser oder in den Schleusen gestattet.

Die Aufgabe der Bezeichnung ist vor allem, daß der zu benutzende Weg eindeutig und klar erkannt wird und die verkehrsregelnden Mitteilungen noch so rechtzeitig an den Schiffsführer gelangen, daß er Zeit und Raum hat, die notwendigen Maßnahmen für die Regelung seiner Fahrt zu treffen. Im allgemeinen genügt hierfür auf Binnenschiffahrtstraßen eine Tragweite der Zeichen von 500—1500 m.

Die Bezeichnung ergänzt weitgehend die bauliche Gestaltung des Fahrwassers. Wenn der Zugang zu den Schleusen oder der Abgang an sich eindeutig erkennbar ist, kann eine Bezeichnung erspart werden. Wenn sie aber notwendig wird, sollte sie einem allgemein bekannten System entnommen sein. Sonderzeichen sind auf ein Minimum zu beschränken, da sie in jedem Falle eine Belastung für den Schiffer darstellen. Aus den Erfahrungen an etwa 100 Schleusen, die in den letzten Jahren in der Bundesrepublik Deutschland neu bezeichnet sind, ergibt sich, daß das in Genf 1957 vorgeschlagene einheitliche System zur Bezeichnung der Binnenschiffahrtstraßen den meisten Anforderungen genügt.

Für Schleusen und Einfahrten in Seitenkanäle sind es meistens die Gebotszeichen, z. B. Gebot, eine Richtung einzuschlagen (Pfeil), Gebot, zu halten (liegender Strich) oder die Verbotsszeichen, z. B. Verbot, festzumachen (durchkreuztes P) und schließlich die Sperrzeichen (rot-weiß-rote Tafel oder 2 rote Lichter übereinander). Nach langjährigen Versuchen ist die Normalabmessung der Tafeln mit 1×1 bzw. $1 \times 1,5$ m so gewählt, daß bei Tag und Nacht (als Transparentschild) eine Erkennbarkeit von 500 m unter Normalverhältnissen erreicht wird.

Als Signale sind Lichttagesignale eingeführt, die auch den Genfer Empfehlungen entsprechen. Sie haben auch bei Tage (blauer Himmel mit weißen Wolken) eine Tragweite von 1000 m. Ihr Vorteil gegenüber den alten Formsignalen ist, daß Tag und Nacht die gleichen Signalbilder gezeigt und daß sie leicht ferngeschaltet werden können. Damit besteht größere Freizügigkeit im Aufstellungsort, die bei den sehr verschiedenen Verhältnissen an Wasserstraßen oft erwünscht ist.

Die Beleuchtung ist nach folgenden Gesichtspunkten gestaltet:

1. Bei der Einfahrt soll der Schiffsführer möglichst einen Raum vor sich sehen, in dem er aus sicherer Erkenntnis von Entfernung und Breite ähnlich wie am Tage navigieren kann.
2. Der Wechsel von der dunklen Strecke in das höhere Beleuchtungsniveau in der Schleuse und vor allem wieder hinaus auf die dunkle Strecke soll allmählich erfolgen, damit der Schiffsführer sich adaptieren kann und z. B. nicht ins „schwarze Loch“ fahren muß.

Diese Forderungen waren 1952 in Richtlinien für die Schleusenbeleuchtung vom Bundesverkehrsministerium niedergelegt. Sie haben sich bewährt und sind in das DIN-Blatt 67 500 „Schleusen und Vorhafenbeleuchtung, Richtlinien“ übernommen worden. Sie werden verwirklicht durch eine Vorhafenbeleuchtung mit ansteigendem Beleuchtungsniveau von etwa 1 lux bis 8—10 lux in der Schleuse und bei der Ausfahrt wieder abfallend auf 1 lux. Dadurch wird auch erreicht, daß der Vorbereitungsraum für die Schleusung bzw. die Liegestellen klar zu übersehen sind und der Durchlauf damit auf der ganzen Strecke flüssiger und sicherer wird.

Die Beleuchtung ist so gerichtet, daß nicht die Wasserfläche beleuchtet wird — das würde leicht Blendung auf der spiegelnden Fläche ergeben —, sondern die Uferfläche, die Schiffsdurchlässe und in der Schleuse die Plattform und die Schleusenwände, also die Arbeitsflächen. Als Lichtquellen haben sich mit Abstand Natriumdampflampen eingeführt. Die Schleusen mit Leuchtstofflampen sind, obgleich sie ein „natürlicheres“ Licht geben als die „gelben“ monochromatischen Natriumlampen in der Minderzahl. Breitstrahlende Spiegelleuchten, Auslegermasten, Lichtpunkthöhen von 8—8,5 m und -abstände von etwa 40 m sind die üblichen Ausführungen. Die Kosten je Lichtpunkt einschließlich der Erdarbeiten und Verkabelung betragen im großen Mittel etwa 2000 DM. An etwa 50 Schleusen hat sich die Beleuchtung nach diesen Richtlinien bereits bewährt.

b. Auswirkung des Schwellbetriebes und der Betätigung der Vorschlußorgane bei Hochwasser auf die Schifffahrt

1. Bei dem 1921 begonnenen Ausbau des Neckars zur Großschiffahrtsstraße (vgl. Bulletin 1959 Vol. II S. 119) wurden an den Staustufen neben den Wehren und Schleusen auch Kraftwerke erstellt. Gegenwärtig sind am kanalisiertem Neckar auf insgesamt 203 km Flußstrecke (Mannheim—Plochingen) 24 Wehren, 23 Schleusen und 23 Kraftwerke vorhanden (Bild 3). Die meisten dieser Werke wurden von der Neckar-Aktiengesellschaft, dem zum Ausbau des Neckars 1921 errichteten gemischtwirtschaftlichen Unternehmen, erbaut und werden auch von ihr betrieben. Der erzeugte Strom wird in

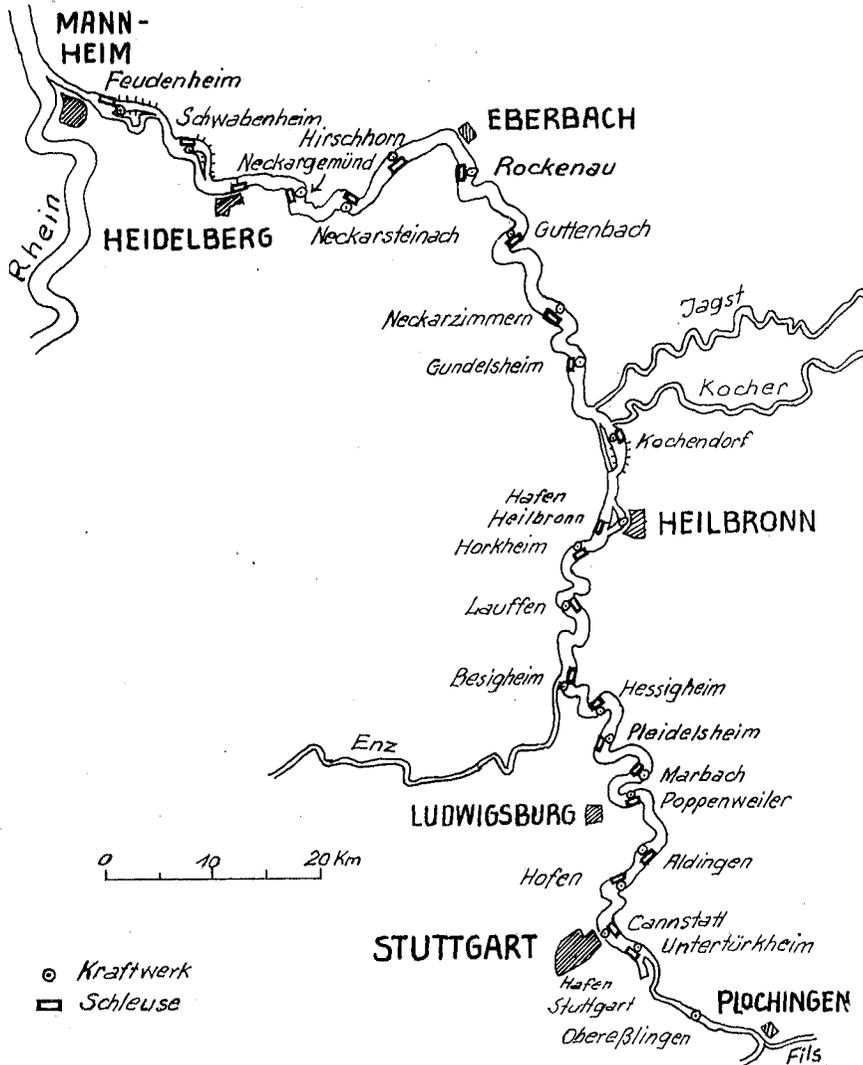


Bild 3
Übersichtslageplan des kanalisiertem Neckars

die Netze großer, im Verbundbetrieb arbeitender Elektrizitätsversorgungsunternehmen eingespeist. Die Voraussetzungen dafür, diese Kraftwerke auch bei Niedrigwasser durch Schwellbetriebe stärker, als es bei reinem Laufbetrieb möglich ist, zur Deckung der Bedarfsspitzen heranzuziehen, sind verhältnismäßig günstig. Betrachtet man zunächst den unteren Neckar zwischen der Mündung des letzten großen Nebenflusses, der Jagst, und der Mündung in den Rhein bei Mannheim (Bild 3), so sind auf dieser 101 km langen Flußstrecke die 9 vorhandenen Kraftwerke für 80 bis 100 m³/s Zufluß ausgebaut. Das mittlere Niedrigwasser beträgt 28 m³/s, Niedrigwasser (Oktober 1949) sogar nur 13 m³/s. Der Durchfluß und damit die Leistung der Kraftwerke kann also bei Schwellbetrieb auf das Mehrfache gesteigert werden (Bild 4). Ein solcher Beitrag zur Deckung des Strombedarfs in den Starklastzeiten der einzelnen Tage war besonders in den ersten Jahren nach dem 2. Weltkrieg erwünscht, in denen die Stromknappheit zum Teil zur Abschaltung von Verbrauchern gezwungen hatte; so wurde der Schwellbetrieb am 9. Juli 1947 erstmals angewendet und in der Folge in den Zeiten, in denen der Zufluß unter 60 % der Ausbaugröße zurückging, in der Kraftwerkskette von Gundelsheim bis zum Rhein weiter fortgeführt, bis er im Dezember 1955 aus Gründen, die mit dem fortschreitenden Ausbau der Wasserstraße zusammenhängen, vorläufig eingestellt werden mußte. Doch steht in Aussicht, daß er in absehbarer Zeit wieder aufgenommen werden kann. — Bei mittlerem Niedrigwasser konnten die Werke im Schwellbetrieb mit annähernd voller Leistung täglich 2 Stunden lang, bei höherem Zufluß entsprechend länger arbeiten. Die Zeit des Schwellbetriebs innerhalb des Tages wurde nach den Wünschen des Lastverteilers der Elektrizitätsversorgungsunternehmen festgesetzt, in der Regel im Sommer auf 10.30 Uhr bis 12.30 Uhr, im Winter auf 17.00 Uhr bis 19.00 Uhr, zum Teil auch auf 2 Zeiten zur Deckung der Morgen- und der Abendspitze aufgeteilt. Auch bei größeren Störungen in der Stromversorgung wurde der Einsatz des Schwellbetriebes angefordert und gegeben, wobei natürlich ein weiterer Einsatz an diesem Tage unmöglich wurde.

2. Am Neckar als einer Großschiffahrtstraße mußte der Schwellbetrieb von vornherein darauf abgestellt werden, daß die Schiffahrt durch ihn nicht leidet. Durch enge Zusammenarbeit zwischen der Neckar-Aktiengesellschaft und der Wasser- und Schiffahrtsdirektion Stuttgart sowie den nachgeordneten Wasser- und Schiffahrtsämtern ist es möglich gewesen, Schäden zu vermeiden.

- 2.1 Eine mögliche Auswirkung des Schwellbetriebes auf die Schiffahrt wäre zunächst die, daß die während der Schwellzeit erhöhte Fließgeschwindigkeit stören könnte. Dies kann jedoch am Neckar nicht eintreten. Der Abfluß aus den Kraftwerken während des Schwellbetriebes kann höchstens die oben erwähnte Ausbaugröße von 80 bis 100 m³/s erreichen; die Schiffahrt wird dagegen erst eingestellt, wenn die Wasserführung auf 450 m³/s gestiegen ist (vgl. Eckoldt, Bestimmung des höchsten Schiffahrtswasserstandes, Beitrag zum XVIII. Internationalen Schiffahrtskongreß Rom 1953, Kongreßbericht S. 2 bis 8), sie kann also eine viel stärkere Fließgeschwindigkeit ertragen.

- 2.2 Schwieriger ist dagegen die Frage, wie die zum Schwellbetrieb notwendige Speicherung in einem oberen und einem unteren Speicherbecken mit der Schiffahrt in Einklang zu bringen ist. Auf ein unteres Speicherbecken ist allerdings verzichtet worden, weil die Schwankungen des Abflusses aus dem Neckar in den Rhein bei dessen vielfach größerer Wasserführung dort keine nachteiligen Folgen hat. Als oberes Speicherbecken mußten Stauhaltungen des Neckars verwendet werden. Absenkungen unter Normalstau konnten dabei wegen der Fahrwassertiefe im oberen Teil der Haltungen nicht zugelassen werden; doch ließ sich der Umstand

ausnützen, daß an allen neueren Wehren die Krone der Verschlüsse 0,20 m über Normalstau gelegt worden ist, um bei den unvermeidbaren Spiegelschwankungen ein Überschwappen von Wasser zu vermeiden, was einen Wasserverlust bedeutet und bei Frostwetter die Verschlüsse zum Vereisen bringt. Es stehen somit nur diese 0,20 m Speicherhöhe zur Verfügung. Als günstig für Speichierzwecke bot sich vor allem die Haltung Lauffen wegen ihrer großen Spiegeloberfläche an. Da jedoch das Wasser der großen Nebenflüsse Kocher und Jagst in den Schwellbetrieb mit einbezogen werden sollte, war es außerdem nötig, die Haltung Gundelsheim, in die diese Flüsse einmünden, mit zur Speicherung heranzuziehen. Aus der Haltung Lauffen allein können mit einer Speicherhöhe von 0,20 m und bei einer Spiegeloberfläche von 1 280 000 m² im Schwellbetrieb 2 Stunden lang

$$\frac{1\,280\,000 \times 0,20}{2 \times 3\,600} = 35,5 \text{ m}^3/\text{s}$$

zusätzlich abgegeben werden. Von Lauffen bis Gundelsheim konnte der Zuschuß wegen örtlicher Umstände nicht im Schwellbetrieb genutzt werden; er mußte daher in Lauffen 1 bis 2 Stunden früher abgelassen werden als in der im Schwellbetrieb gefahrenen Kraftwerkskette von Gundelsheim bis zum Rhein.

Die Speicherung in Lauffen und Gundelsheim wurde vor allem in der Zeit geringen Stromverbrauchs, also in der Nacht, vorgenommen, in der auch der Wasserverbrauch der Schleusen wegfällt; auch wurden kurze Wasseranschwellungen, die zuweilen durch örtliche Starkregen entstehen, aufgefangen. Es war angeordnet worden, daß beide Speicherhaltungen — ebenso wie alle übrigen in den Schwellbetrieb einbezogenen Haltungen — täglich 6 Uhr Vollstau haben, so daß die Kraftwerkskette von diesem Zeitpunkt an jederzeit für die Abgabe der erhöhten Leistung bereit stand und außerdem die für die Schifffahrt und den Schleusenbetrieb notwendigen Wasserstände vorhanden waren.

2.3 Die dritte und entscheidende Wirkung des Schwellbetriebs auf die Schifffahrt ist der Einfluß, den das Beschleunigen und Verzögern der fließenden Wassermasse beim Schwellbetrieb auf die Wasserstände ausübt. Kritisch ist vor allem das Verzögern des Wasserabflusses am Ende der Schwellzeit; hierbei verkleinert sich der Zufluß in die Haltung, wodurch die Wasserstände in ihrem oberen Teil sinken müssen, also gerade in dem Abschnitt, in dem die Fahrwassertiefe nicht, wie im unteren Teil, überreichlich ist, sondern durch Baggern auf den garantierten Mindestwert (2,70 m) gebracht worden ist und nur durch Baggern erhalten werden kann. Die Wassertiefe wird auch nicht, wie man vermuten könnte, durch das Fließgefälle in der Haltung vergrößert, da dieses bei den vorhandenen, von der Schifffahrt geforderten Querschnittsgrößen und bei den Abflüssen, bei denen Schwellbetrieb stattfindet, in den verhältnismäßig kurzen Haltungen des Neckars — die längsten 2 Haltungen sind 13,7 km lang — praktisch Null ist. Viel mehr als durch das Fließgefälle werden die Wasserstände beeinflusst durch die Schleusungen, in deren Verlauf rd. 5 min. lang bis etwa 40 m³/s aus den Haltungen entnommen oder in sie eingeführt werden, und auch durch die Schubwirkung der fahrenden Schiffe. Die Wasserstände im kanalisiertem Fluß können also niemals so stetig verlaufen, wie man es von einem ungestauten Fluß gewöhnt ist; der Schwellbetrieb ist nur eine von mehreren Ursachen mehr oder weniger kurzer Wasserstandsschwankungen, die sich richtig nur in einem sehr großen Zeitmaßstab darstellen ließen und durch Drosselung des Zulaufs zum Pegelschacht gegen gewöhnliche örtliche Wellenbildungen abgegrenzt werden müssen.

Das sich aus diesen Einflüssen ergebende Spiel der Wasserstände in einer Haltung (Neckarzimmern) ist für einen Tag mit Schwellbetrieb in Bild 4 dargestellt. Der

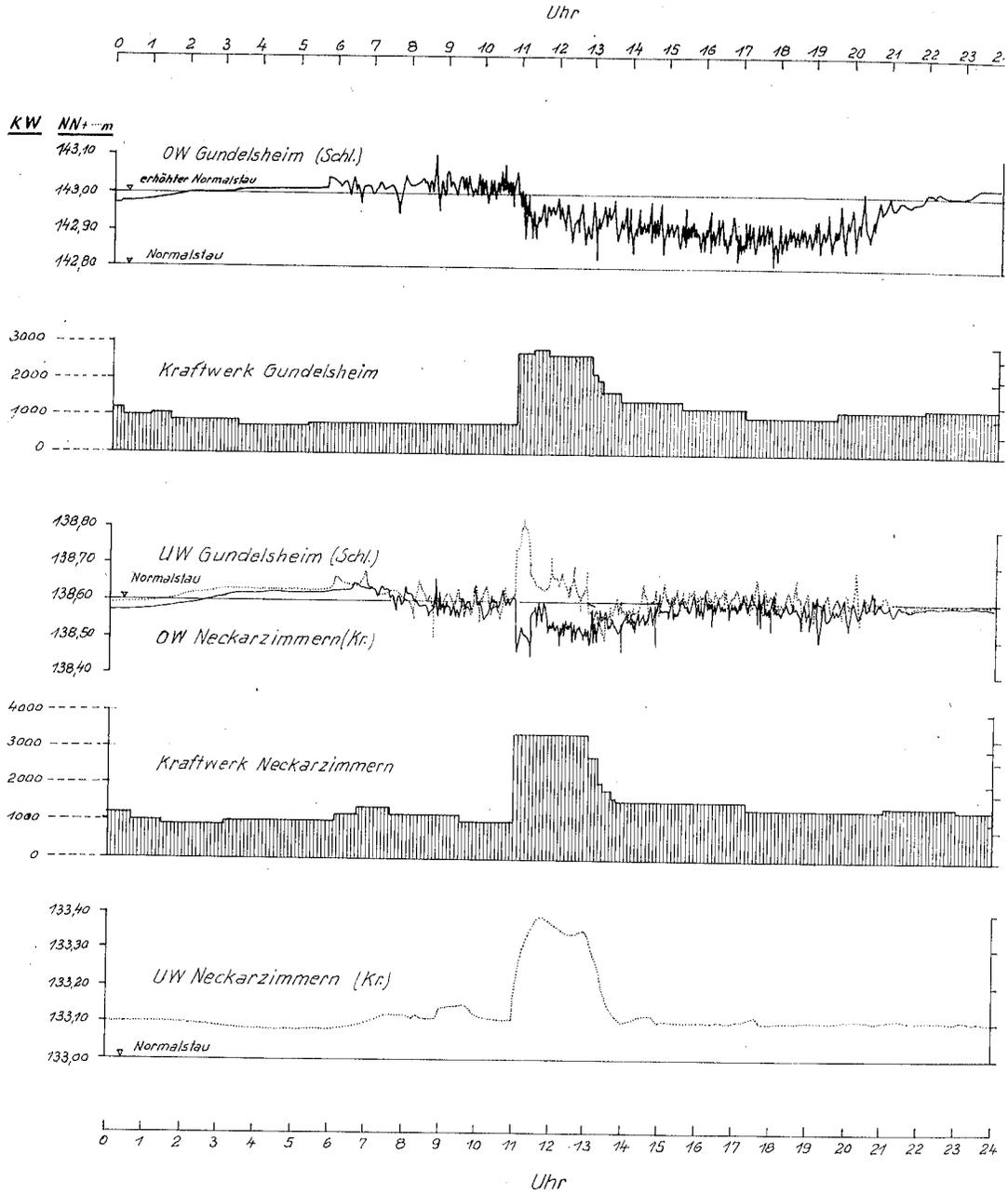


Bild 4
Schwellbetrieb am kanalisierten Neckar

Schwellbetrieb ist durch die Ganglinie der Generatorleistung, die annähernd auch als Ganglinie des Turbinendurchflusses angesehen werden kann (siehe Skala am rechten Rande) gekennzeichnet. Die Wasserstände am oberen und unteren Ende der Haltung, im Unterwasser Gundelsheim und im Oberwasser Neckarzimmern, sind auf gemeinsamer Skala aufgezeichnet, so daß die Differenz zwischen den beiden Linien die Fallhöhe des Wasserspiegels innerhalb der Haltung (kraftwirtschaftlich gesehen: die Verlustfallhöhe) bedeutet.

Im einzelnen zeigt die Betrachtung der Leistungs- und Wasserstandsganglinien (Bild 4) folgendes:

- a) Die Schleusenbetriebszeit macht sich im Oberwasser und Unterwasser Gundelsheim sowie im Oberwasser Neckarzimmern durch kurze Schwankungen bemerkbar. Im Unterwasser Neckarzimmern werden sie durch starke Drosselung des Zulaufs zum Pegelschacht unterdrückt.
 - b) Die Wasserspiegeldifferenz an den Staugrenzen in der Haltung Neckarzimmern beträgt nur wenige Zentimeter und wächst — wie zu erwarten — nur in der Schwellzeit stärker an. An ihrem Anfang erreicht sie für etwa 20 min durch den Sunk im Oberwasser Neckarzimmern und den Schwall im Unterwasser Gundelsheim etwa 0,30 m, geht dann aber rasch auf 0,10 m zurück.
 - c) Der Oberwasserstand Gundelsheim ist, wie es der oben erwähnten Speicherabsicht entspricht, von 0 Uhr bis zum Beginn der Schleusenbetriebszeit langsam erhöht, während der Schwellzeit abgesenkt und anschließend, vor allem vom Ende der Schleusenbetriebszeit an, wieder angespannt worden.
 - d) Der Oberwasserstand Neckarzimmern ist, wie es dem Prinzip der Durchlaufspeicherung entspricht, mit geringen Schwankungen konstant gehalten worden; lediglich am Beginn der Schwellzeit ist er, wie zu erwarten, gut 0,10 m abgesunken. Da die Wassertiefe im Oberwasser reichlich ist, hat dies keine Nachteile.
 - e) Die aufgetragenen Unterwasserstände (Gundelsheim und Neckarzimmern) zeigen das zu erwartende markante Ansteigen während der Schwellzeit (bis 0,30 m).
 - f) Kritisch ist, wie erwähnt, vor allem der Unterwasserstand am Ende der Schwellzeit (13 Uhr). In Neckarzimmern ist der Unterwasserstand genau auf die Höhe vor der Schwellzeit zurückgegangen und damit noch erheblich über Normalstau geblieben. In Gundelsheim dagegen ist er für etwa 1½ Stunde (von 13 bis 14.30 Uhr) unter Normalstau zurückgegangen, allerdings meist nur um etwa 0,03 m. Der tiefste Stand liegt 0,10 m unter Normalstau und auch unter dem gleichzeitigen Wasserstand am unteren Ende der Haltung (Oberwasser Neckarzimmern). Kurzzeitiger Unterstau dieser Größe kann bei kleiner Wasserführung auch ohne Schwellbetrieb durch die Sogwirkung bergwärts fahrender Schiffe eintreten. Bei weiterem Schwellbetrieb wäre es möglich, durch noch kleinere Schritte beim Zurückschalten der Turbinen ungünstigen Einfluß des Schwellbetriebs, falls nötig, noch vollkommener auszuschließen.
3. Die Betätigung der Verschlußorgane der Wehre bei Hochwasser kann sich auf die Schifffahrt am kanalisierten Neckar nicht auswirken, weil diese dann eingestellt ist und die Schiffe an den hierfür vorbereiteten Stellen, besonders in den unteren Schleusenvorhöfen, mittels der an Land angebrachten Poller festgemacht werden. Dabei sind die Wehrwärter angewiesen, die Verschlüsse langsam ein- und auszufahren, damit die Gefahr vermieden wird, daß Schiffe durch ein plötzliches Ansteigen des Wasserstandes losgerissen werden oder bei einem plötzlichen Abfallen auf einem geböschten Ufer aufsitzen. Selbstverständlich ist es dabei erforderlich, daß die Schiffsbesatzung an Bord Wache hält.

c. Lage und Gestaltung der Schleusen und ihrer Zufahrten

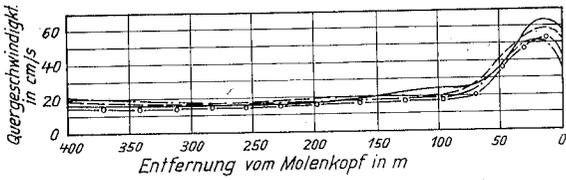
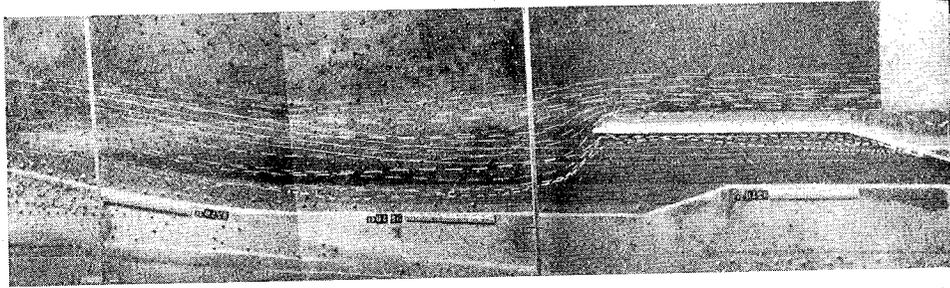
Eine Staustufe, als Mehrzweckanlage, erfordert in der Regel eine größere Breite als die natürliche mittlere Breite des Flusses. Im Interesse des Schiffahrtsbetriebes sollen die Schleuse und der mindestens gleichlange Aus- und Einfahrtabschnitt im oberen und unteren Schleusenvorhafen auf gerader oder nur sehr leicht gekrümmter Achse liegen. Es ergibt sich daher für eine heute übliche mittlere Schleusenlänge von rd. 170 m eine gerade Achse der Fahrstraße von reichlich 500 m, an die sich erst ober- oder unterhalb Stromkrümmungen mit zugelassenem Halbmesser anschließen dürfen. Muß die Stauanlage aus örtlichen Gründen in eine Flußkrümmung gelegt werden, so entstehen Schwierigkeiten in der Unterbringung der Schleusen mit Vorhäfen, wenn sie an der äußeren konkaven Uferseite angeordnet werden. Außerdem treten störende Querströmungen vor dem oberen Vorhafen auf. Den Schleusen fällt damit die innere konvexe Uferseite zu, obwohl die Versandungsfahrer für den oberen und unteren Vorhafen größer ist als auf der gegenüber liegenden Uferseite. Das mit der Stauanlage verbundene Kraftwerk kommt dadurch an die günstige äußere konkave Uferseite. Im oberen Schleusenvorhafen läßt sich die Versandung vermindern, da die notwendige Tiefe des oberen Vorhafens meist wesentlich geringer ist als die vorhandene Stautiefe im Fluß. Die Vorhafensohle kann in die Flußsohle mit einer Neigung von 1:3 bis 1:5 überführt werden. Der auf der Flußsohle nach der Innenseite der Krümmung wandernde Sand oder das Geschiebe müßte einen erheblichen Höhenunterschied überwinden, um in den Vorhafen zu gelangen. Da dies nur kleinen Mengen gelingt, bleibt der obere Vorhafen trotz seiner Anlage am inneren konvexen Ufer im wesentlichen versandungsfrei. Die Gefahr der Verschlickung durch Schwebstoffe ist für beide Uferseiten gleich zu bewerten. Die Versandungsfahrer des unteren Vorhafens kann durch Anordnung von Geschiebeablenkern flußseitig der Vorhafensmole verringert werden (siehe Empfehlung des XVIII. Schiffahrtskongresses in Rom, Abteilung I Frage 3 b).

Für die Länge der Schleuse selbst besteht mit zunehmendem Anteil der Einzelfahrer am Schiffsverkehr und stetiger Abnahme des Anteils der Schleppzüge die Tendenz, von langen Schleppzugsschleusen abzugehen. Es hat sich erwiesen, daß kurze Schleusen, evtl. mehrere nebeneinander, bei gleichem Bauaufwand leistungsfähiger sind (siehe XVIII. Schiffahrtskongreß in Rom Abt. I Mitteilung 3). Bei Einführung der Schubschiffahrt muß die Schleusenlänge der Schubeinheit entsprechen. Für die Schleusen an der Mosel wäre dann eine nutzbare Schleusenlänge von 165 m erforderlich.

Die Mindestbreite des oberen und unteren Schleusenvorhafens soll so groß sein, daß ein Schiff im Vorhafen warten kann, während ein anderes Schiff bei noch ausreichendem Zwischenraum an ihm vorbei in die Schleuse ein- oder ausfahren kann. Die Leitwand als Übergang von der Schleuse zum Vorhafen wird heute allgemein 1:4 zur gemeinsamen Schleusen- und Vorhafensachse geneigt. Die nutzbare Vorhafenslänge soll mindestens dem größten durch die Schleuse verkehrenden Schiff entsprechen, damit es im Vorhafen auf die Schleuse warten kann. Eine größere Länge ist zweckmäßig und erwünscht, um die Einfahrtverhältnisse besonders bei den höchsten Schiffahrtswasserständen (HSW) zu verbessern. Sie bestimmen die Leistungsfähigkeit und Benutzbarkeit der Schleusenanlage während der gesamten Schiffahrtsperiode sehr wesentlich. Daher sei darauf im besonderen näher eingegangen.

Der Schleusenvorhafen ist ein Stillwasserkanal im Gegensatz zum Fluß, der mit zunehmender Abflußmenge eine immer größere Strömungsgeschwindigkeit aufweist. Im Übergangsbereich beider Strömungen müssen sich Ablösungswirbel und Walzen ausbilden, die das Schiff quer zu seiner Fahrtrichtung treffen und es verdrehen. Ferner wird die Breite des Abflußquerschnittes durch den Vorhafen eingeengt und die Abflußmenge

$Q = 1400 \text{ m}^3/\text{s}$; Ausgangsvorschlag ohne Molenverlängerung

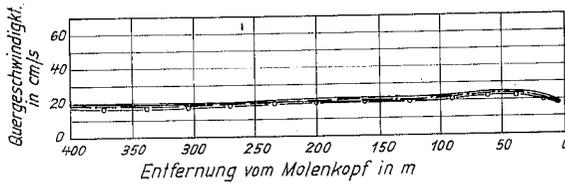
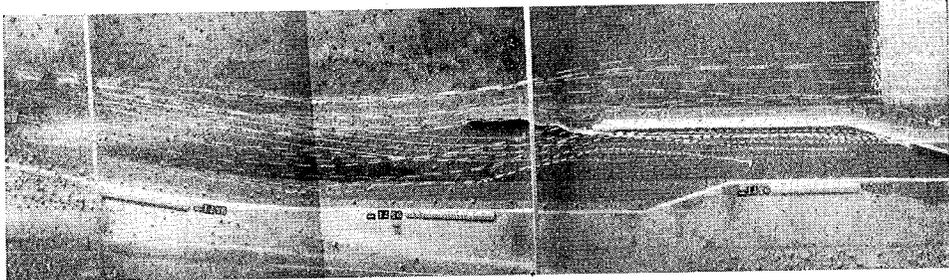


Die max. Quergeschwindigkeiten sind auf jene Schiffsachsen bezogen, die einen Abstand von

- a. ————— 5 m
- b. - - - - - 10 m
- c. 15 m
- d. o o o o 20 m

von der festen Mole besitzen.

$Q = 1400 \text{ m}^3/\text{s}$; 85m vorgesetzte, 2 mal abgewinkelte, durchbrochene Mole



Die max. Quergeschwindigkeiten sind auf jene Schiffsachsen bezogen, die einen Abstand von

- a. ————— 5 m
- b. - - - - - 10 m
- c. 15 m
- d. o o o o 20 m

von der festen Mole besitzen.

Bild 5

Einfahrt in den oberen Schleusenvorhafen Müden/Mosel

muß sich mit der restlichen Flußbreite begnügen. Es legt sich daher vor den Vorhafen eine von der Strömungsgeschwindigkeit des Flusses abhängige Querströmung, die das ein- oder ausfahrende Schiff ebenfalls aus seiner Richtung bringt (siehe Bild 5 der fotoelektrischen Aufnahmen der Oberflächengeschwindigkeiten). Das Schiff kann dem nur durch sein Ruder entgegenwirken. Bei begrenztem Ausschlag des Ruders und begrenzter Schiffsgeschwindigkeit gibt es für das Schiff eine obere Grenze der Querströmung, die es bei der Ein- oder Ausfahrt noch überwinden kann. Wird der Wert überschritten, kommt es zu Schiffshavarien. Der Klärung dieser Frage dienten Naturbeobachtungen an Abzweigungen des Dortmund-Ems-Kanals aus dem Emsfluß im Bereich der Wasser- und Schifffahrtsdirektion Münster im Vergleich mit den diesen Kanalabzweigungen ent-

sprechenden Modelluntersuchungen (Maßstäbe 1 : 25 bis 1 : 30 unverzerrt) in der Bundesanstalt für Wasserbau in Karlsruhe. An den Kanalabzweigungen Bollingerfähr, Hanekenfähr, Hüntel, Hilter und Dütthe wurden in der Natur die Abflußmengen und Wasserstände beobachtet, bei denen die Schiffahrtsschwierigkeiten beginnen. Im Modell wurde in einzelnen Punkten über die ganze Einfahrtstrecke durch unmittelbare Kraftmessung das auf das Schiff wirkende Drehmoment und die es abtreibende Querkraft ermittelt. Die so über die Einfahrtstrecke erhaltenen Momenten- und Querkraftlinien zeigen an einem Punkt ihren Maximalwert an. Es ergab sich, daß mit nur geringen Abweichungen an allen untersuchten Kanalabzweigungen die Schiffahrtsschwierigkeiten eintraten, wenn das größte Verdrehungsmoment 20 tm und die größte Querkraft 2 t erreichte oder überschritt. Damit war für das Meßschiff von 1000 t und die Fahrgeschwindigkeit von rd. 8 km/Stunde ein Maß gefunden, das aus Sicherheitsgründen bei Neuanlagen nicht erreicht oder überschritten werden darf. Es wurden daher Kanalabzweigungen nicht mehr angewendet, bei denen das Moment 12 bis 15 tm und die Querkraft rd. 1,5 t überschreiten. Damit ist gegen Schiffahrtsschwierigkeiten noch eine Sicherheit von 5 bis 8 tm und 0,5 t gegeben. Die zufriedenstellenden Verhältnisse an den genannten 5 Kanalabzweigungen und den später gebauten von Volkach/Main und Landesbergen/Weser bestätigten diesen Erfahrungswert. Da zur Überprüfung hierfür bei unmittelbarer Kraftmessung aber ein verhältnismäßig großes Modell im Maßstab 1 : 25 bis höchstens 1 : 35 benötigt wird, erschien es notwendig, eine Methode zu finden, die es bei wesentlich kleinerem Modell ebenfalls gestattet, die zweckentsprechende Form der Kanalabzweigung zu finden. Es liegt nahe, hierfür die eigentliche Ursache der Schiffahrtsschwierigkeiten, die Querströmung, also die Komponente der Strömungsgeschwindigkeit senkrecht zur Schiffsachse in m/s in der Form der leicht meßbaren Oberflächengeschwindigkeiten heranzuziehen. Es zeigte sich übereinstimmend für alle oben angeführten untersuchten Kanalabzweigungen, daß die Grenze der zulässigen Querströmung mit 0,3 m/s erreicht oder überschritten wird. Bis zu dieser Querströmung kann das Schiff durch seine Ruderkraft (1000 t Schiff mit 8 km/Stunde Geschwindigkeit) noch die Kanaleinfahrt erreichen.

Bei einem verhältnismäßig kurzen oberen Vorhafen muß ein Schiff seine Einfahrtsgeschwindigkeit wesentlich vermindern, um im Vorhafen selbst oder spätestens in der Schleuse zu stoppen. Bei abnehmender Schiffsgeschwindigkeit nimmt auch die Steuerfähigkeit des Schiffes, und zwar mit dem Quadrat seiner Fahrgeschwindigkeit ab. Nimmt also die Schiffsgeschwindigkeit etwa auf $\frac{2}{3}$ ab, so vermindert sich die Steuerfähigkeit auf $(\frac{2}{3})^2 \approx \frac{1}{2}$, bei Abnahme der Schiffsgeschwindigkeit auf $\frac{1}{2}$ geht die Steuerfähigkeit auf $(\frac{1}{2})^2 = \frac{1}{4}$ zurück. Im gleichen Ausmaß müssen dann auch die oben angegebenen Werte für das Verdrehungsmoment verringert werden. Das zulässige Verdrehungsmoment unmittelbar vor der Schleuseneinfahrt beträgt dann höchstens 3 bis 4 tm.

In Anbetracht der Bedeutung, die der oben angeführten Quergeschwindigkeitsgrenze zukommt, wurde nochmals an einem Modell der Staustufe St. Aldegund/Mosel im Maßstab 1 : 33 $\frac{1}{3}$ unverzerrt die unmittelbare Kraftmessung der Messung von Oberflächengeschwindigkeiten gegenübergestellt. Hierbei wurden auch die günstigsten Baumaßnahmen entwickelt, um das Verdrehungsmoment, die Querkraft und die Quergeschwindigkeit auf die oben angeführten zulässigen Maße zu vermindern. Der Fluß wird in diesem Falle um 44 % seiner Breite durch die Vorhäfen für beide Schleusen von 12 und 20 m Breite eingeengt. Bis zu einer größten schiffbaren Wassermenge (HSQ) von 1350 m³/s, bei der der Normalstau zur Vermeidung von Rückstauschäden um einen halben Meter abgesenkt wird, müssen Schiffe noch sicher in den oberen Vorhafen einfahren können. Die mittlere Quergeschwindigkeit im Fluß oberhalb des Oberhafens beträgt dabei 1,35 m/s. Für den Ausgangsvorschlag einer Vorhafenlänge von 258 m mit

flußseitiger fester Mole ergibt sich bei der Einfahrt in den Oberhafen der flußseitigen Schleuse für die größte noch schiffbare Wassermenge (HSQ) von 1350 m³/s ein größtes Schiffsverdrehsmoment von 151 tm und eine größte Querkraft von etwa 15,0 t (siehe Bild 6). Die hierbei ermittelte größte Quergeschwindigkeit beträgt 0,92 m/s. Bei diesen

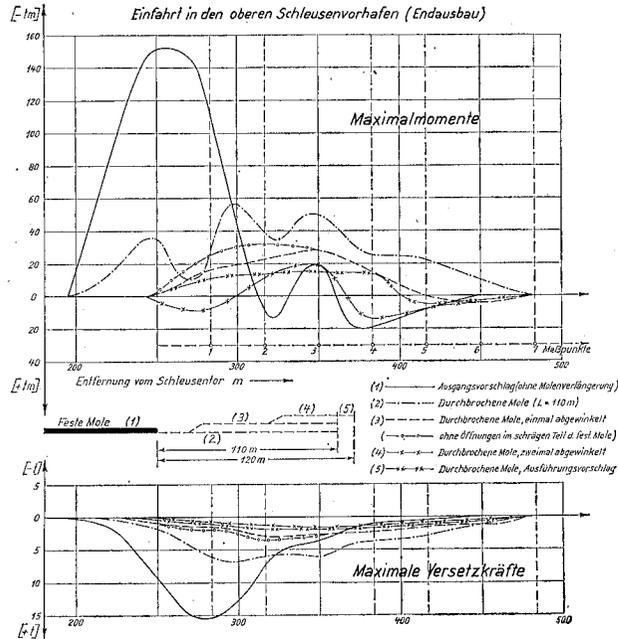


Bild 6
Verdrehsmomente und Querkräfte für ein 1000-t-Schiff

Verhältnissen ist die Einfahrt eines Schiffes bei der größten schiffbaren Abflußmenge unmöglich. Nach früheren Erfahrungen können diese Werte wesentlich verringert werden, wenn die feste Mole des Vorhafens durch eine gerade durchbrochene Mole verlängert wird. Doch müssen diese Durchbrechungen von der Sohle beginnend 1 bis 2 m unter der Wasseroberfläche bleiben, damit ein vorbeifahrendes Schiff nicht von der Strömung, die sich in den Durchbruchöffnungen einstellt, an die Mole gedrückt wird. Für eine optimale Wirkung ist das Öffnungsverhältnis (Summe der Öffnungsfläche : gesamte benetzte Molenfläche) und der Übergang dieses Verhältnisses von der Molenspitze zur festen Mole von besonderer Bedeutung.

Aus der Untersuchung einer größeren Serie der hierfür möglichen Fälle ergab sich als günstigster Fall ein Gesamt-Öffnungsverhältnis von 40 %, wobei dieses im einzelnen von der Molenspitze mit 50 % abnimmt auf 30 % im Übergang zur festen Vorhafenmole. Den Untersuchungen lag stets eine durchbrochene Molenlänge von 100 m zugrunde, der 10 m als Führungslänge vorausgingen. Das Verdrehsmoment wird dadurch auf 57,5 tm bei 6,7 t Querkraft und 0,49 m/s größter Quergeschwindigkeit verringert (Bild 6). Auch diese Werte befriedigen noch nicht. Jedoch ist eine weitere wesentliche Verlängerung der durchbrochenen Mole nicht günstig. Der Linienzug der Verdrehsmomente zeigt deutlich einzelne Zwischenmaxima, deren Beseitigung anzustreben ist. Dies gelang durch Abwinkeln eines Teiles der durchbrochenen Mole um 5 m an der maßgebenden

Stelle. Diese Abwinkelung soll den zum Fluß hinlaufenden Strömungsfäden eine bremsende Stoßkomponente entgegensetzen. Das Verdrehungsmoment ermäßigt sich damit auf 30,5 tm bei 3,6 t Querkraft. Durch einen Wassereinzug in den Vorhafen mit einer maximal auftretenden Längsgeschwindigkeit von 0,30 m/s (Durchbrechen des schrägen Teils der festen Vorhafenmole) und Anordnung einer zweiten Molenabwinkelung kann das Moment auf 20 tm, die Querkraft auf 1,5 t und die größte Quergeschwindigkeit auf 0,28 m/s (in guter Übereinstimmung mit dem oben genannten Wert von 0,30 m/s) verringert werden. Eine bessere Lösung ergibt sich durch weitere Verlängerung der durchbrochenen Mole um 10 m auf insgesamt 120 m Länge und geänderte Öffnungsanordnung in den im Grundriß schrägen Teilen der Mole. Die Molenspitze ist auf 11,6 m Länge nicht durchbrochen. Hierdurch sinkt das Verdrehungsmoment auf 14 tm, die Querkraft steigt auf 1,9 t und die größte Quergeschwindigkeit fällt auf 0,20 m/s ab. Die so gefundene Form der durchbrochenen Mole, die auch bei sehr schlechten Ausgangsverhältnissen bis zur größten schiffbaren Abflußmenge ein sicheres Einfahren gewährleistet, zeigt Bild 7.

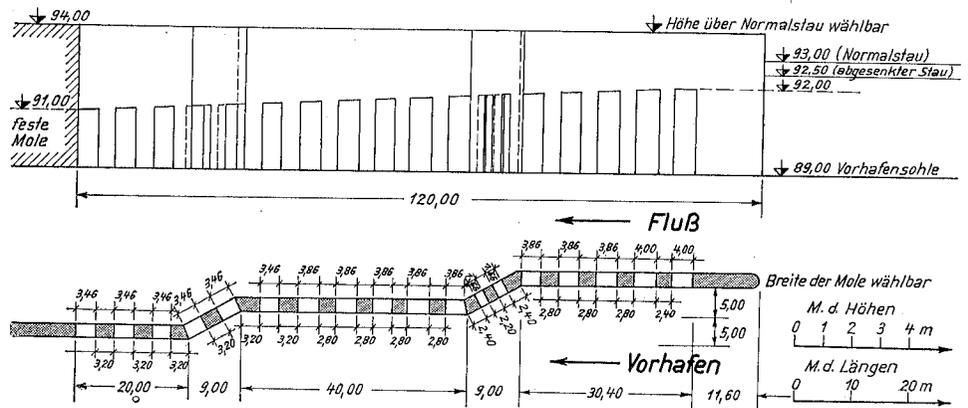


Bild 7

Molenverlängerung am oberen Schleusenvorhafen der Staustufe St. Aldegund/Mosel

Der Wert von 0,20 m/s stellt nunmehr das zulässige Maß für die größte Quergeschwindigkeit beim Eintritt in den oberen Vorhafen dar. Den Zusammenhang zwischen Quergeschwindigkeit und Schiffsverdrehungsmoment zeigt Bild 8.

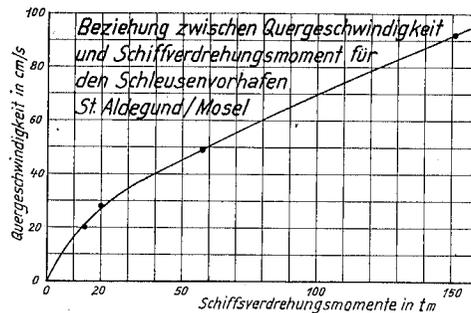


Bild 8

Beziehung zwischen Quergeschwindigkeit und Verdrehungsmoment

Für den unteren Vorhafen sind die Verhältnisse günstiger, da ein einfahrendes Schiff stets die Flußströmung gegen sich hat und dadurch eine gute Steuerfähigkeit hat. Ein ausfahrendes Schiff beschleunigt sich stetig, so daß damit auch seine Steuerkraft zunehmend größer wird. Deshalb kann für den unteren Vorhafen die größte auftretende Quergeschwindigkeit bis zum vollen Wert von 0,30 m/s zugelassen werden. Können die zulässigen Werte für die Verdrehungsmomente und die Querkräfte nicht durch unmittelbare Kraftmessung nachgewiesen werden, gelten die Werte 0,20 m/s für den oberen Vorhafen und 0,30 m/s für den unteren Vorhafen als größte zulässige Werte. Sie können durch entsprechende Baumaßnahmen auch bei sehr schlechten Ausgangsverhältnissen eingehalten werden, wie es die eingehenden Untersuchungen für die 13 neuen Moselstauungen nachweisen.

Wie die Quergeschwindigkeit mit zunehmender Flußwassermenge ansteigt, zeigt eine Untersuchung für den oberen Schleusenvorhafen der Staustufe Müden/Mosel für Wasserführungen von 200, 400, 600, 800, 1000, 1200 und 1400 m³/s. Hierfür wurden die Oberflächen-Geschwindigkeitsfelder vor dem oberen Schleusenvorhafen auf foto-elektrischem Wege ermittelt und daraus für 4 Achsen in 5, 10, 15 und 20 m Entfernung von der festen Mole die Quergeschwindigkeiten ermittelt und unter den entsprechenden Lichtbildern aufgetragen (Bild 5). Das Ergebnis für 10 m Abstand der Schiffsachse von der festen Mole zeigt Bild 9 für 3 Varianten: Ausgangsvorschlag ohne besondere Molenverlänge-

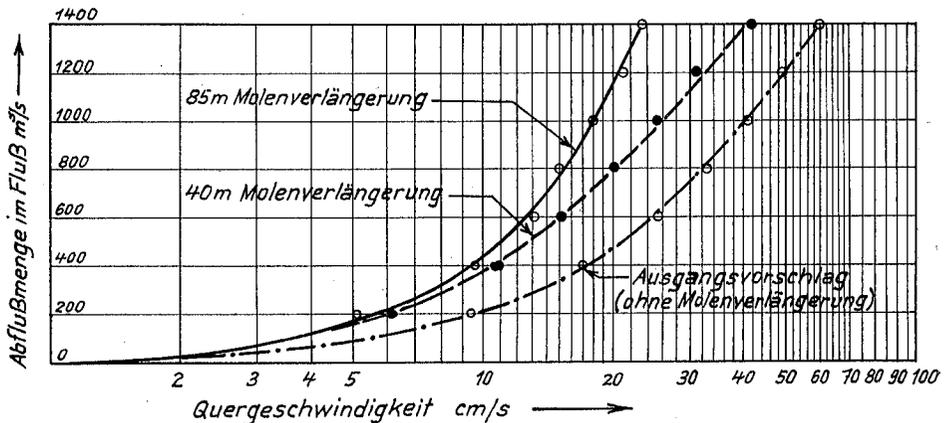


Bild 9

Abhängigkeit der max. Quergeschwindigkeit von der Abflußmenge im Fluß.
Oberer Vorhafen Müden/Mosel

rung, 40 m Molenverlängerung nach der oben beschriebenen Art und 85 m Molenverlängerung. Eine Molenverlängerung von 90 m erlaubt die Einhaltung der Quergeschwindigkeitsgrenze von 0,20 m/s bis zur größten schiffbaren Abflußmenge von 1400 m³/s, während ohne ihre Ausführung die Schifffahrt schon bei etwa 500 m³/s Wasserführung mit ersten Schwierigkeiten zu rechnen hätte. Auf der Mosel müßte dann die Schifffahrt für etwa 2 Monate im Jahr eingestellt werden.

d) Füll- und Entleerungseinrichtungen

I. Allgemeines

Bei der Füllung eines Gefäßes wird die kinetische Energie des Wassers im Gefäß in eine andere Energieform umgewandelt. Der Füllvorgang und die Fülleinrichtungen sind deshalb für das Prisma einer Kammerschleuse, dessen Länge die Breite und Tiefe allgemein um ein Vielfaches übersteigt, von übergeordneter Bedeutung. Die Entleerung und die Einrichtungen für die Entleerung werden durch die Maßnahmen zur Füllung weitgehend bestimmt. Sie sind bei Doppelschleusen besonders zu beachten, wenn die Wirkung des Entleerungswassers auf ein in die zweite Kammer einfahrendes Schiff beurteilt werden muß.

Für die Wahl und die Bemessung von Füll- und Entleerungseinrichtungen an Schiffschleusen sind folgende grundsätzliche Überlegungen maßgebend:

1. Die hydraulischen Vorgänge in der Kammer während der Füllung und Entleerung sollen eine möglichst ruhige Lage des Schiffs gewährleisten. Ein in der Schleusenkammer liegendes Schiff folgt unmittelbar der Neigung des Wasserspiegels. Sie hat verschiedene Ursachen:

- a) Beim Eintritt des Füllstrahls in das bei Beginn der Füllung noch geringe Wasserpulster der Schleusenkammer wird die Geschwindigkeit des eintretenden Füllstrahles in Druck umgewandelt.
- b) Der Schiffswiderstand erzeugt einen Aufstau vor dem Schiff.
- c) In den langen, schmalen Kammern treten durch die Veränderung des sekundlichen Zuflusses dQ/dt [m³/s²] erhebliche Schwallen mit Reflexionen auf.

Um während der Füllung oder Entleerung der Schleusenkammer die Bewegungen des Schiffes auf ein ungefährliches Maß zu verringern, wird das Schiff am Bug und am Heck mit Stahlrossen an Haltekreuzen in der Kammerwand festgehalten. Dadurch entstehen Kräfte in den Trossen, deren zulässige Größe bisher zu $1/600$ bis zu $1/1000$ des Bruttoschiffsgewichts angenommen wurde. Für ein Schiff von 1200 Tonnen Gewicht ergibt sich damit eine maximal zulässige Trossenkraft von 2,0 t (10fache Sicherheit). Die neuzeitlichen Füllmaßnahmen zielen darauf ab, die Vertäuung der Schiffe in der Kammer überflüssig zu machen.

2. Die Füllzeit der Kammer soll möglichst kurz sein. Sie ist von der größten zulässigen Wasserentnahme aus dem Fluß oder aus dem oberen Vorhafen abhängig. Bei Entnahme aus dem oberen Vorhafen ist eine zu große Sunktiefe, vor allem eine zu große Sunkneigung zu vermeiden. Eine mittlere Strömungsgeschwindigkeit von 0,4 bis 0,5 m/s soll an der Stelle des oberen Vorhafens nicht überschritten werden, an der er vom Oberhaupt ausgehend seine größte Breite erreicht. Bei unbeschränkter Wasserentnahme aus dem Fluß hängt die Füllzeit von der zulässigen Trossenkraft ab, die aber durch entsprechende, wenn auch baulich aufwendige Maßnahmen reduziert werden kann. Im Endziel ist bei Mehrzwecke-Stauanlagen nur die aus dem Gesamtbetrieb der Anlage sich ergebende für den Schiffahrtsbetrieb verfügbare Füllwassermenge für die Füllzeit maßgebend.

3. Die Antriebsorgane der Verschlüsse für die Füll- und Entleerungseinrichtungen sollen aus maschinen- und betriebstechnischen Gründen möglichst mit einer gleichförmigen Geschwindigkeit bewegt werden. Sie weichen damit allerdings von dem Ideal der sich stetig steigernden Geschwindigkeit ab.

Wenn unmittelbar durch das Tor gefüllt wird, lassen sich ohnehin zwei Antriebsgeschwindigkeiten nicht vermeiden, da nach beendetem Füllvorgang das Tor rasch vollständig gehoben (Hubtor) oder abgesenkt (Senktor, Hub-Senktor) werden muß, damit das Schiff in die Schleusenammer einfahren kann.

Für die Hubgeschwindigkeiten von Toren und Schützen können folgende Werte als Anhalt dienen:

- a) Tore Füllen (Oberhaupt)
 - Senken 1,5 bis 2,0 mm/s
 - Heben 1,0 bis 2,0 mm/s
- Entleeren (Unterhaupt)
 - Heben 2,0 bis 3,0 mm/s
- b) Schütze (im Tor oder in Umläufen)
 - Oberhaupt 2,0 bis 4,0 mm/s
 - Unterhaupt 3,0 bis 5,0 mm/s
- c) Schütze (in Längskanälen und Grundläufen) 10,0 bis 30,0 mm/s

Die mittlere Steiggeschwindigkeit des Wasserspiegels in der Kammer soll aus Rücksicht auf die Trossenkräfte bei der Füllung vom Oberhaupt durch das Tor folgende Werte nicht überschreiten:

- im Mittel 0,9 bis 1,1 m/min
- maximal 1,6 bis 2,0 m/min

Wird die Kammer mit sich stetig steigender Öffnungsgeschwindigkeit der Füllorgane, etwa durch hydraulische Steuerung bei unbeschränkter Füllwassermenge und unter Verwendung von Längskanälen und Grundläufen gefüllt, können mittlere Steiggeschwindigkeiten bis zu 3,5 m/min erreicht werden. Nennenswerte Trossenkräfte sind hierbei zu vermeiden.

II. Hydraulische Grundlagen

Jeder Füll- und Entleerungsvorgang wird durch die Hub-(Senk-)kurve ($H = f(t)$) und durch die Füll-(Entleerungs-)wassermengenkurve ($Q = f(t)$) gekennzeichnet (Bild 10).

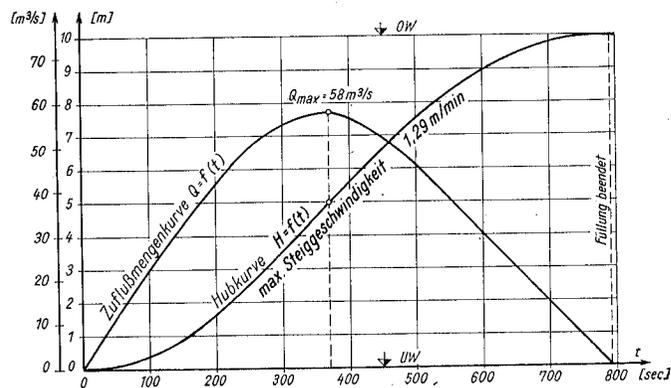


Bild 10
Hubkurve, Füllwassermengenkurve

Folgende Füllphasen können bei einer Kammerfüllung auftreten:

- A. Füllung mit konstanter Druckhöhe
 - a) durch stetig zunehmenden Füllquerschnitt
 - b) durch konstanten Füllquerschnitt
- B. Füllung mit veränderlicher Druckhöhe
 - a) durch stetig zunehmenden Füllquerschnitt
 - b) durch konstanten Füllquerschnitt

Eine nicht stetige Zunahme des Füllquerschnitts hat hydraulische und für die Bewegung des Schiffes in der Kammer beachtliche Vorteile. In der nachfolgenden hydraulischen Analyse wird nur die stetige (lineare) Zunahme des Füllquerschnittes berücksichtigt.

Es bedeuten:

- t = Zeit [sec]
- h = konstante Druckhöhe [m]
- H_t = Druckhöhe zur Zeit t [m]
- Q_t = Füllwassermenge zur Zeit t [m³/s]
- f_0 = Füllquerschnitt vor Beginn der Füllung [m²]
- F = Gesamtfläche der Schleusenkammer [m²]
- F_0 = Fläche des Speicherbeckens im Oberwasser [m²]
- c = Flächenzunahme des Füllquerschnitts [m²/s]

Der Verlustbeiwert μ kann je nach Füllart in folgender Größenordnung geschätzt werden:

μ_T = Füllung durch das Tor	0,60 bis 0,70
μ_K = Füllung durch Torumläufe	0,50 bis 0,60
μ_L = Füllung durch Längskanäle (Grundläufe)	0,60 bis 0,85
μ_S = Füllung aus Speicherbecken	0,55 bis 0,65

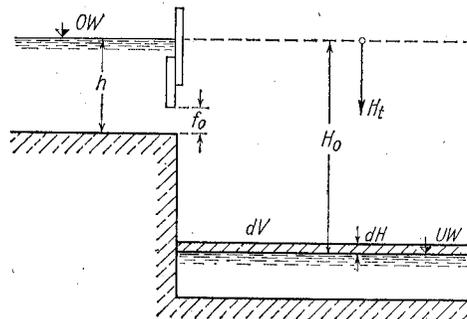


Bild 11
Füllung mit konstanter Druckhöhe

A. Füllung mit konstanter Druckhöhe (Bild 11)

Der Füllvorgang wird durch folgende Differentialgleichung ausgedrückt:

$$Q \cdot dt = + dV = - F \cdot dH \tag{1a}$$

$$\text{Mit } Q = \mu \cdot f \cdot v = \mu (f_0 + c \cdot t) \cdot \sqrt{2g} \sqrt{h} \tag{2}$$

geht Gl. (1a) über in

$$- F \cdot dH = \mu (f_0 + c \cdot t) \sqrt{2g} \cdot \sqrt{h} \cdot dt \tag{1b}$$

Durch Integration in den Grenzen $t = 0$ und $t = t$ erhält man

$$F (H_t - H_0) = - \mu \sqrt{2g} \sqrt{h} \left(f_0 + \frac{c \cdot t^2}{2} \right)$$

oder

$$H_t = H_0 - \frac{\mu \sqrt{2g} \sqrt{h}}{F} \left(f_0 + \frac{c \cdot t^2}{2} \right) \tag{3}$$

Die Füllwassermenge berechnet sich aus

$$Q_t = \mu (c \cdot t) \sqrt{2g} \sqrt{h} \tag{4}$$

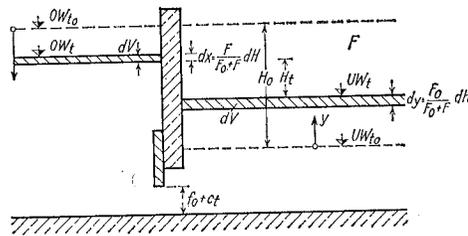


Bild 12

Füllung mit veränderlicher Druckhöhe

B. Füllung mit veränderlicher Druckhöhe (Bild 12)

Mit den Bezeichnungen von Bild 12 ergeben sich folgende Ansätze für den Füllvorgang:

$$dV = F \cdot dx = F \cdot dy \text{ und } - dH = dx + dy$$

Daraus folgt

$$dy = - \frac{F_0}{F + F_0} \cdot dH \text{ und } dx = - \frac{F}{F_0 + F} \cdot dH$$

und

$$- \frac{F_0 \cdot F}{F_0 + F} \cdot dH = dV = Q \cdot dt \tag{5a}$$

Mit Q aus Gl. (2) geht Gl. (4a) über in

$$\frac{F_0 \cdot F}{F_0 + F} \cdot dH = - \mu (f_0 + c \cdot t) \sqrt{2g} \sqrt{H_t} \cdot dt$$

Nach Trennung der Veränderlichen:

$$\frac{dH}{\sqrt{H_t}} = - \frac{\mu \sqrt{2g} (F_o + F)}{F_o \cdot F} (f_o + c \cdot t) dt \quad (5b)$$

Aus der Integration der Gl. (4b) in den Grenzen $t = 0$ und $t = t$ folgt

$$\sqrt{H_t} = \sqrt{H_o} - \frac{\mu \sqrt{2g} (F_o + F)}{2 \cdot F_o \cdot F} (f_o \cdot t + \frac{c \cdot t^2}{2}) \quad (6)$$

Die Füllwassermenge wird aus

$$Q_t = \mu (f_o + c \cdot t) \sqrt{2g} \sqrt{H_t} \quad (7)$$

berechnet, wobei $\sqrt{H_t}$ aus Gl. (6) einzusetzen ist

III. Verschiedene Arten der Füllung

1. Entnahme aus dem oberen Vorhafen

An den Wasserstraßen mit Mehrzwecke-Stauanlagen wird das Füllwasser für die Schleusen meistens den oberen Vorhäfen entnommen. An sich verlangt schon die Verkehrsichte breite Vorhäfen für einen reibungslosen Betrieb. Dadurch bleiben bei der Entnahme von Füllwasser die Strömungsgeschwindigkeiten in dem für die Steuerfähigkeit der Schiffe zulässigen Bereich. Die Füllzeit ist dann im wesentlichen durch die Füllschwalle in der Kammer und die davon abhängigen Trossenkräfte beschränkt.

1.1 Füllung vom Oberhaupt

Jede Füllung einer Schleuse vom Oberhaupt hat die gleichen hydraulischen Merkmale. Der Füllschwall verursacht zuerst eine Wasserspiegelneigung zum Unterhaupt. Durch Reflexion am unteren Tor und Überlagerungen der einzelnen Schwalle tritt im Verlauf des Füllvorgangs eine Neigung zum Oberhaupt auf, die bis zum Ende der Füllung durch den abnehmenden sekundlichen Zufluß dQ/dt nahezu verschwindet. Die auf das Schiff einwirkenden Kräfte entsprechen je nach Lage des Schiffes in der Kammer den Neigungen des Wasserspiegels.

Das Füllwasser wird im Bereich des Oberhauptes auf kürzestem Weg in die Kammer geleitet. Konstruktiv ergeben sich zwei grundsätzliche Möglichkeiten:

- a) Füllung durch Tore verschiedener Bauart: Hubtor, Hub-Senktor, Senktor, Stemmtore mit eingebauten Füllöffnungen (Segmente, Rollkeilschütze), Segmenttor, Klapptor.
- b) Füllung durch Torumläufe mit besonderen Verschlüssen. Sie haben gegenüber der unmittelbaren Füllung durch das Tor den Vorteil, daß bei Ausfall einer Seite der Torumläufe die Kammer durch die zweite Seite, wenn auch langsamer, gefüllt werden kann.

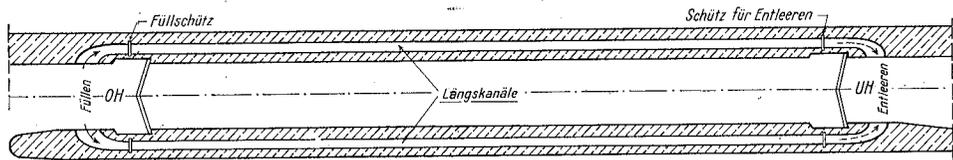
Von der Wiedergabe der außerordentlich mannigfaltigen Ausführungsarten der Verschlüsse wird mit Absicht abgesehen, weil ihre Formen ort- und zweckgebunden, und die Konstruktionsarbeit eine Aufgabe des konkurrierenden Stahlwasserbaues ist. Bei Mehrzwecke-Stauanlagen ist die Dichtung jeglicher Verschlusßart besonders zu beachten. Wasserverluste infolge nicht einwandfreier Dichtungen an den Verschlüssen der Wehr- und Schleusanlage bedeuten den Verlust von elektrischer Energie oder sonstiger Nutzungen des Zuflusses.

Bei Beginn der Füllung vom Oberhaupt trifft der Füllstrahl in der Kammer auf ein niedriges Wasserpolster. Die entstehenden Schwallen rufen durch Reflexionen am unteren Tor und an den Kammerwänden Wasserspiegelneigungen hervor, deren Auswirkungen auf das in der Kammer liegende Schiff in Längs- und in Querrichtung Gefahrezustände erzeugen können. Deshalb muß bei der Füllung vom Oberhaupt die Energieumwandlungsanlage besonders sorgfältig ausgebildet werden. Sie hat die Aufgabe, Ungleichmäßigkeiten des in die Kammer eintretenden Füllstrahls, die sich als heftige Querimpulse bemerkbar machen, zu dämpfen und auszugleichen. Von den Möglichkeiten einer ausreichenden Energieumwandlung hängen die Öffnungsgeschwindigkeiten der Füllorgane, die auftretenden Trossenkräfte und die Füllzeit ab. Die konstruktiven Eigenarten der Energieumwandlungsumlage sind bei der Füllung durch das Tor abhängig von der Form des Verschlusses. Diese Einheit kann vielfach nur durch Modellversuche gefunden werden.

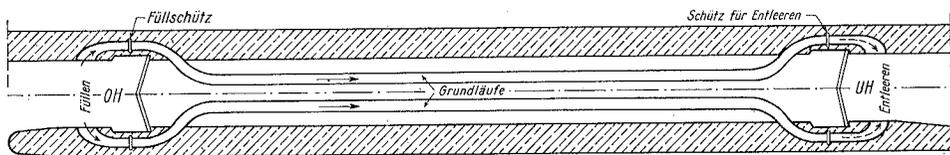
1.2 Füllung durch Längskanäle oder Grundläufe mit Stichkanälen

Das Füllwasser ist auf die gesamte Kammerlänge verteilt. Der Füllschwall wird dadurch bei größeren mittleren Steiggeschwindigkeiten des Wasserspiegels erheblich verringert. Die hydraulischen Zusammenhänge sind nicht mehr eindeutig wie bei der Füllung vom Oberhaupt, sondern hängen von der Anordnung und Zahl der Stichkanäle, sowie der Speisung der Grundläufe oder Längskanäle ab. Die Schiffskräfte werden deshalb auch von der Lage des Schiffs in der Kammer beeinflusst.

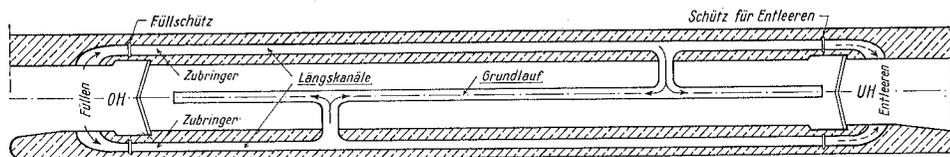
Für den Entwurf eines Längskanal- oder Grundlaufsystems bieten sich viele Möglichkeiten an.



a. Reines Längskanalsystem mit waagrechten Stichkanälen



b. Reines Grundlaufsystem mit lotrechten Stichkanälen



c. Längskanal-Grundlaufsystem mit waagrechten und lotrechten Stichkanälen

Bild 13
Längskanal-Grundlaufsystem

Beim reinen Längskanalssystem mit waagrechten Stichkanälen (Bild 13a) und beim reinen Grundlaufsystem mit lotrechten Stichkanälen (Abb. 13b) kann die beidseitige Entnahme aus dem oberen Vorhafen oder eine Entnahmeöffnung in der Sohle des oberen Vorhafens vorgesehen werden. Das Längskanal-Grundlaufsystem (Bild 13c) gewährleistet nach den neuesten Untersuchungen die optimale Verteilung des Füllwassers über die gesamte Kammerlänge. Von Bedeutung ist die Wahl der Punkte, an denen die Einleitung des Füllwassers aus den Längskanälen in die Grundläufe erfolgt (Bild 13c).

Längskanäle oder Grundläufe werden dort angewendet, wo die Verkehrsdichte kleine Füllzeiten verlangt.

1.3 Kombinierte Füllung

Als „kombinierte Füllung“ wird die gleichzeitige Füllung durch ein Längskanal- oder Grundlaufsystem und die Füllung durch das Obertor bezeichnet.

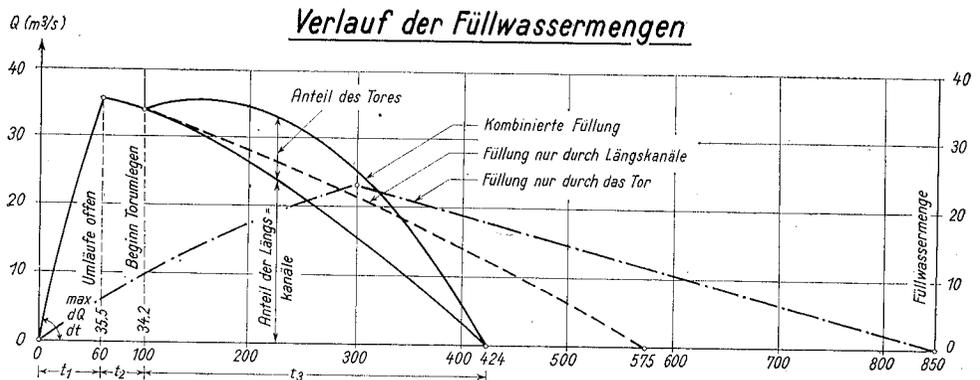


Bild 14
Kombinierte Füllung

Auf Bild 14 ist der Verlauf der Füllwassermengen in Abhängigkeit von der Füllzeit dargestellt. Gegenüber der einfachen Füllung durch das Tor dauert die kombinierte Füllung nur die halbe Zeit. Das Öffnen des Tores (oder der Torschütze) muß derart erfolgen, daß während einer möglichst großen Zeitspanne Q möglichst groß bleibt.

Es muß in jedem besonderen Fall ein betriebswirtschaftlicher Nachweis geführt werden, daß der Bauaufwand dieser Einrichtung vertretbar ist.

2. Entnahme unmittelbar aus dem gestauten Fluß

Bei genügender Wasserführung des Flusses, aber begrenztem Querschnitt des oberen Vorhafens, kann das Füllwasser ganz oder teilweise unmittelbar der Stauhaltung des Flusses entnommen werden. Bei den neueren Mehrzweck-Stauanlagen an Flüssen geringer Breite wird diese Art der Entnahme bevorzugt, da die Schiffsbewegungen im oberen Vorhafen nicht gestört werden.

2.1 Füllung durch Längskanäle oder Grundläufe mit Stichkanälen

Bild 15 zeigt die Systematik der Speisung des Grundlaufsystems einer Schleuse unmittelbar aus dem Stauraum einer Mehrzwecke-Stauanlage. Die Zubringerkanäle liegen in den Viertelpunkten der Schleusenammer. Die Einläufe müssen hydraulisch so ausgebildet werden, daß keine Luft unter Wirbelbildung miteingerissen wird.

Die Entleerung erfolgt unmittelbar in das Unterwasser der Stauanlage.

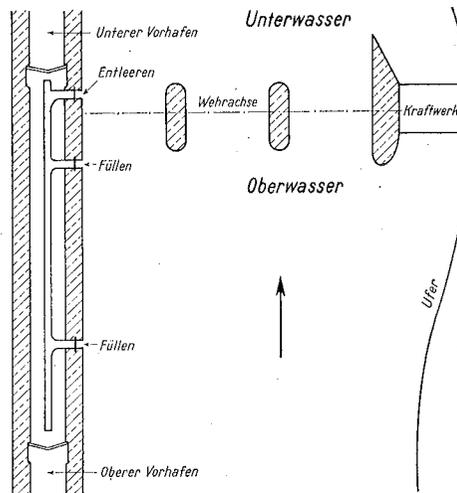


Bild 15
Entnahme unmittelbar aus dem gestauten Fluß

2.2 Füllung vom Oberhaupt und Unterhaupt

Auf ein Längskanalssystem kann verzichtet werden, da die hydraulischen Voraussetzungen ein schnelleres Füllen als nur vom Oberhaupt erlauben. Die Füllwassermengen an den Häuptern sollen gleich groß sein. Die Füllorgane sind so zu steuern, daß die Füllschwalle sich gegenseitig aufheben. Durch geeignete konstruktive Maßnahmen ist eine möglichst gleichmäßige Verteilung über die ganze Kammerbreite anzustreben.

3. Füll- und Betriebseinrichtungen in besonderen Fällen

Die wasserwirtschaftlichen Eigenarten eines Flusses erfordern von den Benutzern der Mehrzwecke-Stauanlage eine gegenseitige Berücksichtigung des Wasserdargebots.

3.1 Bei Niedrigwasser stört die Entnahme des Schleusungswassers den Betrieb einer Wasserkraftanlage. An Doppelschleusen kann die Hälfte der Füllwassermenge gespart werden, wenn eine besondere Einrichtung vorhanden ist, die den gegenseitigen Austausch des Wassers zwischen den Schleusen ermöglicht. Die Doppelschleuse wird dann zur „Zwillingsschleuse“ (Bild 16).

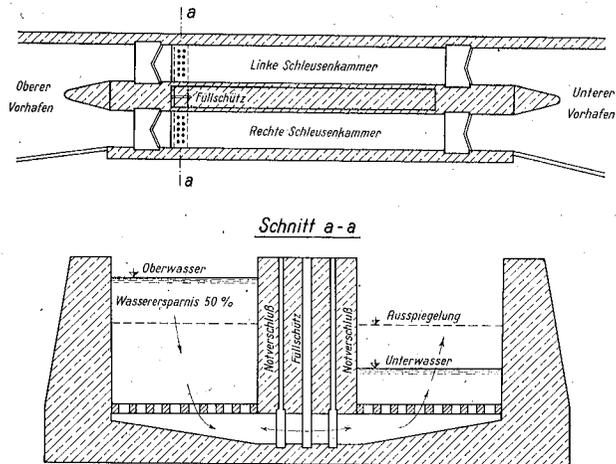


Bild 16
Zwillingsschleuse

Die Anordnung hat den betriebstechnischen Nachteil, daß die Füll- und Entleerungsvorgänge in beiden Kammern voneinander abhängig sind. Sie wird daher auch nur bei geringer Wasserführung des Flusses in Betrieb genommen.

3.2 Die sichere Hochwasserabführung ist bei den meist in unmittelbarer Nähe menschlicher Siedlungen liegenden Mehrzweck-Stauanlagen unbedingt notwendig. Die eigentliche Stauanlage wird deshalb so bemessen, daß bei erforderlichen Wehrröffnungen und dem Versagen eines Verschlusses eine zusätzliche Entlastungsanlage für das Wehr vorhanden ist. Die Schleusen können als zusätzliche Entlastungsanlagen für das Wehr benutzt werden, wenn die Ausbildung der Kammer und ihre Verschlüsse von vornherein auf die betrieblichen und hydraulischen Besonderheiten einer derartigen Mehrzweckschleuse Rücksicht nehmen. Schleusensole und Drempeel des Oberhauptes sollen auf gleicher Höhe liegen. Die Oberhäupter von Doppelschleusen müssen die gleiche Drempeelhöhe aufweisen, da andernfalls die Anströmungsverhältnisse ungünstig sind. Der Verschuß im Oberhaupt verlangt besonders große Betriebssicherheit. Das Öffnen und Schließen des Verschlusses muß jederzeit gewährleistet sein, der Verschuß muß also den Anforderungen genügen, die an einen Weherverschuß gestellt werden. Diese Forderung schließt eine Benutzung des Obertores zur Füllung der Kammer nahezu aus. Die Verschlüsse im Unterhaupt sind, wenn sie nicht vollständig aus dem Wasser gehoben werden können (Hubtor) gegen Beschädigung bei Hochwasser zu sichern.

Die Abflußleistung einer Schleusenammer entspricht etwa derjenigen eines gleichbreiten Weherverschlusses, wenn der obere Vorhafen eine eindeutig günstige Anströmung des oder der Obertore gewährleistet.

Im oberen Vorhafen einer Mehrzweck-Stauanlage sammeln sich bei Hochwasser oft erhebliche Mengen von *Treibzeug* und *Geschwemmsel* an. Die Verunreinigungen der Wasseroberfläche sollen nach Ablauf des Hochwassers möglichst rasch und ohne größere Wasserentnahme aus dem oberen Vorhafen in das Unterwasser abgeleitet werden. Der Verschuß im Oberhaupt muß dieser Forderung entsprechen. Das Hub-Senktor gestattet z. B. durch seine betriebliche Eigenart bei geöffnetem Unterhauptverschuß eine

rasche Abführung des Treibzeugs (Eis) in das Unterwasser. Bei einer anderen Verschlußart im Oberhaupt läßt sich das Treibzeug oder Eis durch eine aufgesetzte Klappe durch die Schleusenammer in das Unterwasser abführen.

IV. Entleerung

Die Entleerungszeiten entsprechen im allgemeinen den Füllzeiten. Bei der Entleerung in den unteren Vorhafen sorgt eine toskammerartige Energieumwandlungsanlage am Unterhaupt für eine gleichmäßig und ruhige Abströmung des Entleerungswassers. Bei Einzelschleusen und symmetrischer Erweiterung des Vorhafens sind ungünstige Strömungsverhältnisse nicht zu erwarten. Beim Entleeren von Doppelschleusen tritt häufig der Betriebszustand auf, daß eine Kammer zur Aufnahme des bergfahrenden Kahnens bereit und geöffnet ist, während die zweite Kammer entleert wird. Im nicht durchströmten Teil des breiten unteren Vorhafens bildet sich hierdurch eine lange bergwärts drehende Walze mit lotrechter Achse, die sogar in die Fahrstraße der zweiten Kammer reicht. Durch die Intensität der Drehbewegung würde das Schiff, das im Drehsinn der Walze in die Kammer einfahren muß, aus dem Ruder laufen.

Es müßte warten bis die Drehbewegung der Walze abgeklungen ist. Diese Wartezeit vermindert die Verkehrsleistung der Schleuse. Es bedarf eines geringen Impulses, um die Drehbewegung der Walze aufzuhalten. Es kann durch die Mittelmole zwischen den beiden Schleusen aus dem Oberwasserstand ein Strahl in das Unterwasser gelenkt werden, der nach rechts und links die Walzenbewegung sich nicht entfalten läßt. Die Entnahme aus dem Oberwasser ist ein Wasserverlust für andere Nutzungen. Es lassen sich ferner im unteren Vorhafen unterhalb der Mittelmole und außerhalb der Fahrstraße Leitflügel zur Umlenkung des austretenden Entleerungsstrahles anordnen. Es kann schließlich das Entstehen der schädlichen Drehbewegung durch einen langsameren Entleerungsvorgang der Kammer vermieden werden. Die Entleerungszeit wird dadurch größer und die Leistung der Schleusenanlage geringer.

e) Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen bei der Bemessung der Schleusenammer und der Leit- und Schutzmauern

1. Allgemeines

Für die Länge und Breite der Schleusenammer, sowie für die Höhenlage der Schleusensole unter dem NSW sind maßgebend die Schiffsgrößen und Schiffszüge der einzelnen Wasserstraßen oder des zusammenhängenden Wasserstraßennetzes. In zunehmendem Maße hat sich das Schiff mit eigener Triebkraft auch auf den Binnenwasserstraßen durchgesetzt. Die langen Schlepzzüge beschränken ihre Fahrt auf den Unterlauf der großen Ströme, wo wegen des geringen Gefälles und trotz vielfach vorhandener großer Abflußmengen Stauanlagen mit dem Ziel der Wasserkraftnutzung sich nicht lohnen. Nur wenn Erosion die Sohle austieft und die Stauanlage das Fortschreiten dieses Vorganges wegen seiner schädlichen Einwirkungen auf die Grundwasserstände vermindert, ist die Mehrzwecke-Stauanlage auch bei geringem Gefälle notwendig. Ebenso kann in Felsstrecken mit großem Gefälle, aber sehr ungleichförmiger Sohle, zur Verbesserung der Schifffahrt eine Stauanlage zweckmäßig sein. Das in der Fallhöhe zusammengefaßte Gefälle wird durch eine Schleusenanlage überwunden, bei der Länge und Breite der Kammer, sowie die Leit- und Schutzmauern dem örtlich vorhandenen oder zu erwartenden Verkehr anzupassen sind. Von einer Wirtschaftlichkeit solcher Einzelstufen im allgemein wirtschaftlichen, privat- oder betriebswirtschaftlichen Sinne kann nicht gesprochen werden, da ihre Wirkung sich nicht auf das Objekt, sondern auf eine geschätzte oder

schwer errechenbare zukünftige Entwicklung des Schiffsverkehrs stützt. Jedenfalls wird diese Schleusenanlage groß anzulegen sein. Für europäische Maßstäbe sind Kammerbreiten bis 24 m und Kammerlängen bis 220 m bei mindestens 3,5 m Tiefe der Kammersohle unter NSW nötig.

Einer betriebswirtschaftlichen Rechnung oder Schätzung eher zugänglich sind Flußstrecken von über 100 km Länge mit einheitlicher Ausbaugröße und Ausbauart. Da jedoch der Bauvortrag solcher langen Kraftwasserstraßen erfahrungsgemäß viele Jahre, wenn nicht Jahrzehnte, dauert, können die Betriebsarten, für die die Schleusen bemessen werden, sich oft grundlegend ändern. So verlangte die Flößerei auf dem Main eine 300 m lange Schleusenkammer. Flöße fahren auf dem Main nur noch selten zu Tal, so daß die 300 m lange Kammermündung durch ein Mittelhaupt in eine 100 und eine 200 m lange Kammer unterteilt wird. Um an Füllwasser zu sparen, ein Vorgang der gleichbedeutend mit Energiegewinn im Kraftwerk ist, wird nur die für die rasche Abwicklung des Schiffsverkehrs notwendige Kammer gefüllt.

Die Schätzungen des künftigen Verkehrs, die von einem vorhandenen Güterumlauf ausgehen und eine knappe Zuwachsrate berücksichtigen, werden nach Inbetriebnahme einer Wasserstraße oder eines industriell bedeutsamen Teilstückes der Wasserstraße meist rasch überholt. Für die Teilstrecke des Neckars von der Rheinmündung bis Heilbronn waren 1925 etwa 2 Millionen Tonnen Umschlag auf der ganzen Strecke vorausgerechnet. Allein im Hafen Heilbronn wurden 1955 etwa 8 Millionen Tonnen umgeschlagen. Der Umschlag des Hafens Basel war 1925 mit 1,3 Millionen Tonnen geschätzt. Er beträgt 1960 nach dem Ausbau des Oberrheins 6 Millionen Tonnen.

Die beiden Angaben über den Hafenumschlag kennzeichnen den Charakter einer Wasserstraße für die Entwicklung seines Hinterlandes. Aus diesen im voraus unwägbareren Größen läßt sich die Wirtschaftlichkeit einer Schleusenanlage äußerst schwer ableiten. Für die genannte Neckarstrecke, deren Mehrzweck-Stauanlagen zunächst mit einer 110 m langen und 12 m breiten Schleusenkammer ausgerüstet waren, verlangte die zunehmende Verkehrsdichte die zweite, daneben liegende Schleusenkammer und die Erweiterung der Leit- und Schutzmauer.

Welcher Art von Erweiterung bei geändertem oder vergrößertem Verkehrsanfall der Vorzug zu geben ist, kann allgemein nicht bestimmt werden. Hier spielen Topographie des Flußtales, Morphologie des Flusses, industrielle und landwirtschaftliche Siedlung, Landschaftscharakter und die primäre Aufgabe des Flusses, Vorfluter der Tallandschaft zu sein, eine oft entscheidendere Rolle, als die mit der Zahl ausgeklügelten Einsparungen an Fracht oder ein mit Imponderabilien belasteter Wirkungsgrad der Schleuse.

Was berechnet werden kann und in die wirtschaftliche Betrachtung einer Schiffahrtsanlage eingeht, sind die Bauwerke selbst, bei denen durch theoretische und praktische Erkenntnisse ein ausgereifter Plan entsteht. Solche Möglichkeiten, die Uferbegrenzungen im Bereich eines Schleusenbauwerks wirtschaftlich zu gestalten, liegen in der statisch günstigen Beeinflussung der angreifenden Kräfte.

2. Beeinflussung des Erddruckes

Schwergewichtsmauern erhalten infolge der Verteilung der angreifenden Kräfte einen nach unten zunehmenden dreiecksförmigen Querschnitt mit senkrechter Vorderseite und geneigter Rückseite. Die Größe und die Richtung des an der Mauerrückseite angreifenden Erddruckes hängen u. a. auch vom Wandreibungswinkel δ ab, dessen Größtwert gleich dem Winkel ρ der inneren Reibung ist.

Das umstürzende Moment des Erddruckes sinkt mit wachsendem δ so daß in dieser Hinsicht diejenigen Querschnittsformen am wirtschaftlichsten sind, die es erlauben, den Größtwert $\delta = \rho$ anzusetzen. Wendet man deshalb anstelle einer ebenen Rückfläche mit $\delta < \rho$ z. B. eine abgestufte Rückwand an (Bild 17), dann verläuft die sekundäre

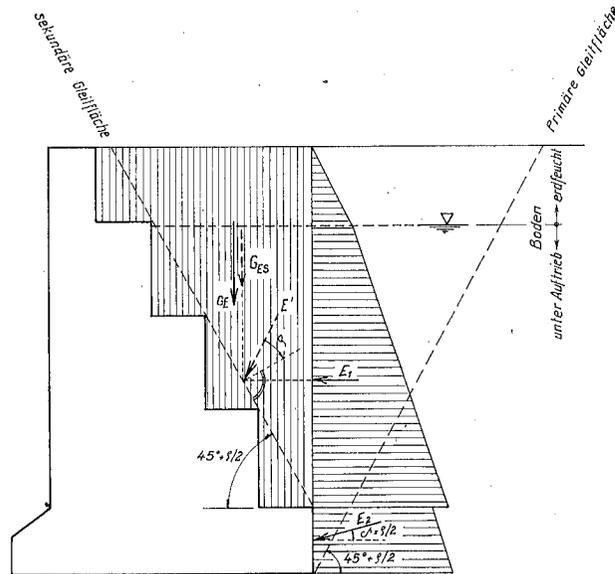


Bild 17

Erddruck auf eine Stützmauer mit abgestufter Rückwand

Gleitfläche im Erdreich. Damit setzt sich im Bereich der Stufen der jetzt unter $\delta = \rho$ geneigte Erddruck E' aus dem Rankine'schen Erddruck E_1 auf eine durch die Mauerhinterkante gezogene senkrechte Fläche und dem Gewicht G_{ES} des Erddruckes zwischen dieser Fläche und der sekundären Gleitfläche als stabilisierender Auflast zusammen. (In der praktischen Rechnung wird G_{ES} mit dem Gewicht des Erdreiches unterhalb der sekundären Gleitfläche zum Gesamtgewicht G_{ES} zusammengefaßt).

Allgemein kann dieser Vorteil erzielt werden, wenn die Mauerrückfläche so rauh gestaltet wird, daß ein Wandreibungswinkel $\delta = \rho$ gewährleistet ist. Dazu kann auch an Stelle einer glatten Schalung ein sägeförmiges Profil angewendet oder die Schalung durch ein Maschendrahtgewebe oder Streckmetallgewebe ersetzt werden. Trotz der höheren Kosten für derartige Sonderschalungen werden die Querschnitte durch Einsparung an Mauerdicke wirtschaftlicher.

3. Beeinflussung des Wasserdruckes

Der Grundwasserstand hinter den Schleusen- und Leitmauern und damit die Belastung der Mauerrückflächen durch Wasserdruck werden durch den Verlauf der Sickerströmung um die Schleuse herum vom Oberwasser zum Unterwasser bestimmt. Da der Wasserdruck einen hohen Anteil an den umstürzenden Kräften besitzt, kann jede Maßnahme zur Herabsetzung des Grundwasserspiegels die Bemessung der Mauer wirtschaftlich

beeinflussen. Dazu gehören in erster Linie eine wirksame Querabriegelung der Sickerströmung am Oberhaupt und eine zuverlässige Abführung des Grundwassers unterhalb der Abriegelung. Als Beispiel diene die Ausführung an der Schleuse in Jochenstein (Bild 18). Der Boden hinter den Schleusenmauern wird durch die Oberkanalufermauern

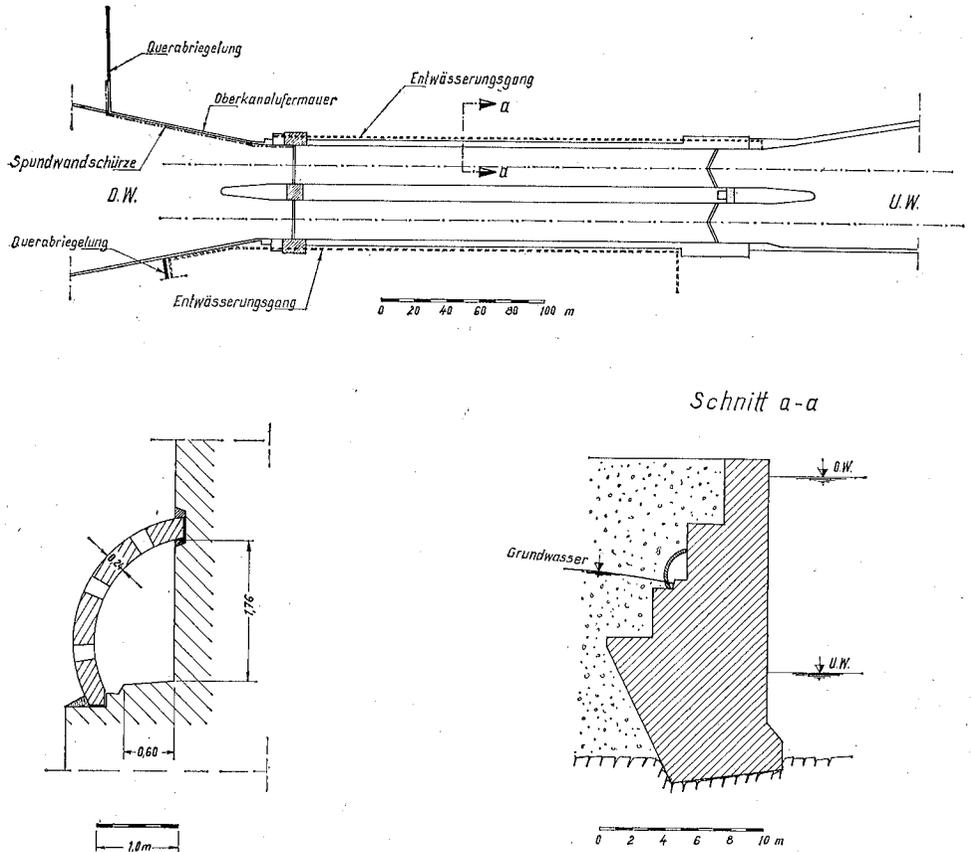


Bild 18

Donaustufe Jochenstein. Entwässerungsgänge hinter den Schleusenkammermauern

und daran anschließende, massive Querabriegelungswände gegen das Oberwasser zu abgeschirmt. Auf einer Stufe der abgetreppten Schleusenmauerrückwand leitet ein begehbare Entwässerungsgang das Grundwasser im freien Gefälle ins Unterwasser ab und sichert damit die Mauer gegen eine Überschreitung des der Berechnung zugrundegelegten niedrigen Grundwasserstandes ab. Die Wände des Ganges aus lose nebeneinander gelegten Fertigbeton-Bogenstücken weisen außer den offenen Stoßfugen noch zahlreiche Öffnungen auf, so daß das Wasser in den Gang eintreten und die Wirksamkeit der Entwässerung jederzeit beobachtet und gegebenenfalls wieder hergestellt werden kann. Die Höhenlage des Entwässerungsganges richtet sich nach der Höhe des Unterwassers; nur an wenigen Tagen im Jahr wird der Gang durch Rückstau überflutet. Durch eine günstige Wahl der Mündungsstelle des Ganges und unter Umständen auch der Mündungsrichtung in den freien Wasserlauf kann eine Verschlammung des Ganges beim

Rückstau vermieden oder in erträglichen Grenzen gehalten werden. Eine Rückstauklappe an der Mündung ins Unterwasser oder eine Spülvorrichtung mit Hilfe einer verschließbaren Verbindung zwischen dem oberen Gange und dem Oberwasser können zur Reinhaltung vorgesehen werden.

4. Beeinflussung der Bodenpressungen

Ein erosionsgefährdeter Baugrund erfordert einen dichten Abschluß der Schleusenkammer gegen den Untergrund. Dazu werden Seitenwände und Sohle zu einem U-förmigen Rahmen vereinigt. Betoniert man die Schleusensohlenplatte gleichzeitig mit den Fundamenten der Wände als eine durchgehende Platte, so erhält sie durch die hohen Seitenaufasten starke Biegebungsbeanspruchungen, die unter Berücksichtigung der Nachgiebigkeit des Untergrundes einen hohen Aufwand an Bewehrung erfordern, ganz abgesehen von der Problematik der Berechnung des elastisch gelagerten Tragwerkes. In vielen Fällen wird die Tragfähigkeit des Baugrundes es zulassen, die Schleusensohlenplatte und die Mauern solange durch Arbeitsfugen zu trennen, bis die Setzungen der Mauern größtenteils abgeklungen sind (Bild 19). Die Fugen sollen weit genug sein, daß

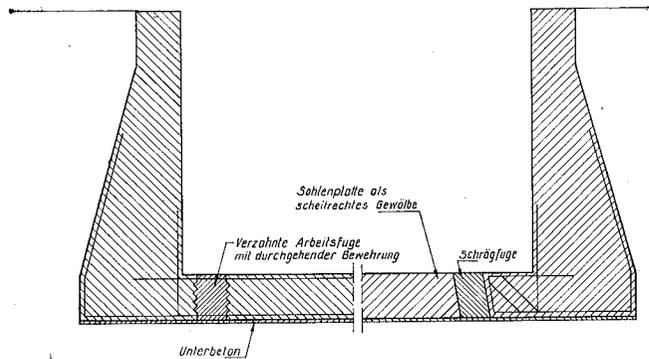


Bild 19

Entlastung der Sohlenplatte durch Arbeitsfuge

sie Platz zu einem einwandfreien Einbauen und Verdichten des schließenden Betons bieten und daß die durchgehende Bewehrung durch die ungleichen Setzungen von Mauer und Sohle keine nennenswerten Biegungsspannungen erhält. Eine geeignete Verzahnung der Fugenwand ermöglicht später die einwandfreie Übertragung der Querkräfte. Unter Umständen können durch die vorübergehende Trennung die Bodenpressungen unter der endgültigen Sohlenplatte so stark herabgesetzt werden, daß die Platte ohne Bewehrung und nur als scheinbares Gewölbe wirkend, ausgeführt und mit einer unverzahnten Schrägfuge entsprechend dem Verlauf der Stützlinie im Gewölbe angeschlossen werden kann.

f) Automatischer Betrieb

1. Automatischer Betrieb von Wehren

1.1 Aufgabe der Automatik

An einem kanalisiertem Fluß mit Kraftwerken, Schleusen und Wehren mit bewegbaren Verschlüssen schwanken die Höhen der Wasserspiegel im Ober- und Unterwasser in Abhängigkeit vom Gesamtzufluß, von der Kraftwassermenge, vom Schleusungswasser

und der Überströmung der Wehrverschlüsse. Die Schwankungen dürfen bestimmte Werte nach oben und unten nicht überschreiten, damit wasserbauliche Anlagen und die Ufer nicht überflutet werden oder die Schiffe den Grund nicht berühren. Innerhalb dieses Spielraumes sind zeitweilige Vergrößerungen der Fallhöhen des Kraftwerks erwünscht. Sie lassen sich durch Verstellen der bewegbaren Verschlüsse des Wehres erzielen. Auch bei neuzeitlichen Mehrzweckanlagen erfolgt dies häufig noch von Hand, wobei das Bedienungspersonal Maschinen zur Hubbewegung einschaltet, sobald eine Pegelanzeige hierzu Anlaß gibt.

Durch eine Automatik, die das ständige Bedienungspersonal entlastet oder überflüssig macht, lassen sich diese Aufgaben jedoch besser lösen. Hierbei ist die Automatik als eine Regelanlage auszubilden, die ihre Informationen von den Meßwerten der Pegel und des Kraftwerkes erhält. Sie verarbeitet diese Daten und stellt Energie bereit zur Bewegung der Wehrverschlüsse. Dabei muß sie drei Aufgaben erfüllen.

1.11 Einhaltung des Stauzieles

Solange das Kraftwerk ungestört arbeitet, brauchen nur die Abweichungen vom zulässigen Stauziel auf die Regelanlagen einzuwirken, wobei entsprechend der Entfernung zwischen Pegel und Wehr auf die Zeit Rücksicht zu nehmen ist, die vergeht, bis sich die Veränderung des Wasserstandes am Pegel auswirkt (Trägheit des Regelkreises). Auf diese Weise kann die Regelung das Stauziel sehr genau halten.

1.12 Einwirkung auf Sunk und Schwall

Wenn sich das Kraftwerk plötzlich ausschaltet und die Schnellschlüsse der Turbinen betätigt werden, kann unterhalb des Wehres Wassermangel (Sunk) eintreten, der bei einer Regelung nur durch den Oberwasser-Pegel zu spät durch Absenken der Wehrverschlüsse ausgeglichen würde. Dadurch können Grundberührungen von Schiffen auftreten. Ebenso besteht die Gefahr unzulässig großer Hebung des Oberwasser-Spiegels (Schwall). Deshalb müssen unmittelbar vom Kraftwerk Impulse auf die Regelanlage gegeben werden, die ohne Zeitverlust eine Schnellsenkung der Wehrverschlüsse bewirken und die veränderte Wasserentnahme der Turbinen ausgleichen.

1.13 Schwellbetrieb

Die Regelanlage soll zeitweilig die Leistung des Kraftwerks durch eine größere Stauhöhe steigern (Schwellbetrieb). Die Sollwerte des Pegelstandes im Oberwasser müssen daher verstellbar werden können, ohne daß die Regelung außer Betrieb kommt.

1.2 Vorteile der Regelung

Gegenüber einer Handregelung hat eine automatische Regelung folgende Vorteile: Die Möglichkeit menschlichen Versagens ist ausgeschaltet, und bei dem hohen Entwicklungsstand neuzeitlicher, elektrischer und hydraulischer Einrichtungen ist — vielleicht nach einigen Anfangsschwierigkeiten — mit technischen Störungen weniger zu rechnen. Ferner ist die Genauigkeit größer, da die Methoden der Regelungstechnik den Einfluß der Zeit zwischen der Information und der dadurch ausgelösten Veränderung besser berücksichtigen können als der Mensch. Die Energie des Wassers kann bestens genutzt werden. Die Schifffahrt wird weniger gefährdet. Schließlich wird auch der Betrieb wirtschaftlicher, da die Kosten der ständigen Bedienung mehr ins Gewicht fallen als die der Regelapparate einschließlich ihrer Instandhaltung.

In besonderen Fällen, bei Störungen oder Montagearbeiten, kann die Automatik ausgeschaltet werden, so daß jeder Wehrverschluß unmittelbar vom Wehrpfeiler aus bedient werden kann.

1.3 Besonderheiten beim Ausbau der Mosel

Bei den zur Zeit im Bau befindlichen Staustufen der Mosel kommen die Vorteile einer Regelung besonders gut zur Geltung. Die Wasserführung ist dort sehr unterschiedlich und die Speicherräume der Haltungen sind zum Teil sehr klein. Die Gefahr von unzulässigen Wasserspiegelschwankungen für die Schifffahrt und die Ufer ist daher groß. Die Regelanlage hält den Wasserspiegel an den als Sektoren ausgebildeten Wehrverschlüssen mit einer Genauigkeit von ± 2 cm.

Durch eine Handregelung wäre diese Genauigkeit nicht zu erzielen. Bei geringen Schwankungen wirkt nur der Sektor einer Wehröffnung, die anderen Sektoren bleiben zur Einsparung von Regelarbeit mit Freibord stehen.

Da bei der Mosel die Planung und Vergabe von 9 Wehranlagen des deutschen Bereiches in einer Hand liegt und sich über einen verhältnismäßig geringen Zeitraum erstreckt, kann an jeder Staustufe die gleiche Regelanlage ausgeführt werden. Dadurch, daß eine Firma alle Anlagen liefert, können die Teile der einzelnen Anlagen mit Sicherheit untereinander ausgetauscht werden. Die Instandhaltung läßt sich dadurch für alle Staustufen gemeinsam und mit einem Minimum von Spezialisten durchführen. Dies ist die wirtschaftlichste und betriebssicherste Lösung.

1.31 Technische Einrichtungen

Die technischen Einrichtungen konnten weitgehend aus bereits fertigen Elementen zusammengestellt werden. Die Impulsgeber für die Wasserstände sind Schwimmpegel mit elektrischer Übertragung, die Impulsgeber für die Energieabgabe des Kraftwerkes sind Frequenzmesser und Leistungsmesser. Durch elektrische und hydraulische Einrichtungen werden die Werte dem Regelgerät zugeführt. Die Sektorverschlüsse an den Staustufen der Mosel verändern die Stauhöhe durch Änderung des Wasserinhaltes im Raum des Sektors. Die Regelanlage braucht nur Absperrorgane für den Zu- und Abfluß zur Sektorkammer zu betätigen. Für notwendige Schnellabsenkungen des Wehres dienen pneumatisch betätigte Rohrschieberverschlüsse.

Im allgemeinen ist für die Bedienung der Sektorverschlüsse einer Staustufe kein besonderes Personal erforderlich. Im Steuerstand der zugehörigen Schleuse sind die für die Verschlüsse notwendigen Instrumente vereinigt, von dort kann der Schleusenbeamte in die Regelung eingreifen. Eine besondere Alarminrichtung spricht an, wenn das Stauziel überschritten oder unterschritten wird oder andere Störungen vorliegen. Sie weckt im Zentralsteuerstand der Schleuse oder in den Wohnungen. Pegelschreiber und Schreibgeräte für die Stellung der Verschlüsse schreiben ständig, so daß bei besonderen Vorkommnissen Beweismittel vorliegen.

2. Automatischer Betrieb von Schleusen

2.1 Aufgabe der Automatik

Die Zeit, die für eine Schleusung benötigt wird, soll möglichst kurz und die Gefahr von Unfällen möglichst klein sein. Ferner soll der Betrieb wirtschaftlich sein, wobei die Einsparung von Personal an erster Stelle steht. Durch den Entwurf der Schleuse und die Konstruktion der Einzelheiten der Tore und Einrichtungen für das Füllen und Leeren wird dieser Forderung bereits Rechnung getragen. Die Art, wie die Anlage bedient wird, läßt aber noch ein erhebliches Spiel für den Zeitbedarf einer Schleusung zu. Hier ergibt sich eine Verbesserungsmöglichkeit durch Automatisierung. Für alle Vorgänge, die nicht unbedingt von Menschenhand gesteuert werden müssen, ist daher der optimale Ablauf zu ermitteln und als „Steuerprogramm“ von Maschinen zu über-

nehmen. Die übrigen Vorgänge sollen für das Bedienungspersonal der Schleuse gut übersehbar und so leicht lenkbar sein, daß sie von nur einem Mann ausgeführt werden können. Für die modernen Schleusen an der Mosel mit starkem Verkehr konnten diese Forderungen durch folgende Anordnung erfüllt werden:

2.11 Alle Einrichtungen für Überwachung und Lenkung des Betriebes sind in einem zentralen Steuerstand mit gutem Überblick über Schleuse und Vorhäfen untergebracht. Bei normalem Betrieb ist die Bedienung der Schleuse nur von diesem Stand aus vorgesehen. Nur in Sonderfällen, etwa bei Eisgang und bei Überholungs- oder Reinigungsarbeiten, wird eine unmittelbar an den Schleusentoren vorgesehene „örtliche Steuerung“ eingeschaltet.

2.12 Der Überwachung dienen Fernsehgeräte. Sie senden zum Steuerstand Bilder von den Stellen, die nicht hinreichend eingesehen werden können. Es hat sich im allgemeinen bewährt, den Steuerstand an das Unterhaupt und ein schwenkbares Fernsehgerät an das Oberhaupt zu setzen.

2.13 Die Pegelstände von Oberwasser, Unterwasser und Schleusenammer sowie die Stellung der Sektorverschlüsse werden zum Steuerstand übertragen.

2.14 Die Signale für die Schifffahrt werden vom Steuerstand gegeben. Ferner kann die Schifffahrt von dort durch Lautsprecher oder Funkprechgerät angesprochen werden.

2.15 Die Anzeigegeräte für die Stellung von Schleusentoren und von Füll- oder Entleerungsöffnungen sind in einem Pult als Teile eines Wirkungsbildes zusammengefaßt. Es enthält auch alle Betätigungsknöpfe für den Schleusungsvorgang und für die Signale.

2.16 Durch einen Druck auf den Betätigungsknopf werden automatisch nach einem Programm die Tore geöffnet oder geschlossen und die Wasserstände entsprechend ausgeglichen. So werden zum Beispiel durch den Druckknopf „Talschleusung“ folgende Vorgänge nacheinander ausgelöst:

- a) Das Obertor (Hub-Senktor) wird geschlossen.
- b) Unmittelbar nach Beendigung dieser Bewegung öffnen sich die Schütze in dem Untertor (Stemmtor).
- c) Durch den Wasserspiegelausgleich ausgelöst öffnen sich die Torflügel, während sich die Schütze wieder schließen.

Sobald die Schiffe aus der Schleuse ausgelaufen und die zu Berg fahrenden eingelaufen sind und festliegen, wird die Bergschleusung durch Betätigung eines anderen Knopfes in ähnlicher Weise ausgelöst.

Bei Störungen oder bei der Notwendigkeit, aus anderen Gründen in den Ablauf einzugreifen, kann durch öffnen einer Klappe im Pult die Automatik ausgeschaltet und jedes Element dieser Kette von Vorgängen einzeln in beliebiger Reihenfolge betätigt werden.

Die Schleusenbedienung wird dadurch so weit vereinfacht, daß sie von einem Mann ausgeführt werden kann, der darüber hinaus für die Beobachtung der Schifffahrt noch hinreichend Zeit hat.

Im Gegensatz zu den oben beschriebenen automatischen Anlagen für Wehrverschlüsse handelt es sich bei den Schleusen also nicht um eine Regelung, sondern um eine automatische Programmsteuerung. Hierbei ist der Ablauf des Programms so ermittelt und festgelegt, daß möglichst viel Zeit eingespart wird und Schäden für Schiffe oder Bauwerke vermieden werden.

Abteilung I — Binnenschifffahrt

Frage 3

Maßnahmen zur Sicherung der durchgehenden Schifffahrt bei Tag und bei Nacht und unter allen Wetterbedingungen

Von Dr.-Ing. Hans D a h m e , Oberregierungsbaurat, Wasser- und Schifffahrtsamt Kiel

Zusammenfassung

Zur Wahl der geeigneten technischen Mittel zur Sicherung der durchgehenden Schifffahrt bei Tag und bei Nacht und unter allen Wetterbedingungen und zur Beurteilung ihres Wertes werden unter Ausnutzung praktischer Erfahrungen aus der Tagesnavigation die zu einer ausreichenden Sicherung der Fahrt auf Binnenschifffahrtstraßen notwendigen Informationen entwickelt, und zwar für die Fahrt nach Sicht, für die Fahrt auf überwachter Strecke und für die Fahrt nach Signal. Für die Fahrt nach Sicht ergeben sich drei Hauptgruppen: Informationen zum Einhalten des Fahrwassers, Informationen über feste Anweisungen und Hinweise und Informationen zur Verhütung von Kollisionen.

Anschließend werden die bisher bekannten optischen, akustischen und funktechnischen Mittel zur Sicherung der Nachtschifffahrt beschrieben, soweit sie geeignet sind, wenigstens einen Teil dieser Informationen zu übertragen.

Wenn auch bei oberflächlicher Betrachtung Reflexstoffe in Verbindung mit Bordscheinwerfern die einfachste und billigste Lösung zu sein scheinen, so müssen bei stärkerem Verkehr die Gefahren durch Blendung, unzureichende Übersicht des Verkehrsraumes und Nichterkennen wichtiger Informationen beachtet werden. Andere optische Mittel wie Befeuerung, Beleuchtung, Lichttagessignale, beleuchtete Verkehrszeichen und Fahrtlichter der Schiffe sind in der Lage, dem Schiffer fast alle benötigten Informationen in guter Qualität, aber nur bei ausreichend sichtigem Wetter darzubieten.

Lautsprecheranlagen können die optischen Mittel an Engpässen (Schleusen) sinnvoll ergänzen, da sie unabhängig von der Sichtweite wirksam bleiben, erfordern aber strenge Sprechdisziplin und unterliegen dem Einfluß des Windes und der Geräusche des eigenen Schiffes. Vertikale und horizontale Echolote sowie Unterwasserschallsignale können in ihrem Wert als Navigationshilfsmittel heute noch nicht beurteilt werden, ihre Zukunft hängt wesentlich von der Entwicklung geeigneter und preiswerter Geräte ab.

Besondere Aufmerksamkeit sollte den funktechnischen Mitteln, insbesondere den Bordradargeräten, den Sicherungsradaranlagen und dem Schiffssicherungsfunk geschenkt werden, die sich in der Küstennavigation seit Jahren ausgezeichnet bewährt haben. Für größere Binnenschifffahrtstraßen (Rhein, Donau) sind geeignete Radargeräte entwickelt und in Serienfertigung verfügbar; eine ausreichende Bezeichnung der Wasserstraßen mit Radarreflektoren ist technisch möglich und nicht allzu aufwendig. Für einen UKW-Schiffssicherungsfunk sind die technischen Voraussetzungen erfüllt und genügend Frequenzen auf internationaler Ebene bereitgestellt. Er bildet zusammen mit ortsfesten Sicherungsradaranlagen ein Sicherungssystem, das fast alle erforderlichen Informationen übermitteln kann und dabei verhältnismäßig geringen Aufwand an Bord erfordert. Funkfeuer- und Decca-Navigation bieten heute noch nicht die nötige Sicherheit, sind aber entwicklungsfähig.

Schließlich werden in Tafelform die einzelnen technischen Mittel zur Sicherung der Nachtschiffahrt navigatorisch bewertet, in ihrer Eignung zur Übertragung der notwendigen Informationen einander gegenübergestellt und Möglichkeiten für eine gemeinsame Verwendung mehrerer Informationsmittel als Sicherungssystem untersucht. Es werden dabei Systeme zusammengestellt, die nur bei sichtigem Wetter wirksam sind, solche, die auch bei Nebel wirksam bleiben, und solche, die bei allmählich eintretender Sichtverschlechterung noch längere Zeit die notwendige Sicherheit bieten können. Eine Zusammenstellung der bisherigen Aufwendungen in der Bundesrepublik Deutschland zur Sicherung der Nachtschiffahrt auf Binnenschiffahrtsstraßen — insgesamt rund 4,5 Mill. DM — schließt die Untersuchung ab und gibt einen Anhaltspunkt für die Kosten je km Wasserstraße, die z. Z. zwischen 240 und 5000 DM/km liegen.

Inhalt

	Seite
1. Einleitung	71
2. Grundlage der Navigation am Tage	71
2.1 Allgemeines	71
2.2 Fahrt auf Sicht	74
2.21 Informationen zum Einhalten des Fahrwassers	74
2.22 Informationen über feste Anweisungen oder Hinweise	75
2.23 Informationen zur Verhütung von Kollisionen	75
2.3 Fahrt auf überwachter Strecke	76
2.4 Fahrt nach Signal	77
3. Informationsmittel zur Sicherung der Fahrt bei Nacht und unsichtigem Wetter	77
3.1 Optische Mittel	77
3.11 Rückstrahler und Reflexstoffe in Verbindung mit Bordscheinwerfern	77
3.12 Befeuerung	79
3.13 Beleuchtung	81
3.14 Lichttagessignale	83
3.15 Verkehrszeichen	83
3.16 Fahrlichter der Schiffe	84
3.17 Lichtsperrn	84
3.18 Fernsehgeräte	85
3.2 Akustische Mittel	85
3.21 Ortsfeste Luftschallsender	85
3.22 Schallsignale an Bord von Schiffen	85
3.23 Lautsprecher	85
3.24 Echolote	86
3.25 Unterwasserschallsignale	86
3.3 Funktechnische Mittel	87
3.31 Radarnavigation	87

	Seite
3.32 Sicherungs-Radar-Anlagen	90
3.33 Funkfeuernavigation	91
3.34 Decca-Navigation	91
3.35 Schiffssicherungsfunk	92
4. Vergleichende Betrachtung und kombinierte Verwendung der Informationsmittel	93
4.1 Allgemeine navigatorische Bewertung	93
4.2 Übertragung der Informationen	93
4.3 Kombinierte Verwendung	93
5. Schlußwort	94

1. Einleitung

Die Schifffahrt unterliegt in weit größerem Maße den Wetterbedingungen als Landverkehrsmittel. Dies gilt besonders für Nebel und unsichtiges Wetter, die die Schifffahrt oft zum Erliegen bringen. Die Binnenschifffahrt ist daüber hinaus das einzige Verkehrsmittel, das heute noch überwiegend den Betrieb mit Beginn der Dunkelheit einstellt.

Vorhandene Sicherungseinrichtungen an Binnenschifffahrtstraßen sind auf Tagesbetrieb bei sichtigem Wetter abgestimmt, ermöglichen daher nur selten eine durchgehende Schifffahrt bei Tag und Nacht und versagen vollständig bei Nebel und unsichtigem Wetter. Es bestehen auch bis heute auf den westeuropäischen Binnenschifffahrtstraßen weder Vorschriften noch Richtlinien über technische Einrichtungen zur Sicherung einer solchen durchgehenden Schifffahrt.

Die nachfolgende Untersuchung behandelt in erster Linie Sicherungseinrichtungen für die Nachtschifffahrt, wobei von den Verhältnissen und Erfahrungen an den heute im durchgehenden Verkehr befahrbaren natürlichen und künstlichen Binnenschifffahrtstraßen Westeuropas, insbesondere der Bundesrepublik Deutschland, ausgegangen wird. Mit Ausnahme der optischen Mittel dienen alle behandelten Informationsmittel aber auch einer Sicherung der Schifffahrt bei Nebel und unsichtigem Wetter, so daß die Frage I/3 erschöpfend behandelt wird.

Die Untersuchung gibt einen Überblick über die heute möglichen Sicherungsverfahren und erleichtert ihre Bewertung nach besonders entwickelten Methoden. Sie soll aber gleichzeitig auch als Anregung für spätere Regeln oder Anweisungen über Maßnahmen zur Sicherung der durchgehenden Schifffahrt auf Binnenschifffahrtstraßen bei Tag und bei Nacht und unter allen Wetterbedingungen dienen. Sie beschränkt sich nicht auf Maßnahmen, deren Wirksamkeit auf Binnenschifffahrtstraßen schon ausreichend erprobt ist, sondern will auch neue Wege zur Lösung dieser Aufgabe zeigen.

2. Grundlage der Navigation am Tage

2.1 Allgemeines

Nach PIRATH müssen im Verkehrswesen Bewegungsvorgänge gesichert werden

„gegen Einwirkungen von außen her, d. h. gegen Widrigkeiten der Natur wie Sturm, Nebel, Dunkelheit, Sonnenblendung, Eis, Schnee usw.;

gegen Abkommen von der Bahn sowie Zusammenstoß mit Gegenständen und Bewegungsvorgängen des gleichen Verkehrsmittels.“

Die Sicherung gegen Widrigkeiten der Natur bleibt hier auf Nebel und Dunkelheit beschränkt.

Für die Binnenschifffahrt ergeben sich daraus zusätzliche Sicherungsmaßnahmen, die folgende Bedingungen erfüllen:

Der Schiffsführer muß jederzeit

- a) mit seinem Fahrzeug eine gegebene Wassertiefe einhalten, also innerhalb fester Fahrwassergrenzen, womöglich in einem bestimmten Fahrwasserbereich, verbleiben und Berührungen mit Untiefen, Wracks oder sonstigen Hindernissen vermeiden können,
- b) feste Anweisungen oder Hinweise für einzelne Punkte oder bestimmte Strecken, die seiner eigenen Sicherheit, der Sicherheit anderer Verkehrsteilnehmer oder dem Schutze der Wasserstraße dienen, sowie Signale zur Wahrschau oder Verkehrsregelung beachten, also zuverlässig erkennen können,
- c) Kollisionen mit anderen Schiffen verhindern, also ihre Anzahl, Art, Größe, Fahrtrichtung, beabsichtigten Manöver usw. rechtzeitig ermitteln können.

Die Tätigkeit des Schiffsführers bei Erfüllung dieser Forderungen kann folgendermaßen analysiert werden:

- a) Er erhält Informationen aus der Umgebung
 - durch unmittelbare Wahrnehmung mit den eigenen Sinnesorganen,
 - durch Personen, die ihm sinnliche Wahrnehmungen übermitteln, z. B. Ausguck oder Lotsen auf dem eigenen Schiff, Wahrschauposten auf Sicherungsfahrzeugen oder an Land usw.,
 - durch technische Navigationshilfsmittel, die ihm Informationen unmittelbar oder über andere Personen zuführen, z. B. optische Peilgeräte, Kompaß, Radargerät, Echolot, Funkpeiler oder Funksprechgerät.
- b) Er wertet diese Informationen aus und beurteilt sie kritisch
 - mit Büchern, Karten, Geräten oder sonstigen Hilfsmitteln,
 - nach seiner Kenntnis der Strecke,
 - nach seinen persönlichen Fähigkeiten und Berufserfahrungen.
- c) Er veranlaßt für sein Schiff, wenn er aus b) ein „Abkommen von der Bahn“ oder die Gefahr eines „Zusammenstoßes mit Gegenständen und Bewegungsvorgängen des gleichen Verkehrsmittels“ erkennt,
 - eine Änderung des Kurses sowie der Geschwindigkeit bis zum Stillstand oder Rückwärtsfahrt,
 - das Setzen von Sichtzeichen und die Abgabe von Licht- oder Schallzeichen, die der jeweiligen Lage und den schiffahrtspolizeilichen Vorschriften entsprechen.

Die Vorgänge unter b) und c) hängen von der Person des Schiffsführers, den Navigationshilfsmitteln, der Entwicklung im Schiffbau usw. ab; sie können durch Sicherungsmaßnahmen an der Wasserstraße nicht beeinflußt werden.

Grundlagen der Navigation sind also Informationen, die der Schiffsführer in der geschilderten Weise aus der Umgebung aufnimmt. Dabei muß unterschieden werden:

Der Informationsinhalt, der eine Unterrichtung über einen bestehenden Zustand oder eine zu befolgende Anweisung sein kann;

das Informationsmittel, das der Übertragung des Informationsinhaltes zum Schiffsführer dient.

Informationsmittel bestehen aus Erzeugen, Übertragen und Aufnehmen von Reizen über eine bestimmte Wegstrecke, denen durch Verabredung ein fester Informationsinhalt — im Gedächtnis oder in Büchern gespeichert — zugeordnet wird. Dabei sind zu unterscheiden:

Natürliche Informationsmittel, die aus natürlichen, verkehrstechnischen oder wasserwirtschaftlichen Gründen, oder auch ohne Beziehung zur Wasserstraße immer gleichmäßig vorhanden sind und vom Schiffsführer durch Auge und Ohr unmittelbar aufgenommen werden;

Künstliche Informationsmittel, die als optische, akustische oder funktechnische Mittel ausschließlich zur Navigationshilfe erzeugt werden und entweder unmittelbar oder über ein besonderes Umwandlungsgerät durch Auge und Ohr aufgenommen werden.

Natürliche Mittel verbinden mit dem gleichen Informationsinhalt unterschiedliche Informationsmittel. Sie erschweren daher dem Schiffsführer die Auswertung durch Belastung des Gedächtnisses oder Benutzung eines Nachschlagewerkes. Bei künstlichen Mitteln können durch Vereinbarungen¹⁾ gleichen Informationsinhalten auch gleiche Informationsmittel zugeordnet werden.

Die größte Informationsreichweite wird in Fahrtrichtung voraus benötigt und hängt neben hydrologischen und meteorologischen Einflüssen von Fahrgeschwindigkeit und Manövriereigenschaften des Schiffes, sowie von Reaktionszeit, Auswertegeschwindigkeit und Entschlußfreudigkeit des Schiffsführers ab. Die Information muß so rechtzeitig aufgenommen werden, daß etwa erforderliche Manöver durchgeführt sind, bevor eine Gefahr für das Schiff eintritt. Folgende Vorgänge laufen dabei hintereinander ab:

Aufnehmen der Information

Auswerten der Information

Entschluß zu einem bestimmten Manöver

Anordnen des Manövers

Durchführen der erforderlichen Maßnahmen an Bord

Reaktion des Schiffes auf das Manöver

Bei den auf deutschen Binnenschiffahrtsstraßen zugelassenen Fahrgeschwindigkeiten und herrschenden Wetterverhältnissen ergeben theoretische Überlegungen und Erfahrungen, daß eine Informationsreichweite von 500 m möglichst nicht unterschritten werden sollte; anzustreben sind 800 bis 1000 m, über 2000 m ist eine Information nur in besonderen Ausnahmefällen erforderlich.

Zur Vereinfachung der Navigation sollten zusätzliche Informationsmittel zur Sicherung der durchgehenden Schifffahrt bei Tag und Nacht und allen Wetterbedingungen möglichst die gleichen Informationen geben, nach denen der Schiffsführer bisher am Tage und bei sichtigem Wetter zu navigieren gewohnt ist. Ein Maßstab für

¹⁾ z. B. Grundsätze für die Bezeichnung der deutschen Küstengewässer vom 12. Februar 1954 — BGBl. II S. 17 ff.

ihre Wirksamkeit ist demnach, wie weit sie die bei Tag und sichtigem Wetter notwendigen Informationen ersetzen oder neue, gleichwertige schaffen können. Dazu müssen zunächst die wichtigsten Informationen für die Tagesnavigation auf Binnenschiffahrtsstraßen festgestellt werden. Zur besseren Übersicht geschieht dies getrennt für verschiedene Fahrtmöglichkeiten.

2.2 Fahrt auf Sicht

Die Navigation beruht allein auf Informationen, die der Schiffsführer mit Auge und Ohr aus der Umgebung wahrnimmt und die ihm Personen oder Navigationshilfsmittel des eigenen Schiffes zuführen. Er erhält weder Beratung noch Anweisung von Land oder Sicherungsfahrzeugen aus, jedoch von anderen Verkehrsteilnehmern die schiffahrtspolizeilich vorgeschriebenen oder sonst üblichen Sicht- und Schallzeichen. Dementsprechend trägt er die volle Verantwortung für seine Navigation allein. Dies ist die normale Fahrt auf der freien Strecke einer Binnenschiffahrtsstraße.

Folgende Informationen sind hierzu notwendig:

2.2.1 Informationen zum Einhalten des Fahrwassers

Das Schiff muß innerhalb des Fahrwassers verbleiben und dabei Berührung mit Untiefen, Wracks oder sonstigen Hindernissen vermeiden. Da das Fahrzeug in den Verkehrsweg eindringt, ist hierfür meist die Wassertiefe maßgebend, die nicht unmittelbar zu erkennen ist. In frei fließenden Gewässern muß zudem für Berg- und Talfahrt ein bestimmter Bereich innerhalb des Fahrwassers aufgesucht werden.

Der Schiffsführer sieht nur die Wasseroberfläche und allenfalls die Ufer. Aus dieser Umgebung muß er zur Einhaltung des Fahrwassers folgende Informationen beziehen:

- a) Die Grenzen des Fahrwassers, und zwar seitliche Grenzen, Abzweigungen oder Einmündungen anderer Fahrwasser, Beginn oder Ende eines Fahrwassers an seeartigen Erweiterungen u. dgl.
- b) Beginn, Ende und seitliche Ausdehnung von Untiefen im Bereich des Fahrwassers.
- c) Lage und Ausdehnung von Wracks oder anderen, nur vorübergehend bestehenden Hindernissen wie verlorene Anker, Ladungsteile u. dgl. innerhalb des Fahrwassers.
- d) Lage, Ausdehnung und Richtung von Brücken- oder Wehrdurchfahrten, Tunneln, Schleusen und anderen erheblichen Einschränkungen des Fahrwassers der Seite oder Höhe nach. Der Schiffsführer muß erkennen, welche Öffnungen befahrbar sind und in welcher Breite und Höhe sowie mit welchem Kurs sie durchfahren werden können.
- e) Lage der Fahrrinne zum Ufer und der Übergänge von einem Ufer zum anderen (im allgemein nur auf fließenden Gewässern).
- f) Verteilung der Stromgeschwindigkeit innerhalb des Fahrwassers eines fließenden Gewässers zur Trennung von Berg- und Talfahrt.
- g) Der jeweils in dem befahrenen Wasserstraßenabschnitt herrschende Wasserstand sowie nach Möglichkeit auch die Wasserstände von ein oder zwei vorausliegenden Abschnitten.

Natürliche Informationsmittel hierfür sind bei Tage und sichtigem Wetter einzelne Berge, Felsen, Bäume, Türme, Schornsteine, Pfähle, Dalben, Buhnenköpfe usw. als Informationspunkte, Berghänge, Baum- und Häuserreihen, Deiche, Uferböschungen usw. als

Informationslinien, ferner Lichtreflexe auf der Wasseroberfläche u. a. m. Künstliche Informationsmittel sind z. B. Tonnen, Baken, Sichtzeichen zur Begrenzung von Brückenöffnungen, An- und Abfahrtsbaken an Flüssen, Band- oder Uhrenpegel.

2.22 Informationen über feste Anweisungen oder Hinweise

Für einzelne Punkte oder bestimmte Strecken muß der Schiffsführer feste Anweisungen oder Hinweise beachten, die seiner eigenen Sicherheit, der Sicherheit anderer Verkehrsteilnehmer oder dem Schutze der Wasserstraße dienen oder auch den Verkehr leichter und flüssiger gestalten sollen. Diese können zu folgenden Hauptgruppen zusammengefaßt werden:

- a) **Gebote**: Der Schiffsführer muß bestimmte Manöver oder Handlungen durchführen, z. B. Geschwindigkeit vermindern, vor einem Punkt halten, ein Schallsignal abgeben, eine angezeigte Richtung einschlagen, eine bestimmte Brückenöffnung benutzen.
- b) **Verbote**: Der Schiffsführer darf bestimmte Manöver oder Handlungen nicht durchführen, z. B. Überholen, Begegnen, Ankern, Anlegen.
- c) **Einschränkungen**: Plötzlich auftretende vorausliegende Einschränkungen im Verkehrsraum sind zu beachten, z. B. Durchfahrthöhe- und -breite unter Brücken, Wassertiefe bei Grundschwellen.
- d) **Hinweise**: Bestimmte Manöver oder Handlungen sollen dem Schiffsführer erleichtert werden, z. B. Anzeigen von Liege- und Wendepätzen, Fähren und Fernsprechstellen, Empfehlen einer Brückenöffnung, Ende eines Ge- oder Verbotes auf einer Strecke.
- e) **Sonstige Hilfen**: Z. B. Anzeigen der Richtung, in der eine Information gilt, zusätzliche Erklärungen in Zahl und Schrift, Kilometertafeln.

Hierfür gibt es auch bei Tage und sichtigem Wetter im allgemeinen nur künstliche Informationsmittel in Form von Schildern oder Tafeln, wie sie von der Straße her bekannt sind. Sie unterscheiden sich in Form und Farbe nach einem einheitlichen System¹⁾. Abweichend von den unter Abschnitt 2.1 angegebenen Informationsreichweiten müssen hier geringere Reichweiten genügen, da die dort geforderten technisch nicht darstellbar sind. Nach den Erfahrungen auf deutschen Binnenschiffahrtstraßen ergeben sich folgende Grenzen:

Deutbarkeitsgrenze ~ 500 m: Man sieht das Zeichen und erkennt, zu welcher Informationsgruppe es gehört.

Erkennbarkeitsgrenze ~ 350 m: Man erkennt die Einzelheiten der Information.

2.23 Information zur Verhütung von Kollisionen

Bewegungen fremder Schiffe werden relativ zum eigenen Schiff beurteilt. Sie können als Mitläufer voraus, achteraus oder auf gleicher Höhe liegen, das eigene Schiff überholen, von ihm überholt werden, ihm begegnen oder vor ihm das Fahrwasser kreuzen. Zur Beurteilung der Lage und der zu treffenden Maßnahmen gehören folgende Informationen:

¹⁾ Ein einheitliches System ist von einem Sachverständigenausschuß des AIPCN erarbeitet und von der ECE allen europäischen Ländern empfohlen worden. Vergleiche Rapport de la Commission pour l'étude de L'unification, sur le plan international, des signaux de navigation intérieure (Commission des Signaux de L'AIPCN), première partie, signalisation des voies navigables. Hrsg. vom AIPCN (Brüssel) 1956. (Nicht veröffentlicht).

- a) Feste Eigenschaften der Schiffe wie Bauart, Größe, Ladung, Manövrierfähigkeit, soweit sie das Verhalten anderer Fahrzeuge beeinflussen, z. B. ob Selbstfahrer, Schleppzug, Bagger oder Arbeitsgerät, ferner Länge, Breite und Tiefgang der Schiffe, ob Feuer- oder Explosionsgefahr besteht.
- b) Stellung und Bewegungszustand der Schiffe, soweit sie dem Schiffsführer Unterlagen über die zu erwartende Ortsveränderung eines auftauchenden Gegenkommers liefern und damit seine navigatorischen Entschlüsse bestimmen, z. B. Fahrtrichtung, Entfernung zum eigenen Schiff, Lage im Fahrwasser, Geschwindigkeit.
- c) Beabsichtigte Manöver der Schiffe, z. B. Wendemanöver, Überholen, falsche Begegnungen an der Steuerbordseite, Kreuzen des Fahrwassers, Ein- und Ausfahrt an Abzweigungen.

Natürliche Informationsmittel hierfür bei Tage und sichtigem Wetter sind z. B. die charakteristischen Formen einzelner Schiffstypen, die sich aus ihren Aufgaben, der Art des Antriebs und der Triebkraft entwickelt haben, die unterschiedliche Ausbildung von Bug und Heck, die Lage des Steuerhauses, Form und Neigung der Schornsteine, ferner die bei der Fahrt entstehende Bugwelle sowie bestimmte Schiffsgeräusche. Künstliche Informationsmittel sind Rotationskörper oder Flaggen in verschiedenen Formen und Farben, Aufschriften, Schallsignale mit Glocken oder Pfeifen usw.

2.3 Fahrt auf überwachter Strecke

Abschnitte einer Wasserstraße werden ständig oder zeitweise überwacht und Schiffe, die sich ihnen nähern, über den zu erwartenden Zustand, beabsichtigte Maßnahmen usw. laufend unterrichtet. Diese Mitteilungen dienen dem Schiffsführer aber nur als zusätzliche Navigationshilfe, seine Entschlüsse bestimmt er auch hier in eigener Verantwortung. Zur Überwachung ist ein besonderer Dienst erforderlich, den im allgemeinen die Verwaltung der Wasserstraße vorhält; sie trägt damit auch die Verantwortung für die Richtigkeit der übermittelten Angaben, soweit ihr dies zugemutet werden kann. Das Verfahren wird für unübersichtliche oder navigatorisch schwierige Strecken, bei Schiffsansammlungen usw. verwendet, dient jedoch immer nur zur Ergänzung der Fahrt auf Sicht.

Hierfür können sehr vielseitige und zahlreiche Informationen notwendig werden, von denen die folgenden z. Z. in der Praxis häufiger vorkommen und durch Schiffahrtspolizeiverordnungen oder allgemeinen Gebrauch geregelt sind:

- a) Schiffsbewegungen im überwachten Abschnitt

Art der Schiffe:	Selbstfahrer oder Schleppzug.
Fahrtrichtung:	Mitläufer oder Gegenkommer, Kreuzen des Fahrwassers.
Lage im Fahrwasser:	Rechte oder linke Fahrwasserseite.
Anzahl der Schiffe:	Abzuwartende Anzahl Gegenkommer, bis die Fahrt fortgesetzt werden darf.
- b) Zustand der Wasserstraßen oder ihrer Anlagen

Unerwartete Wracks:	Lage im Fahrwasser, Passierseite.
Schleusen:	Zur Schleusung vorgesehene Kammer.
Unbekannte Bauarbeiten:	Passierseite, Rücksichtnahme.

Nur künstliche Informationsmittel sind gebräuchlich. Sie bestehen bei Tage und sichtigem Wetter z. Z. aus Rotationskörpern oder Flaggen in verschiedenen Formen und Farben, Lichttagessignalen, auswechselbaren Zahlentafeln oder Uhren mit Stellzeigern, Winksignalen, Anrufen durch Megaphone oder Lautsprecher u. a. m.

2.4 Fahrt nach Signal

Abschnitte einer Wasserstraße werden ständig überwacht, Schiffen, die sich ihnen nähern, jedoch mit Signalen Anweisungen für ihre Weiterfahrt erteilt. Der Schiffsführer hat die gezeigten Signale unbedingt zu beachten, navigiert im übrigen aber wie sonst in eigener Verantwortung. Auch hierfür ist ein besonderer, von der Verwaltung getragener Dienst notwendig, dem mit der weitergehenden Aufgabe auch eine höhere Verantwortung zufällt. Dies Verfahren wird im allgemeinen nur an Schleusen, beweglichen Brücken oder einschiffigen Strecken, sowie an Wasserstraßen mit besonders großer Verkehrsdichte und außergewöhnlichen Verkehrsschwierigkeiten angewendet. Auch die Fahrt nach Signal ergänzt nur die Fahrt auf Sicht. Sie wird an den Binnenschiffahrtsstraßen der Bundesrepublik Deutschland auf folgende Fälle beschränkt:

- Ein- und Ausfahrt an Schleusen und Hebewerken
- Durchfahrt durch bewegliche Brücken und Sperrtore
- Einfahrt in einschiffige Strecken
- Ein- und Ausfahrt an Hafenzufahrten, Nebenarmen, zweiten Fahrten usw.

Signale zeigen mindestens zwei wechselnde Begriffe; im vorliegenden Falle sind dies:

- a) Keine Einfahrt, Ausfahrt oder Durchfahrt
- b) Einfahrt, Ausfahrt oder Durchfahrt frei

Je nach den örtlichen Verhältnissen können diese Informationen weitergehend unterteilt oder auf besondere Fälle abgestimmt werden.

Natürliche Informationsmittel gibt es nicht, künstliche Informationsmittel sind bei Tage und sichtigem Wetter Formsignale aus Scheiben, Bällen oder Armen, neuerdings fast ausschließlich Lichttagessignale, für die ein einheitliches System zweckmäßig ist¹⁾. In Ausnahmefällen werden auch Lautsprecher und Megaphone gebraucht.

3. Informationsmittel zur Sicherung der Fahrt bei Nacht und unsichtigem Wetter

3.1 Optische Mittel

Optische Mittel bestehen aus weißen und farbigen Lichtern, einzeln oder in bestimmter Zusammenstellung angeordnet, sowie beleuchteten oder transparent ausgeleuchteten Flächen, die innerhalb der im Abschnitt 2.1 angegebenen Informationsreichweite bis zu einem von den örtlichen Verhältnissen abhängigen Sichtwert vom Schiffsführer erkannt werden müssen²⁾.

3.1.1 Rückstrahler und Reflexstoffe in Verbindung mit Bordscheinwerfern

Rückstrahler und Reflexstoffe sind Materialien, die auftreffendes Licht vorwiegend in die Einfallsrichtung zurückwerfen. Wird ein Scheinwerfer darauf gerichtet, erkennt der Schiffsführer schon auf größere Entfernung ein starkes Aufleuchten. Über ihre Anwendung auf Wasserstraßen liegen bereits weltweite Erfahrungen vor. Danach bewähren

¹⁾ Vergl. Anmerkung auf Seite 75.

²⁾ Über die erforderlichen Licht- bzw. Beleuchtungsstärken bestehen anerkannte Berechnungsverfahren, über die Farbgrößen der farbigen Lichter internationale Vereinbarungen im Rahmen der CIE, in Deutschland DIN 6163. Entsprechende Regelungen sind für Körperfarben beabsichtigt.

sich am besten Reflexstoffe¹⁾, die aus einer großen Anzahl kleiner katadioptrisch wirkender Teile (meist Glaskugeln $< 0,1 \text{ mm } \phi$) in Kunstharzbettung bestehen und als Papier- oder Gewebefolien auf glatte Flächen geklebt, oder als feste Aluminiumfolie mechanisch befestigt werden. Sie werden in allen im Verkehr gebräuchlichen Farben hergestellt. Den besten Wirkungsgrad haben silberne Reflexstoffe²⁾. Fast alle nach Ziffer 2. der Tagesfahrt dienenden optischen Informationsmittel können mit Reflexstoffen belegt und damit der Nachtfahrt nutzbar gemacht werden. Vorwiegend kennzeichnen sie jedoch Punkte im oder am Fahrwasser, z. B. Bäume, Molenköpfe, Brückenpfeiler, Tonnen, Baken usw. Die Fahrwasserseite oder anderweitige Bedeutung wird dabei durch verschiedene Farben oder durch unterschiedliche Anzahl silberner Streifen gekennzeichnet. Auch werden Toppzeichen als Ganzes mit Reflexstoffen belegt, so daß ihre charakteristische Form erkannt wird, desgleichen Aufschriften, Kilometer tafeln, Verkehrszeichen usw. Bild 1 zeigt ein besonders vorteilhaftes Beispiel am Neckar, das die

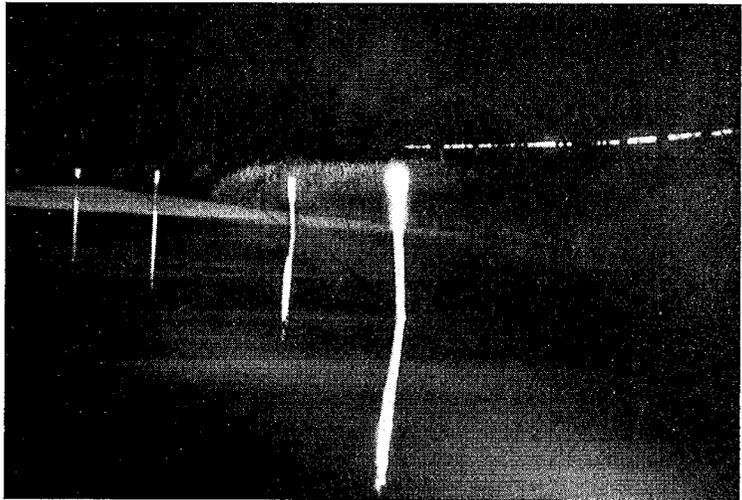


Bild 1
Schwimmstangen mit Reflexstoffen auf dem Neckar im Scheinwerferlicht
Abstand 100 bis 200 m

Fahrwassergrenzen wie eine Lichterkette erscheinen läßt. Bei sichtigem Wetter und Gebrauch der üblichen Scheinwerfer (35 bis 150 Watt) sind nach den vorliegenden Erfahrungen auch farbige Reflexionsstoffe bis 600 m zu erkennen, sofern der Lichteinfallswinkel kleiner als 50° und die Größe einer reflektierenden Fläche mindestens 200 cm^2 beträgt; größere Flächen sind erwünscht. Bei den auf der Donau üblichen 1000 W-Scheinwerfern sind Reflexstoffflächen bis 2000 m sichtbar. Damit erfüllt dieses Mittel die unter Ziffer 2.1 geforderten Informationsreichweiten.

Die Verwendung der Scheinwerfer hat folgende Nachteile:

- a) In stärker befahrenen Fahrwassern treten störende Blendungen auf.
- b) Der Schiffsführer wird durch den Lichtkegel des eigenen Scheinwerfers geblendet, und zwar um so mehr, je diesiger die Luft ist.

¹⁾ In der Bundesrepublik Deutschland genormt nach DIN 67 520, Bl. 1.

²⁾ Rückstrahlwert > 50 gegenüber 5 bis 15 bei anderen Farben.

Zur Vermeidung störender Blendung sind 1951 auf dem Dortmund-Ems-Kanal Versuche mit polarisierten Scheinwerfern durchgeführt; sie ergaben jedoch mehr als 80 % Lichtverlust des eigenen Scheinwerfers und zu große Beeinträchtigung des Schiffsführers durch polarisierte Brillen oder Vorsatzscheiben.

In einigen Fällen ist versucht worden, die Nachtfahrt zum Schutz gegen Blendung tageweise wechselnd auf eine Fahrtrichtung zu beschränken. Dies mindert aber die Verkehrsleistung so sehr, daß der wirtschaftliche Wert der Nachtfahrt in Frage gestellt ist. Geschickte Anordnung eines Scheinwerfers mit großer Breiten- aber geringer Höhenstreuung an der Steuerbordseite unter dem Bug und äußerste Disziplin im Scheinwerfergebrauch können aber nach den in Deutschland vorliegenden Erfahrungen die Blendung auf ein erträgliches Maß herabsetzen und damit bei guter

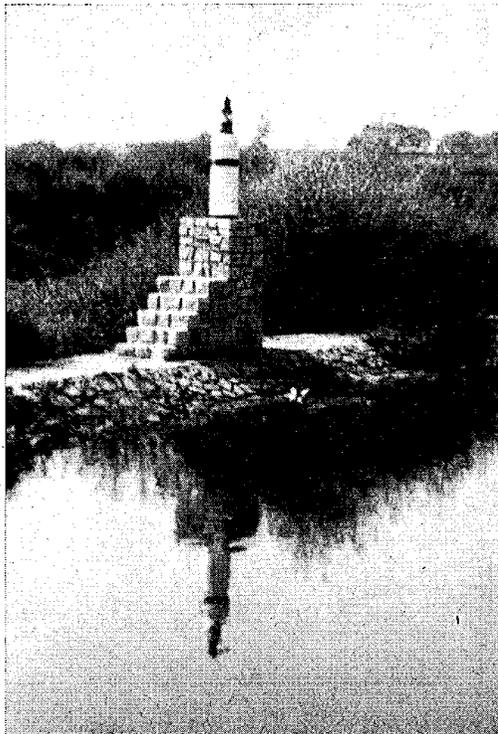


Bild 2

Propanbake an der deutschen Donaustrecke

Witterung und hellen Nächten eine ausreichende Sicherung der Nachtfahrt gewährleisten. Viele Schifffahrtreibende halten jedoch dann eine Fahrt ohne Scheinwerfer mit dunkeladaptiertem Auge für sicherer.

3.12 Befeuerung

Eine Befeuerung besteht aus festen punktförmigen Lichtern (Leuchtfener) auf oder an der Wasserstraße, deren Lichtstärke so bemessen ist, daß sie zwar an der Grenze der erlaubt, die Dunkeladaptation des Auges im Ruderhaus aber möglichst wenig beeinträch-

tigen. Die Lichter können zur gegenseitigen Unterscheidung oder Heraushebung aus dem Informationsreichweite noch wahrgenommen werden, solange die Sicht einen Verkehr Umfeld mit Farb- oder Taktkennungen versehen werden, die gleichzeitig die von ihnen ausgehende Information genauer festlegen. Gegenüber den Reflexstoffen haben sie neben größerer Reichweite den Vorteil, daß keine störende Blendung entsteht und die Aufmerksamkeit des Schiffsführers durch Bedienung der Scheinwerfer nicht abgelenkt wird; allerdings wird dies durch höheren Aufwand bei der Verwaltung erkauft, die im allgemeinen die Befuerung einer Wasserstraße vorhält.

Es sind Gasfeuer und elektrische Feuer in Gebrauch. Als Energiequelle für Gasfeuer wird an deutschen Binnenschiffahrtstraßen nur Propan¹⁾ verwendet, in den Nachbarländern vielfach auch Azetylen. Propanflaschen werden in wasserdichte Flaschenschränke gestellt, auf die in der Küstenbefuerung entwickelte Seelaternen gesetzt werden. Durch eingesetzte Farbglaszylinder können die Feuer rot oder grün gefärbt, durch eingebaute Blinker mit jeder gewünschten Taktkennung versehen werden. Bild 2 zeigt ein solches Feuer an der deutschen Donaustrecke. Propanfeuer dieser Art werden auch auf Leuchttönen verwendet, die den an der Küste erprobten Formen entsprechen. Einseitig verankerte Flöße in flacher, langgestreckter Form mit Propan-Leuchtaufbauten liegen ruhig und stabil in fließenden Gewässern, so daß sie auch seitengebundene Lichter unterschiedlicher Kennung zeigen können²⁾.

Elektrische, mit Netzstrom oder aus Diesel-Aggregaten versorgte Feuer können ohne Schwierigkeiten mit jeder gewünschten Lichtstärke und Kennung betrieben werden. Bei fehlender Stromversorgung werden in der Küstenbefuerung entwickelte „Bojenleuchten“ verwendet. Geschlossene, zylindrische Blechbehälter enthalten eine Anzahl Luftsauerstoffelemente und einen Kennungsgeber. Auf dem Deckel sitzt eine Zwergglühlampe mit Schutzglocke, die zur Erhöhung der Lichtstärke auch mit einer Gürtelleuchte ausgerüstet werden kann. Solche Bojenleuchten können wie Propanfeuer als Leuchtbaken, Leuchttönen oder Leuchtflöße verwendet werden.

Eine elektrische Streckenbefuerung nach dem Vorbild des Kiel-Kanals besteht aus einer Kette einzelner weißer, fester Feuer geringer Lichtstärke³⁾ an einem oder beiden Ufern der Wasserstraße, die dem Schiffsführer den Verlauf der vor ihm liegenden Strecke zeigt, ohne die Ufer zu beleuchten und ihn zu blenden. Bild 3 bringt ein Beispiel vom Kiel-Kanal; man erkennt deutlich die Rechtskurve nach 6 Feuern (1200 m). Wichtige Punkte wie Einschränkungen oder Erweiterungen des Fahrwassers, Fähren usw. können durch Feuer mit Farb- oder Taktkennungen oder durch mehrere Feuer in bestimmter Stellung zueinander bezeichnet werden. Ähnliche Anlagen sind auch an belgischen Kanalstrecken vorhanden; sie sind zwar teuer, aber sehr wirksam für die Nachtfahrt bei starkem Verkehr⁴⁾.

Zur Ersparnis kann es zweckmäßig sein, Leuchtfeuer während des Tages durch Schaltungen oder lichtelektrische Schalter auszuschalten. Taktkennungen werden durch besondere Kennungsgeber erzeugt. Über die Anwendung der Kennungen bestehen auf den europäischen Binnenschiffahrtstraßen internationale Richtlinien⁵⁾.

¹⁾ Reinpropan nach DIN 1875.

²⁾ z. B. Kennzeichnung von Schiffahrtshindernissen unter Angabe der Passierseite.

³⁾ 15 bis 20 cd.

⁴⁾ Kosten je nach Feuerabstand und örtlichen Verhältnissen zwischen 10 000 und 20 000 DM je km Wasserstraße.

⁵⁾ Vergl. Anmerkung Seite 75.

Eine Befeuerung übermittelt dem Schiffsführer nur ausreichende Informationen zum Einhalten des Fahrwassers nach Ziffer 2.21. Z. B. werden Fahrwassergrenzen und Untiefen durch weiße Feuer mit Taktkennungen oder rote und grüne Festfeuer bezeichnet¹⁾, Wracks und Hindernisse, Brückendurchfahrten u. dgl. durch ein oder mehrere weiße oder farbige Lichter usw. Weiße Feuer sind wegen der größeren Tragweite bei gleichem Energieaufwand wirtschaftlicher. Anlagen dieser Art mit Propanfeuer werden auf der Ems und Donau über ca. 200 km Länge betrieben, da Propanbaken zwar in der Beschaffung 2 bis 5mal so teuer sind, aber höhere Lichtstärken erreichen und nur $\frac{1}{3}$ der Betriebskosten elektrischer Bojenleuchten benötigen. Die notwendige Schulung und Erfahrung des Wartungspersonals führt jedoch u. U. dazu, trotz höherer Betriebskosten und geringerer Lichtstärken elektrische Bojenleuchten vorzuziehen, zumal für 2 km Informationsreichweite bei starkem Dunst schon eine Lichtstärke von 30 cd genügt, die bei mäßigem Nebel noch eine Tragweite von 300 bis 400 m erreicht.

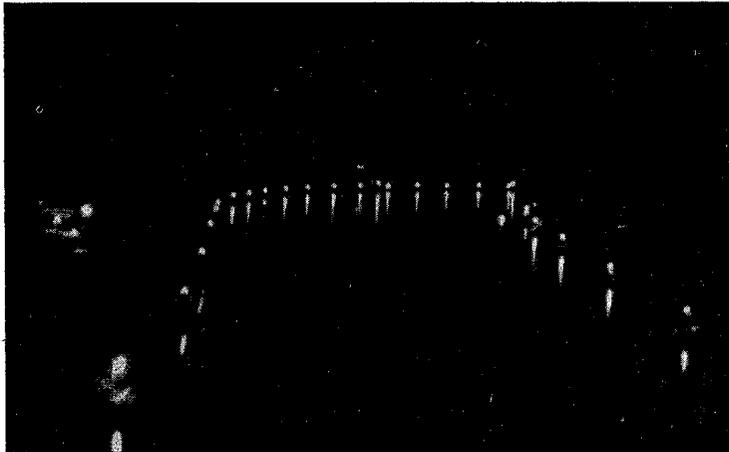


Bild 3

Streckenbefeuerung des Kiel-Kanals, Blick von der Levensauer Hochbrücke nach Westen

3.13 Beleuchtung

Es gibt Fahrwasserabschnitte, in denen eine Nachtfahrt weder mit Reflexstoffen noch mit einer Befeuerung ausreichend gesichert werden kann. Dazu gehören z. B. Schleusen, Brückendurchfahrten, Hafenanlagen, gefährliche Engstellen usw. Eine Beleuchtungsanlage hat sich hier als geeignete Hilfe erwiesen. Die Anforderungen an eine solche Anlage sind in der Bundesrepublik Deutschland an vielen Schleusen untersucht worden. Als Ergebnis wurde 1957 die DIN 67 500: „Schleusen- und Vorhafenbeleuchtung — Richtlinien“ herausgegeben, die zwar nur für Schleusen und Vorhäfen verbindlich ist, aber sinngemäß angewendet auch als Grundlage für andere Beleuchtungsaufgaben dient.

Es werden Natrium-Dampflampen und Niederspannungs-Leuchtstofflampen von 20 bis 85 Watt verwendet, die in Queraufhängung mit einer Lichtpunkthöhe von ~ 8 m und

¹⁾ Grundsätzlich gilt hierfür: Einzelblitze oder Einzelunterbrechungen, ungerade Gruppen, grüne Feuer beliebiger Kennung an der linken Stromseite; weiße, ungerade Gruppen von Blitzen oder Unterbrechungen, rote Feuer beliebiger Kennung an der rechten Stromseite; weiße Feuer mit Gleichtakt- oder Funkelkennung in Fahrwassermitte.

einem Mastabstand von ~ 40 m die Forderung der DIN 67 500 gut erfüllen. Sie brennen in Spiegelleuchten mit tief-breit strahlender Lichtverteilung, deren Hauptstrahlungsrichtung parallel zum Ufer liegt. Zur Aufhängung der Leuchten werden sowohl Betonmasten mit stählernen Auslegern als auch Stahlmaste in Peitschenform aufgestellt.

Oberstes Ziel einer Beleuchtungsanlage ist ein aufgehellter Raum, der den Schiffsführer das Schätzen von Entfernungen sowie die Bestimmung von Kurs und Fahrtgeschwindigkeit erleichtert. Auf richtige Abstufung der Beleuchtungsstärke am Beginn und Ende einer beleuchteten Strecke mit Rücksicht auf die Adaptionsgeschwindigkeit des Auges ist zu achten; maßgebend ist die Ausfahrt aus einer beleuchteten Strecke, da zur Umstellung des Auges von hohen auf geringe Leuchtdichten die längere Zeit benötigt wird. Störende Blendung unmittelbar oder durch Reflexion auf dem Wasser in der Schleusenachse als Blickrichtung des Schiffers während des Einfahrtmanövers ist zu vermeiden, weshalb die oft angewendete Ausleuchtung der Schleusen-kammern durch in der Achse aufgehängte Lampen abzulehnen ist.

Die von einer Beleuchtungsanlage zu vermittelnden Informationen entsprechen denen optischer Tagesinformationsmittel, wobei das verminderte Beleuchtungsniveau zu berücksichtigen ist¹⁾.

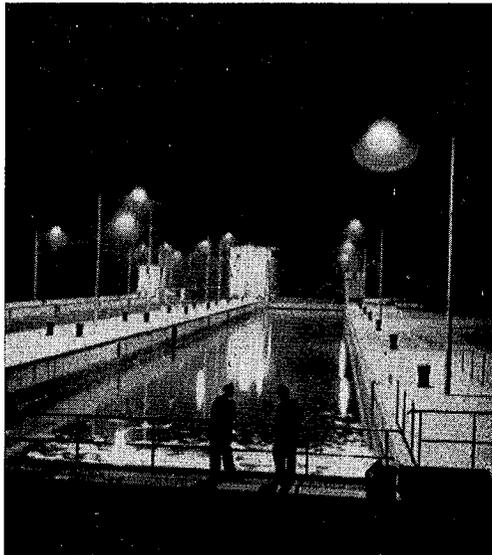


Bild 4

Beleuchtung der Schleuse Hofen/Neckar nach DIN 67 500 mit Na-Lampen

1958 waren an den Binnenschiffahrtstraßen der Bundesrepublik 34 Schleusen mit einem Gesamtaufwand von ca. 1,7 Mill. DM mit modernen Beleuchtungsanlagen ausgerüstet. Bild 4 zeigt davon eine mit Natrium-Dampflampen beleuchtete Schleuse am Neckar. Die Erfahrungen dabei haben ergeben, daß Natrium-Dampflampen durch hohe Lichtausbeute, besonders gute Kontrastwirkungen, sowie kleine Abmessungen und Gewichte so große Vorteile aufweisen, daß die Farbentstellung durch das

¹⁾ Größte Beleuchtungsstärke nach DIN 67 500 ist 8 lx, mittlere Tagesbeleuchtungsstärke bei bedecktem Wetter im Dezember mittags etwa 3000 lx.

gelbe Licht in Kauf genommen werden kann. Die Wirkung einer Beleuchtung kann durch helle Baumaterialien, helle Anstriche der Kammerwand, sowie helle Streifen an Leiternischen, Schleusentoren, Dalben usw. wesentlich unterstützt werden. Der Anteil einer vollständigen Beleuchtung nach DIN 67 500 an den Gesamtkosten einer Schleuse mit Vorhäfen liegt nach deutschen Erfahrungen meist unter 1 %.

3.14 Lichttagessignale

Unter Ziffer 2.3 und 2.4 wurden bereits Lichttagessignale genannt; sie vermitteln die gleichen Informationen auch zur Sicherung der Nachtfahrt. Sie wurden auf Binnenschiffahrtstraßen eingeführt, nachdem die bei der Eisenbahn entwickelten Signallaternen den Bedürfnissen des Verkehrs auf Wasserstraßen angepaßt worden waren, wozu u. a. größere Tragweite und größere Streuwinkel gehören. Verwendet werden besondere Lichttagessignallaternen mit geschliffenen Vollinsen und sehr kleinen hellen Glühlampen, deren Stromverbrauch bei Nacht zur Vermeidung störender Blendung um 30 bis 50 % herabgesetzt wird, wodurch die Lichtstärke auf etwa 8 % sinkt. Zur Ermittlung der für die geforderte Informationsreichweite notwendigen Lichtstärke bei Tag und Nacht gibt es einschlägige Berechnungsverfahren. Das scharf gebündelte Licht wird durch Vorsetzen von Streuscheiben — allerdings auf Kosten der Lichtstärke — den jeweiligen örtlichen Verhältnissen angepaßt. Rote und grüne Farbscheiben müssen DIN 6163, Blatt 2, genügen. Im übrigen entsprechen alle Anforderungen denen der Eisenbahn. Um den Bediensteten gute Übersicht über den Stand der Signale zu schaffen und unbeabsichtigte Schaltungen zu vermeiden, haben sich Stellische nach dem Vorbild der Gleisbildstellwerke bewährt.

Ein einheitliches Signalsystem ist notwendig, wie es die ECE für Europa empfohlen hat¹⁾. Die Grundstellung aller Signale danach ist der „Halt-Begriff“ (2 rote Lichter nebeneinander). Schaltung auf „Fahrt“ (2 grüne Lichter nebeneinander) soll erst möglich sein, wenn die gesicherte Betriebsanlage in geöffneter Endstellung einen Schließkontakt betätigt hat. Signale sollen in Fahrtrichtung rechts möglichst niedrig und dicht vor der Gefahrenstelle angeordnet werden, damit benachbarte Verkehrsmittel nicht beeinträchtigt und Änderungen des Signals bis zum letzten Augenblick vom Schiffsführer wahrgenommen werden.

1958 waren in der Bundesrepublik Deutschland etwa 70 Schleusen mit einem Aufwand von 1,3 Mill. DM mit Lichttagessignalanlagen ausgerüstet, außerdem 9 Brücken mit 0,12 Mill. DM.

3.15 Verkehrszeichen

Unter Ziffer 2.22 wurden farbige Verkehrszeichen als Informationsmittel für feste Anweisungen und Hinweise genannt; sie müssen zur Sicherung der Nachtfahrt ausreichend beleuchtet werden können. Da es sich um größere Flächen mit Farbkontrasten handelt, sind theoretische Überlegungen über die lichttechnischen Anforderungen nicht ausreichend. Auf den Binnenschiffahrtstraßen der Bundesrepublik wurden daher praktische Versuche unter wechselnden Sichtverhältnissen durchgeführt, um eine technisch und wirtschaftlich befriedigende Lösung hierfür zu finden.

Danach können Schilder von mindestens 1 m Kantenlänge innerhalb der unter Ziffer 2.2 genannten Informationsreichweiten erkannt werden, wenn die Leuchtdichte etwa 100 asb beträgt, Symbole in einer Ausdehnung wenigstens 50 cm erreichen und die Striche je nach den verwendeten Farben 8 bis 15 cm stark sind. Ein von der ECE empfohlenes europäisches System¹⁾ verwendet nur die Farben Weiß, Schwarz, Blau und Rot.

¹⁾ Vergl. Anmerkung auf Seite 75.

Die Beleuchtung der Schilder kann elektrisch oder mit Propan durch Anstrahlung oder Transparenzausleuchtung erfolgen. Anstrahlung ermöglicht die Verwendung einfacher undurchsichtiger Schilder, erfordert aber größere Lichtleistung. Transparenzausleuchtung ist daher vorzuziehen. Die Gehäuse ähneln den im Straßenverkehr verwendeten und enthalten Vorrichtungen zum wahlweisen Einbau von Leuchtstofflampen oder Propan-Glühlichtbrennern. Für die geforderte Leuchtdichte genügen 1 bis 2 Leuchtstofflampen je 10 Watt oder Glühkörper GG 10. Besondere Schwierigkeiten bietet die Transparenzscheibe, da sie bei Tag und Nacht gleich gut zu erkennen sein soll. Am besten geeignet zeigten sich Gläser aus weiß durchscheinendem Kunststoff (Acrylgläser), auf die farbiges Plexiglas geklebt wird. Sie sind außerdem elastisch und vertragen Stöße und Steinwürfe besser.

Die Beschaffung und Aufstellung solcher Verkehrszeichen in größerem Umfange soll an den Binnenschiffahrtstraßen der Bundesrepublik in Kürze erfolgen.

3.16 Fahrtlichter der Schiffe

Auf See- und Binnenschiffen sind seit Jahrzehnten einheitliche Fahrtlichter gebräuchlich, die durch Positionslaternen dargestellt werden. Für die technische Ausführung gilt in der Bundesrepublik Deutschland DIN 89 950; rote, grüne, blaue oder gelbe Einsatzgläser müssen DIN 6163, Blatt 6, genügen. Die Abgrenzung der horizontalen Winkel, innerhalb welcher bestimmte Fahrtlichter sichtbar sein müssen, die Festlegung der Farbwerte und Mindesttragweiten, auch die Bedeutung der einzelnen Fahrtlichter sind auf internationaler Grundlage durch nationale Gesetze und Verordnungen geregelt.

Fahrtlichter vermitteln für die Nachtfahrt nur Informationen zur Verhütung von Kollisionen nach Ziffer 2.23. Sie geben z. B. die Fahrtrichtung und Lage im Fahrwasser durch rote und grüne Seitenlichter an, die Bauart und Größe durch Topp- und Hecklichter in Verbindung mit Lichtern für Sonderfahrzeuge wie Fähren, Tanker usw.

3.17 Lichtsperrern

Lichtsperrern sind Vorrichtungen, die irgendwo ein Licht- oder Schallsignal auslösen, wenn ein Schiff in einen bestimmten Fahrwasserabschnitt einfährt oder diesen verläßt. Zur Sicherung der Nachtfahrt können sie erhöhte Bedeutung gewinnen, da die Übersicht gegenüber dem Tageszustand wesentlich eingeschränkt ist. In der Bundesrepublik sind daher Versuche mit Lichtsperrern am Kiel-Kanal und Dortmund-Ems-Kanal durchgeführt worden.

Ein scharf gebündelter Lichtstrahl kreuzt das Fahrwasser und trifft am gegenüberliegenden Ufer auf eine Photozelle. Setzt der Empfang infolge Unterbrechung des Lichtstrahls durch ein passierendes Schiff aus, so wird ein optisches oder akustisches Warnsignal ausgelöst. Durch geeignete Maßnahmen kann die Anzeige richtungsabhängig gemacht werden.

Lichtsperrern können nur Informationen nach Ziffer 2.3 und 2.4 übermitteln. Fahrt auf überwachter Strecke liegt vor, wenn z. B. eine Fähre durch Lichtsperrern gesichert wird. Auf die Fähre zufahrende Schiffe lösen mit einer richtungsabhängigen Lichtsperrern ein Signal an der Fähre aus, das so lange stehen bleibt, bis das Schiff die Fährstelle passiert hat. Fahrt nach Signal liegt vor, wenn der Verkehr auf einer einschiffigen Strecke geregelt werden soll. Jedes einfahrende Schiff schaltet mit einer richtungsabhängigen Sperrern ein Haltesignal am anderen Ende der Strecke ein.

Die Versuche haben bereits gezeigt, daß eine richtungsabhängige Lichtsperrern versagt, wenn Schiffe sich beim Passieren der Sperrern begegnen; eine zweite Lichtsperrern im Abstand etwa einer Schiffslänge ist zur Sicherheit erforderlich. Dadurch steigen die

Kosten erheblich. Die weitere Entwicklung solcher Anlagen wird davon abhängen, ob ihre Betriebssicherheit befriedigt und größerer Bedarf auftritt. Sie haben den Vorteil, daß sie mit Infrarot betrieben auch der Sicherung der Fahrt bei unsichtigem Wetter dienen können.

3.18 Fernsehgeräte

Fernsehgeräte sind zur Sicherung der Bewegungsvorgänge an den Toren langer und unübersichtlicher Schleusen bei gleichzeitiger Einsparung von Personal am Main und an der österreichischen Donaustrecke mit Erfolg eingesetzt worden. Sie dienen jedoch vorwiegend der Sicherung der Tagesfahrt, da ihre Verwendung bei Nacht besondere Beleuchtungsanlagen erfordert.

Die technische Entwicklung der Infrarot-Fernsehgeräte läßt jedoch erwarten, daß die Sicherung von Schleusendurchfahrten bei Nacht und bei unsichtigem Wetter wesentlich verbessert werden kann. Gewisse Nachteile, die bei normalen Fernsehgeräten und den dafür erforderlichen starken Lichtquellen durch Blendung der Schifffahrt eintreten, könnten durch solche Geräte vermieden werden.

3.2 Akustische Mittel

Akustische Mittel bestehen aus Schallquellen, deren Energie im Luftraum oder im Wasser abgestrahlt wird. Die Ausbreitung des Schalles in der Luft hängt wesentlich von den Frequenzen der Schallquelle und den meteorologischen Verhältnissen ab, so daß zuverlässige Berechnungsmethoden hierfür nicht bestehen. Dagegen ist die Unterwasserschallausbreitung bekannt und rechnerisch zu erfassen.

3.21 Orstfeste Luftschallsender

Ortsfest aufgestellte elektrische Membran-Luftschallsender oder Preßlufttyphone, die auf bestimmten Frequenzen gut unterscheidbare Taktkennungen senden, sind in der Seeschifffahrt als Navigationshilfe bei unsichtigem Wetter seit über 30 Jahren gebräuchlich. Sie können auch für die Binnenschifffahrt Informationen zum Einhalten des Fahrwassers nach Ziffer 2.21 geben, wenn sie z. B. an einzelnen besonders gefährlichen Punkten in oder am Fahrwasser aufgestellt werden. Sie sind jedoch sehr aufwendig. Bisher bestehen solche Anlagen auf Binnenschifffahrtstraßen nicht, es ist auch unwahrscheinlich, daß sie in Zukunft hierfür verwendet werden.

3.22 Schallsignale an Bord von Schiffen

Informationen zur Verhütung von Kollisionen nach Ziffer 2.23 werden bei unsichtigem Wetter schon von alters her durch Schallsignale an Bord der Schiffe übermittelt. Sie können ebenfalls einer Sicherung der Nachtfahrt dienen, zumal sie heute vielfach mit Lichthupen gekoppelt sind¹⁾, indem sie als eine Ergänzung der Fahrtlichter (Ziffer 3.16) betrachtet werden, deren Informationen sie bei unsichtigem Wetter übernehmen.

Die Technik solcher Geräte ist bekannt und bietet nichts Besonderes. Die abgegebenen Schallsignale erhalten durch verschiedene Frequenz sowie Kombination langer und kurzer Töne unterscheidbare Kennungen, die auf internationaler Grundlage weitgehend einheitlich festgelegt sind.

3.23 Lautsprecher

Einfache Handmegaphone sind in ihrer Reichweite beschränkt. Elektrische Megaphone ermöglichen eine Verständigung auf 200 bis 1000 m. Ortsfeste Lautsprecher erzielen

¹⁾ Auf dem Rhein vorgeschrieben.

heute Reichweiten bis 600 m und mehr, so daß die unter Ziffer 2.1 geforderten Informationsreichweiten erfüllt werden können.

Neben Sprechverbindungen über das ganze Schiff ergeben sich damit folgende Möglichkeiten zur Sicherung der Fahrt bei Nacht und unsichtigem Wetter auf Binnenschiffahrtstraßen:

- a) Verbindung vom Schlepper zum Anhang oder von einem lotsenden Fahrzeug zu den nachfolgenden (Convoy-Fahrt)
- b) Austausch von Informationen zwischen einander ansichtig werdenden Fahrzeugen
- c) Informationen für Fahrt auf überwachter Strecke von einem Wahrschauposten aus, sowie für Fahrt nach Signal, wenn die optischen Anlagen ausgefallen sind oder einer Ergänzung bedürfen.

a) und b) sind vorwiegend Informationen zur Verhütung von Kollisionen nach Ziffer 2.23. Für c) waren bis 1958 in der Bundesrepublik ~ 80 ortsfeste Lautsprecheranlagen an Schleusen mit einem Kostenaufwand von ~ 800 000 DM eingebaut. Sie dienen der Durchgabe von Mitteilungen oder Weisungen an die Schiffe und der Verständigung des Schleusenpersonals untereinander. Damit erhöhen sie die Sicherheit im Schleusenbetrieb bei Nacht und unsichtigem Wetter.

3.24 Echolote

Die Unterwasserschalltechnik hat vertikale und horizontale Echolote entwickelt, die sich als Navigationsmittel im Küstengebiet, für Vermessung, Wracksuche, Ortung von Fischen u. dgl. gut bewährt haben. Versuche auf Rhein und Donau haben gezeigt, daß sich auch auf Binnenschiffahrtstraßen eine Anwendungsmöglichkeit abzeichnet.

Ein unter dem Schiffsboden ausgefahrener Schwinger sendet gerichtete Ultraschallimpulse aus, die am Unterwasserprofil der Wasserstraße, an Schiffen, Bojen oder anderen festen Gegenständen reflektiert werden, als Echo zum Schwinger zurückkehren und hier eine Lichtanzeige oder einen Schreibimpuls auslösen. Die dazu benötigte Zeit ist proportional der Entfernung. Vertikalecholote sind in der Seefahrt weit verbreitet; jedoch nur für größere Tiefen mit langsamer Lotfolge eingerichtet. Für die Binnenschiffahrt sind Wassertiefen über 5 m ohne Bedeutung, schnelle Lotfolge und genaue Anzeige dicht unter dem Schiffsboden aber wichtig. Nur solche Flachlote zu günstigem Preise, deren Fertigung die Industrie schon aufgenommen hat¹⁾, können Bedeutung in der Binnenschiffahrt gewinnen. Horizontalecholote werden bisher nur für Spezialaufgaben auf See eingesetzt, wo sie ~ 2000 m Informationsreichweite erzielen. Eine Weiterentwicklung für Zwecke der Binnenschiffahrt erscheint möglich.

Echolote übermitteln Informationen zum Einhalten des Fahrwassers nach Ziffer 2.21, z. B. laufende Angabe der Wassertiefe und Entfernung zum Ufer, Anzeige von Unterwasserhindernissen usw. Horizontallote können außerdem Informationen zur Verhütung von Kollisionen nach Ziffer 2.23 vermitteln, z. B. die Lage eines Schiffes im Fahrwasser und sein Bewegungszustand.

3.25 Unterwasserschallsignale

Unterwasserschallsignale waren lange Jahre auf Feuerschiffen zur Richtungs- und Abstandspeilung in Betrieb, sind aber durch die modernen Funknavigationsverfahren verdrängt worden. Ihre Verwendung zur Sicherung der Binnenschiffahrt bei Nacht und unsichtigem Wetter wäre denkbar.

¹⁾ z. B. „Miniskop“ der Fa. Electroacoustic Kiel, Preis rd. 1600 DM.

Als Sender kommen elektrische Membransender in Frage, die Signale beliebiger Taktkennung bei 3000 Hz abstrahlen und bei ungestörter Ausbreitung bis 9 km Reichweite erzielen können. Sender und Empfänger werden an Backbord und Steuerbord derart abgeschirmt eingebaut, daß immer nur im Winkelbereich der roten oder grünen Seitenlichter gesendet oder empfangen werden kann. Dadurch ist eine Seitenbestimmung einfallender Signale möglich, wobei auch die zugekehrte Seite des georteten Schiffes bestimmt werden kann, wenn dies nach Backbord und Steuerbord Signale unterschiedlicher Kennung abstrahlt.

Sind diese Kennungen international vereinbart, so können Informationen zur Verhütung von Kollisionen nach Ziffer 2.23 übermittelt werden, z. B. Stellung und Bewegungszustand der Schiffe, feste Eigenschaften und beabsichtigte Manöver. Das ange-deutete Verfahren ist aber bisher weder geräteseitig entwickelt noch praktisch erprobt worden.

3.3 Funktechnische Mittel

Die Entwicklung der Funktechnik zu immer kürzeren Wellen hat auch für das vorliegende Problem neue Wege eröffnet. Von besonderer Bedeutung ist dabei, daß sich die Ausbreitung der Funkwellen mit abnehmender Wellenlänge dem Verhalten der Lichtwellen nähert. Dm- und cm-Wellen reichen kaum weiter als optische Sicht und werden nach den Gesetzen der Optik reflektiert. Dementsprechend können die Frequenzen durch mehrfache Wiederholung entlang einer Wasserstraße besser ausgenutzt werden, was zudem die Frequenzauslegung der Geräte vereinfacht.

3.31 Radarnavigation

Radarnavigation sichert die Schifffahrt bei unsichtigem Wetter und Dunkelheit. Der Schiffsführer arbeitet dabei fast ausschließlich nach dem maßstabgetreuen, kartenähnlichen Schirmbild eines Radargerätes, das ihm ausreichende Informationen zum Einhalten des Fahrwassers (Ziffer 2.21) und zur Verhütung von Kollisionen (Ziffer 2.23) übermitteln muß. Größere Erfahrungen über Radarnavigation auf Binnenschiffahrtsstraßen liegen in Westeuropa nur am Rhein vor, auf dem jahrelange Versuche in Zusammenarbeit von Wasser- und Schifffahrtsverwaltung der Bundesrepublik Deutschland und Radarfirmen mit der Schifffahrt durchgeführt wurden. Sie zeigten sehr bald, daß eine sichere Radarnavigation neben großer Erfahrung des Schiffsführers die Entwicklung von Spezialradargeräten für die Binnenschifffahrt sowie ausreichende feste Ziele in und an der Wasserstraße unbedingt voraussetzte. Das Gerät mußte zuverlässige Informationen bis 1200 m voraus und 400 m achteraus gewährleisten. Für die Nachtfahrt erwies es sich als besonders vorteilhaft, daß ein schwach leuchtendes Schirmbild bei abwechselnder Betrachtung der Umgebung und des Bildes nur eine geringe Umgewöhnung des Auges erfordert.

Der Schiffsführer darf aber nie vergessen, daß zu kleine oder in ungünstigem Winkel zur Antenne liegende Flächen sowie Unterwasserhindernisse nicht abgebildet werden, daß Schattensektoren durch abdeckende Ziele entstehen und wechselnde Wasserstände das Schirmbild erheblich verändern können. Das Radarbild ist also selbst vom gleichen Standort aus durchaus nicht immer gleich. Radarnavigation erfordert daher Übung, Erfahrung und Ortskenntnis, sowie eine ständige ungestörte Beobachtung des Bildschirmes zur gewissenhaften Verfolgung aller beweglichen Ziele im Kollisionsbereich. Auf dem Rhein ist daher die Bedienung von Ruder und Radargerät durch dieselbe Person verboten.

Geeignete Radargeräte für Binnenschiffe stehen seit 1956 zur Verfügung. Wesentliche Merkmale dieser Geräte sind: Entfernungsbereiche von 800 bis 8000 m bei größtem

Maßstab 1 : 8000, Dezentrierung des Bildes im kleinsten Bereich auf 800 m voraus und 400 m achteraus, bessere Auflösung durch kleinere Impulsdauer und schärfste Antennenbündelung, Leistung mit Rücksicht auf die schwachen Bordnetze der Binnenschiffe ~ 900 W, möglichst geringe Abmessungen und Gewichte. Es kam daher nur ein Gerät mit 3 cm Wellenlänge in Frage. 1958 waren auf dem Rhein ~ 100 Schiffe mit solchen Geräten ausgerüstet.

Die Trägheit des Schirmbildes läßt zu spät erkennen, wann das Fahrzeug den Kurs im beabsichtigten Sinne geändert hat, zu hartes und zu langes Ruderlegen führen daher zu unerwünschten Zickzackkursen. Ein besonderer *Wendeweisiger*, der schon Drehgeschwindigkeiten von mindestens $10^\circ/\text{min}$ anzeigen muß, beseitigt diesen Mangel weitgehend. Dieser hat sich so gut bewährt, daß er auch ohne Radar gerne verwendet wird.

Passive Ziele müssen genügend Energie zurückstrahlen, um nach allen Richtungen auf dem Bildschirm zu erscheinen. Das erfordert weitgehend aufwärtsgerichtete Flächen. Sie müssen ferner so zahlreich vorhanden und charakteristisch gruppiert sein, daß die

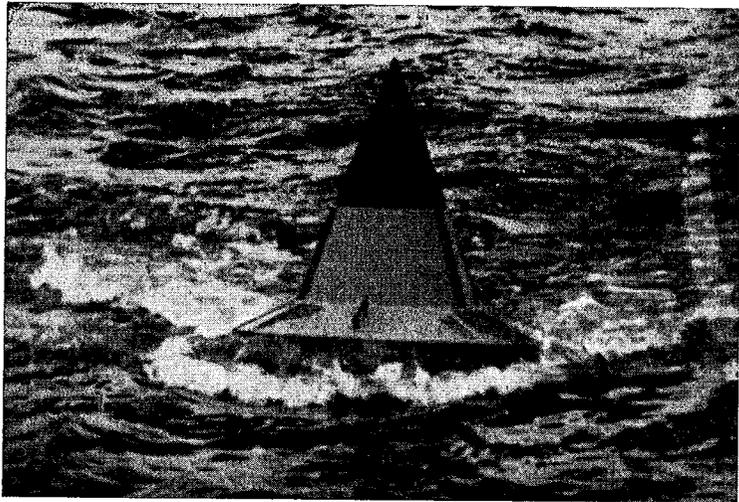


Bild 5

Aluminiumspitztonne auf dem Rhein mit Radarreflektor

Schlüsse des Schiffsführers aus dem Schirmbild eindeutig und unmißverständlich sind. Natürliche Ziele wie Ufer, Deiche, Einzelbäume und Baumreihen, Buhnen usw. reichen nicht immer aus. Ihre Ergänzung durch künstliche Ziele als Radartonnen oder ortsfeste Reflektoren ist notwendig. Sie sind aus Metall nach dem Prinzip des Tripelspiegels gefertigt, wobei sich 30 cm Kantenlänge und 1 m Höhe über Wasser als ausreichend für 1200 m Informationsreichweite erwiesen haben¹⁾. Bild 5 zeigt eine auf dem Rhein verwendete Radartonne, deren Spitze als Winkelreflektor ausgebildet ist. Die charakteristische Form der Tonne bleibt dadurch erhalten. Informationslinien aus künstlichen Zielen können durch eine Kette solcher Reflektoren, aber auch schon durch einfache Zaunpfähle in 6 bis 8 m Abstand erzeugt werden.

¹⁾ Tripelspiegel haben die günstigste äquivalente Echofläche, im vorliegenden Fall bis zu 40 qm.

Besonders wichtige Punkte können als aktive Ziele ausgebildet werden, die durch Abstrahlung eigener Energie bestimmte, mit Kennung versehene Zeichen auf dem Bildschirm hervorrufen. Sie sind als ständig sendende, ungerichtete Funkfeuer (RAMARC) oder als Antwortbaken (RACON) für die Seefahrt entwickelt und bereits erprobt worden. Die Geräte sind sehr empfindlich und aufwendig, ihre Verwendung an Binnenschiffahrtstraßen ist vorerst noch unwahrscheinlich.



Bild 6

Radarbild vom Niederrhein mit der Uerdinger Brücke (800-m-Bereich)

Die Radarnavigation hängt entscheidend ab von der Breite des Fahrwassers der Strömungsgeschwindigkeit, der Verkehrsdichte und der Anzahl brauchbarer natürlicher Ziele, die nur in wirtschaftlich gerechtfertigtem Umfang einer Ergänzung durch künstliche Ziele bedürfen. In Westeuropa erfüllen nach dem heutigen Stand der Technik nur der Rhein mit seinen Mündungsarmen, die Donau und der Po diese Bedingungen befriedigend.

Gute Informationslinien liefern Deiche, Baumreihen u. dgl., gegebenenfalls ergänzt durch künstliche „Radarzäune“, die parallel zum Fahrwasser verlaufen; sie können als „Radarleitlinien“ verwendet werden, von denen ein konstanter Abstand einzuhalten ist. Bild 6 zeigt ein Beispiel am Niederrhein. Künstliche Ziele sind vor allem an Brückenpfeilern notwendig, die in dem Brückenband verschwinden (Bild 6), durch vorgesetzte Reflektoren aber als deutliche Ausbuchtung erscheinen; ferner auf den Köpfen überströmter Buhnen, an Unterwasserhindernissen, bei plötzlichem Seitenwechsel des Fahrwassers u. dgl. Bis 1958 waren auf der deutschen Rheinstrecke ~ 50 Radartonnen vorwiegend an Buhnen und Brückerpfeilern ausgelegt.

Natürliche Ziele bieten mehr Hilfen, als es zunächst den Anschein hat. So zeigen die ungegliederten Ufer des Oberrheines auf dem Bildschirm manche charakteristische Erscheinung, die das Auge nicht sieht, z. B. auffallend geformte Lichtungen und Altarme, Baumschulen, deren Baumreihen wie Schraffur wirken, flache Ufer, die durch streuenden Bewuchs gut reflektieren, überströmte Buhnen, deren Stauwelle reflektiert. Solange diese Bilder dem Schiffsführer noch nicht im Gedächtnis haften, ist daher die Benutzung von Stromkarten unter Eintragung persönlicher Beobachtungen unerlässlich.

Auf diese Weise liefert das Radargerät einem geübten und erfahrenen Beobachter auch noch manche weitere Information, sofern er diesem Hilfsmittel aufgeschlossen gegenübertritt und sich lange genug bei klarem Wetter am Gerät und auf der Strecke geschult hat. Manche Probleme stehen jedoch noch offen, z. B. das Erkennen von Signalen und die Kennzeichnung eines fremden Schiffes als Radarschiff. Ein Bordradargerät allein ermöglicht weder eine Fahrt auf überwachter Strecke (Ziffer 2.3) noch eine Fahrt nach Signal (Ziffer 2.4).

3.32 Sicherungs-Radar-Anlagen

Für die Fahrt auf überwachter Strecke (Ziffer 2.3) ist der Einsatz ortsfester oder schwimmender Sicherungsradaranlagen in Verbindung mit einem Schiffssicherungsfunk (Ziffer 3.35) das modernste, viel Erfolg versprechende, aber auch erheblichen Aufwand seitens der Verwaltung erfordernde Mittel. Mit ihrer Hilfe wird ein besonders schwieriger Abschnitt einer Wasserstraße ständig von einer festen Position aus beobachtet. Auf dem Bildschirm erscheinende Schiffe werden laufend über ihre Lage zu festen Zielen und benachbarten Fahrzeugen unterrichtet. Neben vielen Anlagen im Ausland liegen auch im deutschen Küstengebiet an Elbe und Weser mehrjährige Erfahrungen vor; auf Binnenschiffahrtsstraßen sind sie bisher jedoch noch nicht eingesetzt. In Gegensatz zu Bordradargeräten wird der Beobachter nicht durch andere Tätigkeit abgelenkt und besitzt in seinem Abschnitt besondere Ortskunde; sein Gerät bewegt sich nicht und ermöglicht bei geschickter ortsfester Aufstellung bessere Übersicht und höhere Bildqualität.

Da sich der Schiffsführer auf die Informationen ohne die Möglichkeit einer Kontrolle verlassen muß, sind an die Geräte einer Sicherungsradaranlage größere Anforderungen zu stellen als an Bordgeräte. Für die Anlagen an der Küste sind daher Spezialgeräte entwickelt, die sich vor allem durch wesentlich bessere Winkelauflösung und dichtere Impulsfolge auszeichnen; großer Bildschirmdurchmesser (40 cm), hohe Nachleuchtdauer und günstigeres Leuchtschirmlicht erleichtern die ständige intensive Beobachtung, Einblendung elektronischer Meßlinien und Kurslineale, wandernder Entfernungsmarken und dergleichen beschleunigen die Auswertung. Arbeiten mehrere Geräte als fortlaufende Kette zusammen, kann die Beratung durch Funkübertragung der Bilder an einem Punkt zusammengefaßt werden.

Den Gepflogenheiten der Schiffahrt folgend werden keine Anweisungen gegeben, sondern Schiffe nur über den beobachteten Zustand unterrichtet; hierzu ist eine zeitsparende aber unmißverständliche Ausdrucksweise im Küstengebiet entwickelt, wobei Entfernungen und Peilungen zu festen Zielen im Wasser oder am Ufer, Fahrwassertonnen, Kilometerstationen oder Radarleitlinien übermittelt werden. In der Natur nicht vorhandene Leitlinien, z. B. Fahrwassermittellinien, können zur Erleichterung der Beratung ebenfalls elektronisch eingeblendet werden.

Der Beobachter spricht unmittelbar das Ruderhaus des zu beratenden Schiffes an (Ziffer 3.35). Je Bildschirm können bis zu 8 Schiffe gleichzeitig beraten werden. Die Identifikation beweglicher Ziele auf dem Bildschirm ist noch nicht befriedigend gelöst; der Beobachter läßt, wenn Positionsangaben des Schiffes dazu nicht ausreichen,

schnell zu erkennende Manöver ausführen. Nach dem heutigen Stand der Technik kann ein Abschnitt von etwa 3 km Länge zuverlässig erfaßt werden. Anwendungsmöglichkeiten für die Fahrt bei Nacht und unsichtigem Wetter bestehen an besonders engen und gefährlichen Fahrwasserabschnitten, bei Verkehrsballungen, an Fährstrecken bei starkem Längsverkehr und dergleichen.

3.33 Funkfeuernavigation

Zur Sicherung des See- und Luftverkehrs werden zahlreiche Funkfeuer betrieben, die jedoch vorwiegend der weiträumigen Navigation dienen und aufwendige Empfangsgeräte erfordern. Für die Binnenschifffahrt kommen wegen der engen Fahrwasser, der kleinen Entfernungen, des Frequenzmangels und der Notwendigkeit, die erhaltenen Werte ohne Zeitverlust für die Fahrt auszunützen, nur Richtfunkfeuer auf kürzesten Wellen in Frage. Versuche mit einem im Küstengebiet bewährten 3-cm-Gerät¹⁾ wurden durchgeführt. 2 gegeneinander verschwenkte gerichtete Sender strahlen verschiedene Morsebuchstaben in der Weise aus, daß die Töne des einen die Pausen des anderen lückenlos füllen²⁾. Auf der Winkelhalbierenden wird ein Dauerton empfangen; die Breite des Peilstrahles kann der Fahrwasserbreite angepaßt werden. Der Sender ähnelt einem Radargerät, der leichte und handliche Empfänger (2,6 kg) wird in der Hand gehalten oder drehbar an Bord montiert.

Ein solches Richtfunkfeuer übermittelt Informationen zum Einhalten des Fahrwassers (Ziffer 2.21), z. B. als Zielfahrt den Kurs durch ein schmales Fahrwasser oder eine Hafeneinfahrt, als Quermarke Informationen über Kursänderung oder Übergang des Fahrwassers zum anderen Ufer. Benachbarte Baken müssen unterschiedliche Buchstabenpaare erhalten. Soweit die verfügbaren Buchstaben als Kennung ausreichen, können auch feste Anweisungen und Hinweise nach Ziffer 2.22 übermittelt werden.

Die bisherigen Geräte befriedigen für die Binnenschifffahrt noch nicht. Überbreite des Peilstrahles und Störechos infolge der nahen, oft ansteigenden und bebauten Ufer führen zu Mehrdeutigkeiten. Durch technische Verbesserungen erscheint es jedoch möglich, ein cm-Richtfunkfeuer für Binnenschifffahrtstraßen zur Sicherung der Fahrt bei Nacht und unsichtigem Wetter brauchbar zu gestalten.

3.34 Decca-Navigation

Decca ist ein Langwellen-Hyperbel-Navigationsverfahren, das auf der Messung von Phasendifferenzen zweier Sender beruht. Im allgemeinen arbeiten 3 Sender im Abstand von 100 bis 200 km zusammen, deren Hyperbelscharen durch die Farben Rot, Grün und Violett unterschieden werden und deren Reichweite bei Tage ~ 450 km beträgt; bei Nacht kann sie durch störende Raumwellen erheblich herabgesetzt werden. Das Verfahren hat sich in der See- und Luftfahrt gut bewährt³⁾. In Basisnähe treten um die Mittagszeit relative Fehler ≤ 10 m gegenüber mehr als 100 m an der Grenze des Bedeckungsbereiches auf. Nachteffekt erhöht die Fehler u. U. bis zum zehnfachen Wert.

Die deutsche Decca-Kette überdeckt alle westdeutschen Binnenschifffahrtstraßen, die Basis der Rothyperbeln schneidet den Rhein südlich Bonn. Ähnlich liegt die Themse unterhalb Londons im Zentrum der englischen Kette Nr. 5. Diese Tatsache und erfolgreiche Versuchsfahrten auf Themse und Rhein geben Veranlassung, die Verwendung des Verfahrens für das vorliegende Problem zu prüfen. Die sehr aufwendigen Sendeanlagen⁴⁾ werden für die deutsche Kette von der Flugsicherung, sonst im

¹⁾ Von Firma Elliot-Brothers-Ltd London.

²⁾ Geeignete Buchstaben sind B/V, A/N, S/O, U/D usw.

³⁾ 1958 waren in der Seefahrt ~ 4000 Decometer in Gebrauch.

⁴⁾ Baukosten 1952 ~ 1 Mill. DM.

allgemeinen von der Decca-Navigator-Ltd. betrieben, die sie durch Vermietung der Empfangsgeräte (Decometer) finanziert. Diese zeigen die Hyperbel-Standlinien des Schiffsortes auf roten, grünen und violetten Zifferblättern an. Der Standort kann nur an Hand einer Karte der befahrenen Wasserstraße mit eingetragendem Hyperbelnetz durch Aufsuchen von 2 Hyperbeln mit günstigem Schnittwinkel ermittelt werden, was einen Zeitaufwand von ≥ 1 min erfordert. Auf Binnenschiffen ist aber weder Platz noch Personal noch Zeit zum Auswerten verfügbar. Decca hat daher einen besonderen Kursschreiber für die Schifffahrt entwickelt¹⁾, der die Anzeige zweier Zifferblätter unmittelbar auf eine Papierrolle schreibt. Die ausgewählten Hyperbeln erscheinen als senkrechte Koordinaten (Papiervorschub und Schreibfederweg), der Verlauf der Wasserstraße muß vorher in entsprechender Verzerrung eingetragen sein. Auf diese Weise sind unmittelbare Ableseung des Fahrtweges und rechtzeitige Kursverbesserungen möglich.

Decca-Navigation mit Kursschreiber übermittelt Informationen zum Einhalten des Fahrwassers (Ziff. 2.21) und feste Anweisungen und Hinweise (Ziff. 2.22), soweit Maßstab und Eintragungen auf der Karte dies erlauben. Die Fehler lassen mit den vorhandenen Anlagen eine Hilfe für die Binnenschifffahrt nur in der Mittagszeit, auf breiten Fahrwassern und in der Nähe der Basislinie erwarten. Die geographischen Bedingungen erfüllen in Westeuropa nur der Mittelrhein und die Themse. Erfahrungen mit Ketten kleinerer Basislänge zu Vermessungszwecken haben aber schon Fehler von weniger als 1 m in Basislänge ergeben, so daß die Weiterentwicklung solcher Anlagen der Decca-Navigation in der Binnenschifffahrt bessere Aussichten schaffen kann. Der Einfluß des Nachteffektes wird jedoch immer bleiben, neben kostspieligen Landanlagen liegt der Aufwand an Bord (für Empfänger und Kursschreiber $\sim 30\,000$ DM) heute noch über dem eines Bordradargerätes.

3.35 Schiffssicherungsfunk

Als Schiffssicherungsfunk wird ein nicht öffentlicher UKW-Funksprechdienst Schiff-Schiff oder Land-Land bezeichnet, der der Bewegung und Sicherheit des Schiffes dient. Entwickelt wurde er aus dem Funksprechverkehr zwischen Sicherungsradaranlagen und den zu beratenden Schiffen. Das Brüsseler Abkommen über den internationalen Rheinfunkdienst auf UKW von 1957 schlägt ihn erstmalig auch für Binnenschiffahrtstraßen auf internationaler Grundlage vor. Die Konferenz war sich bewußt, daß ein öffentlicher Dienst hierfür nicht geeignet ist. Sie weist daher mit Empfehlung Nr. 5 die beteiligten Verwaltungen darauf hin, daß ein Schiffssicherungsfunk einschl. nautischem Beratungsdienst durch Radarstellen „möglicherweise auch in Zukunft für den Rhein eingeführt wird, um die Schifffahrt während der Nacht oder bei schlechten Wetterbedingungen zu erleichtern“, und schlägt hierfür die 3 ranghöchsten Simplex- und Duplex-Kanäle des kurz vorher im Haager Abkommen über den internationalen Sprech-Seefunkdienst auf UKW aufgenommenen Schiffssicherungsfunk vor²⁾. Dies hat den Vorteil einheitlicher Geräte für See- und Binnenschifffahrt.

Ortsfeste gerichtete Sender, deren Abstand von Bodenform, Antennenhöhe und Leistung abhängt, werden entlang der Wasserstraße so angeordnet, daß ihr Wirkungsbereich sich weitgehend dem Verlauf der Wasserstraße anpaßt. So lange die Schiffe noch nicht mit eingebauten Fahrzeugstationen ausgerüstet sind, werden tragbare Funksprechgeräte bei der Einfahrt in den gesicherten Bereich an Bord gegeben. Dies Verfahren ist bei allen Sicherungsradaranlagen an der Küste üblich, wofür mit Rücksicht auf den rauen Betrieb Spezialgeräte entwickelt wurden. Eine besondere Organisation für Transport, Aufladung und Instandsetzung der tragbaren Geräte ist allerdings

¹⁾ Marine-Automatic-Plotter.

²⁾ Das Abkommen spricht zwar nur von Port-Operation, definiert den Begriff aber so, daß er nur Gespräche umfaßt, die der Bewegung und Sicherheit des Schiffes dienen.

erforderlich. Die Verbindung erfolgt im Gegensprechen oder bedingten Gegensprechen von jeder Beratungsstelle über die ortsfesten Sender zum Schiff; Schiffe untereinander verkehren im Wechselsprechen. Die Schiffe müssen aber ständig empfangsbereit auf der Beratungsfrequenz des betreffenden Bereiches sein, und zwar durch Lautsprecher im Ruderhaus. Jeglicher öffentliche Funkverkehr über dieses Gerät, das ausschließlich Navigationshilfsmittel ist, scheidet aus.

Schiffssicherungsfunk allein kann Informationen zur Verhütung von Kollisionen (Ziff. 2.23) und für die Fahrt auf überwachter Strecke (Ziff. 2.3) übermitteln, z. B. durch Unterrichtung der Schifffahrt über Wasserstände, Wetterlage, Schifffahrtshindernisse und dgl., ferner über die Verkehrslage, indem alle teilnehmenden Schiffe ihre Position melden, durch Anmeldung der Schiffe an Schleusen und Brücken, Austausch von Mitteilungen zwischen begegnenden und überholenden Schiffen usw. Ihr Hauptanwendungsgebiet findet jedoch dieses Mittel im Zusammenhang mit Sicherungsradaranlagen nach Ziff. 3.32.

4. Vergleichende Betrachtung und kombinierte Verwendung der Informationsmittel

4.1 Allgemeine navigatorische Bewertung

Der Schiffsführer beurteilt ein Informationsmittel danach, wie zuverlässig und geschwind es die Information übermittelt und welche Anforderungen es an ihn und seine Besatzung stellt; davon hängt sein Vertrauen zu ihm und seine Bereitschaft, sich seiner zu bedienen, ab. Tafel 1 zeigt in Spalte 3 bis 8 Merkmale, die den Wert des Informationsmittels entscheidend beeinflussen. Spalte 3 und 4 betreffen die Geschwindigkeit der Übermittlung, wobei die unmittelbare Aufnahme höher zu bewerten ist, Spalte 5 und 6 den zeitlichen Verlauf der Information, wobei laufende Information höher zu bewerten ist. Spalte 7 die Anforderung an Qualität von Schiffsführer und Besatzung, wobei der Fortfall zusätzlicher Ausbildung höher zu bewerten ist, Spalte 8 schließlich die Anforderung an die Schiffsbesatzung, wobei das Auskommen mit der bisherigen Besatzung höher zu bewerten ist.

Man erkennt den Vorteil der optischen Mittel, die fast alle Informationen unmittelbar und laufend übertragen, dabei aber nur geringe zusätzliche Kenntnisse und kein zusätzliches Personal erfordern. Die funktechnischen Mittel übertragen nur mittelbare Informationen und fordern höhere Ausbildung sowie zusätzliches Personal, bieten aber zum größeren Teil auch laufende Informationen. Damit sind die funktechnischen Mittel bezüglich Aufwand an Bord und Geschwindigkeit der Informationsübermittlung schlechter zu bewerten als die optischen Mittel. Eine Mittelstellung nehmen die akustischen Mittel ein.

4.2 Übertragung der Informationen

Zur weiteren Beurteilung der Informationsmittel ist festzustellen, welche der im Abschnitt 2 als notwendig erkannten Informationsinhalte sie zur Sicherung der Fahrt bei Nacht und unsichtigem Wetter übertragen können. Dies ist in Spalte 10 bis 23 Tafel 1 zusammengestellt. Obgleich die Qualität, mit der Information übermittelt werden, je nach der Technik des Informationsmittels unterschiedlich ist, ist nur mit den Begriffen „erfüllt“ — „nicht erfüllt“ — „bedingt erfüllt“ gearbeitet, da sonst keine Übersichtlichkeit erreicht wird. „Bedingt erfüllt“ bedeutet dabei, daß die Informationen aus geographischen oder physikalisch-technischen Gründen nicht immer übertragen werden können oder die Sicherheit der Übertragung nicht ausreichend ist.

4.3 Kombinierte Verwendung

Tafel 1 zeigt, daß kein Informationsmittel alle erforderlichen Informationen allein vermitteln kann. Es sind daher mehrere Informationsmittel so zu einem Sicherungssystem zu verbinden, daß mit wenig Aufwand der größtmögliche Nutzen erzielt wird;

die Informationen müssen also möglichst hochwertig (Ziff. 4.1) und vollständig dem Schiffsführer zugeführt werden. Der Aufwand wird um so größer, je kleiner der Sichtwert ist, bei dem noch Schifffahrt möglich sein soll. Beispiele derartiger Sicherungssysteme enthält Tafel 2. Sie sind in Abhängigkeit von der Sichtigkeit in drei Gruppen zusammengefaßt: Systeme für sichtiges Wetter (Nr. 1—3) sowie für sichtiges und nebliges Wetter (Nr. 4—7) und solche Systeme, die bei Aufkommen von dunstigem Wetter noch bis zu einem weitgehend verminderten Sichtwert Sicherheit bieten (Nr. 8—11). Innerhalb jeder Gruppe können verschiedene Sicherungssysteme nach ihrem navigatorischen Wert, nach den zu der Zeit und an dem Ort verfügbaren technischen Mitteln, nach wirtschaftlichen Erwägungen usw. zusammengestellt werden.

Kombinationen der 1. Gruppe bestehen nur aus optischen Mitteln, deren Vorzüge mit Ziff. 4.2 genannt sind. Nr. 1 und 2 auf Tafel 2 sind wenig aufwendige Systeme, die in der Bundesrepublik auf vielen Kanälen und kanalisierten Flüssen angewendet werden; ein Beispiel für die gemeinsame Verwendung aller optischen Mittel (Nr. 3) liefert die deutsche Donau-Strecke.

Die unter Nr. 5 aufgeführte Verbindung von Sicherungsanlagen mit Schiffssicherungsfunk benötigt als einziges Verfahren an Bord weder zusätzliche Ausbildung noch zusätzliches Personal, sondern nur eine verhältnismäßig geringe zusätzliche Ausrüstung (UKW-Funksprechgerät); trotzdem werden fast alle Informationen mit genügender Sicherheit vermittelt. Nr. 6 u. Nr. 7 liefern als Grundwerte laufende Informationen, die dort, wo es die Sicherheit fordert, durch Informationen in Einzelwerten ergänzt werden. Die Kombinationen der 3. Gruppe haben als Grundlage Radarnavigation oder Schiffssicherungsfunk; die auf kurze schwierige Strecken durch optische oder akustische Mittel ergänzt werden. Davon ist Nr. 11 an Kanälen oder kanalisierten Flüssen mit kurzen Haltungen und starkem Verkehr ein einfaches System zur Sicherung der Strecken zwischen Schleusen, Brücken oder Häfen.

Tafel 2 ist keinesfalls erschöpfend, es sind noch viele andere Kombinationen möglich. Bei Auswahl der Systeme sollte man stets darauf achten, daß die wichtigsten Informationen wenigstens durch 2 Informationsmittel übertragen werden, um bei Versagen eines Mittels noch eine Sicherheit zu haben.

5. Schlußwort

Der vorstehende Bericht berücksichtigt den Stand der Technik zum Zeitpunkt seines Abschlusses. Bis dahin waren im Gebiet der Bundesrepublik Deutschland für zusätzliche Maßnahmen zur Sicherung der Nachtfahrt auf Binnenschiffahrtstraßen ~ 4,5 Mill. DM aufgewendet (Tafel 3). Für viele der behandelten Sicherungsverfahren bestehen noch Möglichkeiten der Weiterentwicklung; die Wege dazu wurden angedeutet.

Eine vergleichende Betrachtung, wie hier unter Ziff. 4 geschehen, kann nur mit großen Vorbehalten durchgeführt werden, zumal es sich um Fragen der Sicherheit handelt und nur wenige hervortretende Eigenschaften einander gegenübergestellt werden konnten. Die Untersuchung kann daher dem Leser nicht die Entscheidung abnehmen, die er bei der Wahl eines Sicherungssystems in jedem Einzelfall zu treffen hat; sie will ihm aber diese Entscheidung erleichtern, indem sie sich bemüht, ihm hierfür möglichst viele Gesichtspunkte zu nennen und alle mit dem vorliegenden Problem zusammenhängenden technischen Fragen objektiv darzustellen. Niemals darf vergessen werden, daß technische Mittel allein zur Sicherung der Fahrt auf Binnenschiffahrtstraßen bei Nacht und unsichtigem Wetter nicht genügen, sondern auch an die im Verkehr tätigen Menschen höhere Anforderungen hinsichtlich Auswahl, Qualität und Ausbildung gestellt werden müssen.

a		Navigatorische Bewertung der Informationsmittel auf Binnenschiffahrtsstraßen bei Nacht und unsichtigem Wetter									notwendigen Informationen durch verschiedene Informationsmittel bei Nacht und unsichtigem Wetter											
b		Aufnahme der Information an Bord							Fahrt auf Sicht													
c		Bemerkungen							Einhalten des Fahrwassers					Verhütung v. Kollisionen			Fahrt auf überwachter Strecke					
d		Bemerkungen							Fahrt auf Sicht					Fahrt auf überwachter Strecke			Fahrt nach Signal					
e/l		10							24													
f		4	5	6	7	8	9															
g									11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
f	Rückstrahler und Reflexstoffe mit Bordscheinwerfern							→ 1 Mann zusätzlich für Scheinwerfer														
	Befeuerung					**	**									**	**	**				
	Beleuchtung							**	**	**	**											
	Lichttagessignale					**	**	Kenntnis des Signal- oder Zeichensystems														
	Verkehrszeichen					**	**															
	Fahrtlichter der Schiffe					**	**															
Lichtsperrn					**	**																
m	Ortsfeste Luftschallsender							**	**													
	Schallsignale an Bord															**	**	**				
	Lautsprecher															**	**	**	**	**	**	**
	Echolote															**	**	**	**	**	**	**
q	Unterwasserschallsignale																					
r	Radarnavigation							→ 1 Radarbeobachter mit Erfahrung und Übung														
	Sicherungsradaranlagen							Zusammen mit Schiffssicherungsfunk														
	Funkfeuernavigation							Kenntnis des Zeichensystems. Übung im Gebrauch des Empfängers. 1 Mann für Empfängerbedienung.														
	Decca-Navigation mit Kursschreiber															**	**	**				
	Schiffssicherungsfunk															**	**	**	**	**	**	**

Deutsche Beiträge zu PIANC-Schiffahrtskongressen seit 1949

1961-03

Tafel 1
Navigatorische Bewertung und Übertragung der Informationen

a		Beispiele für eine Übertragung der Informationen durch gemeinsame Verwendung einander ergänzender Informationsmittel													<input type="checkbox"/> nicht erfüllt <input checked="" type="checkbox"/> erfüllt ** bedingt erfüllt			
b	Informationsinhalt																	
c	Fahrt auf Sicht																	
d	Einhalten des Fahrwassers									Verhütung von Kollisionen			Fahrt auf überwachter Strecke	Fahrt nach Signal	Abhängigkeit vom Wetter	Navigatorischer Wert		
e	Fahrwassergrenzen	Untiefen	Wracks und andere Hindernisse	Brückendurchfahrten und dergleichen	Lage der Fahrinne zum Ufer, Übergänge	Verteilung der Stromgeschwindigkeit	Wasserstand	Feste Anweisungen oder Hinweise	Feste Eigenschaften der Schiffe	Stellung und Bewegungszustand	Beabsichtigte Manöver							
f/1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17		
g	Reflexstoffe + Lichttagessignale + Fahrtlichter	***	***	***	***	***									Nur bei sichtigem Wetter verwendbar	Informationen laufend und unmittelbar		
h	Beleuchtung + Lichttagessignale + Fahrtlichter	****	****	****	****	****												
i	Befeuerung + Beleuchtung + Lichttagessignale (Lichtsperrern) + Verkehrszeichen + Fahrtlichter	****	****	****	****	****												
i	Lautsprecher + Echolote + Unterwasserschallsignale												****	****	Auch bei Nebel oder stark unsichtigem Wetter noch verwendbar	Information vorwiegend mittelbar und in Einzelwerten		
k	Sicherungsradaranlagen mit Schiffssicherungsfunk + Schallsignale an Bord				****	****	****		****				****	****		Information nur mittelbar und nur in Einzelwerten		
l	Decca Navigation oder Funkfeuernavigation + Schiffssicherungsfunk + Schallsignale an Bord				****	****			****				****	****		Information mittelbar und etwa gleichwertig sowohl laufend als auch in Einzelwerten		
m	Radarnavigation + Lautsprecher + Schallsignale an Bord				****	****			****	****		****	****	****	Information vorwiegend mittelbar u. laufend o. schwierig. Stell. ergänzt d. unmittelb. u. laufende Informat.			
n	Radarnavigation + Beleuchtung + Lichttagessignale (Lichtsperrern) + Verkehrszeichen + Fahrtlichter + Schallsignale an Bord				****	****			****				****	****	Bei sichtigem Wetter, aber auch bei dunstigem Wetter mit weitgehend verminderter Sichtweite noch verwendbar	Informationen unmittelbar und laufend		
o	Sicherungsradaranlagen + Beleuchtung + Lichttagessignale + Fahrtlichter + Schallsignale (Lautsprecher)				****	****	****		****				****	****		Information vorwiegend mittelbar und in Einzelwerten, an schwierigen Stellen ergänzt durch unmittelbare und laufende Informationen		
p	Echolote + Schiffssicherungsfunk + Beleuchtung + Schallsignale an Bord				****	****			****				****	****				
q	Reflexstoffe oder Befeuerung + Schiffssicherungsfunk + Fahrtlichter + Schallsignale an Bord				****	****			****				****	****				

Tafel 2

Tafel 3
Maßnahmen zur Sicherung der Nachtfahrt in der Bundesrepublik Deutschland

Zusammenstellung der Maßnahmen der Bundesrepublik Deutschland zur Sicherung der Nachtfahrt auf den Binnenschiffahrtstraßen Stand: 1958																													
Lfd. Nr.	Wasserstraßen, an denen bisher Maßnahmen für die Nachtschiffahrt getroffen wurden	Länge in km	Mit Rückstrahlern oder Reflexstoffen ausgerüstete				Orts-feste Leucht-feuer		Leucht-tonnen		Beleuchtungsanlagen				Lichttagessignalanlagen				Laut-sprecher-anlagen an Schleusen		Radar-tonnen		Ausgaben						
			Baken		Tonnen		An-zahl	DM	An-zahl	DM	An-zahl	DM	Schleusen einschl. Vorhäfen		sonstige		Schleusen		Brücken		An-zahl	DM	An-zahl	DM	An-zahl	DM	je Wasser-strabe DM	je km Was-serstraße DM	
			An-zahl	DM	An-zahl	DM							An-zahl	DM	An-zahl	DM	An-zahl	DM	An-zahl	DM									An-zahl
1	Ems von Leer bis Emden ¹⁾	26	—	—	26	16 000	16	48 000	1	4 000	—	—	—	—	2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	68 000	2 600
2	Küstenkanal und untere Hunte ¹⁾	85	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	5	100 000	—	—	—	—	—	—	—	—	100 000	1 200
3	Elbe-Lübeck-Kanal	60	—	—	—	—	—	—	—	—	—	4	80 000	—	—	—	—	2	16 000	—	—	—	—	—	—	—	—	96 000	1 600
4	Weser und Mittellandkanal	620	—	—	—	—	—	—	—	—	—	4	360 000	—	—	7	160 000	—	—	—	—	5	80 000	—	—	—	—	600 000	1 000
5	Dortmund-Ems-Kanal u. Anschlußkan. d. Ruhrgeb.	380	¹⁾ 40	¹⁾ 4 000	—	—	—	—	—	—	—	9	380 000	—	—	36	555 000	1	6 000	²⁾ 9 000	50	500 000	—	—	—	—	—	1 454 000	3 800
6	Oberelbe von Lauenburg bis Hamburg	40	80	51 000	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	51 000	1 300	
7	Rhein	500	—	—	—	—	³⁾ 9	6 000	7	9 000	—	—	400 m Ufer	15 000	—	—	—	—	—	⁹⁾ 30 000	—	—	53	60 000	—	—	120 000	240	
8	Main	400	—	—	—	—	—	—	—	—	4	240 000	—	—	10	240 000	—	—	¹⁾ 5 000	8	120 000	—	—	—	—	—	605 000	1 500	
9	Neckar	200	—	—	²⁾ 630	²⁾ 100 000	—	—	—	—	10	500 000	—	—	12	300 000	—	—	¹⁾ 5 000	14	100 000	—	—	—	—	—	1 005 000	5 000	
10	Donau	175	60	10 000	40	8 000	20	80 000	—	—	1	100 000	—	—	1	40 000	—	—	¹⁾ 10 000	1	20 000	—	—	—	—	—	268 000	1 500	
11	Über alle Wasserstraßen verteilt	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	⁴⁾ 25	25 000	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	25 000	—
12		2 486	180	65 000	696	124 000	45	134 000	8	13 000	32	1 660 000	25	40 000	68	1 295 000	8	122 000	14	59 000	78	820 000	53	60 000	—	—	4 392 000	—	

1) Nur 2 km von Gleesen bis Hanekenfähr
 2) Nur 97 km von Heilbronn bis Mannheim
 3) Brückenpfeiler ohne Überbau
 4) Angeleuchtete Brückenpfeiler zur Erleichterung der Durchfahrt
 5) Verkehrsregelung Henrichsburg und Hiltrup (alte Fahrt)
 6) Verkehrsregelung Friedensbrücke Würzburg
 7) Verkehrsregelung Hirschhorn
 8) Verkehrsregelung Straubinger Enge
 9) Verkehrsregelung und Wahrschau Gebirgsstrecke
 10) Seeschiffahrtstraße, aber mit überwiegend Binnenverkehr aus dem Dortmund-Ems-Kanal
 11) Untere Hunte Seeschiffahrtstraße, aber mit überwiegend Binnenverkehr

Abteilung I — Binnenschifffahrt

Mitteilung 1

Methode der Schubschifffahrt:

- a) Fahrzeuge für die Schubschifffahrt: (1) Schubboote, (2) Schubleichter, (3) Ausführung und Berechnung der Kuppelungen.
- b) Schubeinheiten: (1) Formationen, (2) Abmessungen.
- c) Zulässige Abmessungen der Schubeinheiten auf einer Wasserstraße (See, Fluß oder Kanal): (1) Breite der Schifffahrtsrinne, (2) Krümmungen (Halbmesser, Breite), (3) Verkehrsdichte, (4) Schleusen.
- d) Schifffahrt mit Schubeinheiten: (1) Geschwindigkeit, (2) Anhalten, (3) Manövrierfähigkeit, (4) benötigte Breite in den Krümmungen, (5) Rückwärts- und seitliche Bewegung, (6) Begegnung und Überholen, (7) Einfluß von Strömungen, Wellen, Wind.
- e) Handhabung der aus dem Verband der Schubeinheit gelösten Schubleichter.
- f) Nebeneinander von Schubschifffahrt und anderen Schifffahrtsmethoden auf derselben Wasserstraße.

Von Dipl.-Ing. Fritz Hartung, Ministerialrat, Bundesministerium für Verkehr, Bonn; Dipl.-Ing. Werner Berger, Oberregierungsbaurat, Bundesministerium für Verkehr, Bonn; Dipl.-Ing. Friedrich Ruschenburg, Oberregierungsbaurat, Wasser und Schifffahrtsdirektion Duisburg; Martin Saltzwedel, Regierungsrat, Wasser- und Schifffahrtsdirektion Duisburg; Dipl.-Ing. Wilhelm Sturtzel, Professor, Technische Hochschule Aachen; Dipl.-Ing. Kurt Winkler, Oberregierungsbaurat, Vorstand des Wasser- und Schifffahrtsamtes Duisburg-Rhein.

Zusammenfassung

Vorbemerkung

Das Streben nach Senkung der Bau- und Betriebskosten von Binnenschiffen und Rationalisierung des Gütertransportes auf den Binnenwasserstraßen führte zur Untersuchung der Frage, welcher wirtschaftliche Erfolg mit der Methode der Schubschifffahrt erreicht werden kann. Eine Übertragung des in den USA verwendeten Schubboot-Systems mit Schubverbänden von bis zu 40 000 t Tragfähigkeit auf die Verhältnisse der Bundesrepublik Deutschland ist nur unter Verkleinerung der Ladefähigkeit auf etwa 5 200 t und unter Verringerung der Abmessungen der Schubverbände möglich. Eine weitere Abwandlung des klassischen Schubsystems zu noch kleineren Einheiten, die für die Kanal- und Flachwasserfahrt geeignet sind, veranlaßte die Prüfung der Frage, ob die Trennung von Antrieb und Frachtraum in jedem Falle eine wirtschaftliche Bedeutung besitzt und ob es nicht zweckmäßig ist, Motorleichter und Motorgüterschiffe anstelle von Schubbooten als Antrieb von Schubverbänden zu verwenden.

Fahrzeuge für die Schubschifffahrt

Aus nautischen Gründen muß die Gesamtlänge eines Schubverbandes möglichst gering gehalten werden. Damit die Gesamtladefähigkeit des Verbandes dennoch möglichst groß wird, muß die Länge des Schubbootes so klein wie möglich sein. In Verbindung mit der Tiefgangbeschränkung wegen geringer Wassertiefen ergibt sich ebenso eine Beschränkung der Verdrängung des Schubbootes und daraus folgend geringes Gewicht der Antriebsanlage und damit die Verwendung von schnelllaufenden Motoren mit geringem

Einheitsgewicht je PS. Wegen der verhältnismäßig großen Zahl von im Mittel 5000 Betriebsstunden im Jahr für die Maschinenanlage der Schubboote, gegenüber 3400 Stunden beim Motorschlepper und 2000 Stunden beim Motorgüterschiff, kommen außerdem nur besonders robuste Bauarten in Frage.

Die Schubboote und Schubleichter der Schubverbände „Wasserbüffel“ und „Nashorn“ sowie des Schwerlastfloßes „Herkules“, einer grundlegend anderen Konstruktion eines Schubverbandes, werden näher beschrieben und ihre wichtigsten Konstruktionsmerkmale erläutert.

Die starre Verbindung der Einzelfahrzeuge zum Schubverband geschieht nach amerikanischem Vorbild mit Drahtseilen, Ketten, Sliphaken und Spannschrauben.

Schubverbände

Die Schubverbände „Wasserbüffel“ und „Nashorn“ bestehen aus je einem Schubboot und 4 Schubleichtern. Die Gesamtlänge beträgt beim „Wasserbüffel“ 164 m und beim „Nashorn“ 176 m; die Breitenmaße sind 18,4 m und 19,0 m.

Fahrzeuge und Schubverbände für Flachwasser- und Kanalfahrt

Mit Rücksicht auf Fahrwasserquerschnitte, Schleusenabmessungen und Krümmungsradien der kanalisiertes Flüsse und Kanäle ist eine allgemeine Einführung des Schubsystems nicht durchführbar. Das schleppende Motorgüterschiff ist in der Lage, bei beschränkter Abladung einen oder mehrere Anhänge zu schleppen. Damit wird die teuerste Investition, die Motorenanlage, auch bei Niedrigwasser voll ausgenutzt. Diese Möglichkeit ist bei einem Schubverband nicht gegeben. Es ist offensichtlich, daß die Anwendung des aus den USA übernommenen Schubsystems unter Verwendung von Schubbooten auf deutschen Wasserstraßen gewissen Einschränkungen unterliegt, die eine volle Ausnutzung nur auf der 220 km langen Strecke Rotterdam—Ruhrort zulassen. Der volkswirtschaftliche Nutzen hängt davon ab, ob es gelingt, dieses System auf dem ganzen Wasserstraßennetz wirksam werden zu lassen.

Es wurde untersucht, wie die anerkannten Vorteile des bestehenden Systems des schleppenden Motorgüterschiffes mit denen des Schubsystems vereinigt werden können, so daß gleichzeitig die Möglichkeit gegeben ist, je nach den veränderlichen Bedingungen der Schiffbarkeit der Wasserstraßen, die Schifffahrt mit dem einen oder anderen System zu betreiben. Das System des schiebenden Motorleichters hat den Vorzug, daß der Rationalisierungserfolg hauptsächlich auf dem Fortfall der Bemannung der Leichter beruht. Für die Betriebskostenrechnung ist nicht entscheidend, ob die Leichter mit kleinerem Widerstand geschoben oder mit größerem Widerstand geschleppt werden. Der Wechselbetrieb zwischen beiden Systemen gestattet, eine größere Gesamtstrecke mit den gleichen Transportmitteln zu durchfahren.

Wegen der notwendigen Abwandlung des von den USA übernommenen Schubsystems zu kleineren Einheiten wurde geprüft, ob die Trennung von Antrieb und Frachtraum im Schubboot und Schubleichter sowohl unter den auf dem Mittel- und Oberrhein als auch auf den kanalisiertes Flüssen und den Kanälen gegebenen Bedingungen noch wirtschaftliche Bedeutung besitzt. Das System des schiebenden Motorleichters geht davon aus, daß diese Frage zu verneinen ist. In einem Wasserstraßennetz, dessen Schiffbarkeit durch Schleusen und starke Krümmungen beeinflusst wird, ist die produktive Ausnutzung der verfügbaren Länge von besonderer Bedeutung. Beim Schubboot-System werden für die Unterbringung der Maschinenanlage 17 m, beim Motorleichter-System nur höchstens 6 m der verfügbaren Gesamtlänge des Verbands benötigt. In allen möglichen Formationen ist das Motorleichter-System hinsichtlich der benötigten Länge um mindestens

17 m günstiger. Von Bedeutung ist auch, daß mit dem Motorleichter-System eine größere Anzahl anwendbarer Formationen gebildet werden kann. Einen weiteren Vorzug bildet die bessere Manövrierfähigkeit, da beim Motorleichter-System die Strahlflächen der Propeller zweier zusammengekuppelter Motorleichter über die große Breite von 15 m angeordnet werden können. Beim Übergang von der Fluß- in die Kanalfahrt läßt sich eine Motorleichter-Zwillingsformation ohne weiteres in 2 Einfach-Formationen teilen; beim Schubboot-System ist das nicht möglich.

Der konstante Tiefgang des Schubbootes hat vor allem in der Flachwasserfahrt Nachteile, während der Tiefgang beim Motorleichter dem veränderlichen Wasserstand angepaßt werden kann. Der konstante Tiefgang des Schubbootes wirkt sich außerdem auf die Propulsionsverhältnisse ungünstig aus.

Der wesentliche Unterschied zwischen Motorleichter- und Schubboot-System ist dadurch gekennzeichnet, daß sowohl die einsetzbare Maschinenleistung und die die Manövrierfähigkeit bestimmenden Kräfte als auch der Tiefgang der Antriebsfahrzeuge bei ersterem Veränderliche sind, während beide Faktoren bei letzterem System als konstant zu betrachten sind.

Der Motorleichter vereinigt in sich alle Steuer- und Antriebsanlagen, die nach neueren Erkenntnissen für den Schubtrieb gefordert werden müssen. Dabei ist es klar, daß ein Motorleichter, dessen beide Propeller nur 200 PS aufnehmen müssen, sehr viel günstigere Propulsionsverhältnisse erwarten läßt als ein Schubboot mit je 400 PS auf jedem Propeller. Das wirkt sich vor allem auf Bau und Betrieb der Motoren-Anlage aus. Der Gütegrad der Propulsion vermindert sich mit steigender Propellerbelastung ebenso wie bei geringer werdender schiffbarer Wassertiefe; letzteres weil die Sogwirkung bei Flachwasserfahrt das Fahrzeug steuerlastig vertrimmt, und zwar um so mehr, je höher die Propellerbelastung ist.

Hinsichtlich der Auswirkungen auf die Hauptantriebsanlage ist festzustellen, daß bei reinen Schubbooten das für die Motorenanlage verfügbare Gewicht und der verfügbare Raum in größerem Maße beschränkt sind als bei Motorleichtern.

In Modellversuchen wurde festgestellt, daß eine Einheitsleistung von 0,274 PSe/t, die beim „Wasserbüffel“ mit 2,75 m Tiefgang in 5,0 m tiefem ruhigem Wasser für eine Fahrgeschwindigkeit von 12 km/h aufzuwenden ist, beim Motorleichter-Schubverband mit 1,30 m Tiefgang in 1,8 m tiefem Wasser für die Erzielung einer Geschwindigkeit von 9,75 km/h benötigt wird. Die Versuche ergaben ferner, daß der aus einem Motorleichter und einem Leichter bestehende Schubverband bei dem sehr kleinen Verhältnis Wassertiefe/Tiefgang keinen höheren Widerstand verursacht als der alleinfahrende Motorleichter. Propulsionsversuche in Rückwärtsfahrt und Manövierversuche brachten befriedigende Ergebnisse.

Ein Motorgüterschiff-Schubverband wurde erstmals im Jahre 1960 in Dienst gestellt und im Kanalgebiet und auf dem Rhein erprobt. Bei den bisherigen Reisen traten keine Zwischenfälle ein, Steuerfähigkeit und Kursbeständigkeit waren gut. Die mittlere Geschwindigkeit des mit 1100 t beladenen Verbands betrug auf der Strecke Duisburg—Salzig 7 bis 8 km/h. Die Besatzung des Schubverbandes wurde auf 4 Mann festgesetzt, so daß 2 Mann Personal eingespart werden. Auch die Erprobungen im Kanalgebiet verliefen ohne Beanstandungen. Auf diesen Fahrten wurde festgestellt, daß vor allem bei höheren Geschwindigkeiten wesentlich kleinere Wasserspiegelabsenkungen und fast keine Heckwellen im Gegensatz zu den normalen Kanalschiffen auftreten. Die Verwendung von Motorgüterschiff-Schubverbänden ist nach dem Ergebnis der bisherigen Versuche ohne Behinderung des übrigen Verkehrs möglich.

Zulässige Abmessungen der Schubverbände auf einer Wasserstraße

Die möglichen zulässigen Abmessungen im regelmäßigen Betrieb verkehrender starrer Schubverbände hängen von den Querschnittsabmessungen und Krümmungsverhältnissen des Fahrwassers und den Abmessungen der Bauwerke (Schleusen, Brücken oder Sperrtore) ab. Die auf die Abmessungen von Fahrwasser und Bauwerken bezogenen Begrenzungen für die Größe der Schubverbände lassen sich unmittelbar angeben. Sie müssen jedoch wegen der Krümmungsverhältnisse des Fahrwassers berichtigt werden, da in Krümmungen, bedingt durch die geometrischen Verhältnisse und die Schräglage des Schiffes, eine größere Verkehrsbreite als in geraden Strecken benötigt wird.

Die Abhängigkeit der Verkehrsbreite vom Derivationswinkel wird untersucht, wobei zwei Fälle zu unterscheiden sind:

Fall 1

Die dem Krümmungsmittelpunkt zugekehrte Seite des Wasserfahrzeuges tangiert zwischen ihrer Mitte und ihrem vorderen Ende den inneren Krümmungskreis des Fahrstreifens (kleiner Derivationswinkel).

Fall 2

Die dem Krümmungsmittelpunkt zugekehrte Seite des Wasserfahrzeuges schneidet mit ihrem vorderen Ende den inneren Krümmungskreis des Fahrstreifens (größerer Derivationswinkel).

Die Abhängigkeit der Verkehrsbreite vom Krümmungshalbmesser und von der Derivation wird durch Formeln für beide Fälle nachgewiesen. In einer Tafel sind für verschiedene Krümmungshalbmesser des Fahrwassers, Längen und Derivationswinkel der Schubverbände, die sich bei konstanter Breite der Verbände nach den Formeln ergebenden Verkehrsbreiten zusammengestellt.

Aus den Verkehrsbreiten, den einzuhaltenden Sicherheitsabständen untereinander und von der inneren und äußeren Fahrwasserbegrenzung läßt sich die notwendige Fahrwasserbreite in einer Krümmung berechnen. Der von der Europäischen Verkehrsministerkonferenz festgelegte Krümmungszuschlag berücksichtigt nur eine bestimmte Schräglage des Falles 1 bei kleinem Derivationswinkel.

Die Bestimmung der benötigten Fahrwasserbreite in Krümmungen setzt die Kenntnis des Derivationswinkels, der von einer Vielzahl von Faktoren beeinflusst wird, voraus. Deshalb wurden in den starken Stromkrümmungen des Niederrheins bei Düsseldorf und Benrath die Radarbilder der Fahrt von Schubverbänden in kurz einander folgenden Zeitabständen fotografisch aufgenommen. Durch zeichnerische Auswertung der übereinanderprojizierten Aufnahmen konnte für jede Fahrt durch die Krümmung der größte Derivationswinkel bestimmt werden. Unter Berücksichtigung der Abmessungen der Schubverbände, ihrer Geschwindigkeit und der Abflußverhältnisse läßt sich für den Schubverkehr auf dem Niederrhein folgender Mittelwert für die Derivation angeben:

$$\text{Talfahrt } \vartheta_B = 15^\circ$$

$$\text{Bergfahrt } \vartheta_T = 10^\circ.$$

Neben dem von der Europäischen Verkehrsministerkonferenz festgelegten Krümmungszuschlag wird noch eine andere in der deutschen Literatur bekannte Beziehung untersucht, nach der der Krümmungszuschlag sich als Stich des zu einem beliebigen Krümmungshalbmesser gehörenden Bogenabschnittes über der konstant betrachteten Sehne ergibt. Ausgehend von dieser Beziehung wird für den Niederrhein der Krümmungszuschlag in Abhängigkeit vom Krümmungshalbmesser und vom Derivationswinkel abgeleitet und als Kurve dargestellt.

Für den Rhein sind die zulässigen Abmessungen starrer Schubverbände bereits festgelegt: Bergfahrt — Länge 185 m, Breite 22,40 m; Talfahrt — Länge 150 m, Breite 33,60 m. Die Nachprüfung der am Niederrhein vorhandenen Fahrwasserbreite von 150 m hat ergeben, daß Schubverbände der festgesetzten Größtabmessungen bei Wasserständen bis etwa 50 cm über GlW unbeschränkt verkehren können; bei kleineren Wasserständen muß ihre Begegnung unterbleiben.

Um die zulässigen Abmessungen starrer Schubverbände auf den übrigen Wasserstraßen der Bundesrepublik Deutschland zu bestimmen, ist eine Reihe von Annahmen, die jedoch rein hypothetischer Natur sind, über die Größe des Derivationswinkels notwendig. Mit diesen Annahmen wird die Ermittlung der zulässigen Abmessungen am Beispiel der Mosel erläutert, während für alle anderen Wasserstraßen das Untersuchungsergebnis in einer Tafel zusammengefaßt wird.

Nach diesen Untersuchungen und Berechnungen ist der Verkehr starrer Schubverbände mit größeren Abmessungen nur auf dem Nieder- und Mittelrhein sowie auf der Elbe bis zu einer Länge von 185 m und einer Breite von 22 bis 33 m möglich. Für die übrigen deutschen Wasserstraßen läßt sich ein endgültiges Ergebnis nicht mitteilen, da keine Erfahrungen über die Größe des zu erwartenden Derivationswinkels in Krümmungen vorliegen. Die hypothetische Untersuchung hat aber gezeigt, daß die Grenze für die maximale Länge bei 100 m liegen wird. Die maximale Breite wird durch die nutzbare Breite der meisten Schleusen (12,00 m) auf 11,50 m begrenzt. Für den Tiefgang gelten für Schubverbände dieselben Grenzen wie für Schleppverbände oder einzeln fahrende Motorgüterschiffe. Die zulässige Höhe der festen Aufbauten über der Wasserlinie richtet sich nach der Durchfahrtshöhe unter den Brücken und kann zwischen 3,80 und 9,00 m liegen.

Es werden noch umfangreiche Untersuchungen nötig sein, um näheren Aufschluß über die Größe des Derivationswinkels für alle vorkommenden Fälle zu erhalten. Die mitgeteilten Ergebnisse beziehen sich nur auf starre Schubverbände; sie ändern sich und werden günstiger, wenn von der Form des starren Schubverbandes abgewichen oder durch zusätzliche schiffbauliche Mittel die Derivation bei der Fahrt durch Krümmungen erheblich verringert wird.

Schiffahrt mit Schubverbänden

Zur Erhöhung der Wirtschaftlichkeit des Betriebes starrer Schubverbände müßte ihre Gesamtlänge möglichst groß sein.

Die Schwierigkeiten des sicheren Manövrierens können durch richtig gewählte Zusammenstellung der Einzeleichter vermindert werden. Die Verlagerung des Verdrängungsschwerpunkts der Leichterkombination nach achtern wirkt sich dabei sowohl für das Manövrieren als auch für eine Verminderung des Einheitswiderstandes positiv aus.

Die Verwendung von Manövriehilfen am Bug der vorderen Leichter erscheint bei Verbandslängen über 200 m unumgänglich. Insgesamt gesehen hat sich das Bug-Strahlruder in Form eines Ruderpropellers als dafür besonders geeignet herausgestellt. Mit seiner Hilfe gelingt es auch, die Verkehrsbreite des Schubverbandes in Krümmungen wirksam zu vermindern.

Der Antriebsart des Schubboots kommt für die Manövriereigenschaften eine besondere Bedeutung zu. Die Drehdüse hat sich in dieser Hinsicht der starren Düse mit normalen Flächenrudern als weit überlegen erwiesen. Auch die Formgebung des Schubboots im Hinterschiffbereich muß zur Erzielung optimaler Manövriertätigkeit sorgfältig durchkonstruiert werden.

Handhabung der aus dem Schubverband gelösten Schubleichter

Die Fortbewegung einzelner aus dem Schubverband gelöster Schubleichter erfordert wegen der Bauart und der fehlenden Besatzung besondere Sicherheitsmaßnahmen. Auf kurzen Strecken wickelt sich der Bugsierdienst in bestimmten, durch die zuständigen Behörden genehmigten Verfahren ab. Auf längeren Strecken bedarf es einer Sondergenehmigung durch die Schiffsuntersuchungskommissionen. Es ist in beiden Fällen eine Verwendung von Bugsier-Schubbooten anzustreben. Nur in Ausnahmefällen soll die Fortbewegung durch Schlepper oder Motorgüterschiffe erfolgen.

Die Schubschiffahrt benötigt Sonderliegeplätze zum Formieren, Laden oder Löschen und Ablegen der Schubleichter, deren Lage und Einrichtungen es ermöglichen, weitgehend auf Besatzung und Bewachung verzichten zu können. Dies kann beispielsweise durch Auslegen von Liegeschiffen oder Liegen vor mehreren Ankern außerhalb des Fahrwassers erreicht werden.

Nebeneinander von Schubschiffahrt und anderen Schiffahrtsmethoden auf derselben Wasserstraße

Ein Nebeneinander von Schubschiffahrt und anderen Schiffahrtsmethoden ist unter folgenden Voraussetzungen möglich:

Grundsätzlich darf die Schubschiffahrt nicht den allgemeinen Verkehrsablauf hindern. In nautischer und schiffahrtspolizeilicher Hinsicht ist daher zu fordern, daß die Schubverbände Kopf vor stoppen können, ihre Steuereinrichtung ein Einordnen in den Gesamtverkehr ermöglicht und sie eine Mindestgeschwindigkeit halten können.

Die Schubschiffahrt muß an starken Krümmungen und Engstellen mit Überhol- und Begegnungsverboten rechnen, auch kann es notwendig sein, streckenweise die Längen und Breiten der Schubverbände zu beschränken. Wegen der Eigenarten der Schubschiffahrt werden besondere Liegeplätze zum Formieren und Ablegen von Schubverbänden oder Leichtern benötigt.

Inhalt

	Seite
1. Vorbemerkung	104
2. Fahrzeuge für die Schubschiffahrt	105
2.1 Schubboote	105
2.2 Schubleichter	107
2.3 Ausführung und Berechnung der Verbindungen zwischen den Einzelfahrzeugen des Schubverbandes	109
3. Schubverbände	109
3.1 Formationen	109
3.2 Abmessungen	109
4. Fahrzeuge und Schubverbände für Flachwasser- und Kanalfahrt	109
4.1 Allgemeine Betrachtungen	109
4.2 Auswirkungen auf die Wahl der Konstruktion der Hauptantriebsanlage	115

	Seite
4.3 Ergebnisse von Modellversuchen mit einem Motorleichter-Schubverband	115
4.4 Erfahrungen mit einem bereits in Dienst gestellten Motorgüterschiff-Schubverband	116
5. Zulässige Abmessungen der Schubverbände auf einer Wasserstraße	117
5.1 Abhängigkeit der Abmessungen	117
5.2 Abhängigkeit der benötigten Verkehrsbreite in Krümmungen vom Derivationswinkel	119
5.3 Bestimmung des Derivationswinkels	124
5.31 Allgemeines	124
5.32 Meßverfahren	125
5.33 Ergebnis	126
5.4 Abhängigkeit des Derivationswinkels vom Krümmungshalbmesser	128
5.5 Der Rhein	128
5.6 Ubrige Wasserstraßen der Bundesrepublik Deutschland	129
5.7 Ergebnis	133
6. Schiffahrt mit Schubverbänden	133
6.1 Das Manövrieren des Schubverbandes	133
6.2 Querkraft- und Drehkreismessungen	135
7. Handhabung der aus dem Schubverband gelösten Schubleichter	138
7.1 Fortbewegung einzelner Schubleichter außerhalb des Schubverbandes	138
7.2 Das Stilliegen der Schubleichter	139
7.3 Weitere Liegemöglichkeiten	140
8. Nebeneinander von Schubschiffahrt und anderen Schiffahrtsmethoden auf derselben Wasserstraße	140
8.1 Forderungen schiffbaulicher und nautischer Art	140
8.2 Forderungen schiffahrtspolizeilicher Art	141

1. Vorbemerkung

Das Streben nach Senkung der Bau- und Betriebskosten von Binnenschiffen und die Bemühungen um die weitere Rationalisierung des Gütertransports auf den Binnenwasserstraßen führte auch in der Bundesrepublik Deutschland zur Untersuchung der Frage, welcher wirtschaftliche Erfolg durch die Anwendung der Methode der Schubschiffahrt nach Maßgabe der besonderen Verhältnisse der Binnenwasserstraßen erreicht werden kann.

Dabei mußte jedoch berücksichtigt werden, daß die auf den Strömen und Kanälen der USA mögliche Massierung der Gütermengen in einem einzigen Schubverband bis zu 40 000 t auf den Wasserstraßen der Bundesrepublik nicht zu verwirklichen ist. Die in den USA gewonnenen Erfahrungen konnten auch wegen der zum Teil größeren Stromgeschwindigkeiten, des stärkeren Wellenganges und des dichteren Schiffsverkehrs nur bedingt verwertet werden.

Eine Übertragung des in den USA vorwiegend oder fast ausschließlich verwendeten Systems auf die Verhältnisse der Bundesrepublik war daher nur unter wesentlicher Verkleinerung der Gesamtladefähigkeit der Schubverbände auf etwa 5200 t und unter Verringerung der Hauptabmessungen der Schubleichter und Schubboote denkbar. Eine weitere Abwandlung des „klassischen Schubsystems“ zu noch kleineren Einheiten, besonders für die Kanalfahrt und die Flachwasserfahrt, veranlaßte die Prüfung der Frage, ob die Trennung von Antrieb und Frachtraum, wie sie im klassischen Schubverband verwirklicht worden ist, in jedem Anwendungsfalle wirtschaftliche Bedeutung besitzt und ob nicht die Notwendigkeit der Beschränkung der Gesamtlänge der Schubverbände aus nautischen Gründen und mit Rücksicht auf die Verhältnisse der Wasserstraßen — hauptsächlich in der Flachwasser- und Kanalfahrt — es zweckmäßig erscheinen läßt, Motorleichter und Motorgüterschiffe anstelle von Schubbooten als Antrieb von Schubverbänden zu verwenden.

Mit der Indienstellung der Schubverbände „Wasserbüffel“ und „Nashorn“ auf dem Rhein konnten erste Erfahrungen gesammelt werden, welche für die Lösung der Frage der allgemeinen Verwendung der Methode der Schubschiffahrt auf dem Wasserstraßennetz der Bundesrepublik Deutschland — das heißt auch auf den Kanälen und in der Flachwasserfahrt — ausgewertet wurden und unter anderem zu Untersuchungen über die Möglichkeit der Verwendung von Motorleichter-Schubverbänden und zum Bau eines Motorgüterschiff-Schubverbandes geführt haben.

2. Fahrzeuge für die Schubschiffahrt

2.1 Schubboote

Die Länge der Schubboote beeinflusst in weit höherem Maße als bei Schleppern und Motorgüterschiffen die Manövriereigenschaften und damit die Wirtschaftlichkeit der Schubverbände. Da das Schubboot nicht wie ein Schlepper eine selbständige nautische Einheit bildet, sondern mit den Schubleichtern zu einer starren Einheit verbunden ist, muß seine Länge wegen der wirtschaftlichen Ausnutzung der aus nautischen Gründen zu begrenzenden Gesamtlänge des Schubverbandes möglichst klein gehalten werden. Das gilt besonders für Ströme mit starken Krümmungen, wie sie der Rhein aufweist. Aus diesem Grunde ist es notwendig, die Wasserverdrängung des Schubbootes zu beschränken. Um die Schubverbände auch bei geringen Wasserständen noch verwenden zu können, muß gleichzeitig der Tiefgang verringert werden. Das für die Hauptantriebsanlage verfügbare Gewicht unterliegt daher sehr starken Einschränkungen und hat zur Folge, daß Dieselmotoren kleiner Einheitsgewichte bei geringem Raumbedarf verwendet werden müssen, das heißt Motoren mit hohen Drehzahlen und Zylinderanordnung in V-Form.

Die erhöhten Anforderungen an die Umsteuerbarkeit beim Stoppen Kopf vor und bei dem backing- and flanking-Manöver und die im Vergleich zu einem Schlepper und Motorgüterschiff höhere Zahl der Betriebsstunden erfordern gleichzeitig eine besonders robuste Bauart der Motoren.

Unter normalen Beschäftigungsverhältnissen haben die Motoren eines Motorschleppers etwa 3400, die eines Motorgüterschiffes etwa 2000 Betriebsstunden pro Jahr. Beim Schubboot, welches nach Möglichkeit in der durchgehenden Tag- und Nachtfahrt eingesetzt werden soll, kann die Zahl der jährlichen Betriebsstunden 5000 und mehr erreichen. Das ergibt sich insbesondere aus der Art der Verkehrsrelationen, für welche die Schubverbände auf dem Rhein bestimmt sind, nämlich Massenguttransport von Erz und Kohle zwischen zwei festen Punkten.

Schubboote „Wasserbüffel“ und „Nashorn“

Der erste auf dem Rhein eingesetzte Schubverband ist der „Wasserbüffel“. Seine Konstruktion ist im wesentlichen durch folgende Daten gekennzeichnet

— Länge	36,23 m
— Breite	8,36 m
— Seitenhöhe	2,50 m
— Tiefgang bei vollen Bunkern	1,80 m
— Maschinenleistung	1260 PSe.

Die Maschinenleistung ist für die Fortbewegung von 4 Schubleichtern mit 5200 t ausgelegt; das entspricht einer Maschinenleistung von 0,24 PS/t.

Die Besatzung des Schubbootes besteht wie bei einem Motorschlepper gleicher Maschinenleistung aus 7 Mann. Im Rahmen der Gesamtkostenrechnung ist jedoch zu berücksichtigen, daß besonderes Landpersonal für die Betreuung der Leichter beim Laden und Löschen bereitgestellt werden muß.

Die Länge des „Wasserbüffel“ wurde beim Bau des nächsten Schubbootes „Nashorn“ beibehalten, die Breite dagegen von 8,36 m auf 9,50 m vergrößert. Die Maschinenleistung des „Nashorn“ beträgt ebenfalls 1260 PSe.

Beide Schubboote werden durch 2 Propeller in Kortdüsen angetrieben.

Das Schubboot soll die Schubleichter nicht nur in der Rückwärtsfahrt im Strom halten, sondern auch rückwärtsfahrend steuern können. Die Motorenleistung muß groß genug sein, um den Schubverband im Strom in der Talfahrt Kopf vor stoppen zu können; deshalb muß die in der Rückwärtsfahrt aufzuwendende Propellerleistung nach den bisherigen Erfahrungen mindestens 75% der für die Vorausfahrt benötigten Leistung erreichen.

Das für die Erfüllung dieser Aufgabe entscheidende Konstruktionsmerkmal ist die Ruder- und Schraubenanordnung.

Die Schubboote haben hinter den Propellern angeordnete Hauptruder und vor den Propellern eingebaute Flankenruder. Die Haupt- und Flankenruder werden durch eine nach amerikanischem Muster entwickelte elektro-hydraulische Ruderanlage betätigt. Wesentlich ist dabei, daß die beiden Ruderarten durch je eine besondere Pinne betätigt werden, die so arbeitet, daß sie immer die gleiche Richtung hat wie das dazugehörige Ruder.

Man geht im allgemeinen davon aus, daß der Trossenzug-Gütegrad eines Schubbootes etwas ungünstiger ist als bei Schleppern gleicher Leistung und gleichen Tiefganges und begründet das mit folgendem:

- a) Das Schubboot liegt im Nachstrom der Schubleichter, ein Umstand, der sich ungünstig auf den Propulsionsgütegrad auswirkt.
- b) Der Schubverband muß in der Talfahrt Kopf vor stoppen können. Daraus ergeben sich höhere Anforderungen an den Propulsionsgütegrad in der Rückwärtsfahrt. Die Tunnel werden daher bis dicht unter die Wasserlinie gezogen, wodurch die Propulsionsverhältnisse bei Vorwärtsfahrt jedoch verschlechtert werden.
- c) Aus der Konstruktion der stark heruntergezogenen Tunnel ergeben sich kleinere Propeller-Durchmesser als beim Schlepper. Die vor den Propellern eingebauten Flankenruder lassen zwar höhere Anforderungen an die Rückwärtsfahreigenschaften als

bei Schleppern zu, führen aber zu einer weiteren Verringerung des Trossenzug-Gütegrades. Bei neueren Entwürfen von Schubbooten sind die Haupt- und Flankenruder daher durch drehbare Kortdüsen ersetzt worden.

Die Schubboote „Wasserbüffel“ und „Nashorn“ sind mit je 2 Deutz-Dieselmotoren des Typs RBT 8M233 (Achtzylinder-Zweitakt mit Abgas-Turboaufladung), Dauerleistung 630 PS bei 500 U/min, ausgerüstet. Die Zylinder sind in V-Form angeordnet. Die direkt umsteuerbaren Motore arbeiten über ein Untersetzungsgetriebe (2 : 1) auf die Propeller.

Alle Maschinenmanöver der Hauptmotoren wie Anlassen, Einstellung der Drehzahl und Umsteuern können mit Hilfe einer pneumatischen Fernsteuerung vom Fahrstand des Ruderhauses aus eingeleitet werden.

Schubboot „Herkules“

Eine bemerkenswerte Lösung des Problems des Massengutverkehrs auf dem Niederrhein stellt im Rahmen des Schubsystems auch das von Dr. Westphal in Verbindung mit der „Ruhrorter Schiffswerft und Maschinenfabrik“ entwickelte Schwerlastfloß dar.

Der Rumpf des Schubbootes wird durch 2 im Abstand von 5 m liegende Schiffskörper gebildet, die über ein durchlaufendes Deck miteinander verbunden sind. Der Vorteil der von der Werft gewählten 2-Körper-Schiffskonstruktion liegt

- a) in dem geringeren Eigenwiderstand gegenüber der normalen Form der Schiffe mit den gleichen Längen- und Breitenverhältnissen,
- b) in dem großen Abstand der Propeller voneinander, die ein sehr gutes Manövrieren des Schubverbandes gewährleisten.

Jeder Schiffskörper erhielt vollkommen voneinander getrennte Motoren und Ruderanlagen, die jedoch von einem gemeinsamen Steuerstand aus bedient werden. Eingebaut sind Deutz-Motoren Type SBA8M 528 mit einer Leistung von je 620 PS bei 750 U/min. Die Drehzahl wird untersetzt auf 375 U/min am Propeller. Die Propeller sind zur Verbesserung der Schubleistung mit Kortdüsen versehen.

Die Hauptdaten sind:

— Länge	26,80 m
— Breite	15,00 m
— Seitenhöhe	2,50 m
— Tiefgang	1,65 m
— Höchster fester Punkt	6,30 m
— Leistung	2 × 620 PS.

2.2 Schubleichter

Schubleichter „Wasserbüffel“ und „Nashorn“

Die Konstruktion der Schubleichter des Schubverbandes „Wasserbüffel“ ist durch folgende Daten gekennzeichnet:

— Länge	64,00 m
— Breite auf Spant	9,20 m
— Seitenhöhe	2,80 m
— Ladefähigkeit	1300 t
— Wasserverdrängung	1500 m ³
— Völligkeitsgrad	0,942

Die Form der Schubleichter ist nach amerikanischen Vorbildern entwickelt worden.

Bei den in der Versuchsanstalt für Binnenschiffbau in Duisburg durchgeführten Versuchen ergab sich, daß der Widerstand von 4 Leichtern mit beiderseits aufgeholten Enden um 30 % größer ist als der Widerstand von 4 „integrated barges“. Dagegen zeigte sich, daß der Widerstand von 4 „semi-integrated barges“ nur um 5 % größer ist als der von 4 „integrated barges“.

Mit Rücksicht auf die für die Talfahrt vorgesehene Formation wurde daher die „semi-integrated-Form“ gewählt. Die Schräge des Bugs des Leichters ist über die im beladenen Zustand erreichte Wasserlinie hinaus verlängert worden. Die Schräge des Hecks ist jedoch im Interesse der Verringerung der Wirbelverluste nur bis zu einer Höhe von etwa 1 m über dem Boden hochgeführt. Dort geht sie in die senkrechte Rückwand über.

Bestimmend für diese Wahl war auch die Tatsache, daß man auf dem Rhein nicht wie auf den amerikanischen Wasserstraßen auf Ankereinrichtungen verzichten kann. Die Anker sind bei den Schubleichtern unter den aufgeholten Enden angebracht, da sie während des Schiebens nicht überstehen dürfen. Bei der Talfahrt müssen sich an beiden Enden des Schubverbandes Anker befinden, da die Forderung erhoben wird, sowohl aufdrehen als auch Kopf vor stoppen zu können. Dann kommen aber die stumpfen Enden der Längsseite des Schubbootes gekuppelten Leichter in Fahrtrichtung. Sie dürfen also nicht rechteckig sein wie bei dem „integrated barges“.

Die Einheitswiderstände des Schubleichters betragen bei 5,00 m Wassertiefe, 2,75 m Tiefgang und 12 km/h Geschwindigkeit in ruhigem stromlosem Wasser:

— beim alleinfahrenden Leichter	3,5 kg/t
— bei 2 nebeneinander gekuppelten Leichtern	4,6 kg/t
— bei 2 voreinander gekuppelten Leichtern	2,0 kg/t
— beim Viererverband mit je 2 nebeneinander und voreinander gekuppelten Leichtern (Gesamtlänge einschl. Schubboot 164 m)	2,7 kg/t.

Im Vergleich dazu beträgt der Einheitswiderstand von Schleppverbänden mit Rhein-Herne-Kanal-Kähnen ($L = 80$ m, $B = 9,5$ m, $T = 2,5$ m) gleicher Anzahl und Gesamtladefähigkeit nur 1,9 kg/t.

Eine widerstandsmäßige Gleichwertigkeit zum Schleppverband ist bei den Schubverbänden des Typs „Wasserbüffel“ erst erreichbar, wenn eine Gesamtlänge von 200 m überschritten wird. Der Einheitswiderstand eines aus 6 Leichtern dieses Typs bestehenden Schubverbandes (Gesamtlänge 228 m) würden den Wert von 2,15 kg/t erreichen. Eine solche Länge ist jedoch aus nautischen Gründen auf dem Rhein nicht erreichbar.

Es erscheint auf Grund der bisherigen Erfahrungen möglich, die Länge der Leichter auf 70 m, ihre Breite auf 9,50 m und ihre Ladefähigkeit auf 1500 t zu vergrößern. Diesen Abmessungen entsprechen daher sowohl die Schubleichter des kürzlich in Dienst gestellten deutschen Schubverbandes „Nashorn“ als auch die der im Bau befindlichen weiteren Neubauten.

Schubleichter des Schubverbandes „Herkules“ (Schwerlastfloß)

Das Floß besteht aus 9 Sektionen mit den Außenabmessungen 15×15 m. Die Seitenwände werden durch Rohre mit einem Durchmesser von 3 m gebildet. Der Boden besteht aus einer eingeschweißten 8 mm starken Membran. Die einzelnen Sektionen werden durch Drähte und Spannschrauben fest miteinander gekuppelt. Die erste und letzte Sektion sind jeweils 19,5 m lang. Sie erhielten aus Gründen des geringeren Wasserwiderstandes einen nach vorne auslaufenden Boden. Außerdem befinden sich auf der

ersten und letzten Sektion die erforderlichen Ankereinrichtungen sowie Vorrichtungen für die Lichterführung. Die Ladefähigkeit jeder Sektion beträgt 500 t. Die bisher gebauten 10 Behälter habe sich bestens bewährt.

2.3 Ausführung und Berechnung der Verbindungen zwischen den Einzelfahrzeugen des Schubverbandes

Die zu einem Schubverband verbundenen Einzelfahrzeuge müssen so starr miteinander gekuppelt sein, daß

- a) eine Verminderung der Manövrierfähigkeit des Schubverbandes durch eine Veränderung der Lage zueinander in der Schwimmebene bei wechselnden Kursen möglichst ausgeschlossen ist,
- b) eine gewisse Beweglichkeit in der Vertikalen gegeneinander trotzdem vorhanden ist, um eine Überbeanspruchung der Verbindungsglieder bei Wellengang und das daraus folgende Zerfallen des Schubverbandes auszuschließen.

Diesen Forderungen wird das von den amerikanischen Vorbildern übernommene Zusammenkuppeln der Fahrzeuge mit Drahtseilen, Ketten, Sliphaken und Spansschrauben am besten gerecht.

Der Bemessung der Kupplungsteile wird die Maschinenleistung des Antriebsfahrzeuges zugrunde gelegt. Unter der Annahme, daß durch sie ein Trossenzug von 10 kg/PS erzeugt werden kann, werden die einzelnen Verbindungen für 100 % Überlast und 4fache Sicherheit bemessen. Durch die 100 % rechnerische Überlast soll der Sog bei der Begegnung mit anderen Fahrzeugen berücksichtigt werden. Jede Einzelverbindung muß allein die errechnete Zugkraft aufnehmen können.

3. Schubverbände

3.1 Formationen

Die Schubverbände „Wasserbüffel“ und „Nashorn“ bestehen aus je einem Schubboot und 4 Schubleichtern, welche zu je zwei Leichtern nebeneinander gekuppelt sind.

3.2 Abmessungen

Die Abmessungen dieser Schubverbände betragen daher

$$\begin{aligned} \text{„Wasserbüffel“: } L &= 36 \text{ m} + 64 \text{ m} + 64 \text{ m} = 164 \text{ m} \\ &B = 9,2 \text{ m} \times 2 = 18,4 \text{ m} \\ \text{„Nashorn“: } L &= 36 \text{ m} + 70 \text{ m} + 70 \text{ m} = 176 \text{ m} \\ &B = 9,5 \text{ m} \times 2 = 19 \text{ m} \end{aligned}$$

4. Fahrzeuge und Schubverbände für Flachwasserfahrt und Kanalfahrt

4.1 Allgemeine Betrachtungen

Eine allgemeine Einführung des Schubsystems auf den deutschen Wasserstraßen in der Form des starren Schubverbandes und der Ladefähigkeit der bisher eingesetzten Schubverbände erscheint mit Rücksicht auf die vorhandenen Fahrwasserquerschnitte, Schleusenabmessungen und Krümmungsradien der kanalisierten Flüsse und Kanäle nicht durchführbar. Die nautischen Bedingungen des Betriebes der Schubschiffahrt auf dem Mittelrhein und Oberrhein sind bei Niedrigwasser außerordentlich erschwert durch die Notwendigkeit, auch den übrigen Schiffsverkehr bei stark verengtem Fahrwasser ungehindert durchzuführen. Das schleppende Motorgüterschiff, dem im Zuge der neueren

technischen Entwicklung auf dem Rhein, den kanalisierten Flüssen und den Kanälen eine besondere Bedeutung zukommt, ist in der Lage, bei beschränktem Tiefgang einen oder mehrere Anhänger zu schleppen. Damit wird die teuerste Investition, die Motorenanlage, auch bei Niedrigwasser voll ausgenutzt. Diese Möglichkeit der Vergrößerung der Ladefähigkeit bei Niedrigwasser ist bei einem aus einem Schubboot und mehreren Schubleichtern bestehenden Schubverband nicht gegeben. Ein solcher Schubverband wird vielmehr aus der Zwillingsformation in die Einer-Formation übergehen müssen und zwar unter Beibehaltung oder Verkürzung der Gesamtlänge.

Es ist daher offensichtlich, daß die Anwendung des Schubsystems in der von den USA übernommenen Form, das heißt unter Verwendung von Schubbooten, auf den deutschen Wasserstraßen gewissen Einschränkungen unterliegt, die eine volle Ausnutzung nur auf der 220 km langen Strecke von Rotterdam bis Ruhrort zulassen.

Der von der Anwendung des Schubsystems erwartete Rationalisierungserfolg hängt jedoch davon ab, ob es gelingt, dieses System über das ganze Wasserstraßennetz (Bundesrepublik Deutschland 4500 km) wirksam werden zu lassen.

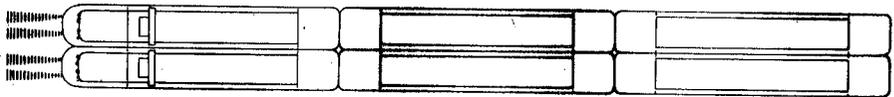


Bild 1

Motorleichter-Schubverband (starre Formation)

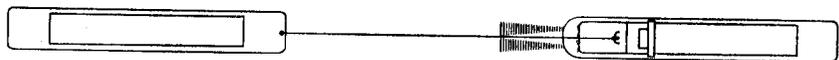
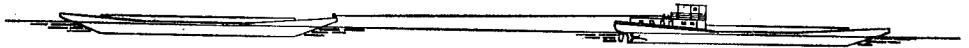


Bild 2

Schleppender Motorleichter

Die den höchsten volkswirtschaftlichen Nutzen versprechende Lösung dieses Problems ist in einem System zu suchen, das die anerkannten Vorteile des bestehenden Systems des schleppenden Motorgüterschiffes mit denen des Schubsystems vereinigt und dabei die Möglichkeit bietet, den Schwerpunkt des Transports in Anpassung an die laufend veränderlichen Bedingungen der Schiffbarkeit der Wasserstraßen jeweils auf das eine oder das andere System zu verlagern.

Eine solche Lösung ist denkbar, wenn Motorleichter anstelle von Schubbooten als schiebende Motorleichter in Zwillingsformation auf dem Rhein in Zeiten ausreichenden Wasserstandes, genügender Fahrwasserbreite und mäßiger Stromgeschwindigkeit eingesetzt werden; die Zwillingsformationen werden auf dem Rhein in Zeiten geringeren Wasserstandes und in Strecken höherer Stromgeschwindigkeit und in bestimmten Kanälen in je zwei Einzelformationen aufgelöst. In Kanälen, welche die Anwendung des Schubsystems nicht zulassen, können die sonst schiebenden Motorleichter als schleppende Motorleichter verwendet werden. (Bilder 1 und 2.)

Dieses System hat den Vorzug, daß der Rationalisierungserfolg in erster Linie durch den Fortfall der Besatzung der Leichter erzielt wird. Für die Betriebskostenrechnung ist es nicht entscheidend, ob die Leichter mit kleinerem Widerstand geschoben oder mit größerem Widerstand geschleppt werden, sondern daß das Gesamtergebnis günstig ist. Wenn dem größeren Widerstand des auf Teilstrecken geschleppten Leichters andere Vorteile gegenüberstehen, die sich aus dem Wechselbetrieb auf einer größeren Gesamtstrecke ergeben (auf der neben einzelnen Schleppstrecken in Kanälen lange Strecken im Schubverband durchfahren werden), dann kann es durchaus wirtschaftlich sein, den Nachteil des größeren Widerstandes beim Schleppen in Kauf zu nehmen, und zwar vor allem dann, wenn er — wie in der Kanalfahrt — ohnehin geringer ist als gegen die Strömung der Flüsse.

Eine Abwandlung des von den USA übernommenen Schubsystems zu kleineren Einheiten, wie sie auf dem Rhein eingesetzt werden, veranlaßt die Prüfung der Frage, ob die Trennung von Antrieb und Frachtraum in Schubboot und Schubleichter sowohl unter den auf dem Mittel- und Oberrhein als auch auf den kanalisiertem Flüssen und den

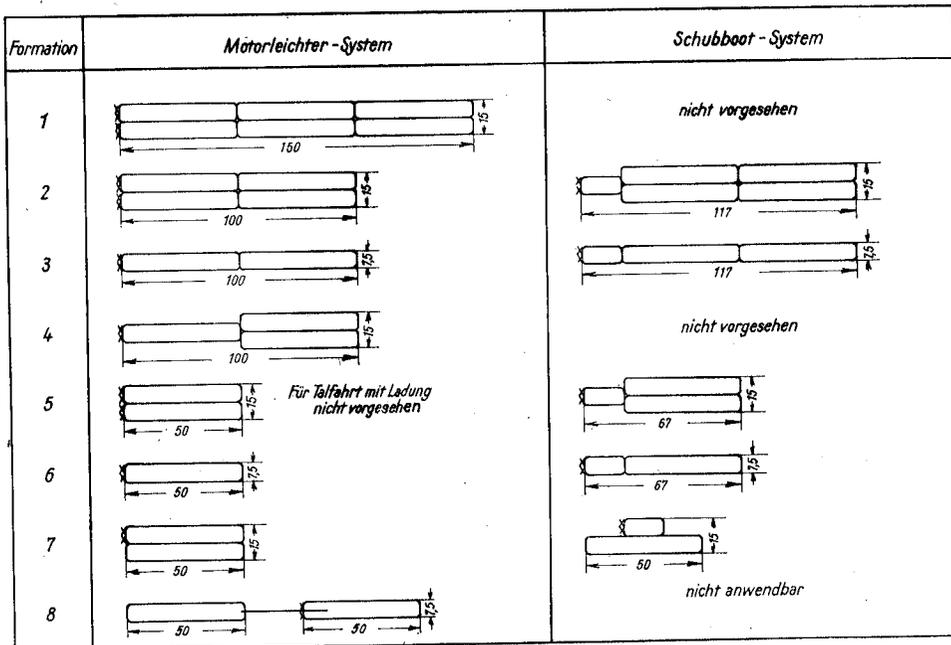


Bild 3

Formation des Motorleichter- und Schubboot-Systems

Kanälen gegebenen Bedingungen noch wirtschaftliche Bedeutung besitzt. Das System des schiebenden Motorleichters geht davon aus, daß diese Frage zu verneinen ist, und zwar auch aus folgenden Gründen: In offenen, durch keinerlei Schleusen unterbrochenen Flüssen, welche zudem keine starken Krümmungen aufweisen, ist die Länge des Schubverbandes und damit die für die Unterbringung des Antriebes (beispielsweise in einem Schubboot) aufzuwendende unproduktive Länge nicht besonders wichtig. In einem Wasserstraßennetz, dessen Schiffbarkeit jedoch durch Schleusen und starke Krümmungen behindert wird, gewinnt die Frage der produktiven Ausnutzung der verfügbaren Länge erheblich an Bedeutung. Bild 3 zeigt die bei beiden Systemen möglichen Formationen und die erforderlichen Gesamtlängen.

Nach diesem Beispiel benötigt man für die Unterbringung der Maschinenanlage bei dem Schubboot-System eine Länge von 17 m, bei dem Motorleichter-System jedoch höchstens 6 m. Darüber hinaus bietet die Verwendung von Schottel-Antrieben die Möglichkeit, diese Länge weiter beträchtlich zu verkürzen. Alle Formationen, die bei dem Schubboot-System denkbar sind, können auch vom Motorleichter-System gebildet werden, jedoch jeweils mit einer um mindestens 17 m geringeren Gesamtlänge. Wesentlich

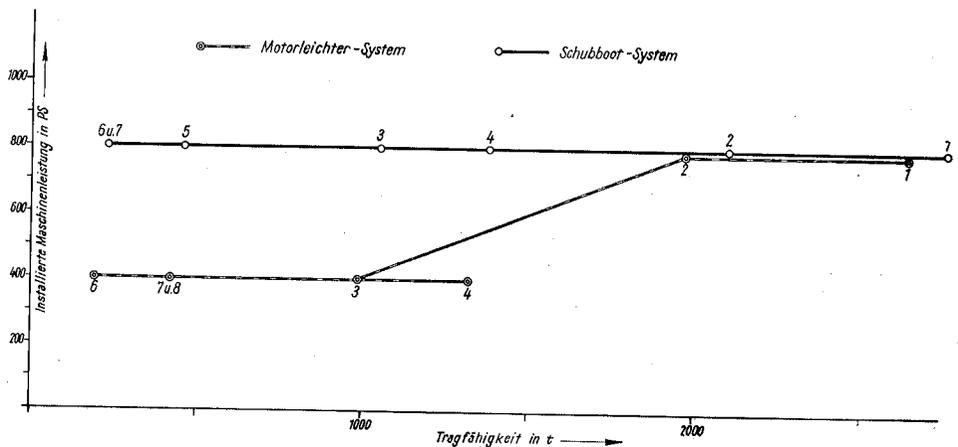


Bild 4

Ladefähigkeit in t und installierte Maschinenleistung in PS bei den Formationen 1 bis 8 (Bild 3) des Motorleichter- und Schubboot-Systems

ist auch, daß das Motorleichter-System über ein größere Skala der anwendbaren Formationen verfügt als das Schubboot-System. Einen weiteren Vorteil bietet die größere Ladefähigkeit sowohl bei guten Wasserhältnissen, die nicht die volle Maschinenleistung erfordern (Formation 1), als auch bei niedrigen Wasserständen, wobei auch die Sicherheit der Navigation erhöht wird (Formationen 7 und 8). Bei Beurteilung der Zweier-Formationen 1, 2 und 5 ist die Verbesserung der Manövrierfähigkeit durch die Verteilung der Strahlflächen der Propeller der beiden zusammengekuppelten Motorleichter über die große Breite von 15 m von Bedeutung. Die Formation 2 des Motorleichter-Systems kann sich im laufenden Betrieb ebenso wie die Formation 5 jederzeit in zwei gleiche Einheiten der Formationen 3 und 6 unter Beibehaltung der pro t Ladung verfügbaren Maschinenleistung auflösen. Das ist entscheidend beim Übergang von der Fluß- in die Kanalfahrt. Beim Schubboot-System müßten in diesem Falle besondere Kanal-Schubboote eingesetzt werden.

Formation	Vergleichswerte *)	Anwendungs- bereich	Motorleichter- System	Anwendungs- bereich	Schubboot- System	Bemerkungen
1	L bei 1,80 m N N/L in PS/t	MW	2 640 t 800 PS 0,30	MW	2 760 t 800 PS 0,29	Bei Schubboot-System nicht vorgesehen und wegen schlechter Manövriereigenschaften auch nicht durchführbar
2	L bei 2,00 m N N/L in PS/t	HW	1 970 t 800 PS 0,41	HW	2 100 t 800 PS 0,38	
3	L bei 2,00 m N N/L in PS/t	HW	985 t 400 PS 0,41	HW	1 050 t 800 PS 0,76	
4	L bei 1,80 m N N/L in PS/t	MW	1 320 t 400 PS 0,30	MW	1 380 t 800 PS 0,58	Bei Schubboot-System nicht vorgesehen, jedoch praktisch möglich
5	L bei 1,10 m N N/L in PS/t	—	Für Talfahrt mit Ladung nicht vorgesehen (2,1)	NW	460 t 800 PS 1,7	Bei Schubboot-System nur möglich, wenn Tiefgang des Schubbootes weniger als 1,10 m
6	L bei 1,10 m N N/L in PS/t	NW	190 t 400 PS 2,1	NW	230 t 800 PS 3,5	
7	L bei 1,10 m N N/L in PS/t	NW	420 t 400 PS 0,95	NW	320 t 800 PS 3,5	
8	L bei 1,10 m N N/L in PS/t	NW	420 t 400 PS 0,95	—	Nicht verwendbar	

*) Es bedeuten: L = Ladefähigkeit in t bei ... m Abladung, N = installierte Maschinenleistung in PS

Tafel 1
Vergleichswerte für Motorleichter- und Schubboot-System

Die „Vergleichswerte“ der Tafel 1 und die Diagramme der Bilder 4 und 5 lassen erkennen, welche Bedeutung der Teilbarkeit der installierten Maschinenleistung der Antriebsfahrzeuge zukommt, und zwar vor allem bei der Flachwasserfahrt.

Der konstante Tiefgang des Schubbootes hat Nachteile, welche sich besonders in der Flachwasserfahrt auswirken. Beim Motorleichter, dessen Tiefgang dem veränderlichen schiffbaren Wasserstand laufend angepaßt werden kann, werden sie vermieden.

Der konstante Tiefgang des Schubbootes wirkt sich aber auch auf die Propulsionsverhältnisse ungünstig aus. Dagegen läßt der abgeladene Motorleichter mit einem Tiefgang von beispielsweise 1,80 m bei höheren Wasserständen eine Verbesserung des Propulsionswirkungsgrades der Propeller und damit eine Steigerung der Sicherheit der Navigation gegenüber einem Schubboot mit unveränderlichem Tiefgang, zum Beispiel 1,20 m, erwarten.

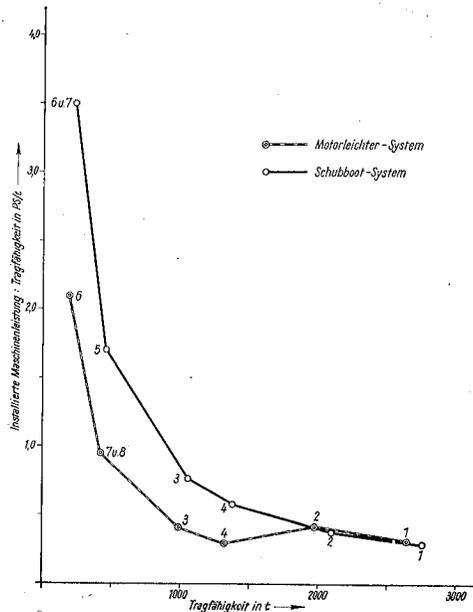


Bild 5

Verhältnis der installierten Maschinenleistung in PS zur Ladefähigkeit in t bei den Formationen 1 bis 8 (Bild 3) des Motorleichter- und Schubboot-Systems.

Der wesentliche Unterschied zwischen dem Motorleichter-System und dem Schubboot-System ist also dadurch gekennzeichnet, daß sowohl die einsetzbare Maschinenleistung und die die Manövrierfähigkeit bestimmenden Kräfte als auch der Tiefgang der Antriebsfahrzeuge bei ersterem Veränderliche sind, während beide Faktoren bei letzterem System als konstant zu betrachten sind.

Der Motorleichter soll alle Steuer- und Antriebsorgane aufweisen, die nach neueren Erkenntnissen für den Schubbetrieb gefordert werden müssen. Dabei ist es klar, daß ein Motorleichter, dessen beide Propeller nur je 200 PS aufnehmen müssen, sehr viel günstigere Propulsionsverhältnisse erwarten läßt als ein Schubboot mit je 400 PS auf jedem Propeller. Das muß sich natürlich auch auf Bau und Betrieb der Motorenanlage auswirken.

Bei einem Vergleich zwischen einem Schubboot mit einer Gesamtmaschinenleistung von 800 PSe, verteilt auf 2 Propeller von einem Durchmesser von je 1,30 m, und 2 Motor-

leichtern mit der gleichen Gesamtmaschinenleistung von 800 PSe, verteilt jedoch auf $2 \times 2 = 4$ Propeller des gleichen Durchmessers von 1,30 m, ergibt sich folgende unterschiedliche, für den Propulsionsgütegrad außerordentlich wichtige Propellerbelastung:

	Schubboot	Motorleichter
Strahlfläche je Propeller in m ²	1,33	1,33
Propellerstrahlfläche gesamt in m ²	2,66	5,32
Propellerbelastung in PSe/m ² Strahlfläche	300	150

Die Gütegrade der Propulsion vermindern sich mit steigender Propellerbelastung. Sie vermindern sich ferner mit absinkender schiffbarer Wassertiefe, da die Sogwirkung bei Flachwasserfahrt eine stärkere steuerlastige Vertrimmung zur Folge hat, und zwar um so mehr, je höher die Propellerbelastung ist.

4.2 Auswirkungen auf die Wahl der Konstruktion der Hauptantriebsanlage

Während die Wahl der Hauptmotoren von reinen Schubbooten mit Rücksicht auf das für die Motorenanlage verfügbare nur geringe Gewicht und die Notwendigkeit der starken Einschränkung des Raumbedarfs sehr einschneidenden Bedingungen unterworfen ist, läßt der Motorleichter als Schubfahrzeug eine Vielzahl von Möglichkeiten bei dem Entwurf der Motorenanlage zu. Dabei ist die Verwendung von Langsamläufern mit direktem Antrieb der Propeller in gleicher Weise dankbar wie der Einbau von Schnellläufern, und zwar unter unmittelbarer Auswertung der im Betrieb der zahlreichen in den letzten Jahren gebauten Motorgüterschiffe gewonnen günstigen Erfahrungen. Auch der Antrieb von Motorleichtern mit Schottel-Antrieben kann im Rahmen des Motorleichter-Systems bei den im Verhältnis zum Schubboot-Antrieb geringeren Maschinenleistungen von wirtschaftlicher Bedeutung sein, und zwar vor allem auch dann, wenn es sich darum handelt, unbemannte Leichter als Einzelfahrer für die Fortbewegung auf Kanälen unter gewissen Bedingungen nur vorübergehend zu motorisieren.

4.3 Ergebnisse von Modellversuchen mit einem Motorleichter-Schubverband

In der Versuchsanstalt für Binnenschiffbau Duisburg sind mit einem Motorleichter-Schubverband folgender Abmessungen Modellversuche durchgeführt worden:

Motorleichter	L = 52 m, B = 7,5 m	
	Verdrängung bei T = 1,25 m	387 m ³
	Verdrängung bei T = 1,80 m	597 m ³
	Maschinenleistung	412 WPS
	2 Propeller ($\phi = 1,15$ m) in drehbaren Düsen	
Leichter	L = 50,4 m, B = 7,5 m	
	Verdrängung bei T = 1,25 m	408 m ³
	Verdrängung bei T = 1,80 m	608 m ³

Verhältnisse der Hauptabmessungen	L/B	B/T
Motorleichter	6,9	4,15
Leichter	6,8	4,15

Im Vergleich dazu beträgt das Verhältnis L/B bei einem Leichter des Typs „Wasserbüffel“ 6,95, das Verhältnis B/T 3,34.

Die entsprechenden Verhältnisse betragen bei den praktisch zu verwendenden Formationen der zu vergleichenden Schubverbände:

Motorleichter-Schubverband (1 Motorleichter + 1 Leichter)

Gesamtlänge 102,4 m, Breite 7,5 m, T = 1,8 m, L/B = 13,7, B/T = 4,15 m

Schubverband „Wasserbüffel“ (Schubboot + 4 Leichter)

Gesamtlänge 164 m, Breite 18,4 m, T = 1,8 m, L/B = 8,9, B/T = 10

Die Einheitsleistung beträgt beim „Wasserbüffel“ (12 km/h bei voller Abladung auf 2,75 m Tiefgang und 5,0 m Wassertiefe in ruhigem Wasser) 0,274 PSe/t. Die gleiche Einheitsleistung von 0,274 PSe/t reicht beim Motorleichter-Schubverband zur Erzielung einer Geschwindigkeit von 9,75 km/h bei einer Abladung auf 1,30 Tiefgang und nur 1,8 m Wassertiefe in ruhigem Wasser aus. Bei einem Leistungsbedarf von 0,08 bis 0,15 PSe/t, einer Abladung auf 1,10 m Tiefgang und 1,5 m Wassertiefe wird eine Geschwindigkeit von 7,0 bis 7,5 km/h erreicht.

Die Versuche haben im übrigen ergeben, daß der aus einem Motorleichter und einem Leichter bestehende Schubverband bei dem sehr kleinen Verhältnis Wassertiefe/Tiefgang keinen höheren Widerstand verursacht als der alleinfahrende Motorleichter.

Bei einem Tiefgang von 1,8 m und einer Wassertiefe von 3,5 m ist mit dem Motorleichter-Schubverband eine Geschwindigkeit von 12,58 km/h in ruhigem Wasser erzielt worden. Es hat sich dabei gezeigt, daß auf eine Tunnelung des Hinterschiffes bei der extremen Flachwasserfahrt nicht verzichtet werden kann. Dadurch wird erreicht, daß die Propeller auch und auf flachem Wasser fast ausschließlich von den Seiten her ansaugen. Bei der ermittelten günstigsten Tunnelform liegen die möglichen Geschwindigkeiten bei Wassertiefen unter 3,5 m wesentlich höher als bei den anderen untersuchten einfachen Heckformen.

Bei Propulsionsversuchen in Rückwärtsfahrt wurden in ruhigem 3,5 m tiefem Wasser 7,60 km/h bei 1,80 m Tiefgang und 8,65 km/h bei 1,25 m Tiefgang erreicht.

Der Motorleichter-Schubverband wurde auch auf sein Verhalten beim Manövrieren (Schlängelversuch), beim Wenden und im Drehkreis untersucht. Bei Hartlage der drehbaren Düsen (40°), einer Maschinenleistung von 2×200 PSe und einem Tiefgang von 1,80 m betrug der Drehkreisdurchmesser des Schwerpunktes des Schubverbandes 174 m oder das 1,7fache der Länge des Verbandes.

Die Reaktionszeit des Motorleichter-Schubverbandes, gekennzeichnet durch Anschwenkzeit und Stützzeit, kann als sehr gut bezeichnet werden.

4.4 Erfahrungen mit einem bereits in Dienst gestellten Motorgüterschiff-Schubverband

Als erster Motorgüterschiff-Schubverband ist in der Bundesrepublik Deutschland im Jahre 1960 der Schubverband „Constantin der Große II“ in Dienst gestellt und im Kanalgebiet und auf dem Rhein erprobt worden. Dieser Verband besteht aus einem Motorgüterschiff (L = 67,60 m, B = 8,20 m, 540 PSe) und einem unbemannten Kahn (L = 62,40 m, B = 7,95 m).

Wegen der großen Gesamtlänge von 130 m ist die Verbindung zwischen den beiden Fahrzeugen für die Verwendung in der Kanalfahrt flexibel gestaltet worden. Die für die Zwecke des Schubsystems angebauten Podeste am Vorschiff des Motorgüterschiffes und am Hinterschiff des Kahnens sind als Gelenke ausgebildet. Die Kupplung

besteht aus Drahtseilen, die von den Winden über Poller führen und auf einem Sliphaken mit Spannschrauben enden. Durch Lösen einer Winde kann der Verband um eines der beiden Gelenke geknickt werden. Bei einem Krümmungsradius von 250 m beträgt der Knickwinkel 15° . Am Kopf des Schubverbandes ist ein Schottel-Navigator (200 PSe) angeordnet. Das schiebende Motorgüterschiff ist im übrigen lediglich mit einem dreiflächigen Hitzler-Ruder ausgerüstet.

Durch Anziehen der Winden und der Spannschrauben kann eine starre Verbindung hergestellt werden. Auf dem Rhein (Ruhrort-Mannheim) fährt der Schubverband in starrer Verbindung und ohne Verwendung des Schottel-Navigators.

Der Schubverband führte bisher 20 Reisen auf dem Rhein zwischen Ruhrort und Mannheim durch, die einwandfrei verliefen. Steuerfähigkeit und Kursbeständigkeit sind gut.

Die mittleren Geschwindigkeiten des mit 1100 t beladenen Verbandes betrug auf der Strecke Duisburg-Salzig 7 bis 8 km/h. Es bestätigte sich auch hier die bereits aus den Modellversuchen mit einem Motorleichter-Schubverband gewonnene Erkenntnis, daß der Gesamtwiderstand des Schubverbandes nicht größer ist als der Widerstand des allein fahrenden Motorgüterschiffes. Die Besatzung wurde auf 4 Mann festgesetzt. Das bedeutet eine Personaleinsparung von 2 Mann = 33% der für die Alleinfahrt erforderlichen Besatzung von $3 + 3 = 6$ Mann.

Auch die Versuche auf der Kanalfahrt von der Ruhr nach Bremen über den Dortmund-Ems-Kanal und den Küstenkanal verliefen ohne jede Beanstandung. Die Ladung betrug 1300 t bei einem Tiefgang von 2 m. Besonders bei Begegnungen zeigte der Verband eine Kursbeständigkeit, wie sie bisher bei keinem anderen Kanalschiff festgestellt wurde. Die Schleusungszeiten betragen im Mittel nur 18 Minuten. Die Hunte, welche als schwieriges Fahrwasser gilt, wurde mit einer Durchschnittsgeschwindigkeit von 10 km/h durchfahren und zwar ohne daß es notwendig war, den Verband zu knicken. Bei 68 Stunden Fahrzeit (einschließlich leerer Rückfahrt) war der Schottel-Navigator nur 3 Stunden in Betrieb. Ein Stoppversuch im Kanal bei einer Geschwindigkeit von 9,7 km/h ergab einen Stoppweg von etwa 120 m, eine Stoppzeit von 30 Sekunden. Ein seitliches Verfallen des Verbandes war nicht festzustellen. Besonders bei höheren Geschwindigkeiten wurde festgestellt, daß wesentlich kleinere Wasserspiegel-Absenkungen als bei den normalen Kanalschiffen und fast keine Heckwellen auftraten.

Der Einsatz solcher Schubverbände ist nach dem Ergebnis der bisherigen Versuche ohne Behinderung des übrigen Verkehrs möglich. Weitere Schubverbände dieser Art befinden sich im Entwurf.

5. Zulässige Abmessungen der Schubverbände auf einer Wasserstraße¹⁾

5.1 Abhängigkeit der Abmessungen

Die zulässigen Abmessungen von Schiffsgefäßen für natürliche und künstliche Wasserstraßen werden nicht nur durch die schiffbaulichen Grundsätze, sondern auch durch die örtlichen Verhältnisse einer Wasserstraße und die an ihr vorhandenen Bauwerke bestimmt.

In der Bundesrepublik Deutschland war die historische Entwicklung der Schifffahrt mit Schleppverbänden oder einzeln fahrenden Motorgüterschiffen für den Ausbau der Binnenschiffahrtstraßen maßgebend. Der Verkehr mit starren Schubverbänden verfolgt das

1) Die im Schiffbau eingeführten Bezeichnungen für die Abmessungen der Wasserfahrzeuge (L = Länge und B = Breite) werden zur Unterscheidung mit denen für das Fahrwasser in diesem Abschnitt mit kleinen Buchstaben (l und b) wiedergegeben.

Wasserstraße	Klasse	Abmessungen der Wasserstraße						Mögliche Abmessungen für starre Schubverbände (Krümmungsverhältnisse sind nicht berücksichtigt)				Bemerkungen	
		Fahrwasser (bei NW bzw. GIW)		Schleusen			Brücken Sperr- fore	Länge	Breite	Tiefgang	Höhe der festen Auf- bauten m		
		Breite m	Tiefe m	klein- ster Halb- messer m	nutz- bare Länge m	nutz- bare Breite m							Drempel- tiefe m
Rhein													
Emmerich—Köln	V	150	2,5	675				9,10	150—185 ¹⁾	22,4—33,6	2,5 ²⁾	9,0	1) Die größten Abmessungen sind für den Rhein: Bergfahrt l = 185 m b = 22,4 m Talfahrt l = 150 m b = 33,6 m
Köln—St. Goar	V	150	2,1	700				9,10	150—185 ¹⁾	22,4—33,6	1,9—2,5	9,0	
St. Goar—Mannheim ³⁾	V	120	1,7	355				9,10	150—185 ¹⁾	22,4—33,6	1,5—2,5	9,0	
Mannheim—Straßburg	V	80—90	1,7	725				9,10	150—185 ¹⁾	22,4—33,6	1,5—2,5	9,0	
Straßburg—Breisach	V	70	1,9	815				6,75	—	—	1,7—2,5	6,7	
Neckar	IV	36	2,5	350	110	12	3,2	5,30	110	11,5	2,1—2,5	5,3	
Main													
Mündung—Offenbach	V	50	3,0	500	120/350	13/15	3,25/3,5	6,11	185	12,5	2,5	6,1	
Offenbach—Bamberg	IV	36	2,5—2,7	350	300	12	2,5	4,88	185	11,5	2,3—2,5	4,6	
Main-Donau-Kanal	IV	40	2,5—4,0	1000	190	12	3,5	6,00	185	11,5	2,5	6,0	2) Für den Tiefgang sind 0,20 m Flottwasser unter dem Kiel angenommen. Der größte Tiefgang ist zu 2,50 m angenommen.
Donau	IV	70	2,0	400	230	24	2,7	6,40	185	22,4	1,8—2,5	6,4	
Mosel	IV	40	2,9	350	165	12	3,5	5,25	170	11,5	2,5	5,2	
Ruhr	V	31,4	3,5—4,0	600	130	13	2,5	6,50	130	12,5	2,5	6,5	
Rhein-Herne-Kanal	IV	23	2,5—3,5	700	165	10	3,0	4,50	165	9,5	2,5	4,5	3) In der Bingerloch- strecke sind 2 Fahrwasser von 30 und 60 m Breite vorhanden.
Wesel-Datteln-Kanal	IV	23	2,5—3,5	600	225	12	4,5	4,50	185	11,5	2,5	4,5	
Datteln-Hamm-Kanal	III	23	2,5—3,5	600	85	10	3,0	4,00	85	9,5	2,5	4,0	
Dortmund-Ems-Kanal													
Dortmund—Bevergern	IV	26	2,5—3,5	900	225	12	3,4	4,00	185	11,5	2,5	4,0	4) Die Abmessungen des Fahrwassers beziehen sich auf die Flußstrecke; in den Seitenkanälen betragen sie: 23,5 m Breite, 2,5 m Tiefe und 1000 m kleinster Halbmesser.
Henrichenburg	IV	—	—	—	90/95	10/12	3,0	—	95	11,5	2,5	—	
Bevergern—Emden	III	20—28	2,5—3,5	500	165	10	3,0	4,00	165	9,5	2,5	4,0	
Mittellandkanal	III	23,2	2,0—3,4	900	225	12	3,0	4,00	185	11,5	2,0	4,0	
Küstenkanal	III	24,5—26,5	2,5	750	105	12	3,5	4,00	105	11,5	2,5	4,0	
Mittelweser⁴⁾	IV	33,1	2,5	200	225	12,5	3,2	4,50	185	12,0	2,3—2,5	4,5	
Elbe	V	150	2,5	800	230	25	3,2	3,82	150—185	22,4	2,5	3,8	
Elbe-Lübeck-Kanal	III	22	2,5—3,0	600	80	12	2,5	4,85	80	11,5	2,5	4,8	

Tafel 2

Abhängigkeit der Abmessungen starrer Schubverbände von den Abmessungen der Binnenwasserstraßen der Bundesrepublik Deutschland (ohne Berücksichtigung der Krümmungsverhältnisse)

Ziel der größtmöglichen Wirtschaftlichkeit durch Einsatz wesentlich längerer und breiterer Schiffseinheiten als bisher üblich. Es ist deshalb zu untersuchen, welche Größt- abmessungen für die im regelmäßigen Betrieb verkehrenden Schubverbände auf den einzelnen deutschen Wasserstraßen möglich sind und zugelassen werden können.

Diese Abmessungen sind von folgenden Bedingungen abhängig:

bei der Schiffahrtsrinne

- von den Querschnittsabmessungen: Fahrwasserbreite, Fahrwassertiefe, Verhältnis von Wasserquerschnitt der Wasserstraße zum eingetauchten Fahrzeugquerschnitt.
- von den Krümmungsverhältnissen: Krümmungshalbmesser, Fahrwasserbreite in Krümmungen.

bei Bauwerken

- von den Schleusen: nutzbare Länge, nutzbare Breite, Drempeeltiefe, Durchfahrtshöhe unter Toren und Schleusenbrücken.
- von den Brücken: Durchfahrtshöhe, Durchfahrtsbreite (bei natürlichen Wasserstraßen bezogen auf den höchsten Schiffahrtswasserstand).
- von den Sperrtoren: Durchfahrtshöhe, Durchfahrtsbreite.

Die von den Abmessungen des Fahrwassers und der Bauwerke abhängigen Grenzmaße der starren Schubverbände sind in Tafel 2 für die wichtigsten Binnenwasserstraßen der Bundesrepublik Deutschland angegeben; die Krümmungsverhältnisse sind noch nicht berücksichtigt.

Für die Festlegung der zulässigen Abmessungen starrer Schubverbände auf den vorhandenen Wasserstraßen sind jedoch im allgemeinen die Krümmungsverhältnisse maßgebend. Beim Durchfahren von Krümmungen wird von einem Wasserfahrzeug eine größere Verkehrsbreite als in geraden Strecken benötigt. Dies ist durch die geometrischen Verhältnisse einer Krümmung und die Schräglage des Schiffes bedingt. Jedes Wasserfahrzeug nimmt bei der Fahrt durch eine Krümmung eine bestimmte zum Krümmungsmittelpunkt gerichtete Schräglage ein, die um den Derivationswinkel δ von der Tangente an den Krümmungskreis in Fahrzeugmitte abweicht. Die Größe dieser Abweichung (Derivation) ist von dem Kräftespiel zwischen Zentrifugalkraft, Anströmung auf das Schiff, Ruderkräften, Druckrichtung des Schiffsantriebs, Spiralströmung und den vorhandenen Windkräften abhängig.

5.2. Abhängigkeit der benötigten Verkehrsbreite in Krümmungen vom Derivationswinkel

Liegt das Fahrzeug schräg zu seiner Fahrtrichtung, so kann die von ihm eingenommene Verkehrsbreite angegeben werden mit:

$$a' = l \cdot \sin \delta + b \cdot \cos \delta \quad (1)$$

Voraussetzung hierfür ist, daß das Fahrzeug als rechteckiger Körper mit der Breite b und der Länge l betrachtet wird und sich auf einer geradlinigen Strecke der Wasserstraße befindet. Für die Fahrt durch eine Krümmung ist die angegebene Formel nur annäherungsweise richtig. Bei genauer Untersuchung sind 2 Fälle zu unterscheiden (Bild 6):

Fall 1

Die dem Krümmungsmittelpunkt zugekehrte Längsseite des Wasserfahrzeuges tangiert zwischen ihrer Mitte und ihrem vorderen Ende den inneren Krümmungskreis des Fahrstreifens (kleiner Derivationswinkel).

Fall 2

Die dem Krümmungsmittelpunkt zugekehrte Längsseite des Wasserfahrzeuges schneidet mit ihrem vorderen Ende den inneren Krümmungskreis des Fahrstreifens (größerer Derivationswinkel).

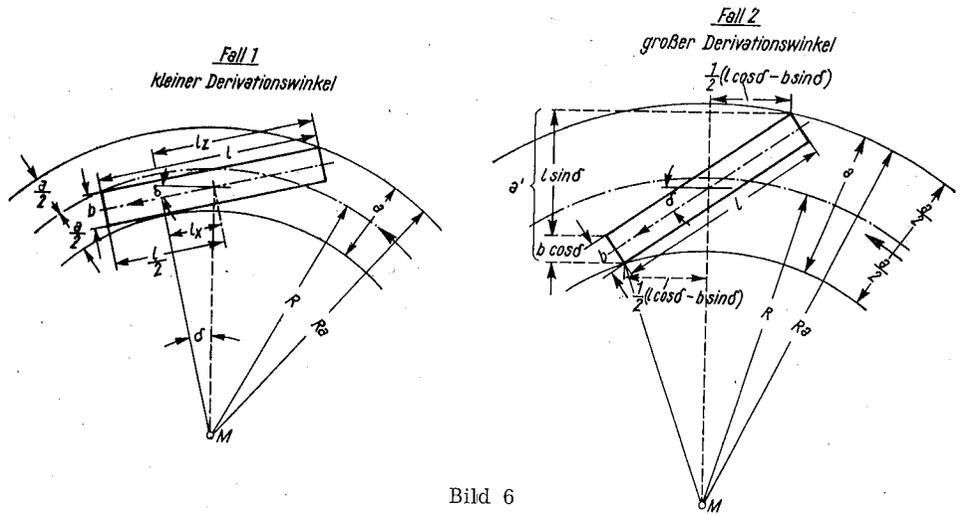


Bild 6
Fahrt durch Krümmungen

Die Formeln für den Fahrstreifen in der Krümmung lauten:

Fall 1

Verkehrsweite $a = b + \frac{(1 + \beta)^2}{4} \cdot \frac{l^2}{2R + b}$
 oder $a = b + \varepsilon^2 \cdot \frac{l^2}{2R + b}$ (2)

Abstandsverhältnis $\beta = 2 \frac{l_x}{l} = \frac{\text{tg } \delta \cdot (2R + b - a)}{l}$
 $0 \leq \beta \leq 1$
 oder $\varepsilon = \frac{1 + \beta}{2} = \frac{l_z}{l} = \frac{\text{tg } \delta \cdot (2R + b - a)}{2l} + \frac{1}{2}$ (3)
 $l_z = \frac{l}{2} + l_x ; 0,5 \leq \varepsilon \leq 1$

Derivationswinkel $\text{tg } \delta = \frac{\beta \cdot l}{2R + b - a}$
 oder $\text{tg } \delta = \frac{(2\varepsilon - 1) \cdot l}{2R + b - a}$ (4)

Krümmungszuschlag $B_v = a - b = \frac{(1 + \beta)^2}{4} \cdot \frac{l^2}{2R + b}$
 oder $B_v = \varepsilon^2 \cdot \frac{l^2}{2R + b}$ (5)

Hierbei ist R gleich dem mittleren Halbmesser des Fahrstreifens zu setzen. Da dieser nicht immer bekannt ist, kann er im ersten Rechnungsgang überschläglic mit Hilfe von Formel (1) ermittelt und dann mit dem erhaltenen ersten Wert für a verbessert werden. Man kann jedoch auch vom Außenhalbmesser ausgehen; die Formel für die Verkehrsweite lautet dann

$$a = b + \left(R_a - \sqrt{R_a^2 - \frac{(1 + \beta)^2}{4} \cdot l^2} \right) \quad (2a)$$

wobei
$$\beta = 2 \frac{l x}{l} = \frac{\operatorname{tg} \delta \cdot (2 R_a + b - 2a)}{l} \quad (4a)$$

ebenfalls mit der Einschränkung $0 \leq \beta \leq 1$ einzusetzen ist. Wird an Stelle von β das Abstandsverhältnis ε eingeführt, so geht Formel (2a) über in

$$a = b + \left(R_a - \sqrt{R_a^2 - \varepsilon^2 \cdot l^2} \right) \quad (2b)$$

wobei für
$$\varepsilon = \frac{1 + \beta}{2} = \frac{l z}{l} = \frac{\operatorname{tg} \delta \cdot (2 R_a + b - 2a)}{2l} + \frac{1}{2} \quad (4b)$$

die Einschränkung $0,5 \leq \varepsilon \leq 1$ gilt.

Schließlich kann statt (2b) auch geschrieben werden

$$a = R_a - \sqrt{R_a^2 - C_1} \quad (2c)$$

mit
$$C_1 = (\varepsilon \cdot l \cdot \sin \delta + b \cdot \cos \delta)^2 -$$

$$- 2 \cdot (\varepsilon \cdot l \cdot \sin \delta + b \cdot \cos \delta) \cdot \sqrt{R_a^2 - \frac{1}{4} \cdot (l \cdot \cos \delta - b \cdot \sin \delta)^2} +$$

$$+ \left[(\varepsilon \cdot l - \frac{l}{2}) \cdot \cos \delta - \frac{b}{2} \sin \delta \right]^2 - \frac{1}{4} \cdot (l \cos \delta - b \cdot \sin \delta)^2 \quad (6)$$

und derselben Einschränkung für ε . Bei Anwendung der Formeln (4a) und (4b) kann überschlägig im ersten Rechnungsgang für a der Wert a' nach der Formel (1) verwendet werden.

Fall 2

Bezogen auf den Krümmungshalbmesser R in Fahrstreifenmitte ergibt sich

Verkehrsweite
$$a = a' \cdot \sqrt{\frac{4 R^2 - (l^2 + b^2)}{4 R^2 - a'^2}} \quad (7)$$

$$a' = l \cdot \sin \delta + b \cdot \cos \delta \quad (1)$$

Derivationswinkel
$$\operatorname{tg} \delta \cong \frac{l}{2 R - \frac{l^2}{2 R + b}} \quad (8)$$

Krümmungszuschlag
$$B_v = a - b \quad (5a)$$

da $l^2 + b^2$ größer als a'^2 ist, ist der Wert unter der Wurzel in (7) kleiner als 1, das heißt $a < a'$.

Tafel 3

Verkehrsbreite a für 9,50 m breite Schubverbände — R = Krümmungshalbmesser;
 l = Länge des Schubverbandes; δ = Derivationswinkel; β, ε = Abstandsverhältnis.

R	Fall 1										Fall 2				
	$a = b + \frac{(1+\beta)^2}{4} \cdot \frac{l^2}{2R+b} = b + \varepsilon^2 \cdot \frac{l^2}{2R+b}; \quad \beta = 2 \frac{l_x}{l}; \quad \varepsilon = \frac{1+\beta}{2} = \frac{l_z}{l}$ $\operatorname{tg} \delta = \frac{\beta \cdot l}{2R+b-a} = \frac{(2\varepsilon-1) \cdot l}{2R+b-a}; \quad 0 \leq \beta \leq 1; \quad 0,5 \leq \varepsilon \leq 1$										$a = a' \cdot \sqrt{\frac{4R^2 - (l^2 + b^2)}{4R^2 - a'^2}}$ $a' = l \cdot \sin \delta + b \cdot \cos \delta$ $\operatorname{tg} \delta = \frac{l}{2R - \frac{l^2}{2R+b}}$				
	β	ε	l = 80 m		l = 100 m		l = 135 m		l = 170 m		δ°	a			
		a	δ°	a	δ°	a	δ°	a	δ°	l = 80 m		l = 100 m	l = 135 m	l = 170 m	
300	0	0,5	12,15	0	13,60	0	17,00	0	21,35	0	5	—	—	—	—
400			11,50		12,60		15,15		18,45			—	—	—	—
600			10,80		11,55		13,25		15,45			16,40	18,10	—	—
800			10,50		11,05		12,35		14,00			16,40	18,15	21,15	—
1000			10,30		10,75		11,75		13,10			16,40	18,15	21,20	24,20
2000			9,90		10,10		10,65		11,30			16,45	18,15	21,20	24,25
3000			9,75		9,90		10,25		10,70		16,45	18,20	21,20	24,25	
300	0,5	0,75	15,40	3,85	18,70	4,83	26,30	6,60	36,15	8,42	10	23,05	26,35	—	—
400			13,95	2,88	16,45	3,60	22,15	4,90	29,60	6,22		23,15	26,50	32,35	—
600			12,50	1,92	14,15	2,40	18,00	3,25	22,95	4,10		23,20	26,60	32,60	38,50
800			11,75	1,43	13,00	1,80	15,85	2,43	19,60	3,05		23,20	26,65	32,70	38,65
1000			11,30	1,15	12,30	1,43	14,60	1,93	17,60	2,44		23,25	26,70	32,75	38,75
2000			10,40	0,57	10,90	0,72	12,05	0,97	13,55	1,22		23,25	26,70	32,80	38,80
3000			10,10	0,38	10,45	0,48	11,20	0,67	12,20	0,81	23,25	26,70	32,80	38,85	
300	1,0	1,0	20,00	7,73	25,90	9,72	39,40	13,32	56,90	17,10	15	26,40	34,60	43,10	—
400			17,40	5,77	21,85	7,23	32,00	9,85	45,20	12,53		26,45	34,80	43,55	52,05
600			14,80	3,92	17,75	4,80	24,55	6,50	33,40	8,22		26,45	34,95	43,85	52,70
800			13,50	2,87	15,70	3,52	20,80	4,84	27,45	6,13		26,50	35,00	44,00	52,90
1000			12,70	2,30	14,50	2,87	18,55	3,88	23,90	4,90		26,50	35,00	44,05	53,00
2000			11,10	1,15	12,00	1,43	14,05	1,95	16,70	2,43		26,50	35,05	44,10	53,10
3000			10,55	0,77	11,15	0,95	12,55	1,28	14,30	1,62	26,50	35,05	44,10	53,15	

Bezogen auf den äußeren Krümmungshalbmesser R_a des Fahrstreifens gilt

$$a = R_a - \sqrt{R_a^2 + C_2} \quad (9)$$

mit
$$C_2 = a'^2 - 2a' \cdot \sqrt{R_a^2 - \frac{1}{4} \cdot (l \cdot \cos \delta - b \cdot \sin \delta)^2} \quad (10)$$

und
$$a' = l \sin \delta + b \cos \delta \quad (1)$$

In allen Ausdrücken bedeutet:

a = Verkehrsbreite

l = Länge des Schubverbandes

b = Breite des Schubverbandes

R = Krümmungshalbmesser in Fahrstreifenmitte

R_a = äußerer Krümmungshalbmesser des Fahrstreifens

δ = Derivationswinkel

β, ε = Abstandsverhältnis

B_v = Krümmungszuschlag.

Auf eine Ableitung der Formeln soll an dieser Stelle verzichtet werden.

In Tafel 3 sind für verschiedene Krümmungshalbmesser R , Längen l der Schubverbände und Derivationswinkel δ , beziehungsweise Abstandsverhältnisse β oder ε im Fall 1, bei konstanter Breite des Schubverbandes $b = 9,50$ m die sich nach den Formeln (2) und (7) ergebenden Verkehrsbreiten zusammengestellt. Bei geringen Breitenabweichungen der Schubverbände genügt es, die Breitendifferenz den angegebenen Streifenbreiten hinzuzufügen; der Fehler ist vernachlässigbar klein.

Je nach dem Ziel der Untersuchung lassen sich nun mit Hilfe der Formeln die notwendige Fahrwasserbreite einer Krümmung oder die zulässigen Abmessungen für starre Schubverbände bestimmen, wenn Klarheit über die Größe des anzusetzenden Derivationswinkels besteht.

Unter Berücksichtigung des Sicherheitsabstandes der Fahrzeuge untereinander (s) und der einzuhaltenden Abstände vom inneren (a_1) und äußeren (a_2) Fahrwasserrand ergibt sich die Fahrwasserbreite in einer Krümmung zu

$$B_k = a_1 + \Sigma a + \Sigma s + a_2 \quad (11)$$

In den Formeln (2) und (7) ist der Krümmungshalbmesser auf die Mitte des Fahrstreifens bezogen. Für die Berechnung wird es meist genügen, bei zweispurigen Wasserstraßen mit dem Halbmesser in Fahrwassermitte zu rechnen. Die Breite des äußeren Fahrstreifens wird dann etwas kleiner, die des inneren etwas größer als der tatsächliche Wert. Beide Einzelfehler gleichen sich jedoch annähernd aus.

Nach dem von der Europäischen Verkehrsministerkonferenz festgelegten Krümmungszuschlag zur Fahrwasserbreite der geraden Strecke

$$B_v = \frac{l^2}{2R} \quad (12)$$

beträgt die Fahrwasserbreite in Krümmungen

$$B_k = B_0 + \frac{l^2}{2R} \quad (13)$$

wobei B_k = Fahrwasserbreite in der Krümmung
 B_o = Fahrwasserbreite auf gerader Strecke
 B_v = Krümmungszuschlag
 l = Länge des größten Typschiffes
 R = Krümmungshalbmesser in Fahrwassermitte.

Nun läßt sich zwischen den Krümmungszuschlägen nach (5) und nach (12) eine einfache Beziehung ableiten. Bei Annahme einer Wasserstraße der Klasse IV (Typschiff $l = 80,00$ m; $b = 9,50$ m) und zweispurigem Verkehr muß der Krümmungszuschlag des Fahrwassers nach (12) gleich dem doppelten Krümmungszuschlag des Fahrstreifens nach (5) sein. Wird näherungsweise $2R + b \sim 2R$ gesetzt, da R gegenüber b sehr groß ist, so erhält man

$$2 \cdot \frac{(1 + \beta)^2}{4} \cdot \frac{l^2}{2R} = \frac{l^2}{2R}$$

oder
$$\beta = \sqrt{2} - 1 = 0,4142$$

Wird von dem Abstandsverhältnis ϵ ausgegangen, so lautet die Beziehung

$$2 \epsilon^2 \cdot \frac{l^2}{2R} = \frac{l^2}{2R}$$

oder
$$\epsilon = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{2} = 0,7071$$

Der Krümmungszuschlag $\frac{l^2}{2R}$ berücksichtigt also nur eine Schräglage bis zu einem Wert $\beta = 0,4142$ ($\epsilon = 0,7071$), die nach (2) und (4) bei Annahme von $R = 500$ m einem Derivationswinkel $\leq 2^\circ$ entspricht.

Die Beziehung zwischen dem Wert $\frac{l^2}{2R}$ und den sich nach (2) und (7) ergebenden Werten für die Fahrwasserbreite einer Wasserstraße der Klasse IV ($B_o = 36$ m, zum Beispiel Main, Neckar) und die Begegnung zweier Typschiffe ($l = 80,00$ m; $b = 9,50$ m) ist in Bild 7 dargestellt. Als Sicherheitsabstände wurden angenommen: $a_1 = a_2 = 4,25$ m und $s = 8,50$ m.

In der geraden Stromstrecke ist dann:

$$B_o = 2 \cdot 4,25 + 8,50 + 2 \cdot 9,50 = 36,00 \text{ m.}$$

5.3 Bestimmung des Derivationswinkels

5.31 Allgemeines

Die vorhergehenden Darlegungen haben ergeben, daß zur Bestimmung der von Wasserfahrzeugen benötigten Fahrwasserbreite in Krümmungen der Derivationswinkel bekannt sein muß.

Der Derivationswinkel wird maßgeblich beeinflusst

- vom Krümmungshalbmesser,
- von der Geschwindigkeit des Wasserfahrzeugs,
- von Länge, Breite und Form des Wasserfahrzeugs.

Von geringem Einfluß sind weitere Faktoren wie

- Querschnittsverhältnis der Wasserstraße
- Spiralströmung
- Windverhältnisse
- Navigationseigenschaften des Wasserfahrzeugs.

Im übrigen wird die Kurvenfahrt auch vom subjektiven Verhalten der Schiffsführung beeinflusst.

Um einen Anhaltspunkt über die Größe des Derivationswinkels von Schubverbänden in Stromkrümmungen zu erhalten, wurden am Niederrhein Radarbeobachtungen durchgeführt.

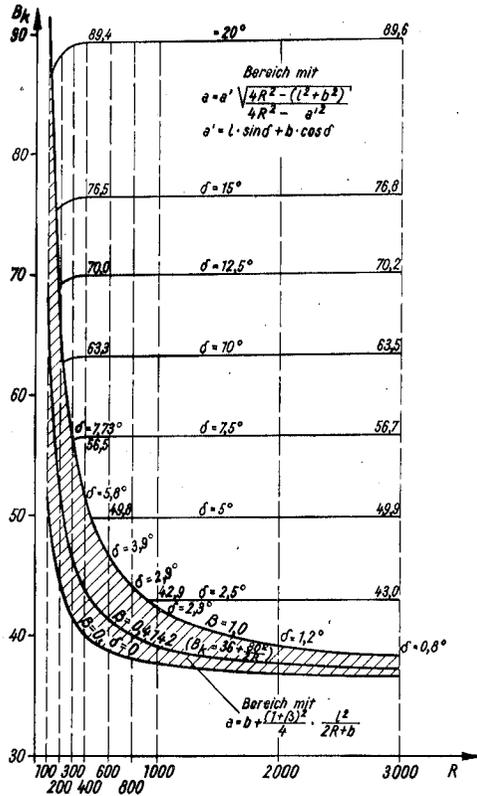


Bild 7

Fahrwasserbreite B_k in Abhängigkeit vom Krümmungshalbmesser R und Derivationswinkel δ — Begegnung zweier Typschiffe der Wasserstraßenklasse IV ($l = 80$ m; $b = 9,50$ m) — Sicherheitsabstände $a_1 = a_2 = 4,25$ m; $s = 8,50$ m.

5.32 Meßverfahren

Mit Hilfe eines auf dem Radargerät montierten Fotoapparates wurde in kurz aufeinander folgenden Zeitabständen das Radarbild der Fahrt eines Schubverbandes in Stromkrümmungen aufgenommen. Die Aufnahmen konnten sowohl von einem vor Anker liegenden als auch von einem vor dem Schubverband herfahrenden Beobachtungsfahrzeug aus gemacht werden. Beobachtungsorte waren die Stromkrümmungen bei Düsseldorf und Benrath (Benrath: km 721,0—723,0; Düsseldorf: km 740,0—744,0) mit Krümmungshalbmessern von 655 bis 700 m. Dabei wurden die auf dieser Rheinstraße verkehrenden Schubverbände „Paul Vidal“ und „Präsident Herrenschmidt“ der CNFR beobachtet.

Durch zeichnerische Auswertung der übereinanderprojizierten Fotoaufnahmen konnten die Längsachse und die Fahrtrichtung der Schubverbände während der Bogenfahrt dargestellt werden (Bild 8). Aus mehreren Beobachtungen ergaben sich die in Tafel 4 wiedergegebenen Werte. Die angegebenen Derivationswinkel geben jeweils den Größtwert der Gierlage während der Fahrt durch die Stromkrümmung an.



Bild 8

Übereinanderprojizierte Radarschirmaufnahmen

5.33 Ergebnis

Als Anhaltspunkt für die Verhältnisse auf dem Niederrhein und bei den angegebenen Fahrzeugabmessungen, Wasserständen und Geschwindigkeiten läßt sich als Mittelwert für die Derivation annäherungsweise angeben:

Derivationswinkel bei Talfahrt $\delta_T = 15^\circ$

Derivationswinkel bei Bergfahrt $\delta_B = 10^\circ$

Beobachtungen über die Größe des Derivationswinkels bei kleineren Halbmessern und kleineren Schubverbänden an Flüssen oder Kanälen sind nicht bekannt.

Fahrtrichtung	Schubverband	Länge	Breite	Geschwindigkeit	Wasserstand	Stromkrümmung	Größter Derivationswinkel
Zu Tal	Paul Vidal	170	28	16,6 km/h	2,63 Pegel Düsseldorf	Düsseldorf- Heerdt	25°
	Paul Vidal	170	28	16,6 km/h	2,63 Pegel Düsseldorf	Düsseldorf- Benrath	14°
	Pr. Herren- schmidt	125	20	18,7 km/h	2,92 Pegel Düsseldorf	Düsseldorf- Heerdt	15°
	Mittelwert:						18°
Zu Berg	Paul Vidal	211	19	7,4 km/h	2,60 Pegel Düsseldorf	Düsseldorf- Heerdt	12°
	Paul Vidal	211	19	7,4 km/h	2,60 Pegel Düsseldorf	Düsseldorf- Benrath	10°
	Mittelwert:						11°

Tafel 4

Zusammenstellung der Radarbeobachtungen von Schubverbänden

5.4 Abhängigkeit des Derivationswinkels vom Krümmungshalbmesser

Außer dem von der Europäischen Verkehrsministerkonferenz festgesetzten Krümmungszuschlag

$$B_v = \frac{l^2}{2R} \quad (12)$$

ist in der deutschen Fachliteratur die Bezeichnung

$$B_v = R_a - \sqrt{R_a^2 - \left(\frac{x_{1,2} \cdot l_{1,2}}{2}\right)^2} \quad (14)$$

bekannt, die ihren Ursprung offensichtlich von den Formeln (2a), (2b), (2c), (9) ableitet.

Bedeutet l_1 die Länge des größten in der Fahrinne verkehrenden Wasserfahrzeugs, l_2 die Gesamtlänge aller in einem Stromquerschnitt befindlichen Wasserfahrzeuge, so ergibt sich der Krümmungszuschlag $K_r (= B_v)$ als Stich des zu einem beliebigen Krümmungshalbmesser gehörenden Bogenabschnitts über der konstant betrachteten Sehne $x_1 \cdot l_1$ beziehungsweise $x_2 \cdot l_2$ ($x_1 \cdot l_1 = x_2 \cdot l_2$). Unterstellt man die Richtigkeit dieser Beziehung — die noch mittels weiterer Beobachtungen des Derivationswinkels in verschiedenen Stromkrümmungen erhärtet werden müßte —, so kann der Wert „x“ ermittelt werden, indem man den für einen bekannten Derivationswinkel nach (1), (2), (2a), (2b), (2c), (7) oder (9) ermittelten Krümmungszuschlag in Gleichung (14) einführt.

Für die stärkste Niederrheinkrümmung (Einzelangaben siehe Abschnitt 5.5) wurde unter Zugrundelegung der Näherungsformel (1) gefunden:

$$B_v = K_r = \sum l_1^n \cdot \sin \vartheta - \sum b_1^n \cdot (1 - \cos \vartheta) = R_a - \sqrt{R_a^2 - \left(\frac{3,12 \cdot l_1}{2}\right)^2}$$

$$\text{Mit} \quad \frac{R_a}{\sum l_1^n} = \frac{R}{335} = y$$

$$\text{und} \quad \frac{\sum b_1^n}{\sum l_1^n} = \frac{33,60 + 22,40}{335} = 0,16717 = C$$

$$\text{erhält man} \quad y - \sqrt{y^2 - 0,87958} = \sin \vartheta - C \cdot (1 - \cos \vartheta)$$

Da $y - \sqrt{y^2 - 0,87058} = Y$ für jeden Krümmungshalbmesser bekannt ist, kann eingeführt werden

$$Y = \sin \vartheta - C (1 - \cos \vartheta)$$

Die Kurven für ϑ , $\sin \vartheta$, $\cos \vartheta$ und für den Krümmungszuschlag $K_r = B_v$ sind auf Bild 9 dargestellt.

5.5 Der Rhein

Mit den auf dem Niederrhein ermittelten Derivationswinkeln für zu Berg und zu Tal fahrende Schubverbände konnte geprüft werden, welche Fahrwasserbreite in den starken Stromkrümmungen im Falle einer Begegnung der zugelassenen Schubverbände benötigt wird.

Abmessungen, Derivationswinkel und Sicherheitsabstände:

- Bergfahrt $l = 185$ m; $b = 22,40$ m; $\delta_B = 10^\circ$;
- Talfahrt $l = 150$ m; $b = 33,60$ m; $\delta_T = 15^\circ$;
- Außenhalbmesser der Stromkrümmung $R_a = 750$ m;
- Abstand vom Fahrwasserrand $a_1 = a_2 = 5,00$ m;
- Begegnungsabstand $s = 15,00$ m.

Die Berechnung nach (9) ergab eine Verkehrsbreite in der Talfahrt mit $a_T = 70,30$ m und in der Bergfahrt mit $a_B = 53,80$ m, so daß die notwendige Fahrwasserbreite in der Krümmung

$$B_k = 5,0 + 70,30 + 15,0 + 53,80 + 5,0 = 149,10 \text{ m}$$

beträgt. Rechnet man nicht nach (9), sondern nach (1), so ergibt sich B_k zu 150,10 m.

Somit können Schubverbände der festgesetzten Größtabmessungen bei Wasserständen bis etwa 50 cm über GIW unbeschränkt verkehren; bei kleineren Wasserständen muß ihre Begegnung in diesen Stromkrümmungen unterbleiben.

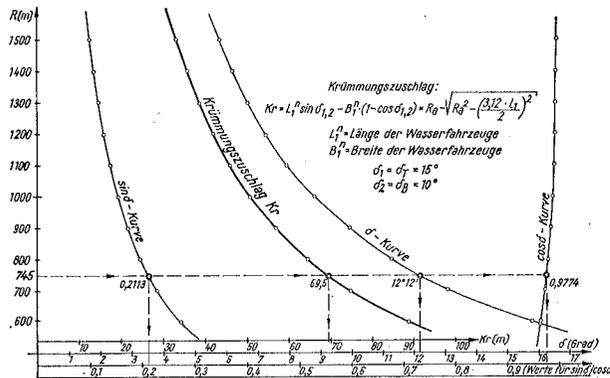


Bild 9
Ermittlung des Krümmungszuschlages für den Niederrhein

5.6 Übrige Wasserstraßen der Bundesrepublik Deutschland

Mit Ausnahme der beschriebenen Beobachtungen am Niederrhein wurden an den deutschen Wasserstraßen noch keine Messungen zur Ermittlung des Derivationswinkels vorgenommen. Um einen Überblick über die Größenordnung der Krümmungszuschläge zu bekommen, sollen folgende Annahmen getroffen werden:

- größter Derivationswinkel bei Talfahrt $\delta_T = 15^\circ$
- größter Derivationswinkel bei Bergfahrt δ_B sei halb so groß wie δ_T
- für eine Schiffslänge $l = 80,00$ m gelten Derivationswinkel, die sich aus dem Krümmungszuschlag $\frac{80^2}{2R}$ errechnen, wobei wieder $\delta_T = 2\delta_B$ ist.
- bei einem Krümmungshalbmesser $R \geq 3000$ m sei der Derivationswinkel $\delta = 0$.

Unter diesen Annahmen, auf deren rein hypothetische Natur noch einmal besonders hingewiesen wird, wurden in Bild 10 die Beziehungen zwischen δ und R für verschiedene Schiffslängen l bei der Talfahrt dargestellt.

Die Ermittlung der zulässigen Abmessungen unter Verwendung der Derivationswinkel nach Bild 10 soll nun am Beispiel der Mosel erläutert werden, während für die übrigen Wasserstraßen nur das Ergebnis angegeben wird.

Für folgende Verkehrssituationen wird die notwendige Fahrrinnenbreite ermittelt:

- a) Richtungsverkehr der Schubverbände
- b) Begegnung Schubverband — Motorgüterschiff
- c) Begegnung von zwei Schubverbänden

Die Abmessungen der verkehrenden Schiffe und des Fahrwassers der Mosel sind:

- 1500-t-Kahn, $l = 80$ m, $b = 10,50$ m
- Kleinster Krümmungshalbmesser $R_{min} = 350$ m
- Fahrwasserbreite in der Geraden $B_0 = 40$ m
- Krümmungszuschlag entsprechend der Norm $B_v = \frac{80^2}{2R}$
- Krümmungszuschlag zur Ermöglichung eines probeweisen Verkehrs von kleineren Schubverbänden $B_v = \frac{142^2}{2R}$
- Sicherheitsabstände für Motorgüterschiffe
 $a_1 = a_2 = 4,75$; $s = 9,50$ m;
- Sicherheitsabstände für Schubverbände
 $a_1 = a_2 = 5,25$; $s = 10,50$ m;
- Sicherheitsabstand für Begegnung Schubverband — Motorgüterschiff
 $s = \frac{1}{2} \cdot (9,50 + 10,50) = 10,00$ m.

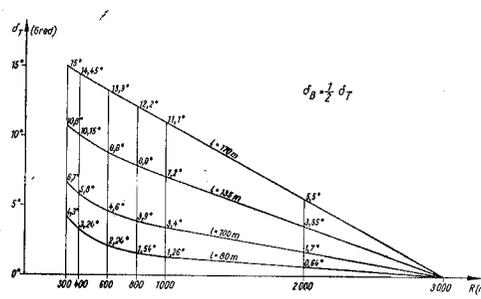


Bild 10

Derivationswinkel δ in Abhängigkeit vom Krümmungshalbmesser R und von der Länge l des Schubverbandes (Annahme)

Die Berechnung wird für Schubverbände von $l = 100$ m, $l = 135$ m und $l = 170$ m Länge durchgeführt und zwar für Krümmungshalbmesser von $R = 300$ m, $R = 350$ m, $R = 400$ m, $R = 600$ m, $R = 800$ m, $R = 1000$ m, $R = 2000$ m und $R = 3000$ m.

Die so berechneten notwendigen Fahrrinnenbreiten sind in Bild 11 den Abmessungen gegenübergestellt, die dem Ausbau zugrunde gelegt und nach der Formel:

$$B_k = B_0 + \frac{l^2}{2R} \text{ für } l = 80 \text{ m und } l = 142 \text{ m berechnet wurden.}$$

Als Ergebnis ist festzuhalten:

- a) Eine Verbreiterung des Fahrwassers mit einem Krümmungszuschlag $B_v = \frac{80^2}{2R}$ reicht lediglich aus, um einen Richtungsverkehr (Verkehrssituation a) von Schubverbänden bis zu etwa 145 m bis 150 m Länge zulassen zu können.
- b) (1) Eine Verbreiterung des Fahrwassers mit einem Krümmungszuschlag $B_v = \frac{142^2}{2R}$ reicht für den Verkehr von Schubverbänden von 100 m Länge ohne Einschränkung aus; die Begegnung von Schubverbänden mit Motorgüterschiffen und von Schubverbänden untereinander ist möglich (Verkehrssituation c).
- (2) Werden nur Begegnungen von Schubverbänden mit Motorgüterschiffen (Verkehrssituation b) zugelassen, so darf die zulässige Länge der Schubverbände 135 m nicht überschreiten.
- (3) Schubverbände von 170 m Länge können nur im Richtungsverkehr (Verkehrssituation a) zugelassen werden.

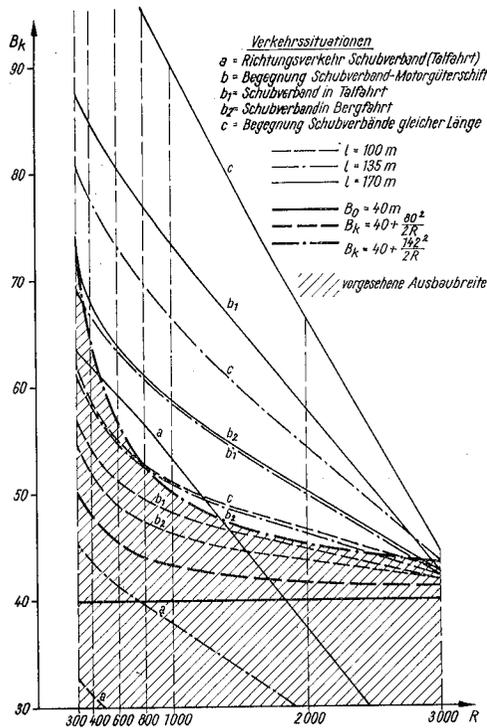


Bild 11

Notwendige Fahrwasserbreite in Abhängigkeit vom Krümmungshalbmesser und von der Länge des Schubverbandes, dargestellt am Beispiel der Mosel

Ähnlich ungünstig sind die vorhandenen Verhältnisse bei allen anderen Wasserstraßen der Bundesrepublik, ausgenommen Elbe und Donau. Das Ergebnis der Untersuchungen ist in Tafel 5 festgehalten.

Wasserstraße	Klasse	Abmessungen des Fahrwassers (bei NW bzw. GIW)		Mögliche Länge starrer Schubverbände nach Tafel 2	Zulässige Länge und Breite starrer Schubverbände auf Grund der Krümmungsverhältnisse ^{1) 2)}						Bemerkungen
		Breite	kleinster Halbmesser		Verkehrssituation a Richtungsverkehr der Schubverbände		Verkehrssituation b Begegnung Schubverband-Motorgüterschiff		Verkehrssituation c Begegnung von zwei Schubverbänden		
					Länge m	Breite m	Länge m	Breite m	Länge m	Breite m	
Rhein											
Emmerich—Köln	V	150	675	150—185	—	—	—	—	150—185	22,4—33,6	1) Den Untersuchungen liegen hypothetische Annahmen für den Derivationswinkel zugrunde
Köln—St. Goar	V	150	700	150—185	—	—	—	—	150—185	22,4—33,6	
St. Goar—Mannheim ³⁾	V	120	355	150—185	—	—	150—185	22,4—33,6	150	22,4	
Mannheim—Straßburg	V	80—90	725	150—185	150—185	22,4—33,6	150—185	22,4	100	22,4	
Straßburg—Breisach	V	70	815	—	150—185	22,4—33,6	80—100	22,4	185	11,5	
Neckar	IV	36	350	110	110 ⁴⁾	11,5	100	11,5	100	11,5	2) Als größte Abmessungen sind für den Rhein festgesetzt: Bergfahrt l = 185 m; b = 22,4 m Talfahrt l = 150 m; b = 33,6 m
Main											
Mündung—Offenbach	V	50	500	185	150—170	11,5	100	11,5	100	11,5	
Offenbach—Bamberg	IV	36	350	185	140—145	11,5	100	11,5	100	11,5	
Main-Donau-Kanal	IV	40	1000	185	185	11,5	100	11,5	100	11,5	
Donau	IV	70	400	185	150—185	22,4 ⁴⁾	100	22,4	185	11,5	
Mosel	IV	40	350	170	170	11,5	135	11,5	100	11,5	
Ruhr	V	31,4	600	130	110—140	9,5	80	9,5	80	9,5	3) In der Binger-Lochstrecke ist nur Richtungsverkehr möglich
Rhein-Herne-Kanal	IV	23	700	165	110—140	9,5	80	9,5	80	9,5	
Wesel-Datteln-Kanal	IV	23	600	185	110—140	9,5	80	9,5	80	9,5	
Datteln-Hamm-Kanal	III	23	600	85	85 ⁴⁾	8,2 ⁴⁾	75	8,2	75	8,2	4) bedingt durch die nutzbare Länge oder Breite der Schleusen
Dortmund-Ems-Kanal											
Dortmund-Bevergern	IV	26	900	185	125—150	9,5	80	9,5	80	9,5	
Bevergern-Emden	III	20—28	500	165	110—140	9,5	80	9,5	80	9,5	
Mittellandkanal	III	23,2	900	185	110—140	8,2	75	8,2	75	8,2	
Küstenkanal	III	24,5—26,5	750	105	110—140	9,5	80	9,5	80	9,5	
Mittelweser	IV	33,1	200	185	110	9,5	80	9,5	80	9,5	
Elbe	V	150	800	150—185	—	—	—	—	150—185	22,4—33,6	
Elbe-Lübeck-Kanal	III	22	600	80	80 ⁴⁾	8,2 ⁴⁾	75	8,2	75	8,2	

Tafel 5

Zulässige Länge und Breite für Schubverbände auf Grund der Krümmungsverhältnisse der Binnenwasserstraßen der Bundesrepublik Deutschland

5.7 Ergebnis

Der Verkehr starrer Schubverbände mit größeren Abmessungen ist auf dem Nieder- und Mittelrhein sowie auf der Elbe bis zu einer Länge von 185 m bei einer Breite von 22—33 m möglich. Für die übrigen deutschen Wasserstraßen läßt sich ein endgültiges Ergebnis nicht mitteilen, da keine Unterlagen über die Größe der zu erwartenden Derivationswinkel vorliegen. Nach dem Ergebnis der hypothetischen Untersuchung läßt sich aber schon sagen, daß die obere Grenze für starre Schubverbände bei einer maximalen Länge von 100 m liegen wird. Die Breite wird durch die nutzbare Schleusenbreite (12,0 m) auf 11,50 m begrenzt.

Für den Tiefgang der Schubverbände gelten dieselben Grenzen wie für Schleppverbände oder einzeln fahrende Motorgüterschiffe (Tafel 1). Die zulässige Höhe der festen Aufbauten über der Wasserlinie richtet sich nach der Durchfahrtshöhe unter den Brücken und kann zwischen 3,80 m und 9,00 m (Tafel 1) liegen.

Es werden noch umfangreiche Untersuchungen nötig sein, um für alle vorkommenden Verhältnisse einen Anhaltspunkt für die Größe der Derivationswinkel zu erhalten. Das Ziel muß sein, aus umfangreichem Beobachtungsmaterial (Radarbeobachtungen) gegebenenfalls in Verbindung mit Modellversuchen, eine Beziehung zwischen dem Derivationswinkel eines Schubverbandes einerseits, seiner Länge, Breite, Form, Geschwindigkeit und dem Halbmesser der zu durchfahrenden Krümmung andererseits, herzustellen, aus der sich der zu erwartende Maximalwert für die Derivation ergibt.

Da sich die Untersuchungen ausschließlich auf den Verkehr starrer Schubverbände erstrecken, gelten die angegebenen zulässigen Abmessungen nur für starre Schubverbände in der bisher üblichen Form. Die mitgeteilten Ergebnisse ändern sich und werden günstiger, wenn von dieser Form des starren Verbandes abgewichen oder durch zusätzliche schiffbauliche Mittel die Derivation bei der Fahrt durch Krümmungen erheblich verringert wird, beispielsweise durch bewegliche Kupplung oder durch Anordnung eines Schottel-Propellers, Bug-Flächenruders, Bug-Strahlruders usw. Da hierüber aber noch nicht genügend Erfahrungen vorliegen, konnten diese Möglichkeiten nicht in die Untersuchungen einbezogen werden.

6. Schifffahrt mit Schubverbänden

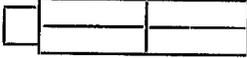
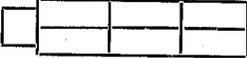
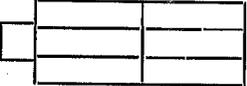
In Abschnitt 2 ist darauf hingewiesen worden, daß bei den Schubverbänden des Typs „Wasserbüffel“ eine Gleichwertigkeit hinsichtlich des Schiffswiderstandes im Vergleich zum Schleppverband erst erreichbar ist, wenn die Gesamtlänge das Maß von 200 m überschreiten könnte. Dieser Vergleich bezieht sich auf eine Wassertiefe von 5,0 m. Auf der Strecke Rotterdam—Ruhrort (mit einer mittleren Wassertiefe von 7,75 m) ist der Vierer-Schubverband „Wasserbüffel“ mit einem Einheitswiderstand von 1,76 kg/t und einer Geschwindigkeit von 12 km/h einem Schleppverband, bestehend aus 4 Kähnen von gleicher Gesamtladefähigkeit, in diesem Sinne gleichwertig. Die Verschiebung der Verhältnisse mit der Wassertiefe erklärt sich daraus, daß der sich mit zunehmender Wassertiefe verringere Anteil des Formwiderstandes auf 5,0 m Wassertiefe beim Schubverband 70 %, beim Schleppverband jedoch nur 50 % des Gesamtwiderstandes ausmacht.

6.1 Das Manövrieren des Schubverbandes

Voraussetzung für die Sicherheit des Schubverbandes ist die Möglichkeit, den Verband durch Rückwärtsarbeiten der Schubbootpropeller gegen den Strom zu halten und ihm darüber hinaus noch eine gewisse Geschwindigkeit bergwärts über Heck zu geben. Modellversuche und Probefahrtmessungen haben gezeigt, daß diese Voraussetzungen

heute ohne besondere Schwierigkeiten verwirklicht werden können. So wurden zum Beispiel folgende Ergebnisse beim Stoppen auf voller Fahrt erzielt:

Talfahrt in einer Rheinschleife — Stromgeschwindigkeit 5,86 km/h (1,63 m/s)

Formation	Motorleistung des Schubbootes P _{Se}	Länge des Schubverbandes m	Stoppweg m	Schiffslängen
	1260 600	164	208 380	1,27 2,32
	2500	228	260	1,14
	2500	164	245	1,50

Die Rückwärtsgeschwindigkeit gegen Wasser betrug etwa 65 bis 75 % der Vorgeschwindigkeit bei gleicher Leistung.

Die allgemeine Manövrierfähigkeit bei der Vorausfahrt ist zwar beim Vierer-Verband, besonders wenn Drehdüsen oder Voith-Schneider-Propeller am Schubboot verwendet werden, ausreichend, doch wachsen die Schwierigkeiten sehr stark mit zunehmender Länge. Vor allem die Fahrt mit leeren Leichtern wird bei Seitenwind zu einem Problem. Aber auch mit beladenen Leichtern ergeben sich noch große Schwierigkeiten, in erster Linie beim Durchfahren von Stromkrümmungen und Engstellen. Durch zusätzliche Steuereinrichtungen am Schubboot allein sind diese Schwierigkeiten nicht zu beseitigen. Für das sichere Manövrieren langer Schubverbände dürfte der Anbau von Steuerorganen am Bug der vorderen Leichter unumgänglich sein. Dies gilt besonders auch deshalb, weil auf dem Rhein mit seiner hohen Verkehrsdichte das Manöver des „Sägens“ beim Durchfahren einer starken Krümmung, wie es in USA üblich ist, nicht durchführbar ist.

Das Durchfahren von Flußkrümmungen mit Fahrzeugen von einer Länge, die nicht mehr klein ist gegenüber dem Krümmungsradius, erfordert infolge des sich einstellenden Derivationswinkels eine Verkehrsbreite, die die Breite des Verbandes erheblich übersteigt. Dieser Flächenbedarf ist von Breite und Länge des Fahrzeugs und vom Derivationswinkel δ abhängig. Während Länge und Breite unveränderlich gegeben sind, besteht eine Möglichkeit, den Derivationswinkel zu beeinflussen.

Der Derivationswinkel, der sich bei einem Schubverband — wie auch bei einem Motorgüterschiff — normalerweise, das heißt ohne zusätzliche Manövrierhilfen, einstellt, ist vom Verhältnis Krümmungsradius zu Schiffslänge, von der Wassertiefe und vom Tiefgang abhängig. Die Fahrgeschwindigkeit und damit die Motorleistung hat keinen im Modellversuch nachweisbaren Einfluß. Der Ruderwinkel am Schubboot ist für den Durchmesser der kreisförmigen Bahn maßgebend, die der Verband durchfährt und somit in dem Quotienten

$$\frac{\text{Durchmesser des Schwerpunktkreises}}{\text{Länge des Verbandes}} = \text{spezifischer Drehkreisdurchmesser}$$

enthalten.

Mit Schwerpunkt ist hier der Lateralschwerpunkt der Leichterkombination gemeint. Im Modellversuch wurden 2 Arten von Manövriehilfen daraufhin geprüft, ob und inwieweit sie für einer Verbesserung der Manövrieeigenschaften und eine Verminderung der Verkehrsbreite in Betracht kommen:

- a) eine normale Bug-Flächenruderanlage
- b) ein Bug-Strahlruder in Form eines schwenkbaren Ruderpropellers.

Beide Arten von Manövriehilfen befinden sich am Bug der vorderen Leichter.

6.2 Querkraft- und Drehkreismessungen

Um die Wirksamkeit der Bugsteuerorgane zu prüfen, wurden zunächst Querkraftmessungen durchgeführt. Der Vorteil des Bug-Strahlruders ließ sich eindeutig erkennen: Es ist in seiner Wirkung von der Fahrgeschwindigkeit nahezu unabhängig, während die Wirkung des normalen Flächenruders etwa mit dem Quadrat der Geschwindigkeit zunimmt. Dabei erreicht das Bugruder unter Umständen wesentlich höhere absolute Querkräfte. Für Ausweichmanöver auf geraden Flußstrecken, bei denen mit fast unverminderter Geschwindigkeit gefahren wird, ist ein solches Ruder also eine sehr wertvolle Hilfe.

Die erzeugten Querkräfte bei gleichem Ruderwinkel sind sogar größer als die Querkräfte, die mit einem Heckruder gleicher Fläche an einem Rhein-Herne-Kanal-Kahn erzielt wurden. In allen Fällen, bei denen die Fahrgeschwindigkeit stark abnimmt, beispielsweise beim Manövrieren in einer Hafeneinfahrt, beim Wenden auf dem Strom oder auch beim Befahren enger Krümmungen, wird das Bug-Flächenruder mehr oder weniger wirkungslos.

Da es im vorliegenden Fall auf die vergleichende Beurteilung der Wirksamkeit zusätzlicher Steuerorgane für das Manövrierverhalten von Schubverbänden ankam, wurde der Drehkreisversuch für die modellmäßige Klärung der Zusammenhänge gewählt.

Die Drehkreisversuche wurden mit einer größeren Zahl von Schubverbänden verschiedener Zusammenstellung ausgeführt:

- a) ein Schubboot mit 2 Drehdüsen bei 5,0 m Wassertiefe,
- b) Vierer-Verband (Schubboot mit Drehdüsen) bei mehreren Wassertiefen,
- c) 2, 4 und 6 Leichter und 3 verschiedene Schubboot-Typen bei 5,0 m Wassertiefe.

Der Leichtertiefgang betrug bei allen beschriebenen Versuchen 2,75 m. Gemessen wurden:

- Drehkreisdurchmesser
- Geschwindigkeit im Drehkreis
- Derivationswinkel im stationären Zustand.

Bild 12 zeigt eine Übersicht der Ergebnisse für die verschiedenen Schubverbände:

- a) ohne Manövriehilfen,
- b) mit Bug-Flächenruder, Anstellwinkel 40° ,
- c) mit Bug-Strahlruder (Ruderpropeller) 200 WPS.

Der Anstellwinkel der Drehdüsen des Schubbootes betrug 40° . Die Motorleistung des Schubbootes lag konstant bei 1200 PSe.

Aus Bild 12 geht hervor, daß die Drehkreisdurchmesser mit Bug-Strahlruder kleiner, mit Bug-Flächenruder etwas größer sind als die Werte ohne Manövriehilfen am Bug der Leichter.

Während die Ergebnisse mit dem quer zur Fahrtrichtung arbeitenden Ruderpropeller durch die Wirkung von etwa 2,2 t Querkraft am Bug des jeweiligen Verbandes bedingt sind, liegen die Verhältnisse beim Bug-Flächenruder sehr viel ungünstiger. Zunächst wurde im Versuch nur eine korrespondierende Drehkreisgeschwindigkeit von 6,9 km/h am Bug erreicht; die Querkraft ist also in allen Fällen beim Ruderpropeller größer. Hinzu kommt, daß die Bugruder nicht unter einem Winkel von 40°, sondern, infolge der Lage des Schubverbandes im Drehkreis, unter wesentlich kleineren Winkeln in der Größenordnung von 10° bis 25° angeströmt werden. Die mit Bugrudern erzielte Querkraft reicht offenbar nicht aus, um die Zunahme der Lateralfläche durch die Bugruder in ihrer Tendenz zur Vergrößerung des Drehkreisdurchmessers zu kompensieren, geschweige denn eine Verkleinerung des Drehkreises herbeizuführen. Die Derivationswinkel mit Bug-Flächenruder sind durchweg noch etwas größer als ohne Manövrierhilfe. Mit Bug-Strahlruder gehen die Derivationswinkel dagegen eindeutig und nicht unerheblich gegenüber dem Zustand ohne Manövrierhilfe zurück.

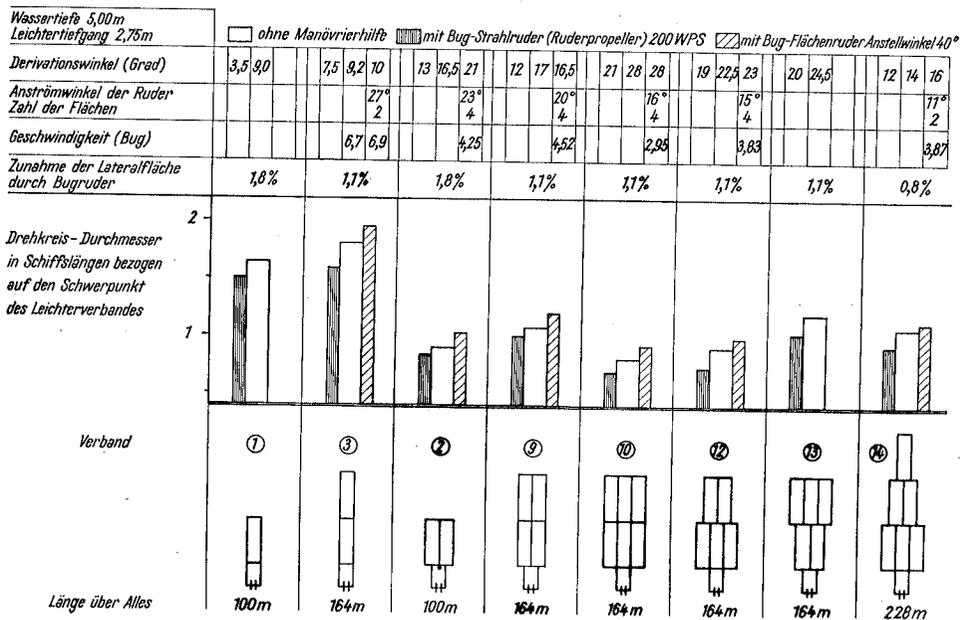


Bild 12

Drehkreisversuche mit Schubverbänden — Durchmesser der Schwerpunktkreise in Schiffslängen (Schubboot mit Drehdüsen, Düsenwinkel 40°)

- a) ohne Manövrierhilfen
- b) mit Bug-Strahlruder
- c) mit Bug-Flächenruder

Das Diagramm Bild 13 zeigt, daß eine Beeinflussung des Derivationswinkels im gewünschten Sinn nur bei Verwendung von Ruderpropellern (Bug-Strahlrudern) möglich ist. Die Werte mit Bug-Flächenruder sind nicht eingetragen, sie streuen um die Kurve des Zustands ohne Manövrierhilfen.

Wegen der Abmessungen des Manövrierteichs war es nicht möglich, Drehkreisdurchmesser von mehr als 2,5 Schiffslängen zu fahren. Aus Bild 13 ist jedoch zu schließen, daß auch bei den in der Praxis auftretenden Fällen noch mit einer Verminderung des

Derivationswinkels um etwa 20—30 % zu rechnen ist. Die kleinsten Krümmungsradien des Fahrwassers des Rheins liegen bei 350 m in Nähe der Loreley. In der Benrather Schleife beträgt der mittlere Krümmungshalbmesser 700 m, die stärkste Krümmung bei Düsseldorf hat einen Halbmesser von 675 m. Bei einem Schubverband von 200 m Länge und 18 m Breite ist an den oben erwähnten Stellen ohne Manövriehilfe mit einer Verkehrsbreite von 60 bis 70 m zu rechnen. Bei Einsatz des Bug-Strahlruders von 200 WPS kann die Verkehrsbreite um etwa 20 % auf 45 bis 55 m verringert werden.

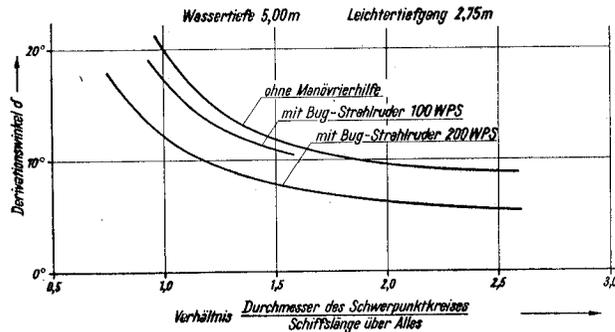


Bild 13

Drehkreisversuche mit Schubverbänden — Derivationswinkel δ und spezifischer Drehkreisdurchmesser.

Um ein befriedigendes Resultat zu erzielen, ist für den Ruderpropeller eine Leistung von 150—200 WPS erforderlich. Diese Erkenntnis deckt sich mit praktischen Erfahrungen der Leistungsbemessung von Bug-Strahlrudern. Während also mit dem Bug-Strahlruder ein besseres Manövrieren bei allen Fahrgeschwindigkeiten erreicht wird, konnte dies im Modellversuch mit dem Bug-Flächenruder nicht nachgewiesen werden. Bei Überhol- und Begegnungsversuchen im langen Schleppkanal war jedoch klar zu erkennen, daß eine solche Ruderanlage bei Geschwindigkeiten über 6—7 km/h dem Schubverband eine wesentlich raschere Reaktionsfähigkeit verleiht (zum Beispiel bei Ausweichmanövern). Auch das Manövrieren über Heck wird durch die in diesem Fall als Hecksteuerung wirkenden Ruderflächen wesentlich verbessert. Das Bug-Flächenruder bietet aber im Gegensatz zum Bug-Strahlruder keine Möglichkeit zu einer wirksamen Verminderung der Verkehrsbreite in engen Strömungskrümmungen. Das aktive Bug-Strahlruder hat darüber hinaus noch den besonderen Vorteil, daß es beim An- und Ablegen sowie beim Wenden im Strom und beim Manövrieren in Schleusen und in Hafeneinfahrten eine ausgezeichnete Hilfe bedeutet. Es ist ferner in der Lage, bei Fahrt mit leeren Leichtern dem Seitenwind entgegenzuwirken, der durch das Versetzen des Schubverbandes nach Lee eine ernste Gefahr, besonders im schmalen Fahrwasser, bedeutet. Es sei auch darauf hingewiesen, daß ein Ruderpropeller am Bug der vorderen Leichter dazu geeignet ist, das Zusammenfügen und Auflösen des Schubverbandes zu beschleunigen und das Problem des Verholens der Leichter im Hafen zu lösen. Schließlich erhöht der Ruderpropeller, der am fahrenden Verband dauernd in Betrieb ist, die für den Vortrieb verfügbare Motorleistung und erleichtert damit gegebenenfalls das Befahren von Flußstrecken mit geringer Wassertiefe und hoher Stromgeschwindigkeit.

Bild 12 zeigt ferner, daß die Art der Zusammenstellung des Schubverbandes, also die dadurch gebildete „Schiffsform“, nicht nur für den Einheitswiderstand, sondern auch für das Manövrieren von erheblicher Bedeutung ist. So erweisen sich Länge, Breite

und Schwerpunktlage des Schubverbandes als wichtige Einflußgrößen auf das spezifische Drehkreisverhalten. Im einzelnen ist folgendes festzustellen:

- a) Mit zunehmender Länge bei konstanter Breite und konstantem Tiefgang wächst das Verhältnis

$$\frac{\text{Drehkreisdurchmesser}}{\text{Verbandslänge}} \quad (\text{spezifischer Drehkreisdurchmesser})$$

bei leicht zunehmenden Derivationswinkel.

- b) Mit zunehmender Breite bei konstanter Länge und konstantem Tiefgang nehmen spezifischer Drehkreisdurchmesser und Derivationswinkel stark ab.
- c) Die Verlagerung des Verdrängungsschwerpunktes nach hinten ohne Veränderung von Länge, maximaler Breite und Tiefgang bringt eine Verminderung des spezifischen Drehkreisdurchmessers und eine Verkleinerung des Derivationswinkels.

Es sei noch darauf hingewiesen, daß sich beim Durchfahren von kurzen Stromkrümmungen die im Versuch nach Erreichen des stationären Drehzustandes gemessenen Derivationswinkel möglicherweise nicht voll ausbilden. Für die vergleichende Beurteilung, die hier durchgeführt wird, bleibt dies jedoch ohne Bedeutung. Mit Ausnahme des Einflusses der Schwerpunktlage steht somit allen Verbesserungen der Manövrierfähigkeit mit Hilfe der Formgebung des Schubverbandes entgegen, daß dadurch die Einheitswiderstände erhöht werden. Daraus ergibt sich die Forderung nach besonderer Beachtung der Schwerpunktlage.

Es erscheint bei Betrachtung von Bild 12 durchaus denkbar, den bisher gebräuchlichen Vierer-Verband nach dem Vorbild des „Wasserbüffel“ ohne Schwierigkeiten durch den aus 5 Leichtern bestehenden Verband mit einer Ladefähigkeit von insgesamt 6500 t zu ersetzen. Man verzichtet dabei zunächst auf eine Vergrößerung der Gesamtlänge, erreicht aber günstigere Manöviereigenschaften und voraussichtlich einen nur wenig höheren Einheitswiderstand als beim Vierer-Verband.

7. Handhabung der aus dem Schubverband gelösten Schubleichter

7.1 Fortbewegung einzelner Schubleichter außerhalb ihres Schubverbandes

Für einen aus dem Schubverband gelösten Schubleichter bedarf es besonderer Bestimmungen, da der Leichter unbemannt ist, er in den meisten Fällen kein Ruder besitzt und hinsichtlich seiner Fortbewegung andere Eigenschaften hat als ein normaler Schleppkahn. Diese Eigenschaften können zum Beispiel durch die Bug- und Heckform, die Breitenmaße oder den Tiefgang bedingt sein. In allen Fällen, in denen Schubleichter außerhalb des Schubverbandes fortbewegt werden, ist die Bemannungsfrage von wesentlicher Bedeutung, und je nach Art der Fortbewegung kann auf eine Bemannung verzichtet werden oder nicht. Grundsätzlich gilt der Verzicht auf die Bemannung nur, solange die Leichter selbst ein Bestandteil des Schubverbandes sind.

Ein aus dem Schubverband gelöster Schubleichter kann über kurze oder lange Entfernungen außerhalb des Schubverbandes fortbewegt werden. Nach der „Bekanntmachung für die Rheinschiffahrt über die Schubschiffahrt“ vom 1. 6. 1959 dürfen sich die Schubleichter auf kurze Entfernungen nur unter Beachtung der von der zuständigen Behörde erlassenen Vorschriften fortbewegen. Auf Grund dieser Verordnung sind Vorschriften erlassen, nach denen die Schubleichter bei der Zusammenstellung oder Auflösung von

Schubverbänden nur einzeln und nur durch ein Schubboot auf kurze Entfernungen verholt werden dürfen. Das Schubboot kann durch je ein an Backbord und an Steuerbord neben dem Heck des Schubleichters gekuppeltes Schleppboot ersetzt werden. Das Schubboot oder die Schlepper müssen eine ausreichende Maschinenleistung und Steuerfähigkeit besitzen. Der Unterschied der Maschinenleistung der Schlepper darf 100 PS nicht überschreiten.

Abweichungen von diesen Vorschriften bedürfen der Erlaubnis der zuständigen Wasser- und Schifffahrtsdirektion. Eine Abweichung besteht zum Beispiel dann, wenn der Leichter von einem Schlepper (und zwar dem stärkeren) am Strang geschleppt wird und ein zweiter Schlepper das Heck hält. Auf kurzen Strecken haben sich die auf dem Niederrhein eingesetzten Bugsierschubboote besonders bewährt, die den Zubringerdienst zwischen Liegeplatz und Hafen übernehmen, zum Teil auch einzelne Leichter in Häfen des Kanalgebietes schieben. Das Verholen von zwei längsseits gekuppelten Leichtern erfolgt auf kurzen Strecken ausschließlich durch die Schubboote selbst.

Wenn ein Leichter außerhalb eines Schubverbandes über lange Strecken fortbewegt werden soll, wird eine Sondergenehmigung nach Art. 4 b der „Untersuchungsordnung für Rheinschiffe und -flöße“ notwendig, in welcher durch die Schiffsuntersuchungskommission die Art der Verschleppung festgelegt wird. Diese Fortbewegung kann auch durch ein Motorgüterschiff erfolgen, das den Schubleichter längsseits nimmt. Hierbei ist wesentlich, ob der Schubleichter ein Ruder hat, das kurzfristig eingesetzt werden kann.

7.2 Das Stilliegen der Schubleichter

Das Stilliegen der Schubleichter muß derart erfolgen, daß keine oder kaum eine Bemannung benötigt wird, da sonst einer der wesentlichsten Vorzüge der Schubschiffahrt verloren geht. Die Leichter müssen also so vor Anker liegen oder festgemacht werden, daß sie kein Hindernis für die Schifffahrt bilden können und auch ohne Bewachung ihren Platz nicht verlassen. Daher ist in der „Bekanntmachung für die Rheinschiffahrt über die Schubschiffahrt“ vorgeschrieben, daß beim Stilliegen einzelne Schubleichter vorn und hinten so befestigt sein müssen, daß sie ihre Lage nicht verändern können. Dies muß auch unter den ungünstigsten Umständen, die an der Liegestelle auftreten können, für die Gesamtdauer des Stilliegens gewährleistet sein. Nur dann, wenn diese Forderungen erfüllt sind, kann auf jegliche Bemannung verzichtet werden. In allen anderen Fällen ist eine Bewachung notwendig.

Entsprechend der Entwicklung der Schubschiffahrt werden Liegeplätze für verschiedene Zwecke benötigt. Das Schubboot bringt die Schubleichter auf dem Strom in Hafennähe. Hier muß ein Liegeplatz vorhanden sein, auf dem die Schubverbände aufgelöst werden; denn fast nie wird der Idealfall erreicht werden, daß das Schubboot den gesamten Schubverband unmittelbar an den Lade- und Lösplatz legen kann. Von diesem Liegeplatz aus werden die Leichter einzeln oder zu zweit in den Hafen zum Löschen und Laden gebracht und liegen hier für kurze Zeit an einem Umschlagplatz, der meistens auf die Belange der Schubschiffahrt ausgerichtet sein wird. Das Zusammenstellen der Schubverbände geschieht dann wieder auf dem Strom, nachdem die Leichter einzeln oder zu zweit den Hafen verlassen haben. Ferner sind Liegemöglichkeiten, beispielsweise am Mittelrhein, an den Stellen vorzusehen, an denen aus nautischen Gründen eine Formationsänderung (Verkürzung oder Verlängerung des Schubverbandes) notwendig wird und ein Teil der Leichter vor Anker geht. Schließlich wird noch ein Liegeplatz zum Ablegen von solchen Leichtern benötigt, die längere Zeit keine Verwendung in einem Schubverband finden können. Es sind demnach 4 Arten von Liegeplätzen zu unterscheiden, die der Zusammenstellung oder Auflösung der Schubverbände, der Änderung ihrer Formationen, dem Umschlag und dem Ablegen einzelner Leichter dienen.

Wegen der Eigenart der Schubleichter wird es im Normalfall notwendig sein, Liegeplätze vorzusehen, die ausschließlich für die Leichter bestimmt sind. Dies gilt vor allem für die zu Schubleichtern umgebauten Schleppkähne, auf die im einzelnen hier nicht weiter eingegangen wird. Die Formierungsplätze müssen genügend Bewegungsfreiheit für das Zusammenstellen und Auflösen der Schubverbände gewährleisten. Andererseits darf der allgemeine Verkehrsablauf nicht gestört werden. Auch müssen ein guter Ankergrund oder ausreichende Festmachermöglichkeiten (Liegeschiffe, Kai, Dalben, Bojen) vorhanden sein.

Auf dem Niederrhein sind heute 2 Formierungsplätze und ein Reserveplatz für die Schubschiffahrt eingerichtet. Auf einem dieser Formierungsplätze ist ein Liegeschiff verankert, das einen Fernsprechananschluß besitzt und auf dem eine Wache wohnt, die die Bewachung des gesamten Liegeplatzes übernimmt. Eine ständige Bewachung ist allein wegen der mit dem Formieren der Schubverbände verbundenen schwierigen Manöver dringend zu empfehlen. Die Leichter liegen entweder längsseits dieses Liegeschiffes oder zu zweit, dritt oder viert vor mehreren Ankern derart, daß ein Schwojen nicht möglich ist und das Fahrwasser frei bleibt.

7.3 Weitere Liegemöglichkeiten

Es wurde geprüft, ob und inwieweit die Anlage von Dalben oder das Ausbringen von Bojen oder die Benutzung von Baggerlöchern ein Liegen von Leichtern auf dem Strom erleichtern kann. Diese Fragen wurden vorläufig nicht weiter verfolgt, unter anderem weil Maßnahmen dieser Art keine Behinderung der sonstigen Schiffahrt mit sich bringen dürfen. Dies ist aber nicht genügend gewährleistet.

8. Nebeneinander von Schubschiffahrt und anderen Schiffahrtsmethoden auf derselben Wasserstraße

Die Maße und Formationen der Schubverbände müssen derart sein, daß sie sich reibungslos in den Verkehrsablauf eingliedern können. Dort, wo dies nicht möglich ist, muß die Schubschiffahrt selbst Beschränkungen und Zeiverluste in Kauf nehmen. Um dieses Nebeneinander von Schubschiffahrt und normaler Schiffahrt zu ermöglichen, sind außer der Festlegung bestimmter Höchstlängen und Formationen für einzelne Strecken folgende schiffbauliche und nautische Mindestforderungen von der Schubschiffahrt zu erfüllen beziehungsweise folgende schiffahrtspolizeiliche Maßnahmen notwendig:

8.1 Forderungen schiffbaulicher und nautischer Art

- a) Schubverbände müssen aus einer normalen Reisegeschwindigkeit heraus, ohne Zuhilfenahme der Ankereinrichtung, in der Talfahrt Kopf vor stoppen können. Die Ankereinrichtung soll nur zur Beschleunigung des Manövers in schwierigen Situationen dienen, da unter anderem auf vielen Strecken ein Ankern nicht möglich oder verboten ist. Das Stoppen Kopf vor ist also von allen Verbänden zu fordern, die wegen ihrer Länge nicht durch Aufdrehen zum Stehen gebracht werden können. Hierdurch wird sichergestellt, daß auch bei plötzlich auftretenden Hindernissen oder Nebel die Schubschiffahrt sich in den allgemeinen Verkehrsablauf einordnet, ohne eine zusätzliche Behinderung für die andere Schiffahrt zu verursachen oder selbst Schaden zu erleiden. Die Forderung entfällt, wenn zum Beispiel ein schiebendes Motorgüterschiff in der Talfahrt seinen Leichter längsseits nimmt und hiermit der Schubverband zum Schleppverband wird, er also aufdrehen kann.

Es wurde bisher davon abgesehen, eine Stoppstrecke und Stoppzeiten vorzuschreiben, da diese Werte sehr stark von der jeweiligen Stromgeschwindigkeit, der Formation

der Schubverbände und der Beladung abhängig sind. Der Schiffsführer muß jedoch den Schubverband derart zusammensetzen und beladen, daß er entsprechend der Stromstrecke und dem Wasserstand rechtzeitig Kopf vor anhalten kann und dabei vollkommen manövrierfähig bleibt. Diese Auflage wird in das Schiffsattest des Schubverbandes eingetragen.

- b) Die Schubverbände müssen Rudereigenschaften (beziehungsweise Steuereigenschaften) besitzen, mit denen sie kurzfristig die Fahrwasserseite wechseln und plötzlich notwendige Ausweichmanöver bei schwierigen Strömungs- und Windverhältnissen durchführen können. Ein gutes Kurshalten auf engem Raum (Brückendurchfahrten) muß auch bei Querwind möglich sein. Die Krümmungen müssen ohne „backing und flanking“ oder andere zusätzliche Manöver durchfahren werden. Die Beweglichkeit der Schubverbände muß ein Einordnen in den Gesamtverkehr und die volle Berücksichtigung plötzlich auftretender Gefahrenlagen zulassen.

Die Steuerfähigkeit wird durch Einbau von Bug-Strahlrudern oder Schöttel-Navigatoren zu verbessern sein. Der Einbau solcher Anlagen wurde jedoch bisher nicht für unbedingt notwendig gehalten. Versuche mit schiebenden Motorgüterschiffen haben jedoch gezeigt, daß der Verband durch Einbau von Schöttel-Navigatoren ausgezeichnete Manövriereigenschaften erhalten kann.

- c) Die Schubverbände müssen eine Mindestgeschwindigkeit halten können und notfalls zur Erreichung dieser Geschwindigkeit auf eine volle Abladung verzichten oder die Formation so ändern, daß die Mindestgeschwindigkeit erreicht wird. In dem Schiffsattest wird zur Auflage gemacht, daß die Schubverbände zu Berg eine Geschwindigkeit erreichen können, die mindestens der mittleren Geschwindigkeit der Schleppverbände auf der gleichen Strecke zur gleichen Zeit entspricht. Diese Auflage gilt nicht für einige Strecken des Mittelrheins.

8.2 Forderungen schiffahrtspolizeilicher Art

- a) An starken Krümmungen und sonstigen Engstellen ist den Schubverbänden dann das Überholen zu verbieten, wenn sie das Fahrwasser derart einengen, daß ein normaler Verkehrsablauf nicht mehr gewährleistet ist. Am Niederrhein wurden Überholverbote für 8 Teilstrecken erlassen. Überholverbotstafeln für Schubverbände sind bereits in die Rheinschiffahrtspolizeiverordnung aufgenommen worden; auch besteht die Möglichkeit, das Verbot auf Schubverbände von einer bestimmten Länge ab zu beschränken. Mit Hilfe dieser Überholverbotstafeln ist es möglich geworden, bei Bauarbeiten und plötzlich notwendig werdenden Sperrungen oder Schiffahrtsbeschränkungen kurzfristig Überholverbote zu erlassen. Von dieser Möglichkeit wurde in zahlreichen Fällen Gebrauch gemacht.
- b) Es muß die Möglichkeit bestehen, auch das Begegnen von Schubverbänden an schwierigen Engstellen, Baustellen oder bei niedrigen Wasserständen zu verbieten oder von Fall zu Fall zuzulassen. Dies ist möglich, wenn ein fester Wahrschaudienst eingereicht ist. Da ein solcher nur selten zur Verfügung steht und auch sehr kostspielig ist, wurden die Schubschiffahrtsreedereien bisher in dringenden Fällen angeschrieben und ersucht, durch organisatorische Maßnahmen ein Begegnen auf bestimmten Strecken zu verhindern. Dieses Verfahren wird bei weiterem Anwachsen der Zahl der Schubverbände nicht mehr durchführbar sein. Die Schubschiffahrt muß dann, wie es schon bei dem Niedrigwasser im Jahre 1959 geschah, angewiesen werden, sich an bestimmten Stellen nautisch so zu verhalten, daß der Verkehrsablauf der übrigen Schifffahrt durch sie nicht behindert wird; die Schubverbände müssen notfalls durch Stoppen Kopf vor anhalten und warten, bis das Fahrwasser frei ist.

- c) Es kann notwendig werden, an bestimmten Engstellen, an Baustellen oder an schwierigen Brückendurchfahrten die Längen oder Breiten der Schubverbände vorübergehend beschränken zu müssen. Hier wird ein Auflösen und Neuformieren der Schubverbände notwendig sein. Am Niederrhein ist ein Verbot erlassen worden, durch das eine Brückenöffnung nur mit einer Schubverbandslänge von höchstens 180 m passiert werden darf.
- d) Die Schubschiffahrt benötigt besondere Liegeplätze zum Formieren der Schubverbände und zum Ablegen von Schubleichtern. Dies ist notwendig, weil zur Zusammenstellung und Auflösung ein großer Raum benötigt wird und die Leichter teilweise so sperrig sind, daß ein Zusammenlegen mit anderen Schleppkähnen vermieden werden sollte. Auch ist es möglich, daß später besondere Liegeplätze an Zollabfertigungsstellen wie zum Beispiel in Emmerich geschaffen werden müssen, da sonst der allgemeine Verkehrsablauf gestört wird.

Abteilung I — Binnenschifffahrt

Mitteilung 2

Entwicklung der Schifffahrt auf Flüssen mit geringer Wassertiefe oder auf Wasserstraßen mit geringen Abmessungen; Lastkähne und Betriebsmittel (Betriebsgeräte) für solche Wasserstraßen. — Vertiefung einer Fahrrinne durch regelmäßig wiederkehrende Unterhaltungsarbeiten (Baggerungen, „Bandelling“¹⁾ usw.). — Mittel zur Überwindung der Schwierigkeiten in unterentwickelten Ländern: Mangel an Kapital und an technischem Personal.

Von Dipl.-Ing. Günther B u z e n g e i g e r, Oberregierungsbaurat, Wasser- und Schifffahrtsdirektion Hannover

Thema:

Entwicklung der Schifffahrt auf Flüssen mit geringer Wassertiefe. Verbesserung der Schifffahrt durch Zuschußwasser aus Speicherbecken, dargestellt am Beispiel der Weser.

Zusammenfassung

Die Unausgeglichenheit der Wasserführung der Ströme und Flüsse beeinträchtigt alle Nutzungsmöglichkeiten des Wassers, nicht zuletzt an von Natur aus schiffbaren Gewässern die Wirtschaftlichkeit der Schifffahrt mit großen Transportgefäßen. Es sollte gezeigt werden am Beispiel der Weser, daß die für alle wasserwirtschaftlichen Bedürfnisse so außerordentlich bedeutungsvolle Schaffung von Speichern (Talsperren) auch der Schifffahrt auf freifließenden Gewässern Vorteile bringen kann, dies um so mehr, je größer die Speicher sind und sich dem Jahresausgleich des Wasserdargebots nähern. Wo daher Großspeicher im Oberlauf oder Quellgebiet geplant oder vorhanden sind, kann unter Umständen durchaus das Zuschußsystem in Frage kommen, ehe man zu der wesentlich kostspieligeren Kanalisierung greifen wird. Voraussetzung hierfür ist naturgemäß, daß der Speicherraum ganz oder zumindest ein ausreichender Teil von ihm im Interesse der Schifffahrt bewirtschaftet werden kann. Trotz des prozentual geringen Umfanges der vorhandenen Wasserspeicherung im Wesergebiet sind zugunsten einer wirtschaftlichen Schifffahrt in jüngster Zeit verfeinerte Methoden in der Aufbesserung der Fahrwassertiefen, abgesehen von sparsamer Grundzuschußabgabe von Dauer, auch in der Ausnutzung von sogenannten künstlichen Wellen erzielt worden. Gewisse Voraussetzungen müssen hierzu allerdings vorliegen, wie ein gut regulierter Fluß, sollen die Wasserverluste nicht zu groß werden. Ferner muß hierbei die Schifffahrt sich einem Fahrplan oder Wellenplan anpassen und die Talfracht in ihrem Umfang die Bergfracht überwiegen.

Inhalt

	Seite
1. Einleitung	144
2. Die Fahrtiefenverbesserung durch Zuschußwasser aus Speicherbecken	144
3. Die Anwendung von Zuschuß aus Talsperren für die Schifffahrt an der Oberweser	146
4. Überbrückung von freifließenden Flußstrecken mit geringer Fahrwassertiefe zwischen vollschiffigen Staustufen durch Wellenfahrten	151

¹⁾ „Bandelling“ ist eine im Orient angewandte Methode zur Verbesserung der Form der Strömungen durch örtliche Verengung der Fahrrinne mittels vorübergehend gesetzter Wände.

1. Einleitung

Seitdem die neuzeitliche Binnenschifffahrt in Mitteleuropa in den achtziger Jahren des vorigen Jahrhunderts entstand, als deren Kennzeichen bekanntlich große Schiffsgefäße für Massentransporte mit unbestrittenem Vorteil gegenüber anderen Verkehrsarten anzusprechen sind, läuft parallel die wasserbauliche Arbeit, dieser Schifffahrt einen entsprechend ausreichenden Wasserweg zu sichern. Auf Strömen, als dem Rückgrat der Binnenschifffahrt, war anfänglich die Wassermenge entscheidend, denn es gab zunächst nur den regulierten freifließenden Fluß. Vor dieser Zeit verkehrten nur kleine Fahrzeuge (bis 20 t). Wegen der hierfür geringen erforderlichen Wassermenge war daher das Wasserverkehrsnetz noch sehr groß. Nunmehr mußte man sich auf die größten Flüsse beschränken, z. B. in Deutschland auf Rhein, Weser, Elbe, Oder. Schon der Main und Neckar im regulierten Zustand konnten wegen der Wasserklemmen und geringer Fahrwassertiefe vor 50 Jahren, als die Rheinschifffahrt in Blüte stand, nicht als Binnenschifffahrtswege von größerer Bedeutung angesehen werden. Sie sind dies erst wieder durch die Kanalisierung geworden. Die vergleichsweise kostspieligeren Kanalisierungen, wodurch die volle Ausnutzung der Schiffsgefäße allein ermöglicht wird, sind zunächst überall da anzutreffen, wo ein bisher unzulänglicher, freier Fluß ein industriell hochentwickeltes Gebiet durchzieht (z. B. Raum Stuttgart am Mittellauf des Neckar oder Berlin am Mittellauf der Havel, kanalisiert vor 70 Jahren). Da in Mitteleuropa das Wirtschaftspotential aber immer mehr in die Breite wächst, nimmt die Kanalisierungsmethode ständig zu (Mittelweser, Mittel-elbe mit Geesthacht begonnen), und es wird der Augenblick kommen, wo nur noch der Rhein ab Straßburg und die Donau ab Wien freie Schifffahrtströme bleiben.

Nun liegen in anderen Kontinenten noch Gebiete, wo man mit den natürlichen Eigenarten eines Stroms für die Binnenschifffahrt zu rechnen hat. Es wird sich zunächst selten lohnen, Ströme mit gängiger Fahrwassertiefe zu kanalisieren, es sei denn, daß die Energiegewinnung sowie die enorm wichtige Frage der Bewässerung aus einem Strom dazu reizt oder zwingt, Speicher oder Staustufen zu bauen. Möglicherweise wird in diesen Gebieten da und dort der Strombau sich ähnlich entwickeln wie bei uns im vorigen Jahrhundert (Regulierung). Heute hat die Binnenschifffahrt dort mit Verhältnissen zu kämpfen, die bei uns in Europa kaum noch vorliegen. Enorme Schlamm-massen oder Sandmengen dieser Ströme verlagern ständig das Fahrwasser und bilden Untiefen. Mit Baggerungen und Pflugfahrten versucht man, eine Schifffahrtsrinne mit mehr oder weniger Erfolg offenzuhalten und verwendet flachgehende Fahrzeuge.

Zur Verbesserung der Ausnutzbarkeit der Schiffsgefäße gibt es nun noch ein Mittel, welches bei Errichtung von Großspeichern im Oberlauf angewandt werden kann: Die Aufbesserung der Wasserstände durch Zuschußwasser. Gerade die jüngsten Großspeicher könnten vielleicht hierzu mit herangezogen werden. Es soll daher über die Methode der Bezuschussung eines Flusses im Interesse der Schifffahrt berichtet werden:

2. Die Fahrtiefenverbesserung durch Zuschußwasser aus Speicherbecken

Die frühere Preußische und spätere Deutsche Reichswasserstraßenverwaltung ist nach Fertigstellung der großen Stromregulierungen an Weser, Elbe, Oder usw. darangegangen, sich mit der Frage zu beschäftigen, wie man unter Beibehaltung der Vorteile eines freien regulierten Stromes für eine unbehinderte Schifffahrt Verbesserungen in der Abladetiefe erzielen könnte. Abgesehen von den Versuchen, von der Mittelwasserregulierung durch weitere Einschränkungen (Buhnen und Deckwerke) zur Niedrigwasserregulierung überzugehen, um damit noch einige dm Fahrwassertiefe zu gewinnen, wurde

schon früh der Gedanke verfolgt, Überschußwasser im Winter zu speichern und in den in Mitteleuropa meist trockenen Sommern den Strömen zuzuschießen. Man kannte zwar schon Talsperren zur Speicherung von Trink- und Industrierwasser (Ruhrtalsperren) und begann auch mit dem Bau von reinen Hochwasserschutzbecken an den Nebenflüssen der Oder (Bober, Queis) und der sächsischen Elbe, aber Wasserspeicherung für Schifffahrtzwecke war doch etwas Neues. Gerade an der Oder ist der Talsperrenbau für Anreicherung der Niedrigwasserführung besonders zwischen den beiden Weltkriegen gefördert worden (Ottmachau an der Neiße, Turawa an der Malapane, an der Klodnitz kleinere Becken). Mit diesen Speichermengen von zusammen mehr als 200 hm³ Inhalt sollte die freie Oderstrecke von Breslau abwärts zur Fahrwasserverbesserung aufgehöhht werden, was auch zweifellos gelang. Das gleiche Bestreben, die Niedrigwasserregulierungen mit Talsperrenzuschuß zu koppeln, ist auch an der Elbe durch den Bau der beiden Großspeicher an der Saale am Bleiloch und bei Hohenwarte mit zusammen mehr als 400 hm³ verwirklicht worden. Hierzu gehört auch der immer wieder aufgetauchte, aber dann doch nicht ausgeführte Plan eines Speicherbeckens in der Elbaue bei Pirna oberhalb von Dresden mit 128 hm³ Inhalt, in welches Elbehochwasser für Zuschußabgabe im Sommer gepumpt werden sollte. Danach war oberhalb der Saalemündung durch das Becken bei Pirna bei 28 m³/s größter Zuschußmenge eine Verbesserung der Mindestfahrtiefe von 1,10 m auf 1,40 m und unterhalb der Saalemündung durch die Saaletalsperren eine solche von 1,40 m auf 1,70 m bei 60 m³/s größtem Zuschuß vorgesehen. Zeitweilig beabsichtigte man auch, in Böhmen durch einen riesigen Speicher an der Beraun (500 hm³) dieses Zuschußwassersystem für die Elbe, welche von Aussig abwärts ein frei regulierter Strom bleiben sollte, weiter zu fördern. Die Bedeutung der Saaletalsperren zur Abgabe von Zuschußwasser zugunsten der Elbeschifffahrt blieb jedoch nach 1945 hinter ihrem wirtschaftlichen Wert in der Energieversorgung und des Hochwasserschutzes zurück.

Auf eine bald 50jährige Zuschußtätigkeit mit Talsperren zugunsten der Schifffahrt kann schließlich das Wesergebiet zurückblicken, dessen Großspeicher „Edersee“ schon bald nach der Jahrhundertwende entstand, und zwar nicht in erster Linie für die Hebung der Weserwasserstände, sondern zum Ausgleich der Verlustwassermenge in den Schifffahrtskanälen Nordwestdeutschlands (Mittellandkanal und z. T. Dortmund-Ems-Kanal). Die Aufbesserung der Wasserstände der Weser ergab sich daraus von selbst, denn das Wasser der Talsperre für die Kanäle fließt in der Weser von Hann. Münden bis zum Kanalpumpwerk Minden auf 205 km Länge. Die Edertalsperre ist damit in Deutschland die älteste Talsperre vornehmlich für Schifffahrtzwecke und vermutlich die einzige in der Welt, mit der heute zugunsten der Schifffahrt die Wasserführung eines Flusses geregelt wird. Gerade in den letzten Jahren bei stärkerem Konkurrenzkampf von Wasserstraße, Eisenbahn und Straße ist es allein durch den Zuschußbetrieb aus der Talsperre möglich gewesen, die Schifffahrt auf der Weser aufrechtzuerhalten. Da die Methode der Fahrtiefenverbesserung durch Zuschuß aus Speichern vielleicht auch in anderen Gegenden von Interesse sein kann, soll hierauf am Beispiel der Weser näher eingegangen werden.

Das erwähnte, im norddeutschen Raum früher intensiv verfolgte Prinzip, die Flüsse nicht durch Staustufen zu kanalisieren, sondern der Schifffahrt die freie Fahrt im ungestauten Fluß zu bewahren und die Niedrigwasserperioden durch Zuschuß aus Talsperren zu überbrücken, wird heute immer mehr zugunsten der Kanalisierung verdrängt, weil die Verbindungskanäle der Stromgebiete, stets vollschiffig befahrbar, in einem Verkehrsnetz mit Wechsel von Fluß und Kanal einfach dazu zwingen. Denn es ist niemals möglich, mit Hilfe von Talsperrenwasser während des ganzen Jahres auch die Flüsse stets vollschiffig in ihrem Wasserstand zu halten. Talsperren erfassen nur einen Bruchteil des Niederschlagsgebiets, so daß die Aufhöhung des Niedrigwassers nur in wenigen

Dezimetern durchführbar ist. Wollte man z. B. an der Weser einen vollständigen Ausgleich der Wasserführung erzielen, so wären Speicher von mehreren Milliarden m^3 erforderlich, die in einem hochkultivierten Land niemals geschaffen werden können. Die Edertalsperre beeinflusst den Abfluß von nur 10 % des Niederschlagsgebiets in Hann. Münden. Mit ihren 202 hm^3 Fassungsvermögen hat sie ferner nur eine Größe von 30 % des mittleren Jahresabflusses der Eder. Ähnlich liegen die Verhältnisse auch im Elbe- und Odergebiet. Es kann sich bei dieser Frage in Mitteleuropa also nur um eine bedingte Verbesserung der Fahrtiefen für die Schifffahrt handeln, wobei offensteht, ob nicht bei den Großspeichern in anderen Kontinenten von mehreren Milliarden m^3 Inhalt wesentlich günstigere Voraussetzungen vorliegen können.

Durch die regen Verkehrsbeziehungen zwischen dem Ruhrgebiet und dem niedersächsischen Wirtschaftsraum um Hannover-Braunschweig über den Mittellandkanal zu den Unterweserhäfen mit Bremen an der Spitze mußte demgegenüber die Vollschiffbarkeit auf der Mittelweser durchgesetzt werden, so daß die Strecke der Weser von Minden bis Bremen seit 1960 kanalisiert ist und für Zuschußwasser nicht mehr interessiert.

3. Die Anwendung von Zuschuß aus Talsperren für die Schifffahrt an der Oberweser

Das Zuschußwassersystem wird heute in mehreren Varianten auf der Oberweser zwischen Kassel-Hann. Münden und Minden betrieben.

Der Strom besitzt eine Mittelwasserführung von 106 m^3/s in Hann. Münden (km 0,0), die sich bis Minden (km 205) auf 170 m^3/s vergrößert. Hierbei beträgt die Tauchtiefe bei Hann. Münden 160 cm und bei Minden gerade 200 cm. Der Fluß hat eine Sohlenbreite von 28 bis 35 m und Wasserspiegelnbreiten von 55 bis 60 m. Fast nur in den Wintermonaten werden die Wasserstände bei MW erreicht bzw. überschritten. Von April bis November sinken die Wassermengen dagegen auf die Hälfte ab und betragen bei NNW ohne Talsperrenzuschuß nur noch 18 bzw. 34 m^3/s , wobei dann 60 bis 70 cm Fahrwassertiefe vorhanden sind. Ohne die Zuschußabgabe würde in jedem Jahr meist ab Juli bis weit in den Herbst hinein wegen Niedrigwasser die Schifffahrt zwischen Kassel und Minden stillliegen. Hiervon würde aber nicht nur die Frachtschifffahrt, sondern auch die in dem schönen Gebirgstal sehr beliebte Personenschifffahrt betroffen. Für letztere ist eine Fahrwassertiefe von 115 cm bei 1 m Tiefgang ihrer Fahrgastschiffe erforderlich. Während die Frachtschifffahrt früher sich mit 90 cm Mindesttieftiefe begnügte (kaum $\frac{1}{4}$ Ladung der üblichen 400- bis 600-t-Schiffe), kann sie seit 1950 wegen der gestiegenen Unkosten nur noch mit 120 cm Abladetiefe bei knapper Wirtschaftlichkeit verkehren. Sie nimmt in Kauf, mit 110 cm Abladung zu fahren, wenn sie eine Kompensation für größere Ablademöglichkeit mit Hilfe von Sonderzuschußwasser erhält.

In den ersten dreißig Jahren seit Bestehen der Talsperre an der Eder (1914 in Betrieb genommen) wurden die Wasserstände in der Weser nach der regelmäßigen Füllung des Ederseespeichers vom November bis 1. Mai eines jeden Jahres (Speicherung von etwa 180 hm^3) durch Zuschußwasser im Sommerhalbjahr stets auf gleicher Höhe für die oben genannten 90 cm Tauchtiefe ab Hann. Münden und 100 cm ab Karlshafen entsprechend einem Abfluß von 40 m^3/s bzw. 48 m^3/s gehalten. Die Zuschußabgabe schwankte entsprechend zwischen 0 und 22 m^3/s . Mit ganz geringen Ausnahmejahren reichten die 180 hm^3 zur Innehaltung dieses Zieles bis zum Spätherbst mit Anschluß an die nächste Winterspeicherung aus. Heute ist diese Betriebsweise der Zuschußabgabe nicht mehr durchführbar. Die erhöhten Mindesttauchtiefen verlangen eine 10 bis 15 m^3/s größere Dauerzuschußabgabe (50 bis 55 m^3/s Mindestabfluß in Hann. Münden, d. i. im Monat 30 bis 40 hm^3 mehr als früher). Infolgedessen zeigte sich bereits 1952 in einem normalen Abflußjahr, daß der Talsperreninhalt bereits Mitte August erschöpft war. Während die

Frachtschiffahrt in solchen Fällen sich auf andere Wasserstraßen (Kanäle, Rhein) absetzen kann, hat das Unternehmen der Personenschiffahrt merkliche Verluste zu verzeichnen, da deren Saison bis Mitte September andauert. Es wurden daher damals schon Versuche unternommen, mit kurzfristig erhöhten Wasserständen durch verstärkte Abgabe aus dem Edersee in Konvois zusammengezogene Talschleppzüge abzufertigen. Die Versuche glückten, worüber in den Deutschen Berichten zum XVIII. Internationalen Schiffahrtskongreß in Rom Ausführungen vom Verfasser gemacht wurden. Die Reedereien blieben jedoch skeptisch und empfanden zunächst die Beschränkung auf bestimmte Fahrzeiten und Fahrtage, an denen die erhöhten Wasserstände — im folgenden „Wellen“ genannt — gegeben werden konnten, lästig. Da in den folgenden Jahren 1954 bis 1956 von Natur aus kein ausgesprochenes Niedrigwasser auftrat, wurde das Verfahren zunächst zurückgestellt. 1957 wurden die Versuche jedoch wiederaufgenommen und zeitigten derartige Erfolge, daß die Schiffahrt seit dem trockenen Sommer 1959 bei den weiter gestiegenen Anforderungen in den Wellenfahrten geradezu ihre Rettung sah. Dieses „Wellenreiten“ hat sich bei Tauchtiefen unter 140 cm, was bei den 400 t Fahrzeugen $\frac{3}{4}$ Ladung und beim 700 t Kahn $\frac{1}{2}$ Ladung entspricht, in der Talfahrt durchgesetzt. Wegen der erhöhten Zuschußwassermengen beim Wellenfahren wurde eine Drosselung der Abgabe an den Tagen ohne Wellen durchgesetzt, denn gleichzeitig mußte Wasser gespart werden, um wenigstens bis Anfang September der täglich verkehrenden Personenschiffahrt auf der 135 km langen Teilstrecke Hann. Münden–Hameln ausreichende Fahrtiefen zu sichern. Dies konnte nur erreicht werden, wenn die Bergschiffahrt, welche von Minden nach Hann. Münden 3 bis 4 Tage Fahrzeit benötigt, mit 110 cm Tauchtiefe sich zufriedengab. Die Wirtschaftlichkeit dieses Betriebes wurde von den Reedern bestätigt. Allerdings wird, wenn die Zuschußabgabe nicht außergewöhnlich hohe Mengen (40 m³/s) erfordert, im allgemeinen auf der 160 km langen Teilstrecke Minden–Karlshafen 120 cm Mindesttauchtiefe gewährt. Diese Unterteilung der Gesamtstrecke bei Karlshafen ist leider naturbedingt, da der Abschnitt Hann. Münden–Karlshafen (45 km) mit steilerem Gefälle und geringsten Wassermengen um 10 bis 15 cm geringere Fahrtiefen aufweist als die Hauptstrecke von Karlshafen bis Minden (160 km). Diese Tatsache wird uns bei der Differenzierung der Wellen noch beschäftigen.

Es ist auch einleuchtend, daß die Wellengabe der Schiffahrt auf der Gesamtstrecke von Hann. Münden bis Minden den größten Nutzen bringt. Inzwischen werden aber die Vorteile des Wellenfahrens auch von Zwischenplätzen wie von Holzminden, Bodenwerder und Hameln nach Minden wahrgenommen, da ein zuverlässiger Fahrplan für alle Stationen inzwischen den verschiedenen Schiffahrtsunternehmen von der Wasser- und Schiffahrtsverwaltung bekanntgemacht wurde. Wesentlich erleichtert wird der Wellenbetrieb dadurch, daß die durchgehende Relation Minden–Hann. Münden/Kassel und umgekehrt fast ausschließlich von einer Weserreederei befahren wird, so daß deren Wünsche über Abladetiefen und Fahrtage in einfachster Weise fernmündlich mit der Verwaltung vereinbart werden können.

Mit Einführung der regelmäßigen Wellenfahrten wurde festgelegt, daß jeweils zum Wochenende eine Welle gegeben wird, weil dann die Strombauarbeiten der Wasserbauverwaltung, bei denen niedrige Wasserstände benötigt werden, ruhen. Diese einmal wöchentliche Welle reicht bei einem Verkehrsumfang ab Kassel/Hann. Münden von rd. 100 000 t bis 150 000 t im Jahr (ab Hameln 500 000 t) aus. Die Anzahl der Fahrzeuge im Bereich einer Welle ist verschieden. Ab Kassel/Hann. Münden werden im Durchschnitt 6 Fahrzeuge abgefertigt. Außer Selbstfahrern ist gewöhnlich ein Schleppzug, seltener zwei, mit bis zu 5 Anhängen dabei, ab Hameln bis zu 20 und mehr Fahrzeuge.

Die Wellen werden in drei Arten je nach Bedürfnis von der Verwaltung gesteuert, und zwar die Kleine und Große Welle für Talfahrer und eine für Bergfahrer.

- a) Kleine Talwelle. Sie dient zur Überbrückung der Strecke Hann. Münden-Karlshafen und erhöht den Wasserstand um etwa 10 bis 15 cm. Das Fahrzeug wird dabei auf den zulässigen Tiefgang für die Hauptstrecke Karlshafen-Minden abgeladen. Die Dauer dieser Welle richtet sich danach, ob ein Schleppkahn mit „kaltem Druck“ (Fahrzeug, das sich von der Strömung zu Tal treiben läßt) oder ein Schleppzug bzw. eine Motorschiff die Welle benutzt. Für den Kahn mit „kaltem Druck“ braucht sie nur 4,5 Stunden zu dauern, für die beiden andern 7,5 Stunden. Dieser Unterschied rührt daher, daß der Schleppzug oder Motorkahn den Wellenanfang schneller erreicht. Bild 1 läßt Laufzeiten und Wellendauer erkennen.
- b) Große Talwelle: Sie wird besonders bei Niedrigwasser angewandt und auf der ganzen Strecke Hann. Münden-Minden befahren. Die Fahrzeuge werden hierbei auf den Tiefgang der Wellenhöhe abgeladen. Da sie wegen ihrer Höhe wesentlich größere Wassermengen benötigt, die stets von der Talsperre abgegeben werden im Gegensatz zur kleinen Welle, die meist schon aus den Stauhaltungen der Fulda zwischen Hann. Münden und Kassel entnommen werden kann, wird eine möglichst kurze Dauer angestrebt und daher für nicht motorisierte Fahrzeuge Schleppzugzwang verlangt. Bei 15 Stunden Wellendauer gelangt der Schleppzug am ersten Tag in 12 bis 13 Stunden Fahrzeit bis Bodenwerder, wo er übernachtet. Die Welle läuft während der Nacht unter ihm durch — siehe Bild 1 links —. Am folgenden Tag gelangt er mit Schleusenaufenthalt in Hameln abends bis Minden in den ersten Stau der Mittelweser. Da bei Kähnen, die nur mit „kaltem Druck“ die Strecke bewältigen wollen, 2 Übernachtungen erforderlich werden und damit um die Hälfte mehr Zuschußwasser benötigt wird — siehe Bild 1 rechts — kommen derartige Wellen praktisch nicht vor.
- c) Welle für Bergfahrer. Diese werden wiederum wie unter a) nur für die Strecke Karlshafen-Hann. Münden zur Überbrückung der 15 cm geringeren Fahrtiefe gegeben. Da die Welle erst Karlshafen erreicht haben muß, ehe die Bergfahrt von da angetreten werden kann und die Fahrt gegen den Strom weniger als 4 km/h beträgt, dauert diese Welle am längsten, nämlich 25 Stunden. Sie wird in der Regel mit der Großen oder Kleinen Talwelle gekoppelt.

Kurz zusammengefaßt dienen also die Wellen a) und c) nur dazu, der Schifffahrt auf der ganzen Strecke Kassel-Minden eine gleiche Tauchtiefe zu gewähren unter Ausnutzung der stets von Natur größeren Fahrtiefe auf den 160 km Karlshafen-Minden. Es leuchtet ein, daß, den Großen Talwellen entsprechend, wegen der 5tägigen Fahrtdauer und einem Verbrauch von mehr als 10 hm³ an Zuschußwasser keine Wellen für die Schifffahrt zu Berg auf der ganzen Strecke in Frage kommen. Sie sind auch nicht erforderlich, weil die weit überwiegende Fracht auf der Oberweser zu Tal geht (Getreide, Kali, Gips, Steine, Holz). Im Bergverkehr wird nur Kohle in geringem Umfang nach Kassel gefahren.

Bild 2 zeigt das Beispiel einer besonders großen Talwelle in ihrer einzelnen Formänderung an einigen Pegelstellen. Der Zuschuß an der Talsperre (Pegel Affoldern) wird von 17 m³/s auf 60 m³/s und dann auf 50 m³/s über 23 Stunden Dauer erhöht. Die größere Menge am Anfang ist erforderlich, um die Verluste auf der 90 km langen Zulaufstrecke durch Eder und Fulda (Stauverluste, Versickerungen am Ufer) auszugleichen. Die Wellenform ist in Hann. Münden noch gleichmäßig. Nach Unterstrom verflachen sich aufsteigender und absteigender Ast. Die Wellenhöhe vermindert sich bis Bodenwerder um 10 cm und um weitere 7 cm bis Porta. In der Fahrtiefe macht diese Verminderung

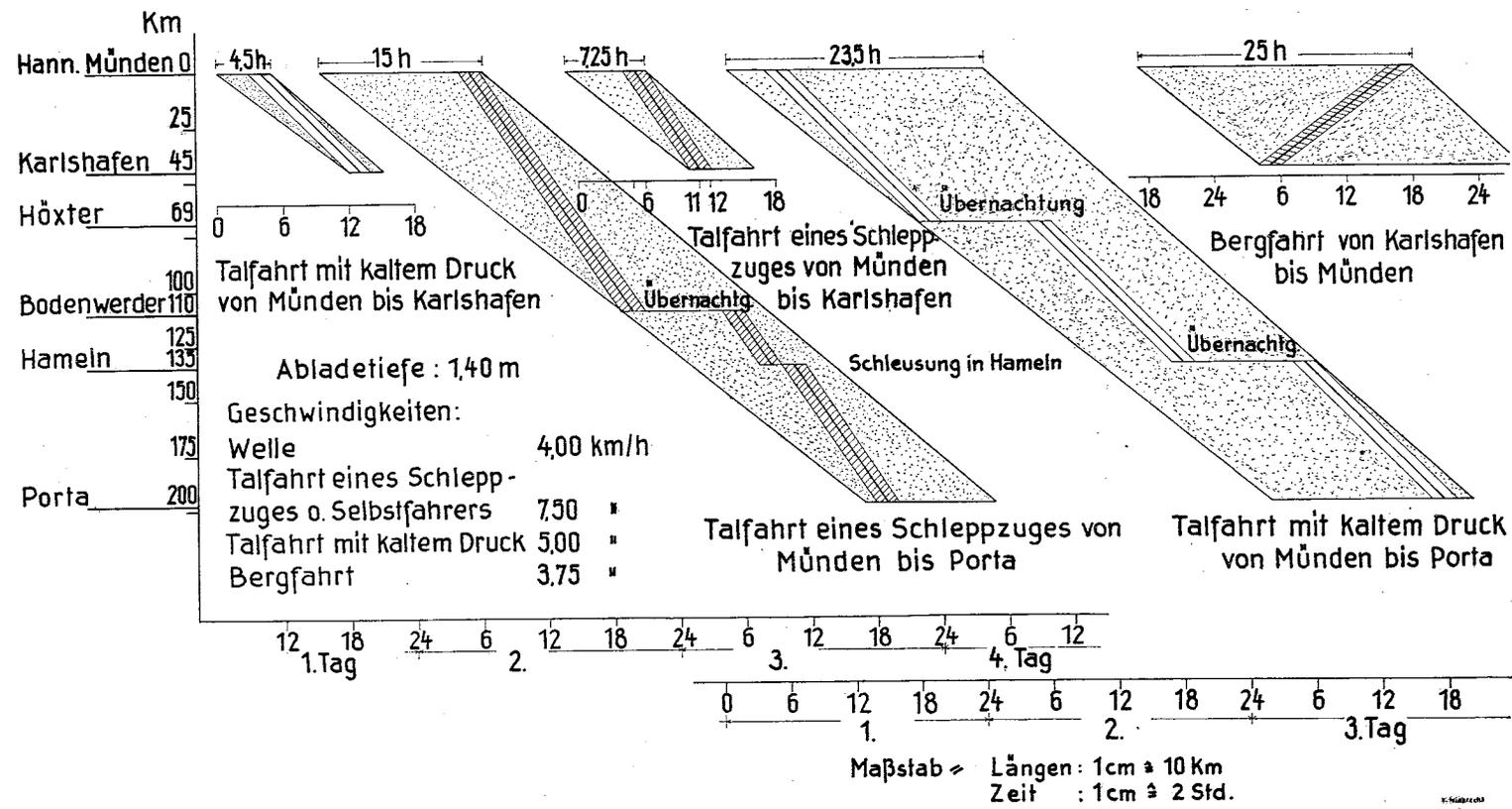


Bild 1
Talwellenfahrplan für die Oberweser

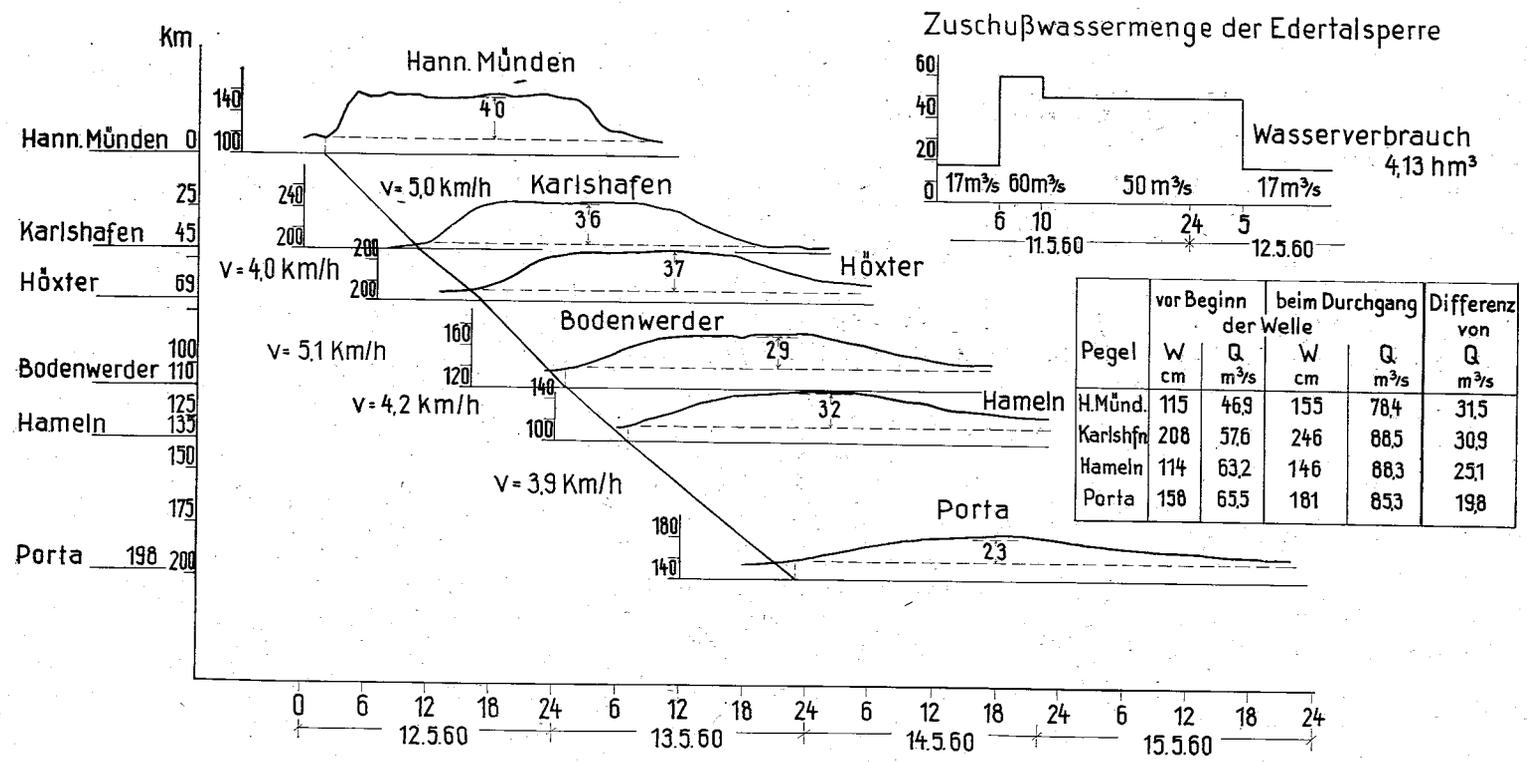


Bild 2
Verlauf einer Zuschußwasserwelle von Hann.-Münden bis Porta

jedoch nichts aus, da die Zuflüsse und das abnehmende Gefälle ausgleichen. Bei den bisher mehr als 50 gefahrenen Großwellen ist noch kein einziger Havariefall vorgekommen. Die mittlere Geschwindigkeit der Welle beträgt im Beispiel 4,4 km/h, bei niedrigeren Wellen sinkt sie unter 4 km/h und ist mit der mittleren Fließgeschwindigkeit der Weser fast gleich.

Auf der durchgehenden Strecke Kassel/Hann.Münden-Minden werden heute gut 70 bis 80% der Güter mit Hilfe der beschriebenen Wellen gefahren. Durch Schaffung weiterer Talsperren im Quellgebiet könnte das System noch wesentlich, besonders in seiner Häufigkeit, aber auch in der Wellenhöhe (40 bis 60 cm), verstärkt werden.

4. Überbrückung von freiließenden Flußstrecken mit geringer Fahrwassertiefe zwischen vollschiffigen Staustufen durch Wellenfahrten

Es ist immer wieder zu beobachten, daß beim Bau einer Staustufenkette eine oder mehrere Stufen dazwischen im Baufortschritt auf spätere Zeit verschoben werden. Dies ist besonders dann verkehrungünstig, wenn der zu kanalisierende Fluß bereits im regulierten Zustand eine beachtliche Schifffahrt aufweist. Der Tiefgang der Fahrzeuge muß sich nach den geringeren Wassertiefen der unausgebauten freien Strecke richten. Ein solcher Fall trat auch bei der Mittelweserkanalisierung ein. Zwischen den Staustufen Schlüsselburg (1957 fertig) und Drakenburg (1956 fertig) wurde die Stufe Landesbergen erst Ende 1960 in Betrieb genommen. Im Trockenjahr 1959 wäre die Mittelweserschifffahrt völlig lahmgelegt gewesen, wenn auf Grund der günstigen Wellenfahrten auf der Oberweser nicht auch hier mit einer ähnlichen Maßnahme geholfen worden wäre. Die zu überbrückende Strecke war von der Schleuse Schlüsselburg bis zum Stauende von Drakenburg 20 km lang. Auf Grund von Berechnungen stellte sich heraus, daß die Wassermenge für Talwellen aus der Stauhaltung Schlüsselburg mit etwa 1 hm³ bei 50 cm unschädlicher Stauabsenkung entnommen werden konnte. Mit Vorlauf wurde eine Wellendauer von rd. 6 Stunden gewählt. Die Wellenhöhe richtete sich nach dem Zufluß in die obere Stauhaltung. Zur Wiederauffüllung der Haltung für die nächste Welle waren bei Niedrigwasser 2½ Tage erforderlich. Der Schifffahrt wurden als regelmäßige Wellentage jeweils der Dienstag und Freitag einer Woche bekanntgegeben. Bei Niedrigwasser betrug die Erhöhung 20 bis 30 cm, bei höheren Wasserständen bis zu 45 cm. Der Betrieb verlief folgendermaßen: Die Fahrzeuge zu Tal wurden am Vorabend und in den ersten Morgenstunden nach der Schleusung im Unteren Vorhafen von Schlüsselburg vom Schleusenbeamten eingeordnet und jeder Schiffsführer erhielt seine genaue Order für die Reihenfolge der Abfahrt hintereinander (10 Min. Abstand). Um 6 Uhr früh wurden die Turbinen des Kraftwerks Schlüsselburg aufgedreht (bis zu 50 m³/s). Der höchste Wasserstand der Welle im Unterhafen traf gegen 8.00 Uhr ein. Die Vorlaufzeit der Welle bis 20 km unterhalb war gegen 12.00 Uhr beendet. Gegen 10.00 Uhr wurde mit der Abfahrt der Schiffe begonnen und um Mittag der folgende Stau erreicht. Diese Einrichtung war von der Schifffahrt sehr begehrt. Häufig konnten mehr als 40 Fahrzeuge mit bis zu 40 cm besserer Tauchtiefe von Stau zu Stau gelangen, wodurch mehrere Tausend Tonnen Laderaum zusätzlich ausgenutzt waren. Auch diese Fahrten verliefen unfallfrei. Bild 3 zeigt den Verlauf zweier solcher Wellen.

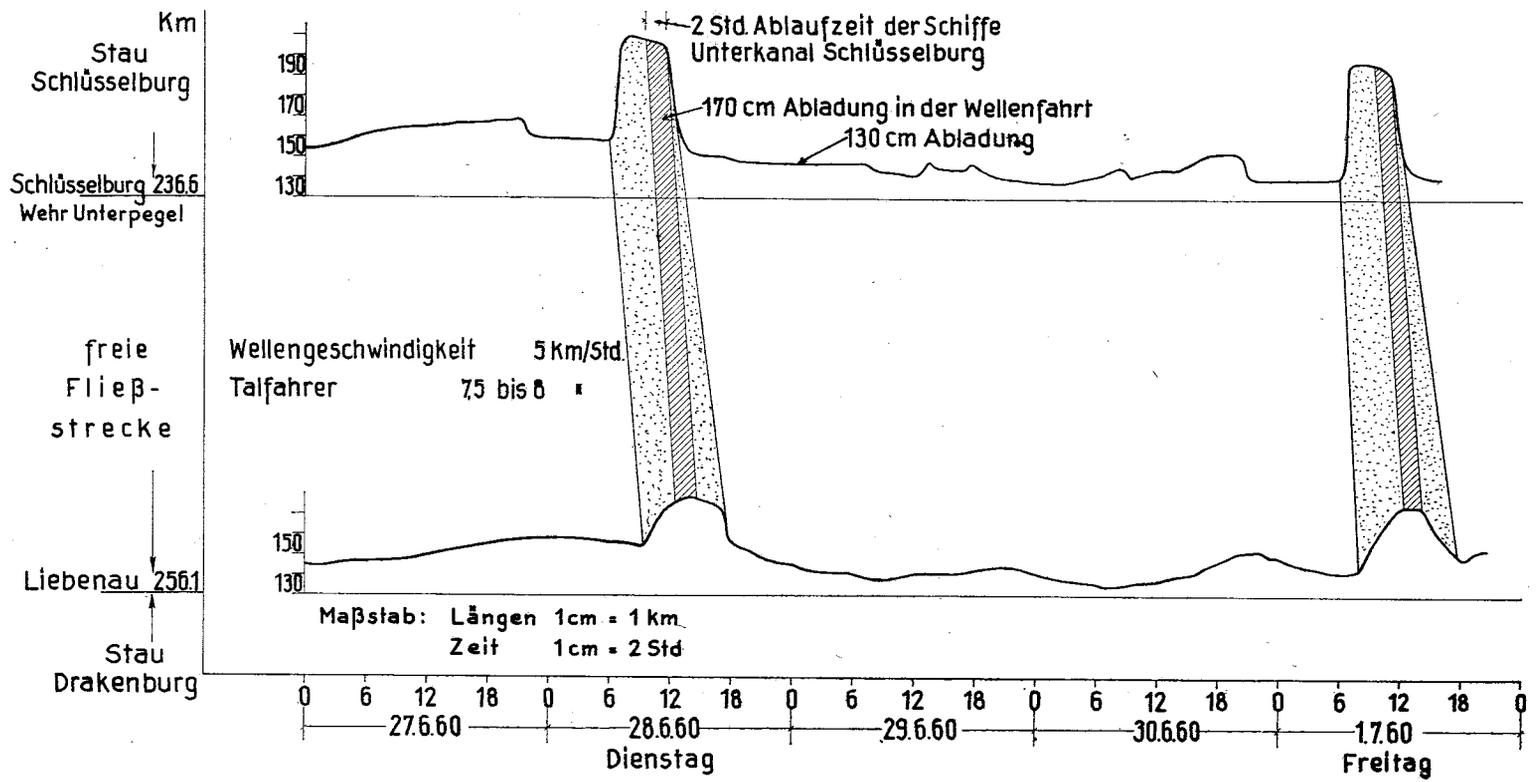


Bild 3

Wellenfahrt in freier Fließstrecke zwischen zwei Staustufen (Mittelweser während der Kanalisierungsarbeiten)

Abteilung I — Binnenschifffahrt

Mitteilung 3

(gemeinsam für Abteilung I und II)

- a) **Wirtschaftliche Gestaltung geneigter oder senkrechter Uferneinbauten zum Anlegen der Schiffe.**
- b) **Einrichtungen und Methoden zum Beladen und Entladen ebenso wie zum Umladen von Gütern; Beziehung zum Schienen- und Straßenverkehr.**
- c) **Hafeneinrichtungen zum Beladen und/oder Entladen großer Mengen fester Massengüter (Erze, Kohle usw.) und deren Lagerung oder Weiterverteilung.**

Von Dipl.-Ing. Hermann B u m m, Hafendirektor, Vorstandsmitglied der Duisburg-Ruhrorter Häfen AG, Duisburg und Dr.-Ing. Erich L a c k n e r, Beratender Ingenieur, Prüflingenieur für Baustatik, Bremen.

Zusammenfassung

I. Wirtschaftliche Gestaltung von Anlegeplätzen für Schiffe an schrägen oder vertikalen Böschungen und Ufern

In Binnenhäfen genügen zum Umschlag von Massengütern meist geböschte Ufer, die mit einem Bruchsteinpflaster abgedeckt sind und deren Fuß mit einer Steinschüttung geschützt ist. Am Fuß des Bruchsteinpflasters ist ein möglichst tiefgreifender Sporn gegen Unterspülung herzustellen. Die Steinschüttung ist gegen Ausspülung durch das Schraubenwasser der Motorschiffe mit Bitumenverguß zu sichern.

Senkrechte Ufermauern sind in Binnenhäfen aus umschlagtechnischen Gründen meist nicht erforderlich und ca. 20% teurer als teilweise senkrechte Wände. Die teilweise senkrechte Wand wird nur bis zur Höhe des Mittelwassers ausgeführt und darüber eine Böschung in der Neigung 1 : 1,25 angeordnet, die mit Bruchsteinpflaster abgedeckt wird.

Die senkrechten oder teilweise senkrechten Uferneinbauten werden aus Stampfbeton, Stahlbeton oder als verankerte Spundwände hergestellt. Welche Bauweise wirtschaftlicher ist, richtet sich nach den örtlichen Verhältnissen.

II. Ausrüstung und System für das Laden und Löschen sowie für den Umschlag von Waren; Beziehung zu Straßen- und Schienenverkehr

Bei der Ausgestaltung der Kaianlagen in den Binnenhäfen sollte man möglichst großzügig verfahren, da für den Umschlag von Stückgütern erfahrungsgemäß viel Platz zum zeitweisen Absetzen der Güter benötigt wird. Durch den Einsatz von Flurförderern ist es nicht mehr nötig, das Lagerhaus möglichst nahe an das Ufer zu legen. Bei starkem Eisenbahnverkehr sind auf der Wasserseite 3 Gleise erforderlich. Die Verlade-rampe soll möglichst 6—8 m breit sein. Wenn der Lastkraftwagen-Verkehr überwiegt und man mit 2 Gleisen auskommen kann, ist es zweckmäßig, die Rampe auf 10—11 m zu verbreitern und hier den Lastkraftwagen für den Direktumschlag zum Schiff fahren zu lassen. Der Lagerschuppen liegt dann 33 m von der Kaikante zurück. Auf der Landseite der Schuppen ist kein Gleis und keine Rampe vorzusehen, da die Lastkraftwagen mit Gabelstaplern beladen werden können. Es ist dann nicht mehr nötig, daß die Lastkraftwagen quer zum Lagerhaus ihre Ladung aufnehmen, wodurch an Straßenbreite gespart wird.

III. Hafenausrüstung für das Laden und Löschen von Massengütern (Erz, Kohle usw.) und für die Lagerung und Weiterverteilung

Erzumschlagplätze werden nicht mehr mit den bisher üblichen Verladebrücken ausgerüstet; das Löschen am Kai geschieht durch Wippkrane oder Uferentlader, die in einen Trichter löschen, von dem das Erz über eine Förderbandanlage weitertransportiert wird. Die Verteilung des Erzes auf dem Lagerplatz und die Rückverladung geschieht durch besondere Band- und Verladebrücken. Der Vorteil dieser Ausrüstung liegt darin, daß das Löschen, Lagern und die Rückverladung mit verschiedenen Geräten erfolgt, also unabhängig voneinander ist. Derartige Anlagen sind auch für das Löschen anderer Schüttgüter geeignet.

Die Beladung von Binnenschiffen mit Erz geschieht auch über Bandanlagen, die über einen Ausleger mit Niedertrageband die Schiffe schonend beladen. Die Massengüter werden entweder mit Selbstentlader angefahren, die über Zwischenbunker entleert werden, oder über Waggonkipper.

Inhalt

	Seite
I. Vorbemerkung	154
II. Wirtschaftliche Gestaltung von Anlegeplätzen für Schiffe an schrägen oder vertikalen Böschungen und Ufern	154
III. Ausrüstung und System für das Laden und Löschen sowie für den Umschlag von Waren; Beziehung zum Straßen- und Schienenverkehr	162
IV. Hafenausrüstung für das Laden und Löschen von Massengütern (Erz, Kohle usw.) und für die Lagerung und Weiterverteilung	165

I. Vorbemerkung

Die technische Entwicklung, die die Umschlaggeräte, Krane, Flurförderer, Gabelstapler, Förderbandanlagen usw., genommen haben, gibt die Möglichkeit zu einer betrieblich rationalen Ausgestaltung der Kaianlagen in einem Hafen. Die Kenntnisse, die daraus in deutschen Binnenhäfen gewonnen wurden, werden im folgenden behandelt.

II. Wirtschaftliche Gestaltung von Anlegeplätzen für Schiffe an schrägen oder vertikalen Böschungen und Ufern

1. Zur Uferbefestigung in Binnenhäfen genügen beim Umschlag von Massengütern meist geböschte Ufer, die mit Bruchsteinpflaster abgedeckt sind und deren Fuß mit einer Steinschüttung geschützt ist. Entscheidend für die Standfestigkeit des Bruchsteinpflasters ist die Sicherung des Böschungsfußes. Zumindest muß der Fuß der Pflasterböschung durch einen möglichst tiefgreifenden Sporn gegen Unterspülung gesichert sein. Die Herstellung des Spornes aus Beton empfiehlt sich nur, wenn die Ausführung in trockener Baugrube möglich ist, also meist nur bei Neuanlage eines Hafens, andernfalls ist keine Gewähr gegeben, daß eine Betonmauer einwandfrei wasserdicht ausgeführt wird. Bei Betonwänden begnügt man sich meist mit einer Gründungstiefe von 1,2–1,5 m, die aber bei starkem Verkehr von Motorgüterschiffen nicht ausreichend ist. Wenn der Schlitz für die Gründung nicht einwandfrei trockenlegen ist, empfiehlt sich statt dessen die Anordnung einer leichten Spundwand. Die Spundwand hat den Vorteil, daß sie ohne Wasserhaltung und in größerer Tiefe, am besten 2,5–3 m ausgeführt werden kann.

der Neigung 1:2, die je nach den Möglichkeiten der Bauausführung etwa bis 1 m unter mittleren Wasserstand reicht. Die Befestigung besteht aus einer rund 0,40 m dicken Bruchsteinpackung von etwa 15 kg Gewicht, die möglichst durch einen leichten Bitumenverguß verkittet werden soll. Wenn unter der Bruchsteinpackung Boden ansteht, der durch die Packung hindurchgespült werden kann, muß dies durch einen rund 0,30 m dicken Mischkiesfilter mit geeignetem Kornaufbau verhindert werden. Das gleiche gilt auch für eventuelle Bodenausspülungen am Fuß der Steinpackung.

Der untere Teil der Böschung, der vor allem durch Schraubeneinwirkung und Anker gefährdet ist, wird vom mittleren Teil durch eine mindestens 2,50 m lange Spundwand getrennt. Hierfür reichen leichte Stahlspundwände oder gleichwertige Stahlbeton- bzw. Holzspundwände aus. Letztere kommen aber nur in Frage, wenn sie durch Fäulnis nicht gefährdet sind. Die Spundwand soll verhindern, daß Schäden vom unteren in den mittleren Böschungsbereich übergreifen. Hierzu muß sie am Kopf durch einen kräftigen Holm, der gefährdete Strecken überbrücken kann, gestützt werden. Dieser Holm wird zweckmäßig in Stahlbeton ausgeführt.

Der durch Spundwand und Stahlbetonholm gesicherte mittlere Böschungsbereich reicht etwa bis 1,50 m über mittleren Wasserstand. Er wird in der Neigung 1:1,5 ausgeführt, mit anschließender 0,70 m bis 1,0 m breiter Berme als Gehweg. Für diesen Bereich haben sich, abgesehen von Fällen mit Schrottverladung, rund 2,0 m breite und 0,25 m dicke Stahlbetonplatten als Abdeckung gut bewährt. Sie lassen sich als Fertigteile rasch verlegen. Gleichfalls gut bewährt haben sich 0,25 m bis 0,30 m dicke Pflasterungen.

Die mittlere Böschungszone ist besonders sorgfältig gegen Wasserüberdruck von der Landseite, aber auch gegen Auswaschen des stützenden Untergrundes zu sichern. Bei Pflasterungen ist außerdem noch für einen guten Verband mit ausreichender gegenseitiger Stützung der Pflastersteine zu sorgen. In jedem Falle wird unter der Deckschicht eine 0,20 m dicke Grobkiesschicht als Drainage angeordnet. Im Bedarfsfalle ist darunter noch ein 0,20 m dicker Kies-Stufenfilter einzubauen.

Die Fugen der Stahlbetonplatten werden im allgemeinen mit Bitumen geeigneter Mischung vergossen. Die Pflasterfugen werden nur zum Teil 5 cm tief mit Zementmörtel ausgefügt bzw. mit Bitumen vergossen, so daß bei gegenseitiger Stützung der Steine noch ein ausreichender Wasserdurchtritt möglich bleibt. Regelmäßig geformte Steine können aber auch ohne besondere Fugen Stein an Stein verlegt werden. In Orlhäfen ist ein Bitumenverguß der Fugen nicht angebracht, da hier das Bitumen aufweichen oder sich auflösen könnte.

Als Pflasterung kommen z. B. in Frage: unbehauene Sandsteine, Basaltbruchsteine, Basaltsäulen und Betonsteine. Betonsteine sollen in möglichst dichtem Beton etwa 50 kg schwer ausgeführt werden.

An die Berme schließt sich als oberer Abschnitt eine weitere Pflasterböschung unter 1:1,5 an. Sie reicht mindestens bis zum höchsten schiffbaren Wasserstand und hat am oberen Ende eine 0,70 bis 1,0 m breite Berme oder den entsprechenden Abschluß im Hafenanplanum.

Endet die Pflasterung unter dem Hafenanplanum, wird der oberste Teil als Rasenböschung unter 1:1,5 m oder flacher ausgeführt. In Orlhäfen empfiehlt es sich, die Pflasterung bis zum Hafenanplanum zu führen. Bei Flußhäfen mit einem Hafengelände über dem höchsten Hochwasserstand muß die Pflasterung mindestens bis zum höchsten Hochwasserstand reichen.

Um den Personenverkehr zu den Schiffs Liegeplätzen zu ermöglichen, werden etwa 1 m breite Treppen in rd. 40 m Abstand angelegt. Sie beginnen am Spundwandholm und füh-

ren, der Böschung folgend, bis zum Hafenplanum. Beiderseitig der Treppen werden Festmachinge angebracht. Gelegentlich werden im Hafenplanum zwischen den Treppen auch leichte Poller angeordnet.

Die Ausführungskosten für Böschungen nach Bild 1 sind bei mittleren Uferhöhen etwa halb so groß wie die einer teilweise senkrechten Wand (Bild 2, 6 und 7).

2. Wenn mit größerem Verkehr von Motorgüterschiffen zu rechnen ist, die zudem noch mit starken Motoren ausgerüstet sind, ist die Steinschüttung vor dem Bruchsteinpflaster auf die Dauer nicht zu halten oder erfordert zumindest einen derart hohen Unterhaltungsaufwand, daß bei Kapitalisierung dieser Kosten eine senkrechte oder teilweise senkrechte Wand, bei der der Steinwurf fortfällt, wirtschaftlicher wird. Senkrechte Ufer werden in Binnenhäfen im allgemeinen nur angewandt, wo das für die Entwicklung des Hafens zur Verfügung stehende Gelände durch die Natur oder die Bebauung so beengt ist, daß man zu einer möglichst weitgehenden Ausnutzung der Kaifläche gezwungen ist oder wenn die Umschlagbedingungen es erfordern. Sie sind bei großer Wasserstandsschwankung, also hoher Uferwand, etwa um 20% teurer als teilweise senkrechte Wände. Bei hohen Nutzlasten ist der Kostenunterschied noch größer.

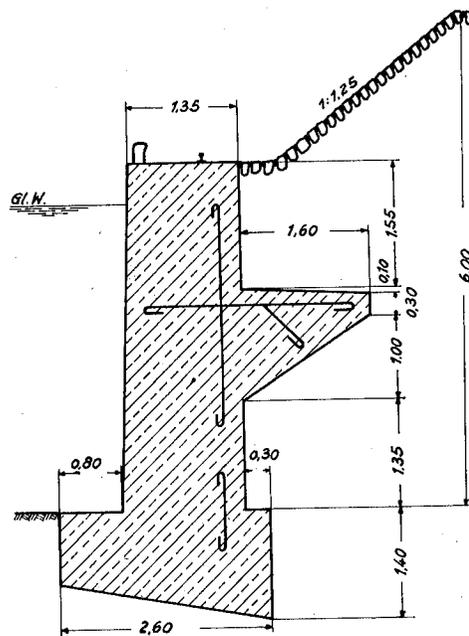


Bild 2

Ausbildung eines senkrechten Ufers in Stampfbeton mit Entlastungssporn

An der senkrechten Kaimauer muß das Schiffpersonal über Steigeleitern große Höhenunterschiede überwinden, um an Land zu kommen. Die häufig in Nischen angeordneten Treppen erfordern einen unbequemen Bauaufwand, verschmutzen leicht und sind an der sonst glatt durchlaufenden Kaimauer Gefahrenquellen, da eine Absicherung durch Geländer wegen des Kranbetriebes nicht möglich ist.

Wenn genügend Gelände zur Gestaltung des Hafens vorhanden ist, besteht keine Veranlassung zur Anordnung einer vollkommen senkrechten Wand. Die teilweise

senkrechte Wand wird bis zur Höhe des mittleren oder am häufigsten auftretenden Wasserstandes geführt, über der eine mit Bruchsteinpflaster abgedeckte Böschung in der Neigung 1 : 1,25 liegt. (Bilder 2, 6 und 7). Die Treppen führen auf der Böschung 1 : 1,25 bis zum Mittelwasser, so daß hier Steigeleitern an der senkrechten Wand durchaus genügen, weil sie nicht mehr so lang sind und nur bei sehr niedrigen Wasserständen benutzt werden müssen. Die an der Oberkante Spundwand entstehende Berme wird als Laufgang von dem Schiffpersonal sehr geschätzt. Es besteht keine Gefahr, daß die Schiffe auf der Spundwand bei höheren Wasserständen aufsetzen, da beladene Schiffe immer genügend weit von der Böschung abliegen. Es ist nach jahrelanger Erfahrung auch noch nicht vorgekommen.

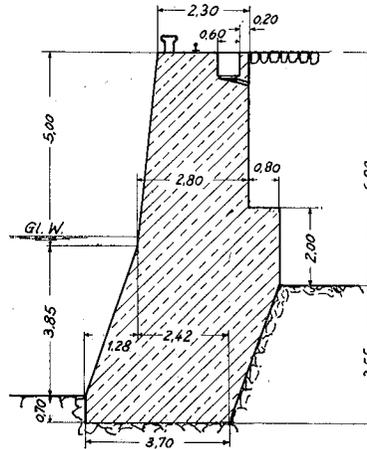


Bild 3

Ausbildung eines Ufers in Stampfbeton in einem Binnenhafen

3. Die senkrechten oder teilweise senkrechten Uferneignungen werden aus Stampfbeton, Stahlbeton mit oder ohne Entlastungssporn und aus verankerten Spundwänden hergestellt. Welche Bauweise am wirtschaftlichsten ist, richtet sich nach der örtlichen Lage, den Untergrundverhältnissen, den Wasserständen und der Bauzeit. In Bild 2 ist eine Ufermauer bei nur geringer Bauhöhe mit Sparbewehrung vor allem am Entlastungssporn dargestellt. Ob ein Entlastungssporn vorteilhaft ist, richtet sich nach den Belastungsverhältnissen und der Höhe der Mauern. In den Bildern 3 bis 5 sind weitere ausgeführte Beispiele von Betonkaimauern dargestellt. Beton- und Stahlbetonmauern werden vorzugsweise beim Neubau von Hafenanlagen ausgeführt, wenn die Mauer in trockener Baugrube vor dem Füllen der Becken hergestellt werden kann. Massive Ufermauern müssen auch angewandt werden, wenn der Untergrund für eine Spundwand nicht rammbaar ist, also aus Fels besteht oder wenn eine Spundwand durch Korrosion, z. B. beim Umschlag aggressiver Chemikalien oder durch Sandschliff, besonders gefährdet wäre.

4. Die Spundwandbauweise wird unter normalen Verhältnissen am billigsten, wenn das Eisenmaterial frachtgünstig zur Verfügung steht. Nach langjähriger Erfahrung sind Stahlspundwände in Binnenhäfen durch Korrosion, abgesehen von Sonderfällen, nur wenig gefährdet. Der Substanzverlust beträgt im Mittel etwa 0,01 mm pro Jahr. Die Verankerung von Spundwänden wird in den letzten Jahren anstatt der bisher üblichen Rundstahlanker mit Verankerungsplatten oder durchlaufender Verankerungsspundwand

werden und oben durch einen starken Eisenbetonholm schubsicher zusammengefaßt sind. Die Spundwand ist in der Lage, ohne Verankerung eine erhebliche Belastung aufzunehmen.

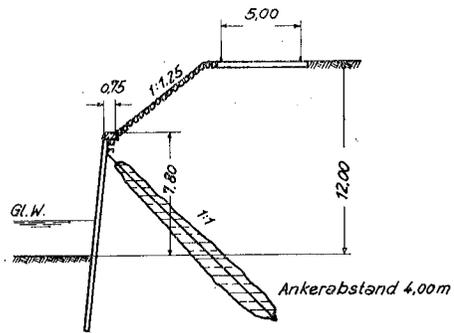


Bild 7

Ausbildung eines Umschlaghafens in Spundwand mit Pfahlverankerung in einem Hafen mit großen Wasserstandsschwankungen

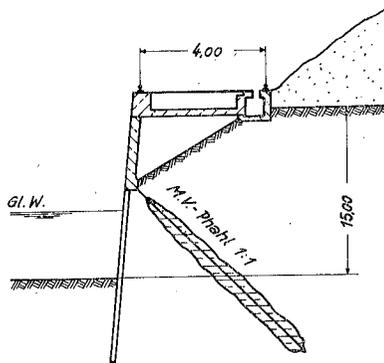


Bild 8

Ausbildung eines Ufers in Spundwand mit aufgesetzter Winkelstützmauer

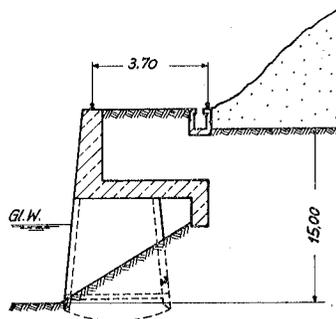


Bild 9

Ausbildung eines Ufers mit Senkbermen und aufgesetzter Winkelstützmauer

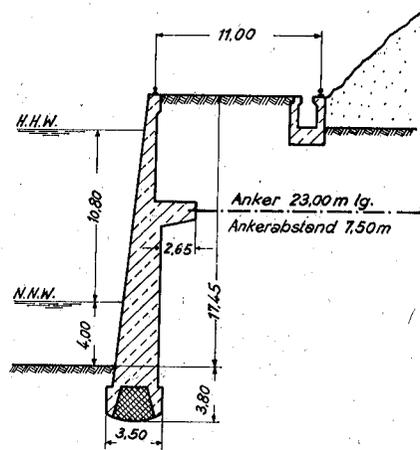


Bild 10

Ausbildung eines Ufers in Caissongründung mit aufgesetzter verankerter Eisenbetonwand bei großer Bauhöhe

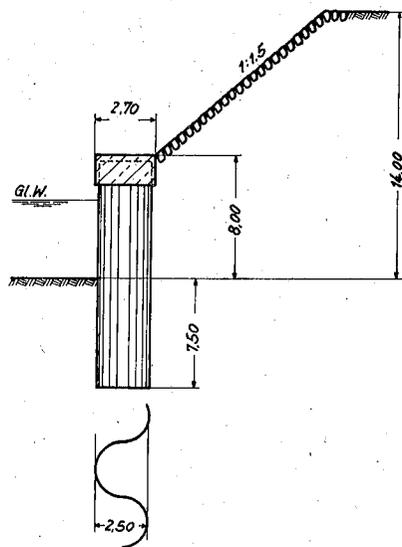


Bild 11

Ausbildung eines Ufers mit Wellenspundwand

III. Ausrüstung und System für das Laden und Löschen sowie für den Umschlag von Waren; Beziehung zum Straßen- und Schienenverkehr

6. Die Ausbildung der Kaianlage in einem Binnenhafen muß aus den Bedingungen des gewählten Umschlaggerätes entwickelt werden. Ein moderner Stückgutkran mit festem Ausleger oder ein Wippkran hat bei der gebräuchlichen Tragfähigkeit von 3—5 t eine Ausladung von 23 m. Diese Ausladung des Kranes reicht, wenn bei starkem Eisen-

bahnverkehr 1 Gleis für den Umschlag Schiff/Bahn, 1 Gleis für den Umschlag Lagerhaus/Bahn und 1 Zustellgleis, also insgesamt 3 Gleise vorhanden sind, um vor dem Schuppen noch eine 6—8 breite Rampe anzuordnen. Die Erfahrung zeigt, daß die Rampen auf der Wasserseite der Schuppen nicht breit genug sein können. Durch den Einsatz von Flurförderern ist es nicht mehr nötig, das Lagerhaus möglichst nahe an das Ufer zu legen. Da die Güter nicht mehr mit dem Sackkarren von Hand, sondern mit mechanisch angetriebenen Transportmitteln gefahren werden, spielt der längere Weg auf der Rampe keine Rolle. Man soll sich daher auf dem Platz, auf dem der Umschlag geschieht, nicht unnötig einengen. Erfahrungsgemäß benötigt man beim Stückgutumschlag viel Platz zum kurzfristigen Abstellen von Gütern, sei es, daß das andere Verkehrsmittel zum

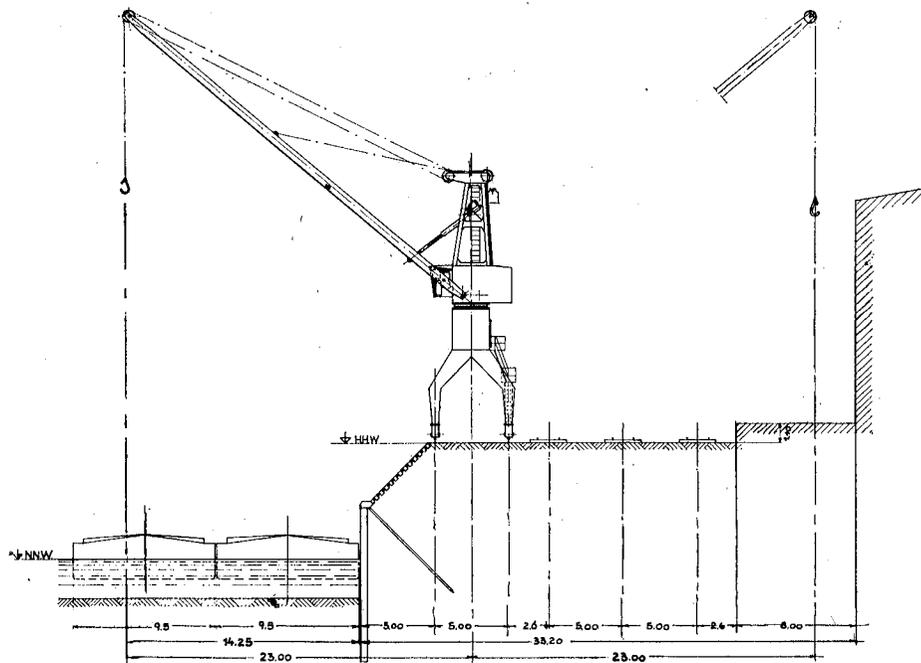


Bild 12

Ausbildung einer Kaianlage mit teilweise senkrechtem Ufer

direkten Umschlag noch nicht da ist, sei es, daß diese Güter aus sonstigen Gründen einige Zeit liegen müssen oder im Freien lagern können. Angenehm ist es auch, wenn die Kranbahnspur nicht durch ein Gleis belegt ist, so daß man auch unmittelbar am Ufer Platz zum Abstellen hat. Sonst werden doch erfahrungsgemäß die Gleise häufig mit Gütern kurzfristig belegt. (Bild 12). Bei geringem Bahn- und größerem Lastkraftwagen-Verkehr genügen 2 Gleise. Die Rampen können dann noch um 5 m verbreitert, also insgesamt auf 10—11 m ausgelegt werden. Auf diese breite Rampe kann der Lastkraftwagen für den Direktumschlag Schiff/Lastwagen fahren, was sich in Seehäfen bereits bewährt hat. Es empfiehlt sich nicht, die Gleise anzupflastern und auf der Wasserseite zwischen Kai und Lagerhaus gemischten Verkehr von Bahn und Lastwagen zuzulassen. Dies sollte nur ein Notbehelf beim Umbau bestehender Anlagen oder bei ganz geringem Bahnverkehr sein. Die Lastwagen behindern sehr das Rangieren, im übrigen ist es nicht ungefährlich, weil der Kranbetrieb über den fahrenden Lastkraftwagen stattfindet. Das

Lagerhaus liegt dann 33 m hinter der Vorderkante Kai. Bei dieser Ausbildung der Kaianlage kann ein moderner Wippkran mit 23 m Ausladung die Rampen bedienen und 2 nebeneinander liegende Schiffe bestreichen, auch wenn der Kai im oberen Teil in einer Breite von 5—6 m mit geböschtem Ufer ausgeführt wird, das heißt, aus Gründen der Kranausladung ist ein senkrechtes Ufer nicht erforderlich.

7. Für die Ausladung des Krans ist also die Ausgestaltung der Landseite und nicht die Wasserseite maßgebend. Es kann eine Böschung im oberen Teil des Ufers angeordnet werden, ohne die Ausladung des Krans vergrößern zu müssen. Für den Kranführer bietet eine senkrechte Wand keinen Vorteil, im Gegenteil, der zu löschende Raum liegt bei senkrechter Uferwand direkt unter dem Kran, so daß im Führerstand ein gläserner Fußboden angeordnet werden muß, um die Sicht in das Schiff zu gewährleisten.

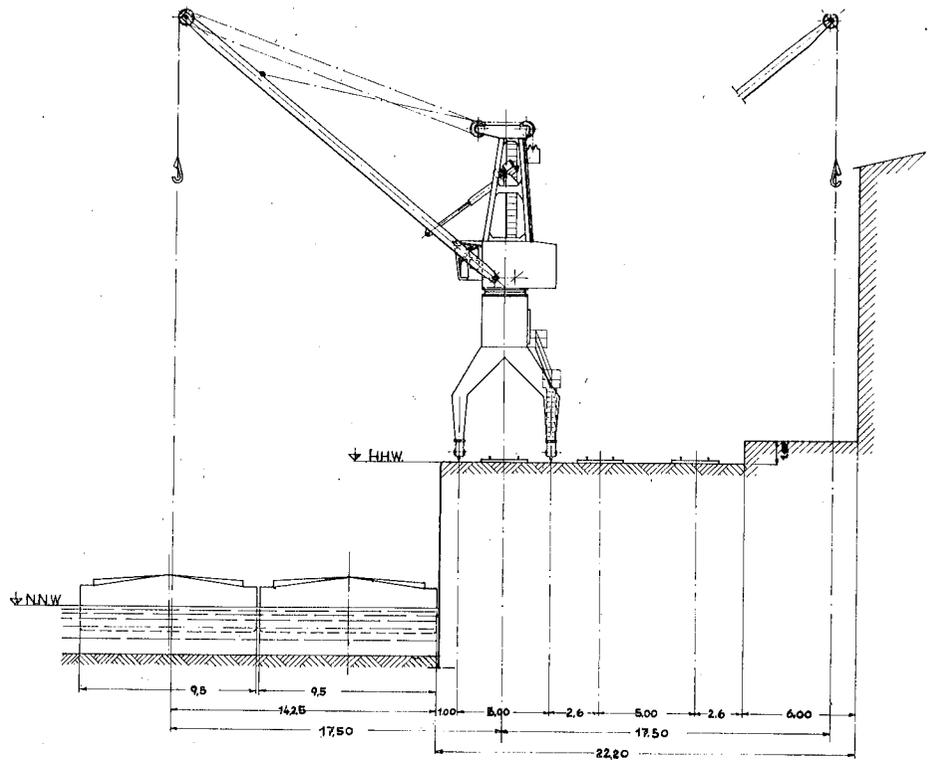


Bild 13

Ausbildung einer Kaianlage mit senkrechtem Ufer bei beschränkten Raumverhältnissen

8. Für beengte Raumverhältnisse ist in Bild 13 eine Uferausbildung mit senkrechten Wänden dargestellt. Die Breite des Uferstreifens kann bei 3 Gleisen auf 22,2 m zusammengedrückt werden, wobei ein Lastkraftwagen-Verkehr auf der Wasserseite nicht vorgesehen ist. Für die Größe der Kranausladung ist hier die Wasserseite maßgebend. Je nach den örtlichen Verhältnissen, der Art und dem Umfang des Güterumschlags, wäre zwischen diesen beiden extremen Lösungen die zweckmäßigste Ausbildung der Kaianlage zu wählen. Bei ausreichenden Geländebedingungen sollte man sich nicht einengen und nur bei ungünstigen Platzverhältnissen auf das Mindestmaß von 22,2 m heruntergehen.

Auf der Landseite des Lagerhauses ist eine Rampe beim Einsatz von Gabelstaplern für die Lastkraftwagen-Beladung nicht erforderlich. Es ist dann nicht mehr nötig, daß die Lastkraftwagen quer zum Lagerhaus ihre Ladung aufnehmen, wodurch an Straßenbreite gespart wird. Man kann die Ladestraße um die Rampenhöhe = 1,10 m höher als die Gleise auf der Kaiseite legen, so daß der Fußboden der Halle horizontal liegt. Andernfalls muß der Gefälleunterschied im Hallenboden ausgeglichen werden. Wenn die Rampe auf der Wasserseite für den Lastkraftwagen befahrbar ist, ist es besser, die Straße um die Rampenhöhe gegen das Schienenniveau anzuheben.

9. Die Tiefe der Lagerschuppen wird von der Art der zu lagernden Güter bestimmt. Die zweckmäßigste Tiefe in Binnenhäfen liegt zwischen 30—50 m. Die Landseite soll dem Lastkraftwagen-Verkehr vorbehalten bleiben. Da in Binnenhäfen der Bahnverkehr auf der Wasserseite zu bewältigen sein wird, ist hier kein eingepflastertes Gleis vorzusehen. Ist ein größerer, direkter Umschlag Schiff/Lastkraftwagen zu erwarten, so kann dieser auf Freiplätzen zwischen den Lagerhäusern vorgenommen werden. Diese Plätze müssen 60 m breit sein, damit der Lastkraftwagen eine Rundfahrt ausführen kann. Ob die vor den Lagerhäusern liegende wasserseitige Rampe vor diesen Plätzen durchgeführt wird, hängt von dem umzuschlagenden Gut ab, das entweder auf der Rampe abgesetzt wird oder bei fehlender Rampe direkt auf den Lastkraftwagen umgeschlagen wird.

10. In den Oberrheinhäfen Basel, Straßburg und Ludwigshafen haben sich die sogenannten „Schnellumschlaghallen“ sehr bewährt. Hier stehen nebeneinander mehrere ca. 50—80 m lange und 25 m breite Hallen quer zum Kai, die mit Laufkatzenkränen ausgerüstet sind. Die Kranbahnen führen über die Gleise und ragen soweit über die Ufer in das Hafenbecken, daß sie 2 nebeneinander liegende Schiffe bedienen können. Die Kranbahnen sind überdacht, so daß im Trockenen gelöscht werden kann. Insbesondere, wenn länger zu lagernde Güter anfallen, haben sich diese Hallen gut bewährt, weil der Umschlag mit Laufkatzenkränen billig ist und weil große Mengen von den die ganze Halle bestreichenden Kranen hoch gestapelt werden können, also je laufendes Meter Ufer eine große gedeckte Lagerkapazität vorhanden ist. Der Nachteil ist, daß die Schiffe beim Umschlag verholen müssen, da eine Laufkatze nur $\frac{1}{4}$ der Schiffslänge bestreicht.

11. Für den Umschlag von Eisenblechen, Profileisen und Rohren sind verhältnismäßig große Lagerplätze erforderlich, um die verschiedenen Sorten einwandfrei lagern zu können. Zur Bedienung dieses Lagerplatzes und für den Umschlagbetrieb sind hier Kranbrücken mit einem auf dem Obergurt laufenden Drehkran am zweckmäßigsten. Laufkatzenkrane sind nicht so günstig, weil die langen Eisen mit der Traverse in Längsrichtung zwischen den Stützen der Brücke, also quer zum Schiff, bewegt und zweimal gedreht werden müssen.

IV. Hafenausrüstung für das Laden und Löschen von Massengütern (Erz, Kohle usw.) und für die Lagerung und Weiterverteilung

12. Erzumschlagplätze sind in letzter Zeit nicht mehr mit den bisher üblichen Verladebrücken ausgerüstet worden. Das Löschen am Kai geschieht durch Wippkrane oder Uferentlader, auch Hammerkran genannt, die in einen Trichter löschen, von dem das Erz über eine Förderbandanlage entweder direkt zum Hochofen oder auf den Lagerplatz transportiert wird. Die Uferentlader sind Laufkatzenkrane, deren horizontaler Ausleger über 1 Schiff reicht und deren Trichter im Portal angeordnet sind (Bild 14). Sie sind billiger und im Betrieb einfacher als Wippkrane. Die Verteilung des Erzes auf dem Lagerplatz und die Rückverladung geschieht durch besondere Band- und Verladebrücken,

meist Laufkatzenbrücken, die den ganzen Lagerplatz bestreichen. Der erhebliche Vorteil dieser Anlagen liegt darin, daß das Löschen der Schiffe und die Bedienung des Lagerplatzes betriebsmäßig getrennt und damit voneinander unabhängig sind. Das Löschen der Schiffe geht schneller, da der Kran das Erz nicht auf hinten liegende Lagerplätze ablegen muß. Zudem würde bei den heute üblichen Greifergewichten von 12 bis 16 t eine Kranbrücke mit Drehkran sehr schwer und unbeholfen sein. Die bei modernen Wippkranen oder Uferentladern übliche Leistung von 300—400 t/h bei 60 Spielen in der Stunde wäre bei Kranbrücken nicht zu erreichen. Auch das Löschen anderer Schüttgüter wie Kohle, Steine usw. kann über gleichartige Anlagen, Uferentlader und Bandanlagen erfolgen.

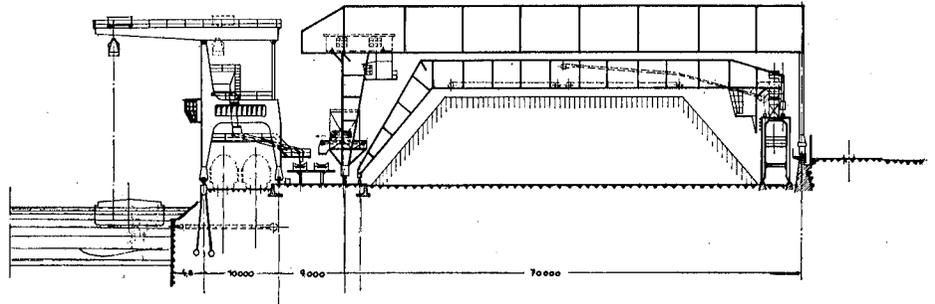


Bild 14

Ausbildung eines Erzhafens

13. Die Beladung von Binnenschiffen mit Erz geschieht auch über Bandanlagen, die über einen Ausleger mit Niedertragband die Schiffe schonend beladen. Die Niedertragebänder müssen längs des Ufers fahrbar sein, damit das Schiff nicht verholen muß. Wird das Erz per Bahn angefahren, so kommen hierfür nur Selbstentlader in Frage, die über Zwischenbunker auf die Bandanlagen entleert werden. Erfolgt bei Kohle die Zufuhr per Bahn, so kommen hier auch Selbstentlader zum Einsatz oder die Wagen werden über Kipper auf Band entleert. Bei Kohle ist auch die Kübelverladung zweckmäßig. Die auf Spezialwaggons stehenden Kübel werden vom Kran über das Schiff gehoben und durch eine Bodenklappe entleert. Dieses Verfahren ist nur bei einem Knotenpunktverkehr und nicht zu großen Entfernungen wirtschaftlich. Findet in größerem Umfang die Abfuhr der Kohle durch Lastkraftwagen statt, so kann an die Brückenkonstruktion ein Verladeband mit heb- und senkbaren Auslegebändern und Waage angeordnet werden.

Es besteht kein Hinderungsgrund, daß die beschriebenen Anlagen für Massengüter verschiedener spezifischer Gewichte konstruiert werden.

Abteilung II — Seeschifffahrt

Frage 1

Fortsetzung der Untersuchungen der vorhergehenden Kongresse (XVII., XVIII. und XIX.):

- a) Entwurf und Ausführung von Molen, Anlegedalben und Anlegebrücken für große Schiffe (Tanker, Erzfrachter usw.) an der Küste, in den Flußmündungen und an den großen Strömen.
- b) Zulässige Amplitude der Dünung.
- c) Aufprallgeschwindigkeit.
- d) Festmachevorrichtungen.
- e) Gründungen, besonders auf nachgiebigem Baugrund.

Von Dr.-Ing. Erich L a c k n e r, Beratender Ingenieur, Prüfingenieur für Baustatik, Bremen, und Dr.-Ing. Walter H e n s e n, Professor, Ordinarius für Grundbau und Wasserbau an der Technischen Hochschule Hannover.

Thema

- I. Grundsätze für die Ausbildung von Löschbrücken für Großtanker, dargestellt am Beispiel der Ölbrücke Wilhelmshaven.
- II. Auswirkung langperiodischer Wellen in Häfen.

Zusammenfassung

I. Grundsätze für die Ausbildung von Löschbrücken für Großtanker, dargestellt am Beispiel der Ölbrücke Wilhelmshaven

Im Jahre 1958 ist in Wilhelmshaven eine nach modernsten Gesichtspunkten geplante Öllöschbrücke für Tanker bis zu 100 000 t dwt ausgeführt worden. Trotz der schwierigen Bauarbeiten in freier See und auch in den Wintermonaten konnte die Brücke in nur 11monatiger Bauzeit mit verhältnismäßig niedrigem Kostenaufwand erstellt werden.

Für Planung, Entwurf, Bemessung und Bauausführung wurden dabei ganz bestimmte zum Teil allgemein gültige Grundsätze erarbeitet und beachtet, die im folgenden kurz zusammengefaßt werden.

1. Der Standort muß so gewählt werden, daß in Zukunft größte Tanker die Umschlagsanlage ohne Schwierigkeiten erreichen können, genügend Platz für das als Puffer erforderliche Tanklager vorhanden ist, die örtlichen Verhältnisse für die Errichtung und den Betrieb von Brücke und Tanklager geeignet sind und die geographische Lage zu den Hauptverbrauchscentren so günstig ist, daß das Rohöl zu den dort zu errichtenden Raffinerien per Pipeline oder sonstige Transportmittel möglichst billig geliefert werden kann.
2. Die Ausbaugröße ist so zu wählen, daß die teuren Schiffe ohne lange Wartezeiten schnell abgefertigt werden können und auch für die Zukunft noch genügend Erweiterungsmöglichkeiten bestehen.
3. Die Ausbauf orm moderner Ölhäfen für Supertanker muß den erforderlichen großen Wassertiefen von mindestens 15 m unter SKN angepaßt werden. Die Pump-

fähigkeit des Umschlaggutes beeinflusst und erleichtert die Ausbildung. Olumschlagsanlagen werden heute in Form offener Pierbrücken bis in die erforderliche Wassertiefe vorgestreckt. Sie setzen sich zusammen aus dem Landanschluß zum Tanklager, der Zufahrtsbrücke, dem Kreuzkopf, der Löschrücke mit den Löschköpfen, den unabhängig davon ausgebildeten Anlegebauwerken und den Festmachereinrichtungen mit den zugehörigen Stegen. Die Löschrücke wird so gut wie möglich in die Stromrichtung gelegt.

4. Einwandfreie Planungs- und Entwurfsgrundlagen bilden die wichtigste Voraussetzung für eine gute Lösung und geringe Baukosten. Vor Beginn der eigentlichen Entwurfsarbeiten müssen daher die örtlichen Verhältnisse betreffend Wind, Wetter, Sicht, Tide, Wasserstände, Sturmfluten, Strömungen, Eisgang, Bodenaufbau, Bodenwerte usw. genauestens bekannt sein, desgleichen die in Frage kommenden Schiffsgrößen mit der Entwicklungstendenz, die Häufigkeit der Schiffsbelegungen und die Vorgesehene Art des Anlegens mit oder ohne Schlepperhilfe.
5. Die Berechnungsgrundlagen, wie Ansatz der Kräfte und deren Zusammenfassung zu Lastfällen, die Festlegung der zulässigen Spannungen und Sicherheiten in Abhängigkeit von den Lastfällen müssen so festgelegt werden, daß unter Beachtung der allgemeinen Vorschriften den besonderen Verhältnissen bei Ölbrücken Rechnung getragen wird.
6. Die Grundmaße der Brückenkonstruktion richten sich bei Großanlagen vor allem nach den unterzubringenden Rohrleitungen. Brücke und Rohrleitungen können auf ganzer Länge eben ausgeführt werden. Die Fahrbrücke wird so hoch über den Rohrleitungen angeordnet, daß alle Rohrkreuzungen unter der Brücke ausgeführt werden können. Auf der Zufahrtsbrücke können die Rohrleitungen beidseitig, auf der Löschrücke aus Sicherheitsgründen nur landseitig, verlegt werden. Die Fahrbahnbreite richtet sich nach der Brückenlänge und den Sichtverhältnissen. Bei langen Brücken empfiehlt sich eine 5,50 m breite Fahrbahn mit einer Fahrspur und einer Standspur. Letztere ist für die Arbeit eines Montagekranes wichtig. Die Fahrbrücke wird am besten ohne Querscheiben ausgebildet. Die Brückengründung wird zweckmäßig mit Pfählen so ausgeführt, daß Strömung und Eisgang so wenig wie möglich behindert und größere Kolkbildungen in der Hafensohle vermieden werden. Die Pfahlgründungen werden durch Jochbalken aus Stahlbeton zusammengefaßt, die mit der darüber liegenden Fahrbahnbrücke biegesteif verbunden werden. Bei Großanlagen werden die Stahlbetonteile zweckmäßig als Fertigteile an Land hergestellt und mittels schwerem Gerät eingebaut.
7. Die Wahl der Anlegekonstruktion ist für die Baukosten und für den späteren Betrieb von besonderer Bedeutung. Sie wird je nach Ausbildung entsprechend weit vor den Löschköpfen errichtet. Bei großen Wasserstandsschwankungen eignen sich am besten elastische Stahldalben mit vorgehängter Fenderschürze aus tropischem Hartholz. Jeder Liegeplatz wird mit vier Dalben ausgerüstet, von denen die beiden äußeren vor allem beim Anlegen beansprucht werden und die beiden inneren als Schützdalben für den Löschkopf dienen. Die Dalben sollen mit ihrer Vorderkante etwa 5 m vor Löschkopfvorderkante liegen.
8. Die Bemessung elastischer Stahldalben wird für die bei ordnungsgemäßen Anlegemanövern zu erwartende kinetische Energie so vorgenommen, daß der maximale Anlegedruck in einer Größe bleibt, die das Schiff nicht gefährdet. Außerdem muß der Dalben im Liegebetrieb den Winddruck und sofern vorhanden den Strömungsdruck und deren Auswirkungen aufnehmen können. Die kinetische Energie richtet sich nach der Größe der Schiffe und ihrer Anlegegeschwindigkeit quer zum

Liegeplatz. Letztere hängt ab von der Lage der Brücke und den Anfahrbedingungen. Für die zu berücksichtigenden Anlegegeschwindigkeiten liegen Erfahrungswerte vor. Da bei richtigem Anlegen nicht die gesamte Energie von einem einzigen Dalben aufgenommen werden muß, wird mit einem Abminderungsfaktor gerechnet, der nach deutscher Praxis zwischen 0,4 und 0,5 liegt. Für Wilhelmshaven mußten die Dalben so für 60 tm Arbeitsvermögen bemessen werden, wobei Spannungen an der Streckgrenze zugelassen wurden.

9. Die Festmachereinrichtungen werden zweckmäßig als Pollerdalben völlig unabhängig von der Löschrücke gegründet. Ihre Lage richtet sich nach dem Verläuplan, ihre Bemessung nach den örtlichen Verhältnissen und den anlegenden größten Schiffen. In Wilhelmshaven wurden die Hauptpollerdalben vor Kopf und am Ende eines jeden Liegeplatzes für 250 t Trossenzug und die übrigen Dalben für 125 t Trossenzug bemessen. Die Pollerhauben wurden ersetzt durch Sliphakenstühle mit 1 bis 3 Sliphaken von je 125 t Tragkraft. Diese Ausrüstung hat sich bestens bewährt.
10. Für die Bauausführung in freier See eignen sich besonders sogenannte „Hubinseln“ und die Anwendung von Stahlbeton-Fertigteilen. Die Korrosion von Stahlbauteilen unter Wasser muß besonders berücksichtigt und durch geeignete Gegenmaßnahmen in ihrer Wirkung ausgeschaltet werden.

II. Auswirkungen langperiodischer Wellen in Häfen

In einem Grundsatzmodell mit rechteckigem Hafenbecken wurde die Auswirkung langperiodischer Wellen in Häfen untersucht. Von den verschiedenen Möglichkeiten zur Dämpfung der im Hafenbecken u.U. auftretenden Resonanzschwingungen erwies sich der Einbau von Quermolen in verschiedener Lage, Länge und Anordnung als zweckmäßige Maßnahme, die über ein breites Frequenzband wirksam bleibt; die Quermolen sind dabei in den meisten Fällen mit dem Bestimmungszweck des Hafens zu vereinbaren. Die am idealisierten Hafenmodell gewonnenen Erkenntnisse können bei Modelluntersuchungen für gegebene Häfen beliebiger Gestaltung als Richtlinien benutzt werden.

Inhalt

	Seite
I. Grundsätze für die Ausbildung von Löschrücken für Großtanker, dargestellt am Beispiel der Ölbrücke Wilhelmshaven	170
1. Standortfrage	170
2. Ausbaugröße	170
3. Ausbauf orm moderner Ölhäfen	172
4. Planungs- und Entwurfsgrundlagen	173
5. Berechnungsgrundlagen	177
6. Grundmaße der Brückenkonstruktion, Einzelheiten der Ausbildung	180
7. Wahl der Anlegekonstruktion	184
8. Bemessung elastischer Stahldalben und ihre Ausbildung	185
9. Ausbildung der Festmachereinrichtungen in Wilhelmshaven	188
10. Bauleistungen in Wilhelmshaven	192

	Seite
II. Auswirkungen langperiodischer Wellen in Häfen	195
1. Vorbemerkung	195
2. Modellversuche	195
3. Ergebnis	199

I. Grundsätze für die Ausbildung von Löschbrücken für Großtanker, dargestellt am Beispiel der Ölbrücke Wilhelmshaven ¹⁾

1. Standortfrage

Der überwiegende Teil des Rohöls wird in den sogenannten Entwicklungsländern gewonnen und in den hochindustrialisierten Ländern verbraucht. Der Weg von der Gewinnungsstelle bis zum Verbraucherland führt im allgemeinen über See. Das Rohöl muß dabei in Seehäfen für Olumschlag gelöscht, zwischengelagert und zu den in den Verbrauchszentren liegenden Raffinerien befördert werden. Die Zwischenlagerung in einem leistungsfähigen Tanklager ergibt sich aus der stoßweisen Anfuhr des Rohöls in Großschiffen und dem kontinuierlichen Weitertransport in einer Pipeline oder sonstigen Transportmitteln wie Tankwagen oder kleineren Tankschiffen. Zur Erzielung geringer Rohölkosten am Ort der Verarbeitung ist daher die richtige Wahl des Standortes einer Löschbrücke von besonderer Bedeutung. Da die Seetransportkosten des Rohöls mit steigender Schiffsgröße abnehmen, muß eine Großtanker-Löschanlage in einem Küstengebiet errichtet werden, das in Zukunft die für größte Tankschiffe notwendige Wassertiefe aufweist. Außerdem müssen die technischen Voraussetzungen für die Errichtung des erforderlichen Tanklagers und der Umschlagsbrücke bei tragbarem Kostenaufwand gegeben sein, ohne daß die Kosten für den Weitertransport des Rohöls zu den Raffinerien zu hoch werden.

Die Standortfrage muß daher in jedem Falle sorgfältigst untersucht werden.

Für die Pipeline Nordsee-Ruhrgebiet-Rheinland ergab sich auf Grund sorgfältiger Untersuchungen des Bauherrn, der Nord-West Oelleitung GmbH. (NWO) der am tiefen Wasser der Jade gelegene Heppenser Groden bei Wilhelmshaven als besonders geeignet (Bild 1). Dieser Standort entsprach auch den sonstigen übergeordneten wirtschaftlichen und verkehrstechnischen Belangen, was in jedem Falle angestrebt werden muß.

2. Ausbaugröße

Ausbaugröße und Ausbaustufe müssen sich nach dem zu erwartenden Umschlag richten. Um teure Liegezeiten der Tanker zu vermeiden, muß jede Ölloschanlage in Bau und Ausrüstung so gestaltet werden, daß die ankommenden Schiffe im Normalfalle ohne Verzug anlegen, mit hoher Pumpleistung entladen werden und jederzeit ablegen können.

An der Ölbrücke Wilhelmshaven sollen in den ersten Jahren rd. 9 Mill. Jahrestonnen Rohöl umgeschlagen werden, mit einer späteren Leistungssteigerung auf rd. 20 Mill. t. Nach der Inbetriebnahme der Pipeline wird zunächst mit etwa 300 Tankern pro Jahr gerechnet, mit einem späteren Anstieg auf 700 und mehr Tankern bis zu 100 000 t.d.w.

Die Ölloschbrücke wurde daher vorerst für drei Großschiffsliegeplätze ausgebaut. Sie wird in einer zweiten Ausbaustufe auf sechs Großschiffsliegeplätze erweitert (Bild 2). Zusätzliche Erweiterungen für kleinere Tanker sind durch Fingerpiers zwischen der Hauptlöschanlage und dem Ufer möglich.

¹⁾ Die Bilder sind der Veröffentlichung des Verfassers: „Entwurf und Baudurchführung der großen neuen Olumschlagsbrücke in Wilhelmshaven“, Jahrbuch der Hafentechnischen Gesellschaft 23./24. Band 1955/57, Springer-Verlag Berlin, 1959, entnommen.

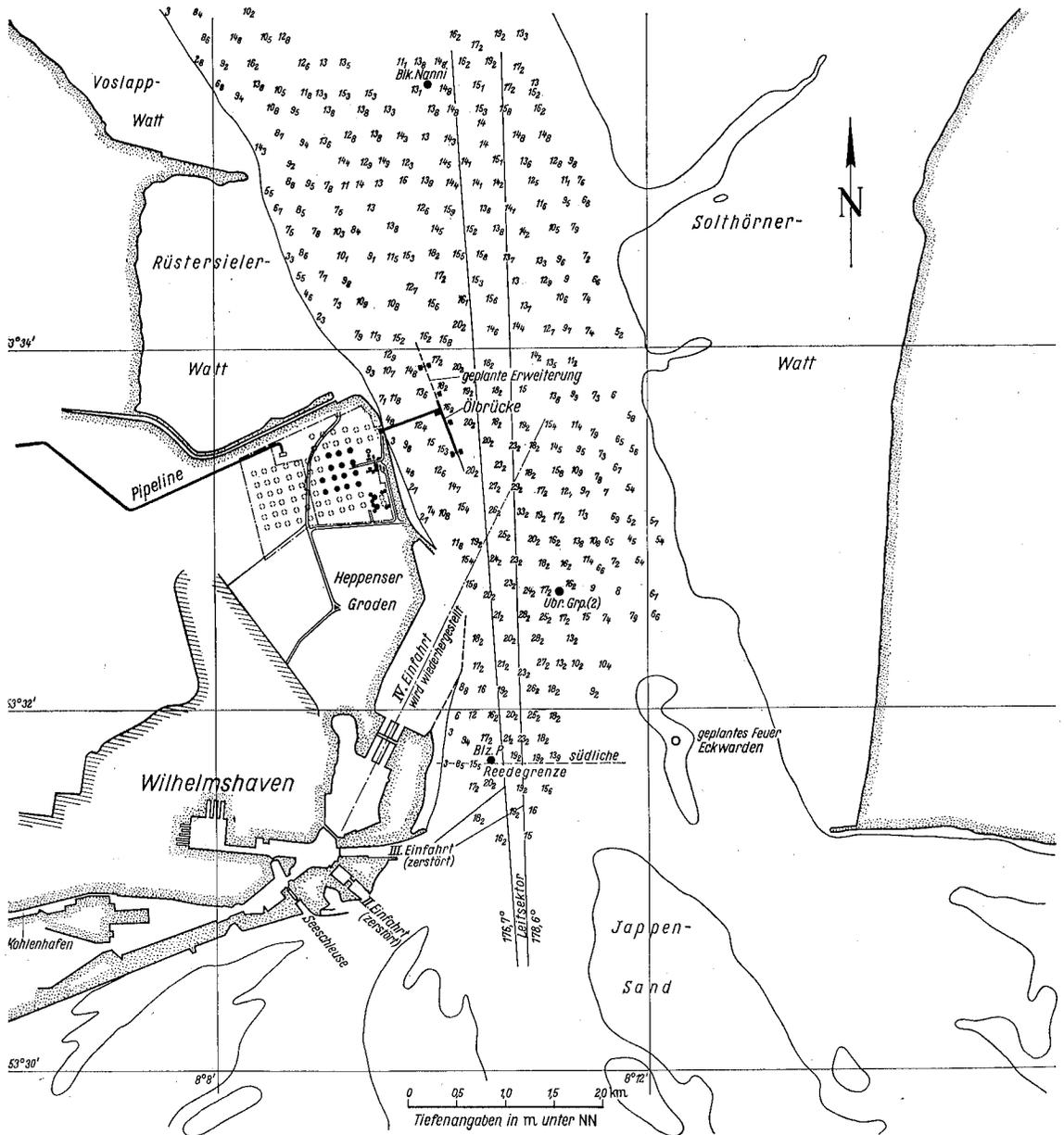


Bild 1
Lage der Ölbrücke im Raum Wilhelmshaven

Umschlagsanlage und Tanklager sind so ausgebildet und gesteuert, daß jede Raffinerie das für sie aus Übersee angelieferte Rohöl tatsächlich erhält. Für das Tanklager wurde ein 1,5 Mill. m² großes Gelände erworben und hierauf in der ersten Ausbaustufe 441 000 m³ Tankraum errichtet, das sind 14 Rohöltanks \varnothing 55 m, 13 m hoch, mit je 31 500 m³ Inhalt (Bild 1). Der weitere Ausbau wird dem Bedarf angepaßt.

Zur Versorgung der Schiffe mit Bunkeröl mußten auf dem Heppenser Groden auch leistungsfähige Bunkeranlagen errichtet werden.

Auch sonst wurden alle Voraussetzungen für eine rasche und einwandfreie Versorgung der Schiffe mit Trinkwasser, Ballastwasser, Lebensmitteln und dergleichen geschaffen und durch gute Verkehrswege dafür gesorgt, daß die Mannschaften trotz der kurzen Liegezeit Gelegenheit haben an Land zu gehen.

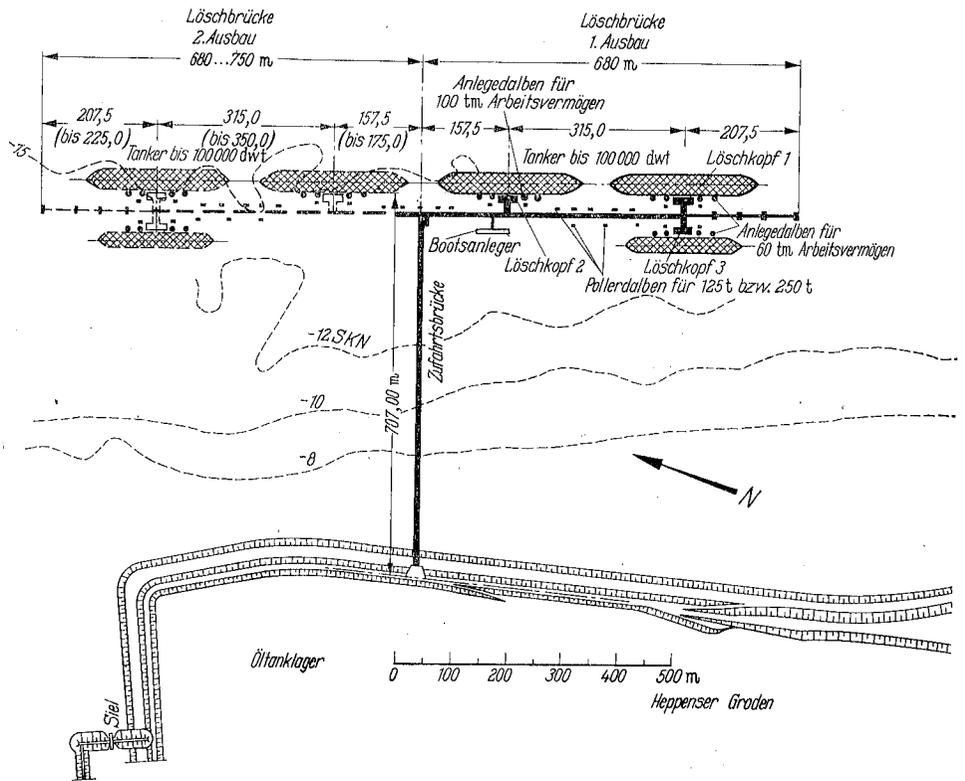


Bild 2
Genereller Übersichtsplan der Ölbrücke

3. Ausbauf orm moderner Ölhäfen

Infolge des wirtschaftlicheren Rohöltransportes in Großschiffen zeigt der Tankerbau seit Jahren den Trend zu immer größeren Supertankern. Gegenüber sonstigen Umschlagshäfen wird in Ölhäfen das Be- und Entladeproblem durch die Pumpfähigkeit des Materials erleichtert. Diese Eigenschaft in Verbindung mit den erforderlichen großen Wassertiefen für Supertanker und der Zwang zu einer möglichst wirtschaftlichen Gestaltung

fürten zu einer neuen Form von Hafenanlagen für Großtanker. Es sind dies weit in die See oder den Seeweg bis in das ausreichend tiefe Wasser vorgestreckte offene Pierbrücken. Diese Anlagen unterscheiden sich in Planung, Konstruktion und Bau- durchführung grundlegend von den üblichen Umschlagshäfen für Stückgut oder Massengut.

Bei den neuen Hafenanlagen für Großtanker müssen die Bauelemente unter schwierigen Strömungs-, Wellen-, Wind- und Wetterverhältnissen eingebracht werden. Dies muß in der Planung, Konstruktion und Bauausführung berücksichtigt werden, um das Risiko in tragbaren Grenzen zu halten. Alle Anlagen müssen dabei auf das notwendige Minimum beschränkt, aber entsprechend sinnvoll und solide ausgebildet werden.

Das neue System erwies sich auch für Wilhelmshaven als die sowohl in der Anlage als auch im Betrieb technisch und wirtschaftlich zweckmäßigste Lösung (Bilder 1, 2 und 8).

Ölumschlagsbrücken werden heute mit besonders ausgerüsteten Löschköpfen versehen. Sie befinden sich etwa in der Mitte des jeweiligen Liegeplatzes und tragen das erforderliche Schlauchgerüst für die Be- und Entladung. Die Schiffe liegen jedoch zweckmäßig nicht unmittelbar an diesen Löschköpfen, sondern an unabhängigen Anlegekonstruktionen. Diese müssen den Anlegestoß abfedern und den Liegedruck aufnehmen, ohne die eigentliche Brücke zu beanspruchen.

Gleichfalls unabhängig von der Löschbrücke werden die Festmacheeinrichtungen ausgebildet und gegründet. So können sich Überlagerungen nicht nachteilig auf die Brücke auswirken. Die Lage der Festmacheeinrichtungen richtet sich nach dem Vertäuplan der Schiffe.

Die Zufahrtsbrücke erhält den erforderlichen Landanschluß zum Tanklager und zu den Verkehrswegen sowie die erforderliche Anzahl von Rohrleitungen, die beidseitig der Fahrbrücke verlegt werden können. Auf der Löschbrücke liegen die Rohre aus Sicherheitsgründen nur landseitig.

Obige und weitere wichtige Grundsätze sind bei der Planung und beim Bau der neuen Ölbrücke in Wilhelmshaven in allen Konsequenzen berücksichtigt worden.

4. Planungs- und Entwurfsgrundlagen

Voraussetzung für eine einwandfreie Planungs-, Entwurfs-, Ausschreibungs- und Angebotsbearbeitung und eine sinnvolle Bauausführung ist die genaue Kenntnis der örtlichen Verhältnisse betreffend Wind, Wetter, Sicht, Tide, Wasserstände, Sturmfluten, Strömungen, Eisgang, Bodenaufbau, Bodenwerte usw. Dank der über lange Zeiträume laufenden Beobachtungen der zuständigen Dienststellen bereitete das Zusammenstellen der meisten Unterlagen in Wilhelmshaven keine besonderen Schwierigkeiten, zum Unterschied von Entwicklungsländern, in denen langjährige Beobachtungen häufig noch fehlen.

Vor Beginn der detaillierten Planungs- und Entwurfsarbeiten für eine Ölbrückenanlage empfiehlt es sich, eingehende Strömungs- und Modelluntersuchungen durchzuführen und die Ergebnisse beim Entwurf zu berücksichtigen. Sie sollen vor allem die Gefahr von Kolken sowie die Auswirkungen der möglichen Strömungen, des Eisganges usw. auf die vorgesehene Grundlösung der Brücke und auf das Anlegen, Liegen und Ablegen der Schiffe erkunden.

Im Falle Wilhelmshaven sind diese Versuche vom Franziusinstitut der Technischen Hochschule Hannover durchgeführt worden.

Auf Grund allgemeiner Erfahrungen, der Bodenaufschlüsse und der sonstigen besonderen örtlichen Bedingungen stand fest, daß in Wilhelmshaven nur eine offene Pierkonstruktion auf verhältnismäßig schlanken, keine tiefen Kolke verursachenden Pfählen in Frage kam. Die Pfähle mußten allerdings stark genug sein, um neben den Beanspruchungen aus den Brückenüberbauten, Rohrlasten, Winddruck und Strömungsdruck, vor allem Eisdruck und Eisstoß sowohl im Bau als auch im Betrieb sicher aufnehmen zu können.

Mit Rücksicht auf den Untergrund durften im Bereich der Ölbrücke Wilhelmshaven keine größeren Baggerarbeiten ausgeführt werden. Die seeseitigen Anlegekonstruktionen mußten daher mit ihrer Vorderkante 707 m vom Deich entfernt angeordnet werden. Sie befinden sich so in einem Gebiet der für 100 000-t-dw-Tanker erforderlichen natürlichen Wassertiefe von 15 m unter SKN. Örtliche geringe Glättungen von Sohlenriffeln mußten hierbei in Kauf genommen werden. Größere Baggerungen, die bei der vorhandenen Bodenformation gefährliche Folgen haben konnten, wurden jedoch vermieden. Sie hätten die diluvialen Kies-, Grobsand- und verkitteten Feinsandschichten, die als Deckschichten über den vorwiegend tertiären, schluffigen Mittel- und Feinsanden liegen und die Sohle stabilisieren, beseitigt und damit die gesamte Sohle im Bereich der Ölbrücke in Bewegung gebracht, wobei die Folgen nicht abzusehen gewesen wären.

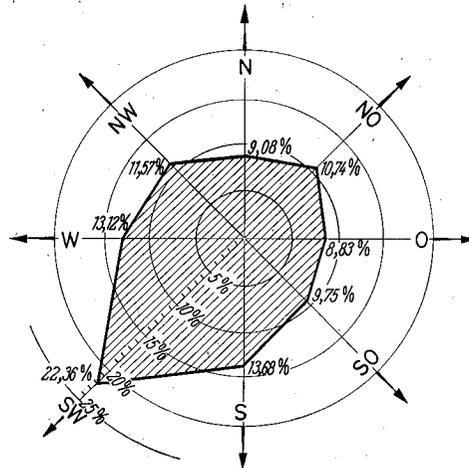


Bild 3

Jahres-Windrose für Wilhelmshaven
(Mittelwerte von 1903 bis 1918)

Um ein einfaches An- und Ablegen und ein ruhiges Liegen der Tanker sicherzustellen, mußte die Löschrücke möglichst in die Stromrichtung der Jade gelegt werden (Bild 1).

Eingehende Untersuchungen hatten gezeigt, daß im Bereich der Brücke Flut- und Ebbstromrichtung nur um einen Winkel von 6° voneinander abweichen. Da beide Ströme etwa gleich stark sind, wurde die Löschrückennachse in der Winkelhalbierenden, also unter 3° zum Flut- bzw. Ebbstrom, angeordnet.

Um den späteren Betrieb der IV. Einfahrt Wilhelmshaven nicht zu behindern, mußte der südlichste Pollerdalben der Ollöschrücke mindestens 500 m von der Schleusenachse entfernt angeordnet werden.

Die nunmehr vorhandenen Fahrwasserverhältnisse in der Jade sind aus Bild 1 ersichtlich. Der Leitsektor des Leuchtturms Arngast mußte hierzu um einige Grade verschwenkt werden. Die Fahrwasserbegrenzung ist nun soweit von der Ölbrücke entfernt, daß die an der Brücke liegenden Schiffe bei langsamem Verkehr im Fahrwasser nicht mehr gestört werden. Gleichzeitig blieb das öffentliche Interesse an einer aufnahmefähigen Reede vor Wilhelmshaven gewahrt.

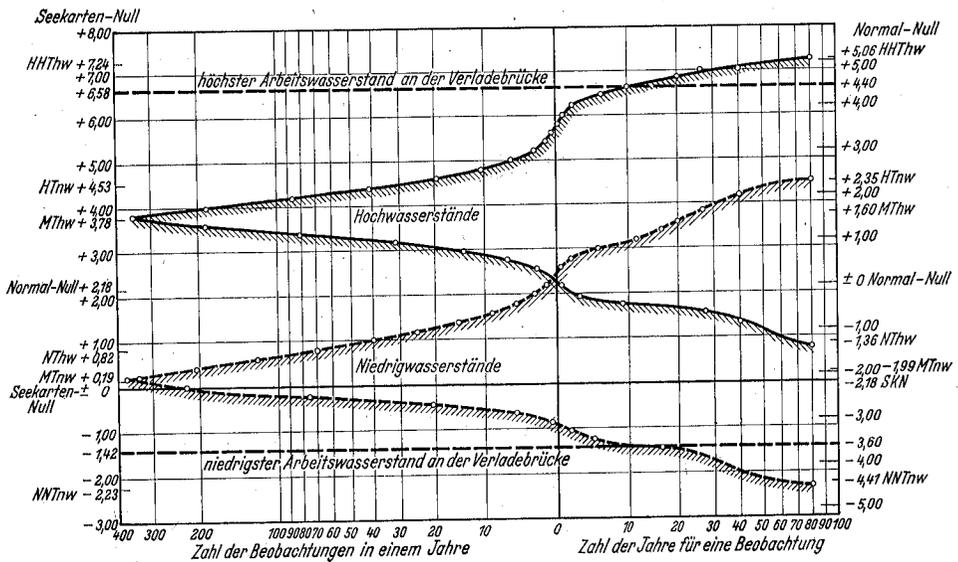


Bild 4
Häufigkeit der Wasserstände an der Seeschleuse Wilhelmshaven

Bezüglich der genauen Angaben über die sonstigen örtlichen Verhältnisse wird auf die unter 1) genannte Veröffentlichung verwiesen. Zur allgemeinen Unterrichtung werden hier lediglich die Jahreswindrose (Bild 3), die Häufigkeit der Wasserstände (Bild 4), die extremen Tankschiffslagen beim höchsten und niedrigsten Arbeitswasserstand (Bild 5), die extremen Schlauchanschlußlagen (Bild 6) und der Lageplan der Seebohrungen vor dem Heppensen Groden (Bild 7), gebracht.

Die Windverhältnisse an der Brücke sind günstig. Das Jahresmittel der Windgeschwindigkeiten beträgt 5,7 m/sek, die größte stündliche Windgeschwindigkeit 26 m/sek. Der Windstau in der Jade kann je nach Windrichtung von - 1,30 bis + 2,00 m betragen. Die langjährigen Beobachtungen ergaben im Mittel 5,3 Sturmfluten pro Jahr. Es sind aber nur 2 sehr schwere Sturmfluten in 60 Jahren aufgetreten.

Die größte Wellenhöhe beträgt 1,30 m, die größte Strömungsgeschwindigkeit nach amtlichen Feststellungen 2,5 sm/h. Der mittlere Tiedenhub = rd. 3,60 m.

Die Häufigkeit der Wasserstände gemäß Bild 4 war maßgebend für die zu wählenden extremen Arbeitswasserstände. Man wählte im Hinblick auf die zu erwartende starke Belegung der Brücke als höchsten Arbeitswasserstand + 4,40 NN und als niedrigsten - 3,60 NN. Beide Wasserstände werden in 10 Jahren nur einmal über bzw. unterschritten.

Aus Bild 5 ist zu erkennen, daß bei der vorhandenen Sohlenlage — 15,00 SKN = — 17,24 NN auch bei größten Tankern selbst bei Wasserständen unter dem niedrigsten Arbeitswasserstand eine Bodenberührung mit Sicherheit vermieden werden kann, wenn der Zeitpunkt ihres Anlegens und die Pumpleistung entsprechend aufeinander abgestimmt werden.

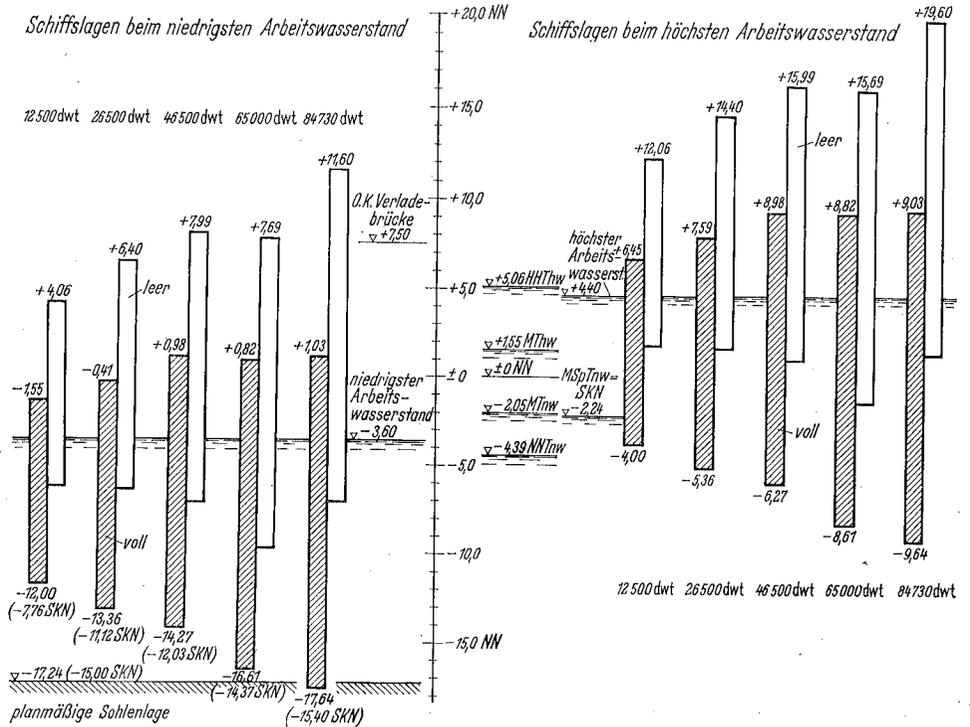


Bild 5

Extreme Tankschiffslagen beim höchsten und niedrigsten Arbeitswasserstand

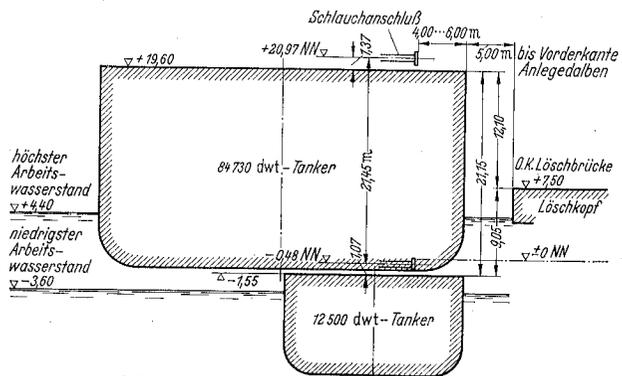


Bild 6

Extreme Schlauchanschlüßlagen

Bild 6 zeigt, daß die Schlauchanschlüsse beim kleinsten in Frage kommenden Tanker von 12 500 tdw in tiefster Arbeitslage und dem in höchster Arbeitslage befindlichen 84 730-tdw-Tanker eine Höhendifferenz von 21,45 m aufweisen. Beim 100 000-tdw-Tanker ist die Differenz noch größer. Dies mußte bei den Schlauchgerüsten berücksichtigt werden.

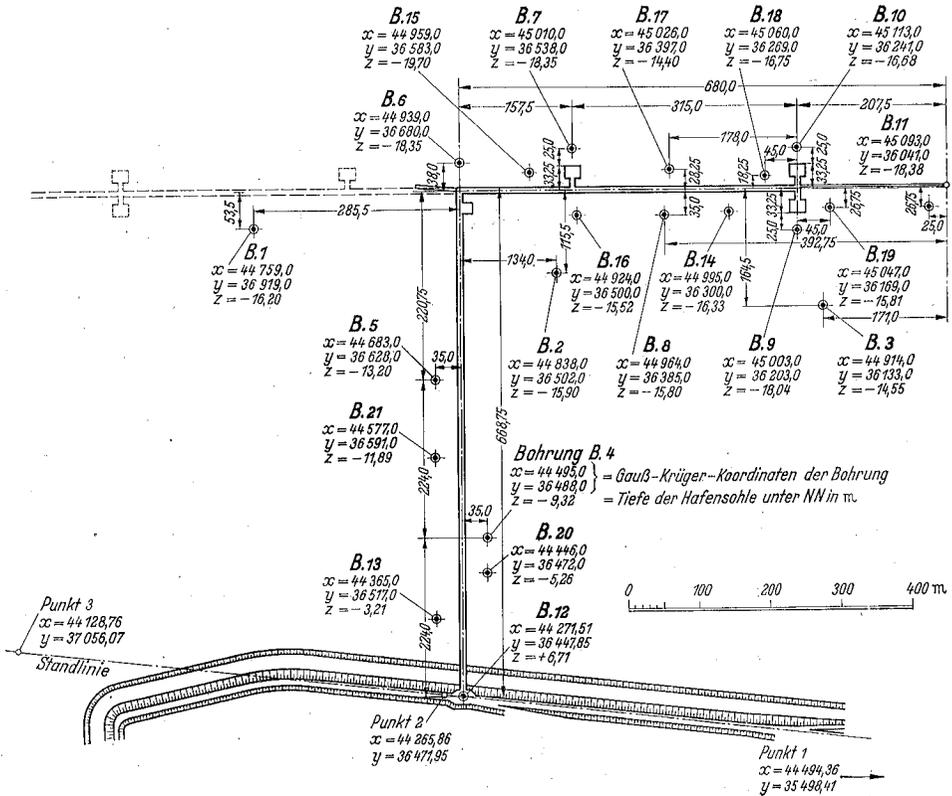


Bild 7

Lageplan der Seebohrungen vor dem Heppenser Groden

Der Untergrund an der Löschrücke besteht vorwiegend aus Feinsand, Sand und oben aus Kies. Abweichend von den ersten drei Erkundungsbohrungen B₁, B₂, B₃ (Bild 7) wurde zwischen Kreuzkopf und Löschkopf 2 (Bilder 7 und 8) eine 6—8 m unter Hafensohle beginnende, bis zu 2,50 m dicke Lignitschicht erbohrt. Sie war vor allem für die Pollergründungen von Bedeutung, deren Pfähle wegen der aufzunehmenden hohen Zuglasten, durch die Lignitschicht hindurch, tief eingerammt werden mußten. Dank der sorgfältigen Abbohrung wurde diese Schicht rechtzeitig erkannt und die Pollergründung in diesem Bereich mit Sonderpfählen vorgenommen.

5. Berechnungsgrundlagen

Die Berechnungsgrundlagen müssen dem jeweiligen Projekt angepaßt werden. Die folgenden für die Ölbrücke Wilhelmshaven gestellten Forderungen sollen hierzu einen allgemeinen Überblick vermitteln.

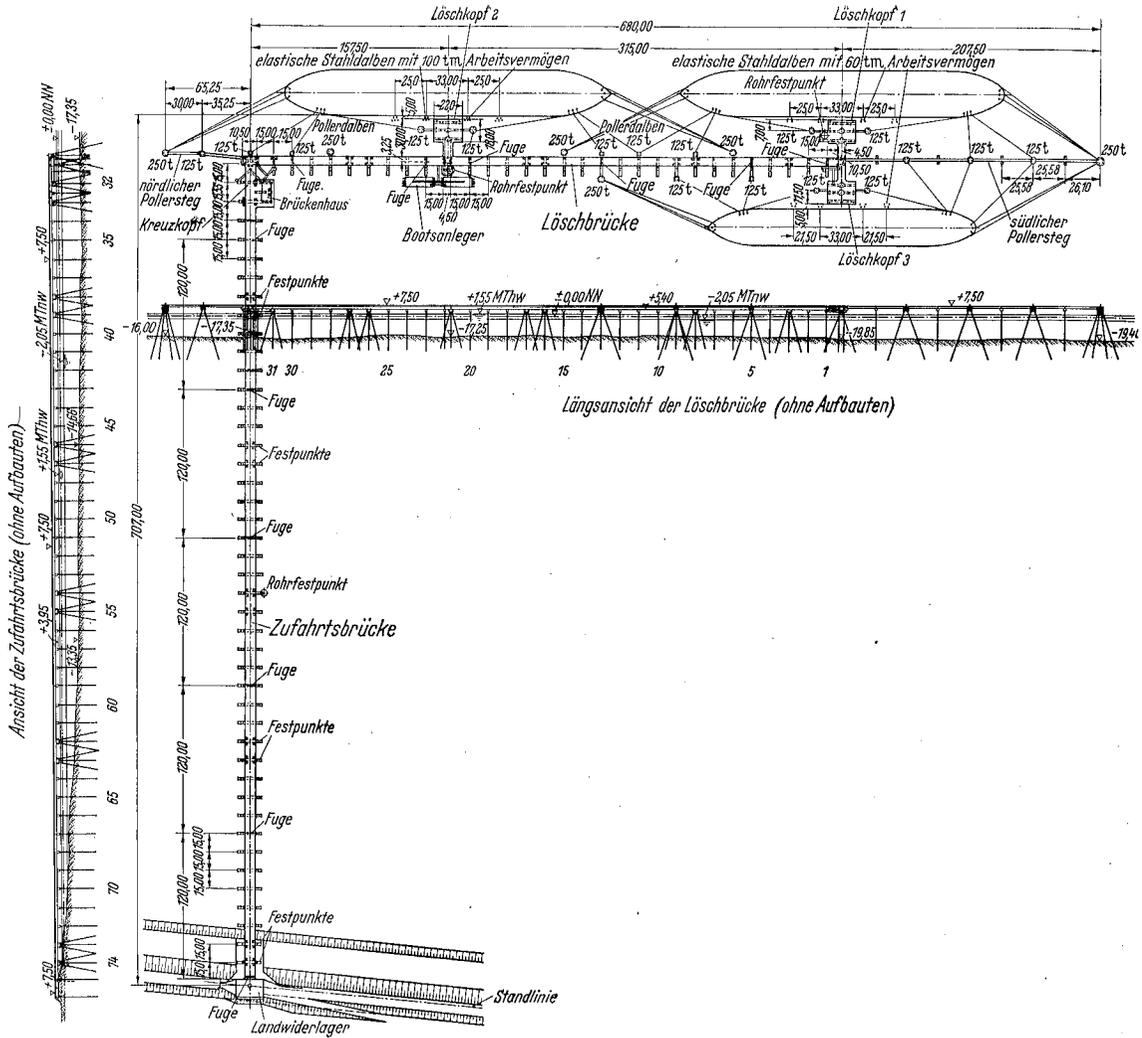


Bild 8

Erste Ausbaustufe der Ölbrücke

5.1 Vorschriften und Belastungsansätze

Es wurden die einschlägigen DIN zugrundegelegt, vor allem für:
 Stahlbeton- und Spannbetonbauteile DIN 1045, 1075, 4225, 4227,
 Stahlbauteile DIN 1050, 1073, 4114,
 Gründungen DIN 1054,
 Eigengewichte DIN 1055,
 Winddruck und Bremskräfte DIN 1072.

Der Strömungsdruck wurde bei der max. Geschwindigkeit von 1,27 m/sek bei den Rohrpfehlen mit einem Formfaktor für Druck und Sog $c = 1,5$ mit $0,125 \text{ t/m}^2$ Querschnittsfläche angesetzt.

Die Reibungskräfte wurden bei den Rollenlagern der Rohre und der Brücke mit dem Reibungsfaktor $\mu = 0,1$ errechnet. Für Stahlgleitlager wurde $\mu = 0,4$ gefordert.

Die Belastung durch Eis wurde durch eine Grundlast von 1 t/lfdm Brücke bzw. 15 t je Pfahl in möglicher Lage rechnerisch erfaßt. Durch eine besondere Eisaussteifung unter Mittelwasserhöhe kann jedoch auch der 4fache Eisdruck bzw. Stoß von den Pfahlgründungen aufgenommen werden.

Bei den elastischen Anlegekonstruktionen wurde die Bemessung für eine Anlegegeschwindigkeit quer zum Liegeplatz gemäß Empfehlung E 40 des Arbeitsausschusses „Ufereinfassungen“ der Hafenbautechnischen Gesellschaft e.V. und der Deutschen Gesellschaft für Erd- und Grundbau e. V. gefordert²⁾. Die Einbindung in den Boden wurde nach „Blum“³⁾ erfaßt. Weitere Einzelheiten s. Abschnitt 8.

Die Trossenzüge wurden nach Empfehlung E 12 des Arbeitsausschusses „Ufereinfassungen“ festgelegt und zwar: Für Hauptpoller vor Kopf und am Ende eines jeden Liegeplatzes: 250 t/Poller dalben; für die sonstigen Poller: 125 t/Poller dalben. Die Anordnung der Poller dalben wurde gemäß Bild 8 bzw. 15 verbindlich festgelegt. Für die Bemessung der Poller dalben gründungen war der Pollerzug von 250 t bzw. 125 t je Block, in jeder Richtung wirkend, waagrecht anzusetzen.

Die Pollerköpfe und ihre Anschlüsse mußten für einen Zug von jeweils 250 t bzw. 125 t auch in einer bis zu 30° gegen die Waagerechte nach oben gerichteten Neigung berechnet werden.

5.2 Lastfälle

Folgende Lastfälle mußten untersucht werden, wobei die anzusetzenden Kräfte in ungünstigster Zusammenstellung berücksichtigt werden mußten:

- Lastfall 1: Eigengewicht und Verkehrslasten, Rohrlasten, Strömungsdruck sowie die Hälfte der größten Rohrreibungskräfte in gleicher Richtung wirkend.
- Lastfall 2: Eigengewicht und Verkehrslasten, Bremskräfte, Rohrlasten, Strömungsdruck, Windlast sowie größte Rohrreibungskräfte in gleicher Richtung wirkend.
- Lastfall 3: Eigengewicht und Verkehrslasten, Bremskräfte, Rohrlasten, Strömungsdruck, Windlast, größte Rohrreibungskräfte, falls ungünstig, auch gegenläufig wirkend, Trossenzüge, Eisstoß.

5.3 Zulässige Spannungen

Unter Berücksichtigung der besonderen Verhältnisse des vorliegenden Bauwerkes und der Lastannahmen, die auch ungünstigste Kombinationen erfassen, wurden folgende Spannungen zugelassen:

Brückenteile, Joche, Poller und zugehörige Pfähle

- Lastfall 1: entsprechend den einschlägigen DIN-Vorschriften.
- Lastfall 2: 15%ige Spannungserhöhung gegenüber Lastfall 1.
- Lastfall 3: 30%ige Spannungserhöhung gegenüber Lastfall 1.

²⁾ Sammelveröffentlichung aller bis 1959 erschienenen Empfehlungen siehe: Empfehlungen des Arbeitsausschusses „Ufereinfassungen“ Berlin 1960, Verlag von Wilhelm Ernst u. Sohn.

³⁾ Blum, H.: „Wirtschaftliche Dalbenformen und deren Berechnung“ Bautechnik 1932 Heft 5.

Elastische Stahldalben

Für die geforderten Dalbenbeanspruchungen wurde die Fließgrenze als zulässige Spannung angesetzt.

5.4 Zulässige Belastung der Pfahlgründungen

Grenzlasterkennungen im tragfähigen, nicht bindenden Boden bei Rammpfählen:

$$\begin{aligned} \text{Spitzenwiderstand } q_s &= 500 \text{ t/m}^2 \\ \text{Mantelreibung } q_m &= 5 \text{ t/m}^2 \end{aligned}$$

Hierbei wurde ein so tiefes Einrammen der Pfähle in den tragfähigen Baugrund vorausgesetzt, daß eine ausreichende Verdichtung vor allem in der Umgebung des Pfahlfußes vorhanden ist und bei Stahlpfählen mit Flügeln auch die Pfropfenbildung am Pfahlfuß gewährleistet ist.

Geforderte Sicherheiten gegen Erreichen der Pfahlgrenzlasterkennungen:

Pfähle der Brückenjoche:

Lastfall 1: Zug	$\eta = 2,00$
Druck	$\eta = 2,00$
Lastfall 2: Zug	$\eta = 2,00$
Druck	$\eta = 1,75$
Lastfall 3: Zug	$\eta = 1,75$
Druck	$\eta = 1,50$

Pfähle der Pollergründungen:

Bei Anwendung von Abreißpollern oder gleichwertigen Konstruktionen wurde sowohl für Zug- als auch für Druck $\eta = 1,25$ zugelassen unter der Voraussetzung, daß Stahlrampfpfähle angewendet wurden, bei denen Grenzmantelreibung später infolge Verkrustung ansteigt, sonst $\eta = 1,50$.

6. Grundmaße der Brückenkonstruktion

Einzelheiten der Ausbildung

Moderne Ölbrücken gliedern sich in den Landanschluß, die Zufahrtsbrücke, den Kreuzkopf, die Löschrücke, die Löschköpfe, die Anlegekonstruktion und die Festmacheinrichtungen mit den zugehörigen Pollersteinen. Die entsprechende Gliederung für Wilhelmshaven mit den gewählten Maßen geht aus Bild 8 hervor.

Die großen Rohre werden freispannend über den Jochbalken verlegt. Hierdurch ergibt sich zwangsläufig die Trennung der eigentlichen Rohrbrücke von der Fahrbrücke. Um Schwingungen zu vermeiden, wird die Stützweite der großen Rohre im allgemeinen nicht größer als 15 m gewählt. Der Jochabstand ist somit begrenzt, sofern nicht Zwischenstützen, von der Fahrbrücke auskragend, angeordnet werden. Kleinere Rohre können unter der Brückenfahrbahn angeordnet werden mit einer Stützweite bis zu rd. 7,50 m.

Die Rohre müssen bei dieser offenen Bauweise so hoch gelegt werden, daß sie im ungünstigsten Falle nur noch von den Wellenkämmen berührt werden können.

Für Wilhelmshaven ergab sich so beim HHTw + 5,06 NN und 1,39 m größten Wellenhöhe die Rohrunterkante + 5,60 NN. Unter Berücksichtigung von 20 cm Bauhöhe der Rohrlager und eines 5 cm dicken Mörtelbettes mußte die Oberkante der Bankettbalken auf + 5,35 NN gelegt werden (Bild 9).

Bei großen Anlagen ist es zweckmäßig, Rohrführungen über der Brückenfahrbahn zu vermeiden. Das Fahrplanum muß daher so hoch über den Lagern der großen Rohre und damit der Jochbalken angeordnet werden, daß alle Rohrkreuzungen unter der Brückenfahrbahn Platz finden. Dabei ergibt sich im allgemeinen eine Höhe, die die Anordnung eines Revisionsganges unter der Brückenfahrbahn gestattet. Damit die unter der Brücke liegenden kleineren Rohre und der Revisionsgang ungehindert durchlaufen können, wird die Fahrbrücke ohne Querscheiben ausgeführt. Zur Erhöhung der Steifigkeit können die Fahrbahnplatte durchgehend und die Längsträger über den Jochbalken verstärkt werden.

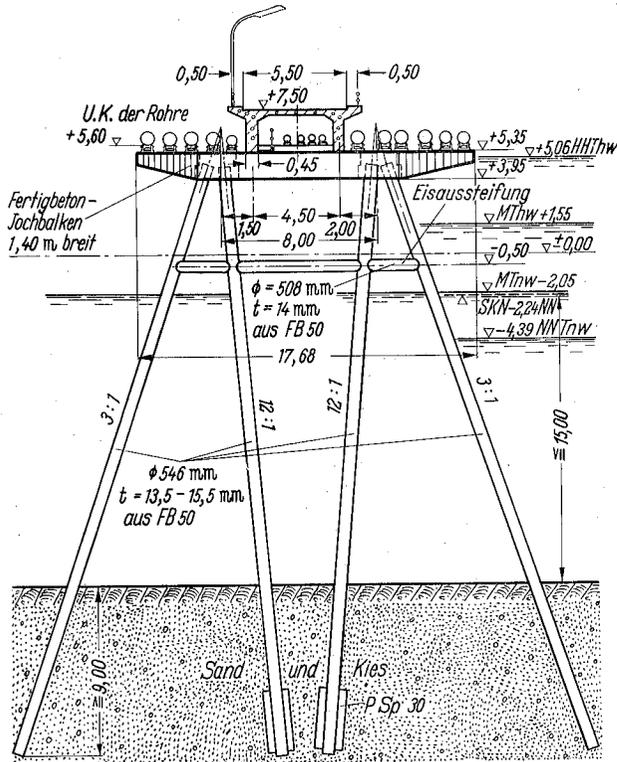


Bild 9
Querschnitt der Zufahrtsbrücke

In Wilhelmshaven ergab sich so die Oberkante der Brückenfahrbahn auf + 7,50 NN und eine Mindestdicke der Fahrbahnplatte von 25 cm (Bilder 9 und 10).

Die Rohre und damit die Fahrbahngradienten können auf ganzer Brückenlänge waagrecht geführt werden.

Die Fahrbahnbreite richtet sich nach der Brückenlänge und den Sichtverhältnissen. In Wilhelmshaven wurde sie 5,50 m breit gewählt mit 0,50 m Schrammborden bis zur Geländerachse (Bilder 9 und 10). Hierbei ergab sich eine 3,00 m breite Fahrspur und eine 2,50 m breite Standspur. Bei 5,50 m Straßenbreite ist der laufende Gegen-

verkehr kleinerer Kraftfahrzeuge, z. B. von Personenwagen, ohne Schwierigkeiten möglich. Die Fahrbahn wird für das 12-t-Regelfahrzeug bemessen. Dadurch ist es möglich, die Brücke mit einem Straßenkran zu befahren und ihn bei notwendigen Reparaturen oder Montagen an beliebiger Stelle einzusetzen.

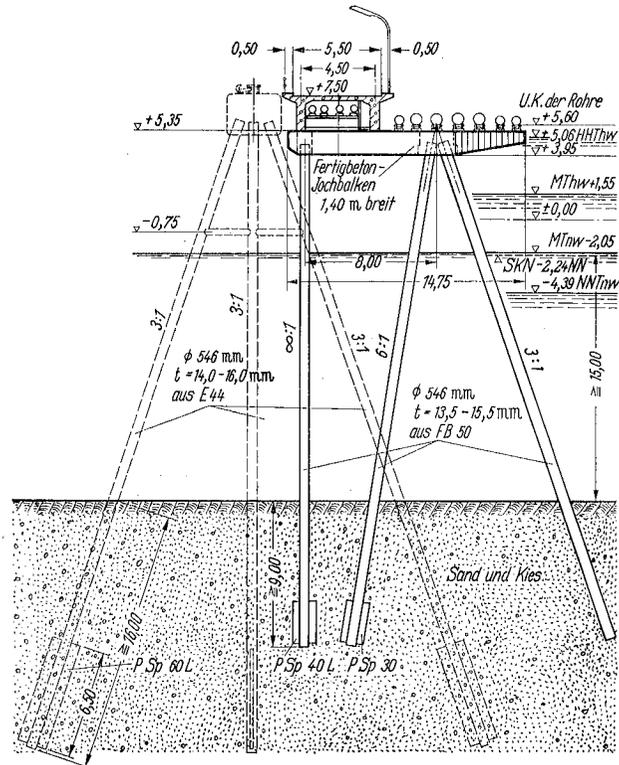


Bild 10

Querschnitt der Löschbrücke

Die Länge der Jochbalken ergibt sich aus den neben der Brückenfahrbahn aufzulagernden Rohrleitungen. In Wilhelmshaven sind die Jochbalken der Zufahrtsbrücke 17,68 m und die der Löschbrücke 14,75 m lang (Bilder 9 und 10).

Die Löschköpfe müssen den Schlauchgerüsten und den Rohrführungen angepaßt werden und auch die Unterbringung einer Gangway gestatten. Damit die Schlepper auch zwischen Schiff und Löschbrücke operieren können, muß die Löschkopf Vorderkante 30 m vor der Löschbrücken Vorderkante liegen (Bild 8).

In Wilhelmshaven erhalten die Brückenpfähle Drucklasten von 100 bis 180 t, die Pollerpfähle maximal 280 t Druck und 230 t Zug. Die Brückenpfähle wurden 28,0 bis 35,0 m, die Pollerpfähle bis 43,5 m lang ausgeführt.

Als Gründungspfähle wurden, abgesehen vom Landwiderlager, vor allem mit Rücksicht auf den Korrosionsschutz, nahtlose Stahlrohrpfähle ϕ 546 mm aus Feinkornstahl gewählt (Bilder 9 und 10).

Die Wandung des obersten Pfahlrohrschusses, der der Korrosion am meisten ausgesetzt ist, wurde mit einem Zuschlag von 2 mm, bei den Brückenpfählen 15,5 mm und bei den Pollendalbenpfählen 16,0 mm dick gewählt (Bilder 10 und 13). Der anschließende Schuß ist 1,5 mm dünner. Beim untersten, ganz im Boden befindlichen Schuß wurde die Wanddicke um weitere 0,5 mm vermindert, und damit die statisch erforderlichen Dicken 13,5 bzw. 14 mm eingehalten.

Zur Verminderung der Korrosion mußten alle Außenflächen der Pfähle bis 2,0 m unter Hafensohle durch Sandstrahlung von der Walzhaut und an der Oberfläche befindlichen Lunkern befreit werden. Außerdem wurde gefordert, von Unterkante Betonüberbau bis etwa - 6,40 NN, sowie von 5,00 m über bis 2,00 m unter planmäßiger Hafensohle einen vierlagigen Steinkohlenteerpech-Kaltanstrich aufzubringen. Weiter wurden alle Vorkehrungen für einen späteren kathodischen Schutz mit Fremdstromanlage getroffen.

Die Pfähle wurden durch Veränderung der Einbindelänge in den tragfähigen Boden und durch eine besondere Fußausrüstung mit angeschweißten Stahlflügeln aus kupierten Peiner Spundwandprofilen sowie eine entsprechende Kopfausrüstung den angreifenden Lasten und dem Untergrund angepaßt.

Die Fußflügel mußten so ausgebildet und angeschlossen werden, daß bei einwandfrei gewährleisteter Pfropfenbildung die Pfahlfüße den Rammvorgang ohne Zerstörungen sicher überstehen konnten.

Um die jeweils auftretenden größten Pfahlkräfte sicher in die anschließenden Stahlbetonteile überleiten zu können, wurden die Pfahlköpfe, nach Pfahltypen variiert, mit durchgesteckten und verschweißten Eisenbahnschienen und angeschweißten Laschen ausgerüstet.

Obwohl die Pfähle sowohl im Jochbalken als auch im Erdboden voll eingespannt sind, wirken die normalen Joche in Brückenlängsrichtung infolge Biegsamkeit der Pfähle wie Pendelstützen.

Alle quer zum Brückenbauwerk angreifenden Horizontalkräfte werden laufend durch die Schrägpfahlböcke der Joche aufgenommen (Bilder 9 und 10). In der Straßenbrücke wurden Bewegungsfugen mit Rollenlagern in 120 m Abstand angeordnet (Bild 8). Die Bewegungsfugen in der Fahrbahn wurden durch eine bewährte Schleppblechkonstruktion abgedeckt.

Alle auf diese Brückenabschnitte entfallenden Längskräfte werden an den sogenannten Festpunktjochen durch je 4 in Längsrichtung stehende Pfahlböcke unter 3:1 aufgenommen. Als Beton wurde B 225, als Bewehrung Betonstahl I gewählt.

Im übrigen mußten die Brückenabmessungen und die Gestaltung der Einzelteile bei Wahrung der statisch-konstruktiven Belange so gewählt werden, daß die Fertigstellung des gesamten Bauwerkes in der geforderten Qualität und außerordentlich kurzen Bauzeit mit normalem Kostenaufwand möglich wurde.

Dies war nur bei Fertigteilbauweise möglich. Die 75 bzw. 65 t schweren Jochbalken der Zufahrts- bzw. Löschrücke und die rd. 137 t schweren 14,2 m langen Teile des Brückenüberbaues wurden an Land vorfabriziert, zur Brückenbaustelle gefahren und mit einem schweren Schwimmkran eingesetzt.

Die Plomben in den Jochbalken wurden für die Überleitung der Pfahlkräfte ausgebildet und die Plomben in den Brückenfeldern zur Herstellung einer über 8 Felder durchlaufenden Brücke mit lotrechter Anschlußbewehrung an die Jochbalken. Die Plomben wurden mit B 300 geschlossen, womit eine solide, zusammenwirkende Gesamtkonstruktion erreicht wurde.

7. Wahl der Anlegekonstruktion

Die richtige Wahl und Bemessung der Anlegekonstruktion ist für die Betriebssicherheit jedes Liegeplatzes von besonderer Bedeutung. Sie muß in jedem Ausführungsfalle besonders untersucht werden. Dabei spielen neben der Frage des Anlegens mit oder ohne Schlepperhilfe, die Schiffsgrößen und die Anfahrtbedingungen, die Wind-, Wellen- und Strömungsverhältnisse, und vor allem auch die Wasserstandsschwankungen eine wichtige Rolle.

Die Voruntersuchungen für Wilhelmshaven hatten gezeigt, daß beim vorgesehenen Anlegen mit Schlepperhilfe als Anlegekonstruktion für jeden Liegeplatz ein Berthing Beam oder die Ausrüstung mit 4 elastischen Stahldalben in Frage kam. In beiden Fällen ist die Anlegekonstruktion völlig getrennt von der Brücke.

Der Berthing Beam besteht aus einem kräftigen Stahlbetonkopfbalken auf schräg eingerammten Stahlpfählen. Er wird unter den gegebenen Verhältnissen etwa 75 m lang ausgeführt. Die Enden sind abgeschrägt, so daß ein Schiffsstoß dort üblicherweise nicht angreifen kann. Die kinetische Energie des anlegenden Schiffes wird durch die Hebung des Betonkopfes und die Federspannung der durchgebogenen Pfähle aufgenommen. Die durchlaufende Anlegestrecke erleichtert das Anlegen.

Bei elastischen Stahldalben muß die gesamte Energie durch Federspannung der elastischen Dalbenpfähle aufgenommen werden. Eine durchlaufende Anlegefläche ist nicht vorhanden.

Nach sorgfältiger Gegenüberstellung der beiden Ausführungsmöglichkeiten ergab sich bei den Wilhelmshavener Verhältnissen eine eindeutige wirtschaftliche und technische Überlegenheit der Dalbenlösung. Dies ist vor allem auf die großen Wasserstandsschwankungen zurückzuführen mit einem Höhenunterschied von 8,0 m zwischen höchstem und niedrigstem Arbeitswasserstand.

Da beim Berthing Beam der Auftrieb das wirksame Gewicht des Kopfbalkens stark beeinflussen würde, muß der Kopfbalken über dem höchsten Arbeitswasserstand angeordnet werden. In dieser Lage hätte sich in Wilhelmshaven aber eine sehr teure Fenderung ergeben, zumal beim niedrigsten Arbeitswasserstand und kleinsten voll beladenen Schiff ein tiefster Stoß auf $-2,00$ NN berücksichtigt werden mußte.

Die genaue Untersuchung des Berthing Beams hat weiter ergeben, daß das Gewicht des Kopfbalkens bei einem Stoß nahe dem Balkenende keine nennenswerte Arbeit leistet, weil der Hebung im Stoßbereich eine Senkung auf der anderen Balkenseite gegenübersteht. Da ein Berthing Beam für den Stoß im Randbereich bemessen werden muß, ist bei einem Stoß im Mittelbereich das rechnungsmäßige Arbeitsvermögen sehr hoch. Es kann aber nicht genutzt werden, weil sonst die Beanspruchung des Schiffes zu groß würde. Außerdem müßte der Kopfbalken im mittleren Bereich wesentlich stärker ausgeführt werden als bisher üblich, damit er bei einem schweren Stoß im Mittelbereich nicht bricht.

In einem Havariefall ist ein Berthing Beam der bisherigen Ausführungsart nur mit hohem Zeit- und Kostenaufwand wiederherzustellen. Der Liegeplatz fällt während dieser Zeit aus. Zur Vermeidung dieser Nachteile müßte der Berthing Beam noch weiterentwickelt werden. Er müßte den auftretenden Belastungs- und Betriebsfällen angepaßt, eventuell gegliedert ausgeführt werden, so daß auch Wiederstellungsarbeiten schnell ausgeführt werden können. Diese Verbesserungen müßten mit erhöhten Kosten erkauf werden.

Die Entscheidung fiel daher zugunsten elastischer Stahldalben. Auch diese müssen zur Schonung von Schiff und Dalben mit einer hohen Federung ausgerüstet werden. Sie kann aber zu einer Fenderschürze zusammengefaßt werden, die als Ganzes an einen Dalben gehängt und wieder abgenommen werden kann.

Zur gleichmäßigen Beanspruchung auch bei ausmittigen Stößen müssen die Dalben torsionssteif ausgeführt werden. Da sorgfältige Vergleichsrechnungen ergeben hatten, daß die Dalben für die Ölbrücke am wirtschaftlichsten in hochwertiger Stahlrohrkonstruktion hergestellt werden konnten, wurde diese Ausführungsart als verbindlich festgelegt. Sie erleichterte im übrigen durch die mögliche Variation in den Schußlängen und Wanddicken die Anpassung an die örtlichen Verhältnisse wie Sohlentiefe, Bodenschichtung und die Sicherung gegen Korrosion.

8. Bemessung elastischer Stahldalben und ihre Ausbildung

8.1 Allgemeines

Elastische Stahldalben haben gegenüber starren Anlegebauwerken den Vorteil, daß sie die Anlegeenergie weich aufnehmen, indem sie sich wie eine Stahlfeder durchbiegen. Bekanntlich ist bei einer etwa linear anschwellenden Kraft, wie dem Durchbiegungswiderstand eines Dalbens die Formänderungsarbeit A im elastischen Bereich etwa gleich dem halben Produkt aus der Widerstandskraft P zum Zeitpunkt der größten Durchbiegung und der dabei in Krafrichtung auftretenden Durchbiegung s , $A = P \cdot s/2$. Daraus errechnet sich bei gegebener Arbeit A die Widerstandskraft $P = 2 A/s$.

Wird der Arbeitsweg kleiner, steigt die Kraft P im umgekehrten Verhältnis an und wird unendlich groß, wenn der Arbeitsweg unendlich klein wird. Eine unnachgiebige Anlegekonstruktion führt daher zu sehr hohen Anlegestößen, die unendlich groß würden, wenn die Schiffswand und eine etwa zwischengeschaltete Federung nicht nachgeben würden. Eine ausreichend weiche Stoßaufnahme ist daher für die Schonung des Schiffes von besonderer Bedeutung.

Elastische Stahldalben werden so gestaltet und bemessen, daß der Stoß in einer Größe bleibt, die das Schiff nicht gefährdet. Der Dalben wird für die bei ordnungsgemäßen Anlegemanövern zu erwartenden Beanspruchungen bemessen. Außerdem muß er im Liegebetrieb auch den Winddruck und, sofern vorhanden, den Strömungsdruck und deren Auswirkungen aufnehmen können.

Wird ein elastischer Stahldalben in einem Havariefall überlastet, bricht er noch nicht, sondern verformt sich plastisch, wobei die an der Streckgrenze des Materials der Dalbenrohre erreichte maximale Widerstandskraft P_S konstant bleibt. Er leistet daher bei der plastischen Verformung s_{plast} die Arbeit $A_{\text{plast}} = P_S \cdot s_{\text{plast}}$. Die Gesamtarbeit des Dalbens ist dann gleich der Summe aus elastischer und plastischer Arbeit und beträgt $A_{\text{res}} = \frac{1}{2} \cdot P_S \cdot s_{\text{elast}} + P_S \cdot s_{\text{plast}}$. Hierin liegt bei biegsamen Stahldalben für Havariefälle erfahrungsgemäß eine beachtliche Arbeitsreserve, die den dahinterliegenden Brückenkonstruktionen zugute kommt, wenn die Dalben ausreichend weit vor diesen Bauwerken stehen.

Die Bemessung der Dalben richtet sich nach der quer zum Liegeplatz wirkenden kinetischen Energie des Schiffes zum Zeitpunkt des Anlegens. Sie hängt ab von der Größe des Schiffes und seiner Anlegegeschwindigkeit quer zum Liegeplatz. Letztere hängt wieder ab von der Länge der Brücke und den Anfahrbedingungen. Hierfür gibt es Erfahrungswerte, die anlässlich des Internationalen Schiffahrtskongresses in Rom im Jahre 1953 von Baker veröffentlicht worden sind. Die dort genannten Werte wurden im

Jahre 1955 in der Empfehlung E 40 des Arbeitsausschusses „Ufereinfassungen“ mit nur geringfügigen Abänderungen übernommen. Demnach sind nach deutscher Praxis für den Fall des Anlegens mit Schlepperhilfe folgende Anlegegeschwindigkeiten quer zum Liegeplatz zu berücksichtigen:

Lage	Anlegegeschwindigkeit quer zum Liegeplatz in m/s			
	Anfahrt	bis 1000 BRT (≤ 1500 tdw)	bis 5000 BRT (≤ 7500 tdw)	bis 10 000 BRT und mehr ($\geq 15 000$ tdw)
starker Wind und Seegang	schwierig	0,75	0,55	0,40
starker Wind und Seegang	günstig	0,60	0,45	0,30
mäßiger Wind und Seegang	mäßig	0,45	0,35	0,20
geschützt	schwierig	0,25	0,20	0,15
geschützt	günstig	0,20	0,15	0,10

Diese Tafel zeigt die Abhängigkeit der zu berücksichtigenden Anlegegeschwindigkeit v von Wind und Seegang, den Bedingungen der Anfahrt und von der Schiffsgröße. Auf die Abnahme der anzusetzenden Anlegegeschwindigkeit mit steigender Schiffsgröße sei besonders hingewiesen.

Da das Schiff beim Anlegen beweglich bleibt und üblicherweise bei solchen Anlagen 4 Dalben je Liegeplatz vorhanden sind, hat ein einzelner Dalben bei einem ordnungsgemäßen Anlegemanöver nicht die gesamte kinetische Energie des Schiffes, sondern nur einen Teil derselben aufzunehmen.

Der von Minikin eingeführte, die Einwirkung auf den Einzaldalben berücksichtigende Abminderungsfaktor für die kinetische Energie quer zum Liegeplatz wird nach deutscher Praxis mit 0,4 bis 0,5 angesetzt.

Nach allgemeinen gültigen Hafengebäudegrundsätzen werden Havariefälle bei der Bemessung nicht berücksichtigt, weil die Hafengebäudekosten und die Kosten an den dann in verstärktem Maße gefährdeten Schiffen sonst nicht vertretbar ansteigen würden. Sie stünden in keinem Verhältnis zu den Kosten, die nach der bisherigen Praxis durch Havarieschäden in Häfen verursacht werden.

8.2 Bemessung und Ausbildung der Dalben für Wilhelmshaven

Da die Löschbrücke in Wilhelmshaven von der Richtung des Flut- bzw. Ebbstromes nur um einen Winkel von rd. 3° abweicht und eine ausreichend breite Fahrrinne zur Verfügung steht, sind trotz der Lage in der freien Jade die Anfahrtbedingungen günstig. Gleiches gilt bezüglich Wind und Seegang. Die vorherrschenden Südwest-Winde sind durch das vorgelagerte Land bereits geschwächt und vermindern im übrigen die Anlege-

geschwindigkeit quer zu den seeseitigen Liegeplätzen. Das gleiche gilt praktisch auch für die sonst an der deutschen Nordseeküste besonders gefährlichen Nordwest-Stürme.

Bei diesen Verhältnissen wurde für die größten Tanker mit 100 000 tdw = rd. 125 000 t Wasserverdrängung eine Anlegegeschwindigkeit v quer zum Liegeplatz zwischen 0,10 und 0,15 m/s zugrunde gelegt, obwohl bei einer sinngemäßen Ausdeutung von E 40 bei dieser Schiffsgröße noch kleinere Geschwindigkeiten hätten vertreten werden können.

Bei der Bemessung der Anlegedalben wurden auch die sonstigen deutschen Erfahrungen berücksichtigt. Hierdurch ergab sich eine Kontrolle der zugrunde zu legenden Werte. Nach den bis 1957 gemachten deutschen Erfahrungen mit elastischen Dalben war geplant, elastische Großschiffsdalben an der freien Elbe für ein Arbeitsvermögen von 50 tm zu bemessen.

Im Hinblick auf die noch größeren Schiffe wurde für Wilhelmshaven ein Arbeitsvermögen von 60 tm gewählt. Hieraus ergab sich für das größte in Frage kommende Schiff von 100 000 tdw bei einem mittleren Abminderungsfaktor 0,45 eine maximal zulässige Anfahrsgeschwindigkeit quer zum Liegeplatz

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot 9,81 \cdot 60}{0,45 \cdot 125\,000}} = \sqrt{0,021} = 0,145 \text{ m/s}$$

Für das kleinste in Frage kommende Schiff von 12 500 dwt mit rd. 17 000 t Wasserverdrängung wird die zulässige Anfahrsgeschwindigkeit entsprechend größer. Unter sonst gleichen Voraussetzungen ergibt sich

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot 9,81 \cdot 60}{0,45 \cdot 17\,000}} = \sqrt{0,154} = 0,39 \text{ m/s}$$

Bei der gewählten Bemessung für ein Arbeitsvermögen von 60 tm wird demnach die Empfehlung E 40 beim 100 000-tdw-Tanker gut, bei kleineren Tankern sehr gut erfüllt. Die Dalben für 60 tm Arbeitsvermögen können daher die zu erwartenden üblichen Betriebsbeanspruchungen ohne jeden Schaden aufnehmen. Bei unsachgemäßem Manövrieren, Reißen von Schleppertrossen und dergleichen können natürlich noch größere Anfahrsgeschwindigkeiten und Beanspruchungen auftreten. In solchen Fällen handelt es sich aber bereits um Havariefälle.

Aus internen Gründen der NWO mußten bei der Bemessung der Wilhelmshavener Anlegedalben neben den deutschen Grundsätzen auch englische und amerikanische Wünsche berücksichtigt werden. Während von englischer Seite eine Bemessung der Dalben für 100 tm gewünscht wurde, wurde nach amerikanischer Praxis ein Arbeitsvermögen von nur 50 tm gefordert. Man einigte sich dann auf einen Kompromiß. Danach wurde der Liegeplatz am Löschkopf 2 mit je vier 100-tm-Dalben ausgerüstet, während die beiden weiteren Liegeplätze je vier 60-tm-Dalben erhielten, die im Bedarfsfalle später auf 100 tm verstärkt werden können. Der größte Anlegedruck der 100-tm-Dalben wurde mit rd. 150 t festgelegt, der der 60-tm-Dalben mit mindestens 90 t, aber so weit unter 150 t, daß im Verstärkungsfalle auf 100 tm wieder ein maximaler Druck in der Größenordnung von 150 t erreicht wird.

Die Bemessung wurde bedingungsgemäß nach den üblichen deutschen Grundsätzen für die Spannungen an der Streckgrenze durchgeführt.

Der Achsabstand der beiden äußeren Dalben der seeseitigen Liegeplätze wurde mit 83 m so groß gewählt, wie im Hinblick auf die Schiffsform möglich. Der Abstand der beiden inneren, vor allem als Schutz für den 22,00 m breiten Löschkopf wirkenden Dalben beträgt 33,00 m. Die Vorderkante der Dalbenfenderung liegt 5,00 m vor der Löschkopf-vorderkante (Bild 8).

Die Dalben wurden überhängend gerammt, so daß das Schiff auch bei der größten planmäßigen Durchbiegung des Dalben von rd. 1,30 m nicht gegen die Dalbenpfähle stoßen kann. Bild 11 zeigt die generelle Gestaltung und die Hauptabmessungen des 100-t-Dalbens. Die Dalben wurden in allen Einzelheiten einwandfrei berechnet und konstruiert.

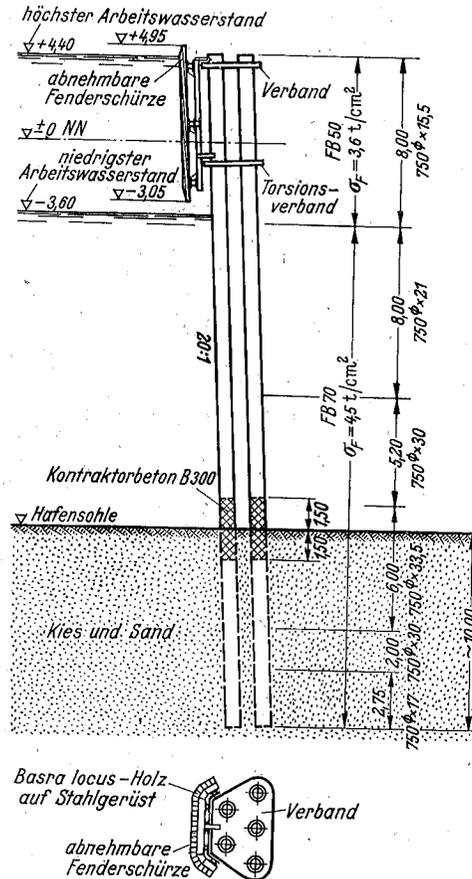


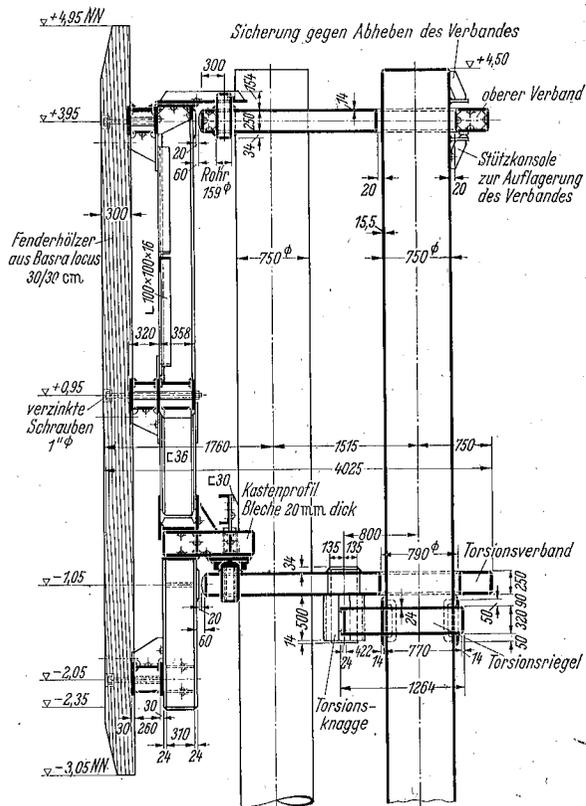
Bild 11

Elastischer Stahlrohr-Anlegedalben mit 100 tm Arbeitsvermögen

Bild 12 gibt einen Überblick über die Einzelausbildung der Verbände und der als Schild vorgehängten Fenderschürze aus Basralocus-Holz auf Stahlgerüst. Verbände und Fenderschürze passen zu allen Dalben und können daher ausgewechselt werden.

9. Ausbildung der Festmachereinrichtungen in Wilhelmshaven

Nach dem Grundsatz, die Festmachereinrichtungen von der Löschbrücke völlig zu trennen, wurden in Wilhelmshaven zum Festmachen gemäß dem Vertäuplan (Bilder 8 und 15) unabhängig gegründete 125-t- bzw. 250-t-Pollerdalben ausgeführt (Bild 10). Soweit Pollerstege erforderlich, wurden auch die Pollerdalben zu ihrer Auflagerung herangezogen (Bild 13).



Schnitt A-B

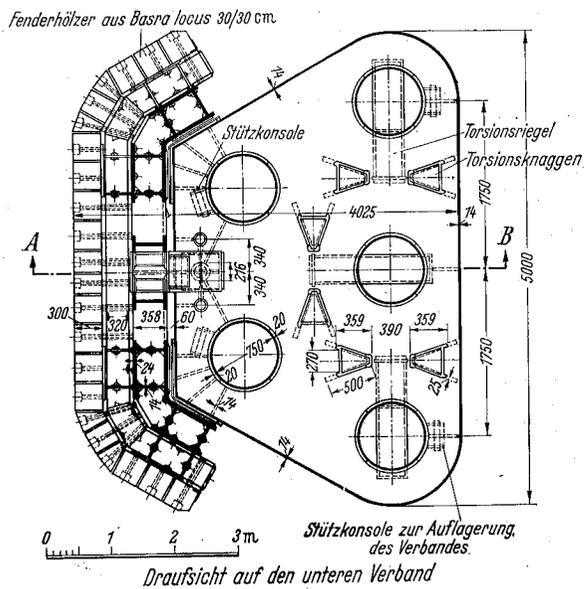


Bild 12

Verbände und Fenderung der Anlegedolben

Die 125-t-Pollerdalben erforderten 4, die 250-t-Pollerdalben 8 hochbelastbare Gründungspfähle (Bild 13). Zur Verminderung der Knicklänge und zur Eisaussteifung erhielten sämtliche Pollerdalben einen alle Pfähle verbindenden Aussteifungsrahmen aus Stahlrohren mit Achse auf $- 0,75$ NN. Um Schwierigkeiten bei der Überleitung der großen Pollerpfahlkräfte zu vermeiden, wurden alle Pollerdalbenköpfe in Ortbeton B 225 ausgeführt.

Die Pollerdalben sind auch vom Wasser aus über eine Steigeleiter zugänglich. Sie ist mit einer Fenderkonstruktion aus Basralocusholz auf Stahlprofilen verbunden, die das Anlegen von Kleinschiffen ermöglicht (Bild 13).

Alle Pollerdalben auf der Seeseite der Löschbrücke können unmittelbar von der Brücke aus betreten werden. Ein Schleppblech deckt die 15 cm breite Trennfuge ab. Die auf der Landseite befindlichen Pollerdalben sind durch einen leicht abnehmbaren Stahl-

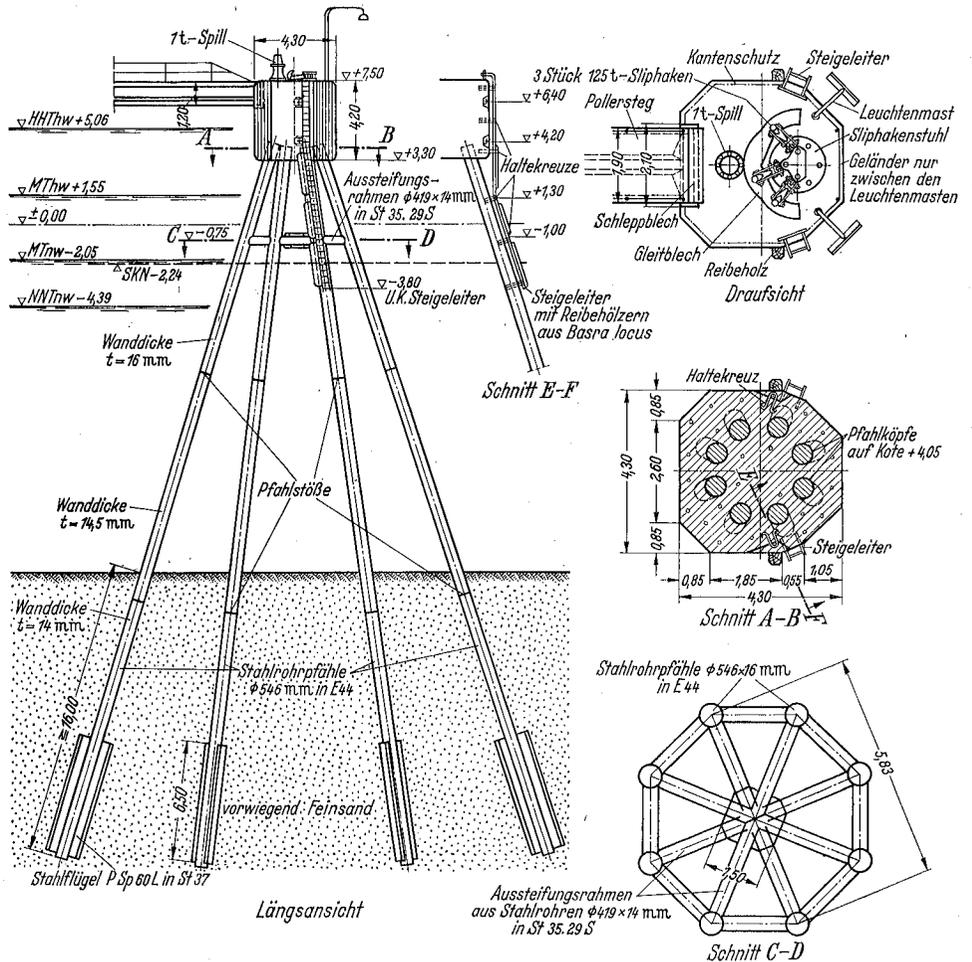


Bild 13
250-t-Endpollerdalben des südlichen Pollersteges

steg mit Gitterrostabdeckung, der über die Rohre hinwegführt, mit der Brücke verbunden. Diese Pollerstege erhielten eine nutzbare Breite von 1,50 m und beidseitig feste Geländer.

Die Verbindungsbrücke zu den Pollerdalben des südlichen und nördlichen Pollersteiges (Bilder 8 und 15) wurden, um laufende Unterhaltungsarbeiten zu vermeiden, in Stahlbeton ausgeführt. Sie liegen auf den Pollerdalbenköpfen und auf jeweils einem Zwischenjoch aus 2 Pfählen mit Ortbetonkopf. Das Zwischenjoch wirkt in Stegichtung als Pendelstütze. Die nutzbare Breite der Stege beträgt 1,70 m.

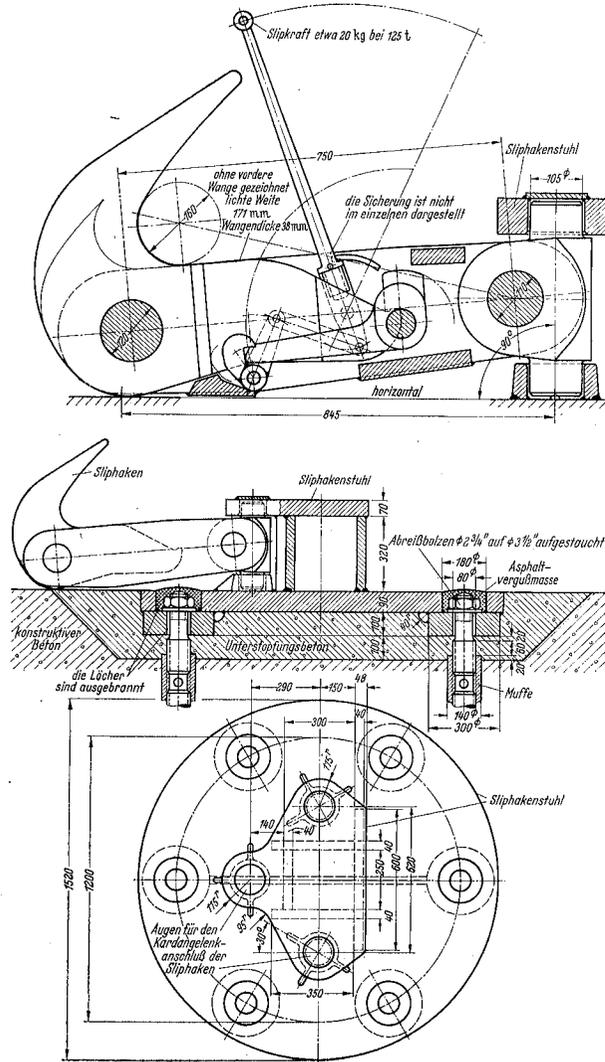


Bild 14
Sliphakenstuhl mit drei Sliphaken

Die Pollerdalben wurden ursprünglich mit jeweils zwei 125-t- bzw. 250-t-Pollern aus Stahlguß geplant. Sie wurden mit einem 1-t-Elektrospinn zum Hochholen der Trossen ausgerüstet, und mit einem Stahlkantenschutz versehen, der ein Abgleiten verhindert. Die Abmessungen der Betonköpfe wurden so gewählt, daß ausreichend Arbeitsraum für die Festmacher vorhanden ist und die Köpfe der Gründungspfähle einwandfrei zusammengefaßt werden.

Um bei Gefahr auch Stahltrossen rasch lösen zu können, wurde im Frühjahr 1958 bauseitig in Erwägung gezogen, die Poller zusätzlich mit einem im Ausland bereits angewendeten Slipgeschirr auszurüsten. Eine sorgfältige Untersuchung vorhandener Sliphaken ergab jedoch, daß sie entweder nicht unfallsicher oder unter Vollast nicht betriebssicher waren. Man entschloß sich daher, ein besonderes Slipgeschirr zu entwickeln. Ausgehend von bisherigen Schlepperhaken⁴⁾, wurde ein Sliphaken für eine Grenzlast von 125 t ausgebildet. Die Sliphaken werden mittels Kreuzgelenk an geschweißten Stühlen allseitig beweglich befestigt (Bild 14). Jeder Sliphaken kann mit mehreren Trossen belegt werden. Er gibt sie sowohl bei Vollast als auch bei geringer Belastung durch einen einfachen Handgriff mit geringer Zugkraft frei.

Je nach Pollerbelastung und Zugrichtungen wurden die Pollerblöcke mit 1 bis 3 Sliphaken ausgerüstet, deren Schwenkbereich so groß gewählt wurde, daß sie für alle in Frage kommenden Betriebsfälle ausreichen. Bild 15 gibt einen Überblick über die gewählten Schwenkbereiche der Sliphaken

Die Sliphaken haben sich inzwischen im Betrieb bestens bewährt.

Das neue Slipgeschirr erforderte eine Änderung der bis dahin vorgesehenen Stegauf-lagerung, insbesondere bei den Stahlbeton-Pollerstegen. Beim raschen Lösen der unter Vollast stehenden Trossen federn die Pollerdalben zurück und pendeln sich in gedämpfter Schwingung in ihre Ruhelage ein. Bei fester Lagerung der Pollerstege würden dabei große Massenkräfte übertragen und in kurzer Zeit Zerstörungen eintreten. Um dies zu vermeiden, wurden alle Pollerstege wie Maschinen auf Spezial-Gummilagern (Schwingmetall) gelagert. Die gewählten Lager können waagrecht bis zu 10 cm ausfedern. Im Bedarfsfalle können sie auch ohne Schwierigkeiten ausgewechselt werden. Sie haben sich bisher einwandfrei bewährt.

10. Bauleistungen in Wilhelmshaven

Das vom Ingenieurbüro Prof. Dr. Agatz Nachfolger Bremen erarbeitete Projekt wurde unter 25 deutschen Tiefbaufirmen ausgeschrieben. Aufgrund des Ausschreibungsergebnisses, vor allem aber im Hinblick auf die angebotene Ausführung der schwierigen Rammarbeiten mit Hilfe eines damals völlig neuartigen Baugerätes, erhielt die Arbeitsgemeinschaft Olumschlag, bestehend aus der Strabag-Bau AG., der Hochtief AG., der Ed. Züblin AG., der Firma Polensky und Zöllner, der Bauunternehmung Hermann Möller, der Tiefbau AG. „Unterweser“ und der De Long-Corporation New York, am 1. 11. 1957 den Auftrag für die Bauausführung mit der Maßgabe, mit den Bauarbeiten sofort zu beginnen und sie bis zum 1. 9. 1958 im wesentlichen abzuschließen. Diese Firmengruppe hatte vorgeschlagen, die außerordentlich schwierigen Rammarbeiten mit Hilfe einer „schwimmenden Insel“ und aufgesetzter schwerer Ramme durchzuführen. Die Ramme sollte nach allen Seiten verschieblich und drehbar angebracht werden, so daß aus einer Inselstellung die verschiedensten Pfähle gerammt werden konnten.

⁴⁾ Schlepperhaken der AG „Weser“, Werk Seebeck, Bremerhaven

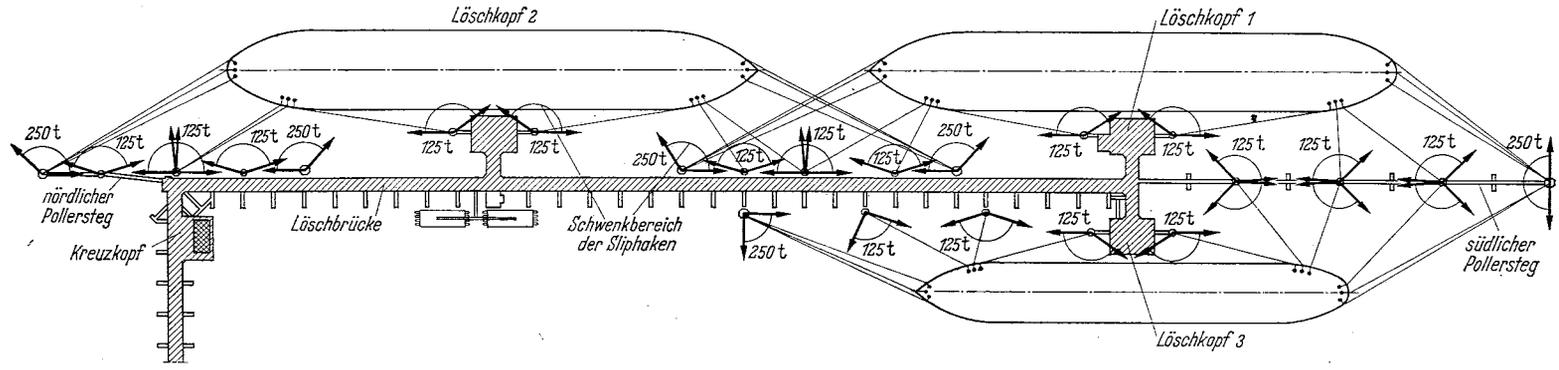


Bild 15
Vertäuplan und Schwenkbereiche der Sliphaken

Das System der „schwimmenden Insel“ ist heute aus zahlreichen Veröffentlichungen bekannt. Es sei daher nur kurz zusammengefaßt, daß hierbei ein Stahlponton in absenk- baren starken Stahlrohren mit Hilfe von Preßluftpumpen aus dem Wasser gehoben und wieder abgesenkt werden kann. Auf einer solchen Hubinsel können Bauarbeiten wie auf dem festen Lande ausgeführt werden. Sie bringt weitere Möglichkeiten in der Planung, Ausbildung und Ausführung, vor allem auch für Umschlagsbrücken in freier See. Sie hat in Wilhelmshaven nach ihrem Eintreffen, 3 Monate nach Auftragserteilung, die Bauarbeiten entscheidend beeinflusst.

Die Bauarbeiten für die Brücke einschließlich Anlegedalben und Pollerdalben waren, abgesehen von kleinen Restarbeiten, am 30. 9. 1958 abgeschlossen, obwohl am 27. 4. 1958 in einer Sturmboe fast das gesamte schwimmende Gerät untergegangen war und erst mühevoll wieder gehoben werden mußte.

In dieser kurzen Bauzeit von 11 Monaten wurden unter zum Teil schwierigsten Bedin- gungen, vor allem in den Wintermonaten, folgende Bauleistungen vollbracht:

R a m m a r b e i t e n`

416 Brückenpfähle, ϕ 546 \times 15,5/14,0/13,5 mm aus FB 50, bis 35,00 m lang aus St 37, Pfahlgewicht bis 7,5 t.

116 Pollerpfähle ϕ 546 \times 16,0/14,5/14,0 mm aus E 44, bis 43,5 m lang mit Flügeln PSp 60 L, 6,50 m lang aus St 37, Pfahlgewicht bis 10,0 t.

52 Dalbenpfähle ϕ 750 mm, maximale Wanddicke 33,5 mm, bis 34,90 m lang, aus FB 50 ($\sigma_s = 3600 \text{ kg/cm}^2$) bzw. FB 70 ($\sigma_s = 4600 \text{ kg/cm}^2$), Pfahlgewicht bis 14,3 t.

Für die Gründung der Brücke und der Pollerdalben sowie für die Anlegedalben und deren Ausrüstung wurden insgesamt 5385 t Stahl eingebaut.

B e t o n a r b e i t e n

5505 m³ Fertigbeton für:

29 Stck. Jochbalken der Zufahrtsbrücke

20 Stck. Jochbalken der Löschbrücke

73 Stck. Brückenüberbauten

3919 m³ Ortbeton, davon:

195 m³ Landwiderlagerbeton

1627 m³ Jochbalkenbeton unter + 5,35 NN

1248 m³ Brückenüberbaubeton über + 5,35 NN

791 m³ Beton der Pollerblöcke

58 m³ Unterwasserbeton der Dalbenpfähle

1550 t Betonstahl I bis ϕ 36 mm für die insgesamt 9366 m³ Stahlbeton.

Zur Verwirklichung dieser Bauleistungen wurden von der Arge Olumschlag auf der Baustelle, den Werkplätzen und den Baugeräten im Mittel 250 und maximal 386 Arbeits- kräfte eingesetzt.

II. Auswirkung langperiodischer Wellen in Häfen

1. Vorbemerkung

Die zulässige Amplitude von Wellen in Häfen ist natürlich von den Schiffstypen abhängig, die den Hafen anlaufen. Gemeint ist in der Regel der Schwall durch Windwellen oder Dünung. Aber auch andere, nämlich langperiodische Wellen mit kleiner Amplitude können eine sehr unerwünschte Unruhe in Häfen verursachen. Langperiodische Wellen liegen im Bereiche zwischen Wind- und Tidewellen, ihre Periode erstreckt sich von etwa 20 Sekunden bis zu mehreren Stunden. Solche langperiodischen Wellen, deren Ursprung noch nicht vollständig geklärt ist, machen sich in manchen Häfen, teilweise sehr störend bemerkbar, so z. B. im Hafen von Algier, bei Madagaskar, in Kapstadt und Guam.

Die Auswirkung langperiodischer Wellen auf ein Hafenbecken ist zweierlei Art:

a) Periodische Füllung und Leerung des Hafenbeckens

Die Füllung und die Leerung des Hafenbeckens sind von der Periode und dem Betrage der senkrechten Amplitude der langperiodischen Welle abhängig, außerdem von der Größe des Hafenbeckens und dem Verhältnis des Querschnittes in der Einfahrt zur Hafensfläche. Infolge des periodischen Füllens und Entleerens entstehen in der Einfahrt und im Bereiche von Querschnittsverengungen innerhalb des Hafens periodisch alternierende Strömungen, die bei einer senkrechten Amplitude von z. B. nur 10 bis 20 cm Geschwindigkeiten von 2,0 bis 2,5 m/s erreichen können.

b) Anregung von Resonanzschwingungen im Hafenbecken

Die Wassermassen des Hafenbeckens stellen ein schwingungsfähiges System dar, das zu Resonanzschwingungen angeregt wird, wenn die von außen ankommenden langperiodischen Wellen die gleiche Periode wie die Eigenschwingung des Hafenwassers haben. Dabei wird innerhalb des Hafens die Schwingungsamplitude gegenüber derjenigen der erregenden Welle verstärkt. Die Verstärkung kann in einigen Fällen über das 20fache gehen, liegt im allgemeinen aber zwischen dem 4- bis 12fachen. An den Knotenpunkten der stehenden Resonanzschwingung im Hafenbecken treten dabei entsprechend stärkere, waagerechte, mit der Periode alternierende Strömungsgeschwindigkeiten auf.

2. Modellversuche

a) Aufgabe der Versuche

In grundsätzlichen (schematischen) Modellversuchen wurden mit dankenswerter Unterstützung des U. S. Department of Army, European Research Office, im Franzius-Institut die mit der Auswirkung langperiodischer Wellen in Häfen zusammenhängenden Fragen behandelt *).

Die Aufgabe der Versuche bestand darin, ein Mittel zu finden, mit dem man die Resonanzverstärkung weitgehend unterbinden kann und das möglichst allgemein anwendbar ist. Da die Erregerwellen sich über ein breites Frequenzband erstrecken, scheiden alle Maßnahmen aus, die darauf abzielen, die Resonanzverstärkung im Hafenbecken für eine bestimmte Periode zu beseitigen. Dazu gehört z. B. eine Vertiefung des Hafenbeckens, wodurch die Periode verlängert wird. Aber auch praktisch kaum zu verwirklichende Maßnahmen, wie etwa der Bau eines Vorhafens, der als Resonator dient, scheiden aus. Ebenso scheidet eine Verkleinerung des Querschnittes in der Hafens-

*) Die Versuche wurden von Dr. Otto LINKE durchgeführt.

einfahrt aus, da die Dämpfung der Resonanzschwingung im Hafenbecken erst bei sehr kleinem Querschnitt in der Hafeneinfahrt zu erreichen ist.

Das den Untersuchungen zugrunde gelegte Prinzip besteht darin, die Resonanz durch Einbauten innerhalb des Hafenbeckens zu vermindern, wobei diese Einbauten möglichst zugleich dem Bestimmungszweck des Hafens dienstbar gemacht werden sollten. Dazu eignen sich Quermolen, die in verschiedener Anzahl, Länge und Lage im Hafenbecken angeordnet werden.

Mit derartigen Einbauten kann die Periode der Grundschwingungen eines Hafenbeckens auf den zwei- bis dreifachen Betrag verlängert werden. Das ist insofern von Bedeutung, als sich aus Untersuchungen über die Schiffsbewegung infolge langperiodischer Schwingungen im Hafen ergeben hat, daß für die Praxis die Perioden von 30 bis 120 Sekunden die unangenehmsten sind. Man hat dann in der Möglichkeit, die Periode der Grundschwingung zu verlängern, ein Mittel, aus dem gefährlichsten Frequenzbereich herauszukommen.

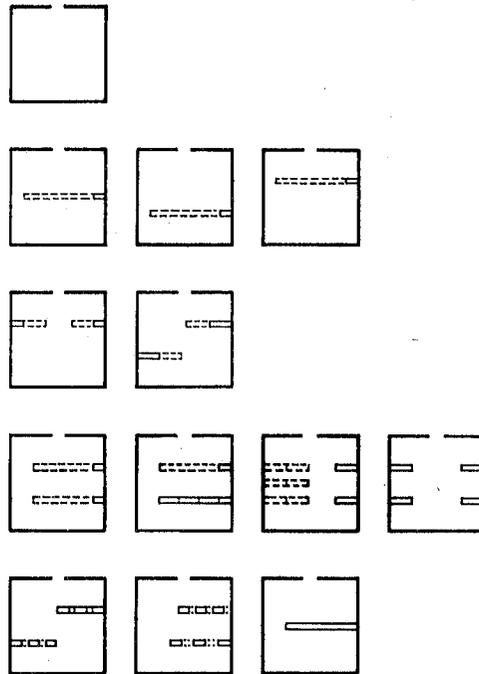


Bild 16

Untersuchte Ausbaustände

Die Untersuchungen sollten ferner zu allgemein anwendbaren Ergebnissen führen. Sie wurden deshalb an einem quadratischen Hafenbecken gleichbleibender Tiefe durchgeführt. Außerdem wurden sie zunächst nur auf Untersuchungen der Grundschwingung begrenzt, da bei dieser die größten Amplituden auftreten, die bei der ersten und den höheren Harmonischen sehr schnell kleiner werden; z. B. beträgt die Amplitude der ersten Harmonischen nur noch 25 % der Amplitude der Grundschwingung. Die verschiedenen im Modell untersuchten Moleneinbauten sind in Bild 16 dargestellt.

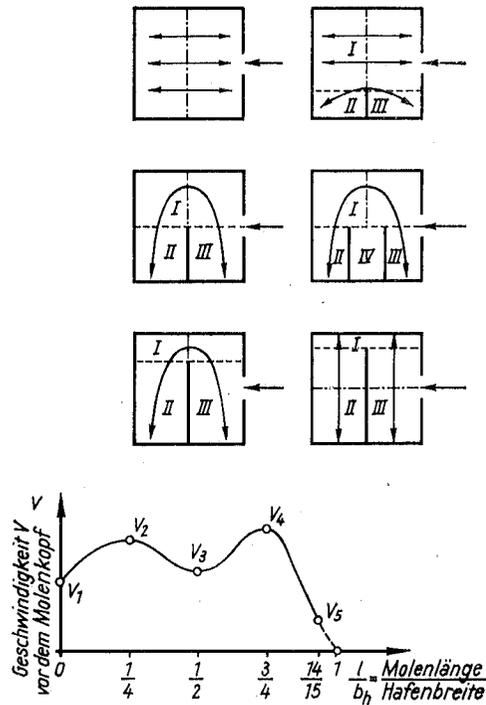


Bild 17

Wirkung von Quermolen verschiedener Längen auf das Schwingungsbild im Hafen und auf die waagerechten Geschwindigkeiten vor dem Molenkopf

b) Ergebnisse der Versuche

Die grundsätzliche Wirkung einer Quermole ist in Bild 17 dargestellt.

Der Einbau einer kurzen Quermole stört zunächst die bestehende Grundschwingung, führt bei allmählich länger werdender Mole zur Ausbildung einer neuen, bogenförmigen Grundschwingung längerer Periode.

Eine weitere Verlängerung der Mole führt zu einer Störung der neuen Schwingung und bei noch weiterer Verlängerung der Mole bildet sich abermals ein neues Schwingungsbild im Hafen aus.

Entsprechend verändern sich die Geschwindigkeiten vor dem Molenkopf, die immer dann am größten sind, wenn die Mole nur störend auf die bestehende Schwingung wirkt.

Nach diesem grundsätzlichen Schema lassen sich auch die Schwingungsformen eines Hafenbeckens mit mehreren eingebauten Quermolen verständlich machen.

In den Übergangsstadien, bei denen die alte Grundschwingung nicht mehr voll und die neue noch nicht voll ausgebildet ist, kommt es zu Schwebungen. Die Schwingungsbäuche sind dann nicht mehr ortsfest, sondern verschieben sich langsam innerhalb eines bestimmten Bereiches im Hafenbecken hin und her. Eine Analogie dazu bilden zusammengesetzte mechanische Schwingungssysteme mit mehreren Freiheitsgraden und loser Koppelung.

Bei der Länge einer Quermole von $\frac{1}{5}$ der Hafensbreite ist bei konstanter Periode, die der Eigenschwingung des unverbauten Hafenbeckens gleich ist, die Resonanzschwingung im Hafenbecken vollständig gedämpft, die Resonanzschwingung nimmt sogar negative Werte an.

Bei veränderlicher Periode erzeugt die Quermole im Hafenbecken eine bogenförmige Schwingung, d. h. aber, daß die Periode der neuen Schwingung größer wird. Durch Quermolen von $\frac{3}{4}$ bis $\frac{7}{8}$ der Hafensbreite wird die Periode auf etwa den doppelten Betrag verlängert. Die dämpfende Wirkung kommt darin zum Ausdruck, daß die senkrechten Amplituden im allgemeinen kleiner bleiben als die der Grundschwingung des unverbauten Hafens. Während die senkrechten Amplituden gleichmäßig mit länger werdender Mole abnehmen, ändert sich die waagerechte Amplitude in Schwingungsknoten vor dem Molenkopf periodisch von kleineren zu größeren Werten und umgekehrt. Solange die Molenlänge etwa $\frac{1}{4}$ der Hafensbreite nicht überschreitet, nimmt die waagerechte Amplitude beträchtlich zu, wird aber bei einer Verlängerung der Mole bis etwa $\frac{1}{2}$ der Hafensbreite wieder kleiner, was mit dem Auftreten der neuen bogenförmigen Schwingung zusammenfällt. Wird die Mole noch länger, etwa $\frac{3}{4}$ bis $\frac{7}{8}$ der Hafensbreite, nimmt die waagerechte Amplitude erneut zu. Das gilt nur für den Bereich um den Molenkopf. In der Hafeneinfahrt nimmt die waagerechte Amplitude mit der Molenlänge gleichmäßig zu.

Ordnet man die Mole nicht in der Mitte, sondern im vorderen Drittel einer Hafenseite an, verschiebt sich das Bild etwas. Bei einer Länge der Mole von $\frac{1}{4}$ der Hafensbreite ist die waagerechte Amplitude beträchtlich kleiner, bei $\frac{1}{2}$ der Hafensbreite jedoch sehr viel größer. In der Hafeneinfahrt ist die waagerechte Amplitude durchgehend größer als bei Anordnung der Mole in der Mitte des Hafens.

Die senkrechten Amplituden sind bei unsymmetrischer Lage der Mole durchgehend in dem schmaleren der durch die Quermole gebildeten Teilbecken größer als in dem breiteren, gleichgültig, ob die Mole im vorderen oder hinteren Drittel des Hafens angeordnet wird.

Werden zwei Quermolen an den einander gegenüberliegenden Hafenseiten eingebaut, dann wird bei einander gegenüberliegenden Molen die Periode nur wenig verlängert. Dagegen wird die dämpfende Wirkung zweier Quermolen ein Maximum, wenn beide Molen gegeneinander versetzt eingebaut werden, die eine Mole im vorderen, die andere im hinteren Hafendrittel. Die wirksamste Länge der Molen beträgt etwa $\frac{3}{8}$ der Hafensbreite. Im Hafenbecken ist dann eine S-förmige Schwingung ausgebildet, die beide Molen umschwingt und deren Periode etwa den doppelten Betrag der Periode der Grundschwingung des unverbauten Hafens hat. Die lotrechten Amplituden bleiben durchgehend sehr klein und erreichen nur an wenigen Stellen einen bis 1,5fachen Betrag der lotrechten Amplitude der Erregerwelle. Eine maximale Dämpfung ist nur bei gleichlangen Molen vorhanden. Werden die Molen bei gleicher Lage ungleich lang, werden auch die Amplituden wieder größer.

Versuche mit zwei an einer Hafenseite angeordneten Parallelmolen gleicher Länge ergaben ein Schwingungsbild ähnlich dem einer einzigen Mole, solange der Abstand der beiden Molen voneinander nicht mehr als $\frac{1}{3}$ der Hafenslänge beträgt. In diesem Falle schwingt das Wasser des Hafenbeckens um beide Molen bogenförmig herum, so daß das Teilbecken zwischen den beiden Molen schwingungsfrei bleibt.

Mit der Anordnung von Parallelmolen hat man die Möglichkeit, sehr ruhige Teilbecken innerhalb eines Hafens zu schaffen. Das Schwingungsbild im Hafen mit zwei Parallelmolen ist jedoch stark abhängig von der Periode der Erregerwelle. Man kann bei lang-

sam veränderlicher Periode der Erregerwelle sehr verschiedene Schwingungsbilder erzielen. Die Schwingung kann vom vorderen bis zum mittleren Teilbecken reichen, wobei das hintere Teilbecken ruhig bleibt; sie kann aber auch vom vorderen zum mittleren und von da wieder zum hinteren Teilbecken laufen. Beide Schwingungsarten treten bei kürzerer Periode auf als der der Schwingung vom vorderen zum hinteren Teilbecken unter Ausschaltung des mittleren, und sie führen zu größeren waagerechten Amplituden in den jeweilig schwingenden Teilbecken.

Wird bei Anordnung von Parallelmolen eine Mole länger als die andere, treten sofort in dem der längeren Mole anliegenden vorderen oder hinteren Teilbecken erhöhte Schwingungsamplituden auf.

Durch die Anordnung von zwei Parallelmolen an einer und einer dritten Mole an der entgegengesetzten Hafenseite wird die Periode der Grundschiwingung wirksam verlängert, ähnlich wie bei der Anordnung von zwei Molen in unsymmetrischer Lage zueinander.

Werden an den beiden gegenüberliegenden Hafenseiten jeweils zwei parallele Molen gleicher Länge angeordnet, dann wird die Dämpfung der Amplituden im Resonanzfall wirksamer, als wenn nur zwei Parallelmolen an einer Hafenseite angeordnet werden, deren Länge doppelt so groß ist, d. h. der Querschnittsverbau in beiden Fällen bleibt der gleiche.

Versuche mit teildurchlässigen Molen ergaben, daß die Dämpfung der Schwingungsamplituden im Resonanzfall nur dann erreicht werden kann, wenn die Durchlässigkeit der Mole etwa 10% beträgt. Bei größeren Durchlässigkeiten treten in den Molenöffnungen hohe Geschwindigkeiten auf, die mit dem Schiffsbetrieb im Hafen nicht zu vereinbaren sind. Eine 10% durchlässige Mole dämpft die waagerechten Amplituden auf ein Fünftel der Amplituden bei einer gleichlangen, aber undurchlässigen Mole. Teildurchlässigkeit der Mole ist mithin ein zusätzliches Mittel zur Dämpfung von Hafenschwingungen, das auch praktisch brauchbar ist, da die Durchlässigkeit der Mole klein bleibt und auf die ganze Länge der Mole verteilt werden kann. Allerdings wird bei teildurchlässigen Molen die Periode der Grundschiwingung etwas kleiner als bei gleich angeordneter, aber undurchlässiger Mole.

3. Ergebnis

Die Grundsatzversuche haben gezeigt, daß es möglich ist, durch den Einbau von Quermolen in ein Hafenbecken folgende Änderungen in der Auswirkung langperiodischer Wellen in Häfen zu erzielen:

- a) Die Periode der Grundschiwingung des Hafens kann beträchtlich verlängert werden. Dadurch kann die Periode, bei der eine gefährliche Resonanzverstärkung auftritt, in einen Bereich des Frequenzspektrums verlegt werden, in dem die Erregerwellen den Hafen mit sehr kleiner Amplitude erreichen. Das kann z. B. der Fall sein, wenn der Hafen in einer Bucht liegt, durch die bereits eine Verstärkung bestimmter Frequenzen herbeigeführt wird.
- b) Die lotrechten und waagerechten Amplituden der Resonanzschwingung können in verschiedenen Gebieten des Hafenbeckens sehr wirksam gedämpft werden.
- c) Entsprechend werden auch die periodisch alternierenden Strömungsgeschwindigkeiten durch die Hafeneinfahrt kleiner.

Die Fortpflanzung der Wellen hängt vorwiegend von Schwere- und Trägheitskräften ab. Die Ergebnisse von Wellenuntersuchungen in Modellen werden dementsprechend

nach dem FROUDEschen Ähnlichkeitsgesetz vom Modell auf die Natur übertragen. Die maximalen Amplituden bei Resonanzschwingungen treten dann auf, wenn die in den Hafen mit der Erregerwelle gelangende Energie gerade durch Reibungsverluste ausgeglichen wird, die bei der Schwingung der Wassermasse des Hafens auftreten. Die Resonanzverstärkung wird also außer durch Trägheits- und Schwerekräfte entscheidend durch Reibungskräfte beeinflusst. Da beide Arten von Kräften oder, mit anderen Worten, das FROUDEsche und das REYNOLDSche Ähnlichkeitsgesetz in ein und demselben Modell nicht gleichzeitig berücksichtigt werden können, sind auch die Ergebnisse der vorliegenden Grundsatzversuche hinsichtlich der Resonanzverstärkung nur qualitativ auf die Natur übertragbar.

Die Untersuchungen wurden an einem idealen, quadratischen Hafenbecken durchgeführt. Da die geometrische Gestalt der Häfen, die den Einflüssen langperiodischer Wellen ausgesetzt sind, im allgemeinen ziemlich unregelmäßig ist, wird es nötig sein, für einen gegebenen Hafen besondere Modellversuche durchzuführen, um die Auswirkung von Quermolen in diesem Hafen zu untersuchen. Aus solchen Modellversuchen muß die wirksamste Anordnung und Gruppierung von Quermolen auf die Dämpfung der Resonanzschwingung besonders in den wichtigeren Gebieten des Hafenbeckens untersucht werden. Die Ergebnisse und Erfahrungen der durchgeführten Grundsatzversuche können dabei als Richtlinien dienen.

Abteilung II — Seeschifffahrt

Frage 2

Richtung und Gestalt der Zufahrten zu den Seehäfen und Verbesserung der Schifffahrtsrinne bis ins tiefe Wasser. — Vertiefung und Erhaltung der Tiefen. — Einfluß von Strömungen, Wellen, Wind und Sandbewegung.

Von Dr.-Ing. Wulf Niebuhr, Ministerialrat, Bundesministerium für Verkehr, Bonn; Dr.-Ing. Theodor Janssen, Oberregierungsbaurat, Wasser- und Schifffahrtsdirektion Aurich; Dipl.-Ing. Max Krause, Präsident der Wasser- und Schifffahrtsdirektion Hamburg; Dr.-Ing. Friedrich Müller, Regierungsbaurat, Wasser- und Schifffahrtsamt Emden; Dipl.-Ing. Martin Schreiber, Wasser- und Schifffahrtsamt Emden; Dr.-Ing. Friedrich Walther, Präsident der Wasser- und Schifffahrtsdirektion Aurich.

Thema:

- I. Richtung und Gestaltung der Zufahrten zu den deutschen Nordseehäfen und Verbesserung der Schifffahrtsrinnen.
- II. Über eine Möglichkeit, in der Brackwasserzone tideunterworfenen Ästuarien durch Beeinflussung der Richtung bzw. Größe der vorhandenen Räumungskraft die Fahrwassertiefe zu verbessern bzw. zu erhalten.

Zusammenfassung

I. Richtung und Gestaltung der Zufahrten zu den deutschen Nordseehäfen und Verbesserung der Schifffahrtsrinnen

Nach einem allgemeinen Überblick über die Geographie der deutschen Nordseeküste werden die besonderen Verhältnisse an der ostfriesischen Inselküste, die von den Mündungen der Ems, Jade, Weser und Elbe unterbrochen bzw. begrenzt wird, geschildert. Die an dieser Küste vorherrschende west-ost gerichtete Sandbewegung ist einerseits bestimmend für den Charakter der Küste, andererseits verursacht sie Versandungen in den Mündungen, sowie auch Verlagerungen der Zufahrten zu den deutschen Seehäfen. Die hierbei auftretenden Probleme werden aufgezeigt, die wichtigsten für die einzelnen Flüsse maßgebenden hydrologischen Daten wie Tidehöhe, Flut- und Ebbe- wassermengen und Oberwassermengen werden mitgeteilt.

Es folgt eine allgemeine Beschreibung der Entwicklung und des gegenwärtigen Zustandes der einzelnen Zufahrten. Im Gebiet der Emsmündung hat im Laufe des letzten Jahrhunderts eine Verswenkung der Zufahrt aus einer ursprünglich mehr nördlichen Richtung in eine Nordwest-Südost-Richtung stattgefunden. In der Außenjade waren zur Offenhaltung einer Wassertiefe von zunächst 10 m umfangreiche Regulierungsbauwerke und regelmäßige Baggerungen notwendig. Die Wassertiefe in der neuen Weser hält sich zumeist ohne Baggerungen auf 10 m, in der alten Weser auf 12—13 m und in der Elbe außerhalb von Scharhörn auf 20 m. Im ganzen läßt sich feststellen, daß im äußeren Mündungsbereich von Jade, Weser und Elbe sowohl die Wassertiefen wie auch die Stabilität der Stromrinnen von Westen nach Osten zunehmen.

Dort, wo sich bereits ausgedehnte Wattengebiete gebildet haben (Mündungsbucht), weisen die Stromrinnen in ihrer Lage, z. T. durch wasserbauliche Maßnahmen, wie Regu-

lierungsbauwerke und Baggerungen, unterstützt, bereits eine große Stabilität auf. Die zunehmenden Ansprüche der immer größer werdenden Seeschiffe erforderten besonders in den Unterläufen der Flüsse, d. h. oberhalb der Mündungsbuchten, umfangreiche wasserbauliche Maßnahmen. In der Ems wurde schon verhältnismäßig früh (seit 1870) mit größeren Regulierungsbauten begonnen. Diese, in Verbindung mit Baggerungen, ermöglichten eine Vergrößerung der Fahrwassertiefe von ursprünglich etwa 3,0—3,5 m auf heute 8,0 m unter Kartennull (= MSprTnw). In der Unterweser wurde mit den ersten umfangreichen Ausbaumaßnahmen im Jahre 1887 nach Plänen und unter der Leitung von Ludwig Franzius begonnen. Diese und die folgenden Ausbauten führten zu einem vollen Erfolg. Unter Ausnutzung der Tide können auf der Weser heute Schiffe bis zu 9,6 m Tiefgang verkehren. In der Elbe suchte man zunächst ausschließlich durch Baggerungen die erforderlichen Fahrwassertiefen herzustellen bzw. zu erhalten. Die Fahrwassertiefe ist hier allein durch Baggerung von $2\frac{1}{2}$ —3 m auf 8 m unter MThw gebracht worden. Erst um die Jahrhundertwende begann man mit dem planmäßigen Ausbau des Stromes. Durch diesen Ausbau, wiederum in Verbindung mit Baggerungen, gelang es, eine Fahrwassertiefe von 10 m unter Kartennull herzustellen. Die laufend für die Unterhaltung erforderlichen Baggerungen betragen hierbei i. M. 1,7 Mill. m³ jährlich. Zur Zeit ist der Ausbau auf 11 m im Gange.

Die Ausbaumaßnahmen haben außer z. T. erheblichen Veränderungen der Wasserstände, z. B. Vergrößerung des Tidehubes von 0,20—0,30 auf 3,20 m in Bremen, bzw. von 2,0 auf rd. 2,40 m in Hamburg, Veränderungen der Tidewassermengen und auch eine Verschiebung der Brackwasserzone stromauf zur Folge gehabt. Die Tidehubvergrößerungen wurden hierbei hauptsächlich durch entsprechende Senkungen der Niedrigwasserstände hervorgerufen.

Der Ausbau der Zufahrten erfolgt nach folgenden Grundsätzen:

Vermehrung der Tidewassermenge durch Beseitigung aller Hindernisse, wie Nebenarme, Engstellen, starke Krümmungen.

Bildung eines von oben nach unten allmählich sich trichterförmig verbreiternden Stromlaufes mit schwachen Krümmungen.

Herstellung eines der jeweils zur Verfügung stehenden Tidewassermenge angepaßten Querschnittes, so daß die für die Selbsträumung des Flusses erforderliche Stromgeschwindigkeit gewährleistet ist.

In einem weiteren Abschnitt wird über Bodensedimente, Korngrößenverteilung und Sinkstofftransport in den Mündungsgebieten berichtet. Einige wichtige und für das Geschehen in diesen Gebieten aufschlußreiche Untersuchungsergebnisse werden mitgeteilt:

1. Die Sinkstoffbewegung im Tidegebiet spielt sich hauptsächlich in schwebender Form, d. h. im gesamten Querschnitt ab, während die Geschiebebewegung unmittelbar auf der Sohle für den Gesamttransport ohne Bedeutung ist, weil im allgemeinen die Korngrößen im Mündungsgebiet klein sind. Nur dort, wo größeres Geschiebe (> 0,2 mm) vorherrscht, kann auch die Geschiebebewegung unmittelbar an der Sohle von Bedeutung sein.
2. Die Sinkstoffbewegung ist örtlich verschieden, sie hängt außer vom Korndurchmesser und der Kornform der Sedimente vom jeweiligen Schlückgehalt sowie von der Beschaffenheit der Flußsohle ab. Die Grenzgeschwindigkeit v_0 , bei der die Bewegung beginnt, wurde für einen mittleren Korndurchmesser von 0,11 bis 0,15 mm zu etwa 15 cm/s (gemessen 0,5 m über Grund) und für einen mittleren Korndurchmesser von 0,3 bis 0,4 mm zu etwa 20 cm/s gefunden.

3. Eine gesetzmäßige Beziehung zwischen dem mittleren Sinkstofftransport und der mittleren Stromgeschwindigkeit ist bei sonst gleichen örtlichen Bedingungen nur für den Fein- und Mehlsandgehalt ($> 0,05$ mm), nicht dagegen für den Anteil an schluffigen Sinkstoffen ($< 0,05$ mm) gegeben. Als Annäherung für den Sinkstofftransport \dot{S} (sandiger Anteil) kann die Beziehung genannt werden:

$$S = C \cdot v^\alpha \left(1 - \frac{v_0}{v}\right)$$

worin C eine von den örtlichen Bedingungen abhängige Konstante, v die mittlere und v_0 die Grenzgeschwindigkeit, bei der die Bewegung beginnt, bedeuten. α ergab sich für Sand zu ~ 4 .

4. In der Lotrechten verhält sich der Gehalt an Fein- und Mehlsand ($> 0,05$ mm) in 10, 30, 50 und 70 cm über Grund etwa wie 100 : 51 : 37 : 29 (Ems-Messung), Werte, wie sie ähnlich auch van Veen angibt (100 : 54 : 34 : 28) (5). Der Gehalt an Mehlsand und Schluff ($< 0,05$ mm) erreicht demgegenüber bei 30 bis 50 cm über Grund sein Maximum.

Berechnungen über den Sandhaushalt in der Elbemündung haben weiter ergeben, daß eine erhebliche wechselseitige Ein- und Ausfuhr von Sand mit dem Gezeitenstrom stattfindet, wobei zeitweise die Einfuhr und zeitweise die Ausfuhr überwiegt. Eine gewisse Abhängigkeit von den jeweiligen meteorologischen Verhältnissen scheint hierbei gegeben.

II. Über eine Möglichkeit, in der Brackwasserzone tideunterworfenen Astuarien durch Beeinflussung der Richtung bzw. Größe der vorhandenen Räumungskraft die Fahrwassertiefe zu verbessern bzw. zu erhalten

Ausgehend von der Tatsache, daß in einem Tidefluß die Stabilität der Flußsohle, Anlandung oder Erosion, von der resultierenden Räumungskraft abhängt, wird eine Möglichkeit aufgezeigt, durch künstliche Beeinflussung der Räumungskraft stabile Verhältnisse im Fluß bzw. im Fahrwasser zu erreichen. Gleichgewicht, d. h. eine unveränderte Sohlenlage, wird herrschen, wenn genau so viel Geschiebe mit der Ebbe stromab, wie mit der Flut stromauf verfrachtet wird. Da aus verschiedenen Gründen ein solches Gleichgewicht aber praktisch nicht erreichbar ist, wird man entweder ein Übergewicht der stromab gerichteten Räumkraft oder der stromauf gerichteten Räumkraft anzustreben haben, wobei dann allerdings unterhalb bzw. oberhalb der in Frage stehenden Strecke mit einer Versandung zu rechnen ist. Die Notwendigkeit zu baggern wird hierbei also nicht beseitigt, es kann aber ggf. die Baggerstelle aus der Schiffahrtsrinne heraus verlegt werden und damit können unliebsame Störungen für die Schifffahrt vermieden werden. Im Brackwassergebiet besteht oft ein Übergewicht der stromauf gerichteten Räumkraft infolge des hier wirksamen Dichte-Gefälles. In diesem Falle kann es in Frage kommen, unter Ausnutzung des schon natürlich gegebenen Übergewichtes der Fluträumung diese noch künstlich zu verstärken. Das hierbei anzuwendende Verfahren, Zusammenarbeit zwischen Modell und Rechnung, der rechnerische Ansatz für die Räumkraft bzw. für eine dieser Räumkraft proportionalen Größe von der Form:

$$B \cdot \int_0^D v^\alpha dt,$$

da es ja nur auf das jeweilige Verhältnis von Fluträumung zu Ebberäumung ankommt, wird am Beispiel „Emder Fahrwasser“ im einzelnen geschildert.

Inhalt

	Seite
I. Richtung und Gestaltung der Zufahrten zu den deutschen Nordseehäfen und Verbesserung der Schiffahrtsrinnen	205
A. Allgemeiner Überblick über die Zufahrtswege zu den deutschen Nordseehäfen	205
B. Vergleichende Betrachtung über die Mündungen der Ems, Jade, Weser und Elbe	209
1. Allgemeine Beschreibung	209
2. Der äußere Mündungsbereich	209
3. Die Mündungsbuchten von Ems, Jade, Weser und Elbe	212
4. Der Unterlauf von Ems, Weser und Elbe	213
C. Ausbaumaßnahmen in den Strommündungen	214
1. Die Ems	214
2. Die Jade	215
3. Die Weser	216
4. Die Elbe	220
D. Entstehung und Herkunft der Bodenablagerungen, Grenzgeschwindigkeiten, Bodensedimente, Korngrößenverteilung und Sinkstofftransport (Untersuchungsergebnisse)	225
E. Folgerungen	229
II. Über eine Möglichkeit, in der Brackwasserzone tideunterworfenen Ästuarien durch Beeinflussung der Richtung bzw. Größe der vorhandenen Räumungskraft die Fahrwassertiefe zu verbessern bzw. zu erhalten.	230
Schrifttumsverzeichnis	235

I. Richtung und Gestaltung der Zufahrten zu den deutschen Nordseehäfen und Verbesserung der Schiffahrtsrinnen

A. Allgemeiner Überblick über die Zufahrtswege zu den deutschen Nordseehäfen

Die Ströme Ems, Weser und Elbe sowie die erst in historischer Zeit entstandene Meeresbucht der Jade (Bild 1) bilden in ihren Mündungsbuchten ausgedehnte Wattflächen und ein System von natürlichen Stromrinnen, deren Lage, Ausdehnung und Wassertiefe unter Einwirkung der Naturkräfte (Seegang, Brandung, Strömung) ständigen Änderungen unterworfen ist.

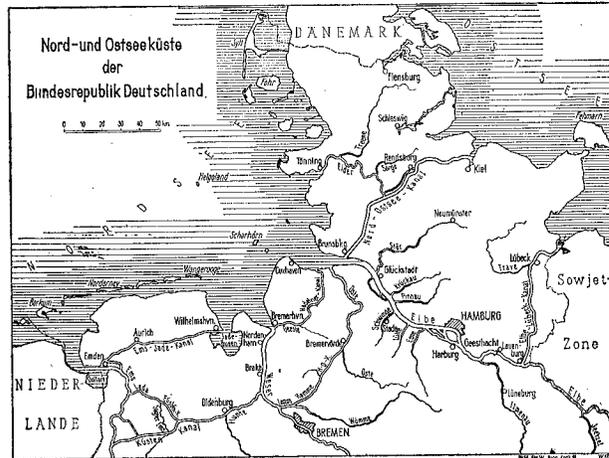


Bild 1

Nord- und Ostseeküste der Bundesrepublik Deutschland

Die Haupttrinnen haben in den Mündungsbuchten (außerhalb der Festlandküste) heute durchweg einen von Nordwesten nach Südosten gerichteten Verlauf. Außerhalb der Inselkette sind sie fast westöstlich gerichtet. Sie kehren sich also der von Westen anlaufenden Flutwelle entgegen.

Noch in historischer Zeit hatten die Zufahrten außerhalb der Festlandküste eine mehr nördlich gerichtete Mündung; das Verschwenken in die Nordwest-Südostrichtung ging schrittweise vor sich. Hierbei wird die Veränderung der meteorologischen Verhältnisse, insbesondere die Zunahme der Häufigkeit des Auftretens von Westwinden in der nördlichen Hemisphäre seit Beginn des vorigen Jahrhunderts, mitgewirkt haben. Diese Erklärung macht u. a. deutlich, warum auch die Jade, die im Bereich des Festlandes etwa Nord-Süd verläuft, im Bereich von Minsener Oog deutlich das Bestreben nach einer Verschwenkung in die Nordwest-Südost-Richtung zeigt.

Zwischen der Ems- und Jademündung hat sich als Fortsetzung der westfriesischen Inseln die Kette der ostfriesischen Schwemmsand-Inseln gebildet, die den nördlichen Abschluß des dem Festland vorgelagerten Wattengebietes bildet. Dieses Wattengebiet umfaßt eine Breite von 6 bis 10 km. Entlang der Inselküste findet unter dem Einfluß der vorwiegend von Westen nach Osten gerichteten Wirkung der Naturkräfte eine Wanderung feiner Sandmassen in west-östlicher Richtung statt. Diese Sanddrift birgt das Hauptproblem der Offenhaltung der Schiffahrtsrinnen zu den deutschen Nordseehäfen in sich, und zwar in doppelter Beziehung:

- a) Dort, wo die west-östliche Sanddrift die Flußmündungen kreuzt, entstehen Untiefen und Platen im Fahrwasser. Dieser Erscheinung kann durch künstliche Mittel (außer Baggerung) kaum begegnet werden.
- b) Mit dem Flutstrom gelangt Sand auch in die Flußmündungen hinein und führt hier zu unliebsamen Ablagerungen. Zur Bekämpfung dieser Mißstände werden außer Baggerungen auch Ausbaumaßnahmen verschiedener Art durchgeführt.

Im inneren Winkel der Deutschen Bucht haben Ems, Jade, Weser und Elbe große Mündungstrichter gebildet, durch welche die vor der ostfriesischen Küste vorhandene Inselkette unterbrochen wird (Bild 2).

Nördlich der Elbemündung besteht die Westküste Schleswig-Holsteins dann wieder aus Watten und Inseln. Sie ist allerdings wegen ihrer anderen Lage zur Richtung der wirkenden Naturkräfte und wegen der anders gearteten geologischen Verhältnisse nicht so regelmäßig ausgebildet wie die ostfriesische Inselküste.

Die Strommündungen bilden von alters her für die Seeschifffahrt den natürlichen Zugang zum Binnenland. In ihnen sind daher auch bereits vor mehr als tausend Jahren

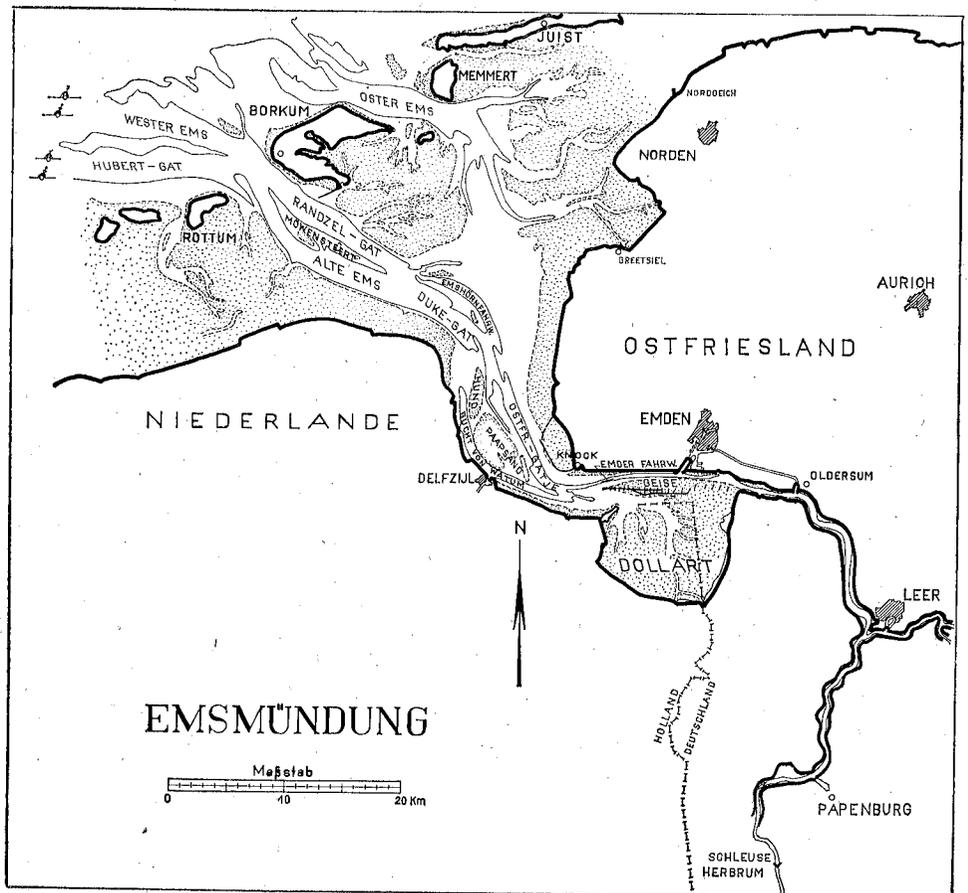


Bild 2
Emsmündung

die alten Hafenstädte Emden, Bremen und Hamburg entstanden. Mit der fortschreitenden Entwicklung des Handels und der Seeschifffahrt kamen neue Häfen hinzu, die weiter abwärts gegründet wurden, da die bis zu den älteren Häfen von Natur vorhandenen Fahrwasserhältnisse für die größeren Seeschiffe nicht mehr ausreichten.

Die Entfernungen vom äußeren Bereich der Strommündungen bis zu den einzelnen Häfen sind beträchtlich. Sie sind für die wichtigsten Häfen nachstehend angegeben:

Ems		Jade	Weser	Elbe
Von Borkum bis:		von Wangerooge bis:	von Leuchtturm Roter Sand bis:	von Feuerschiff „Elbe I“ bis:
Emden	48 km	Wilhelmshaven	Bremerhaven	Cuxhaven 40 km
Leer	75 km	45 km	49 km	Brunsbüttelkoog
Papenburg	90 km		Nordenham 56 km	70 km
			Brake 73 km	Hamburg-St. Pauli
			Bremen 109 km	140 km

Von den aufgeführten Häfen haben Emden, Wilhelmshaven, Bremerhaven und Cuxhaven etwa gleiche Entfernungen von 40 bis 49 km von der offenen See. Aber von ihnen ist nur Emden einer der alten Häfen, während Bremerhaven, Cuxhaven und Wilhelmshaven als Häfen erst seit 100 bis 150 Jahren hervorgetreten sind. Wilhelmshaven hat trotz der günstigen natürlichen Voraussetzungen des Jadefahrwassers als Handelshafen erst seit 1958 erhebliche Bedeutung für den Verkehr von Großtankern erlangt, nachdem dort großzügige Löschanlagen für Öl errichtet worden sind.

Mit dem ständigen Anwachsen der Schiffsgrößen und insbesondere der Schiffstiefgänge mußten seit mehr als 100 Jahren an den Zufahrten zu den deutschen Seehäfen umfangreiche Maßnahmen durchgeführt werden, um diese den gesteigerten Anforderungen anzupassen. Diese Entwicklung ist im Hinblick auf die weitere Größenentwicklung der Seeschiffe noch nicht abgeschlossen. Von ausschlaggebender Bedeutung für die Ausbaufähigkeit der Fahrwasser sind die natürlichen morphologischen und hydrologischen Gegebenheiten, wie Küstengestaltung, das Ausmaß der Gezeitenbewegung, die in jeder Tide bewegten Flut- und Ebbwassermengen und die Abflussumengen aus dem Binnenland. Schließlich ist — namentlich in den äußeren Mündungsbereichen — noch die (in der Stromrichtung gesehen) nach rechts gerichtete Wirkung der Erdrotation auf die Wasserbewegung zu berücksichtigen. Diese Gegebenheiten können durch wasserbautechnische Maßnahmen nur z. T. und auch nur bis zu gewissen Grenzen beeinflusst werden. Je größer aber die Tidenhöhe, die Flut- und Ebbwassermengen sowie der Abfluß aus dem Binnenland in den Strommündungen sind, um so günstiger sind auch die Voraussetzungen für die Offenhaltung ausreichend tiefer und breiter Stromrinnen.

Um einen Überblick über die Gezeitenbewegung an der deutschen Nordseeküste zu geben, werden nachstehend die mittleren Tidenhöbe an verschiedenen Punkten der Seeschiffahrtstraßen aufgeführt:

Ems		Jade	Weser	Elbe
Borkum	2,20 m	Wangerooge-Ost	Roter Sand 2,75 m	Cuxhaven 2,90 m
Emden	3,00 m	2,80 m	Bremerhaven	Brunsbüttelkoog
Leerort	2,45 m	Wilhelmshaven	3,40 m	2,65 m
Papenburg	1,65 m	3,60 m	Nordenham 3,40 m	Hamburg-St. Pauli
			Brake 3,35 m	2,30 m
			Bremen 3,20 m	

Die folgende Zusammenstellung der Flut- und Ebbwassermengen ermöglicht einen Vergleich über die in den verschiedenen Stromgebieten unterschiedlichen hydrologischen Grundlagen.

Flut- und Ebbwassermengen bei mittlerem Tidehub
und mittlerem Oberwasserabfluß:

Stromgebiet	Ortsbezeichnung	Flutwassermenge (Mill. m ³)	Ebbwassermenge (Mill. m ³)
Ems	Dollart und Emders Fahrwasser	197,0	199,0
	Emders Fahrwasser (Geisspitze)	67,0	83,0
	Emden	44,0	52,0
	Leerort	13,0	14,5
Jade	Wilhelmshaven	399,6	399,6
Weser	Bremerhaven-Blexen	119,0	132,0
	Brake	52,1	65,1
	Veegesack	17,4	30,1
Elbe	Cuxhaven (ohne Klotzenloch)	540,6	592,0
	Brunsbüttelkoog	377,9	404,3
	Wedel	105,4	131,8

Ebenso zeigen die nachstehenden Angaben über die sekundlichen Abflußmengen aus dem Binnenland für höchstes Hochwasser, Mittelwasser und niedrigstes Niedrigwasser die Unterschiede in der Bedeutung der Ströme Ems, Weser und Elbe. An der Jade ist ein nennenswerter Abfluß aus dem Binnenlande nicht vorhanden, da sie eine reine Meeresbucht ist.

Abflüsse aus dem Binnenland (Oberwassermengen):

Stromgebiet	Pegel	Höchstes Hochwasser HHQ (m ³ /s)	Mittelwasser MQ (m ³ /s)	Niedrigstes Niedrigwasser NNQ (m ³ /s)
Ems	Herbrum	1 269	73	6,5
Weser	Intschede	3 370	311	51
Elbe	Artlenburg	3 400	660	190

B. Vergleichende Betrachtung über die Mündungen der Ems, Jade, Weser und Elbe

1. Allgemeine Beschreibung

Zwischen der niederländischen Insel Rottum und der deutschen Insel Juist liegt das Mündungsgebiet der Ems, die mit ihren Mündungsarmen Wester- und Osterems die Insel Borkum umfaßt.

Östlich der Insel Wangerooge wird die bis dahin geschlossene Inselkette durch die Mündungsgebiete der Jade, Weser und Elbe unterbrochen. Innerhalb dieser Mündungsgebiete haben sich zwischen den Stromrinnen ausgedehnte Wattengebiete gebildet, die zwischen Weser und Elbe nördlich und südlich des Großen Knechtsandes durch selbständige bedeutende Wattströme (Tegeler Rinne, Norder- und Westertill) gefüllt und entleert werden.

Die hier zwischen den Stromsystemen liegenden Wattzungen sind jedoch so schmal, daß sich auf ihnen die Bildung dauerhafter Düneninseln nach dem Vorbild der ostfriesischen Inseln nicht vollziehen konnte. Ansätze hierzu sind aber überall erkennbar, wie die über das mittlere Tidehochwasser hochgewachsenen, teilweise mit Dünen bestandenen Sände bzw. Wattinseln Minsener-Oog, Alte Mellum, Scharhörn und Trischen (sowie die Insel Neuwerk) beweisen. Sie alle säumen den seeseitigen Rand der zwischen den Stromrinnen liegenden Wattgebiete. Auch am seeseitigen Rand des Großen Knechtsandes ist von jeher die Bildung hochwasserfreier Sandplatten erkennbar; sie haben aber nicht annähernd die gleiche Stabilität wie die übrigen genannten Sände.

Die entlang der ostfriesischen Inseln von Westen nach Osten gerichtete Sandwanderung setzt sich durch das Mündungsgebiet der drei Ströme unter den veränderten hydrologischen Voraussetzungen in besonderen Formen fort.

Nach dem Festland zu befinden sich die Mündungsbuchten im engeren Sinn und anschließend weiter landeinwärts die Unterläufe der Ströme selbst, die bereits zwischen festen Ufern liegen.

Das Mündungsgebiet der Ströme läßt sich daher in drei Zonen einteilen:

Der äußere Mündungsbereich, in welchem die Stromrinnen stark veränderlich sind,

die Mündungsbucht, in welcher sich breite Wattengebiete gebildet haben und die Stromrinnen ihrer Lage nach, durch wasserbauliche Maßnahmen unterstützt, bereits eine größere Stabilität aufweisen,

der Unterlauf der Ströme, der zwischen festen Ufern liegt.

2. Der äußere Mündungsbereich

Die vorwiegend in west-östlicher Richtung wirkenden Naturkräfte erfahren in ihrer Richtung und Stärke beim Eintritt in die Mündungsbuchten Veränderungen. Seegang und Brandung verlieren an Stärke, je mehr sie in die Gebiete flacheren Wassers und in das Wattengebiet eintreten. Die entlang der Inseln bei Flut nach Osten, bei Ebbe nach Westen gerichteten Gezeitenströmungen haben dort normalerweise nur Geschwindigkeiten von wenigen Dezimetern je Sekunde. Im äußeren Mündungsbereich wird die Richtung der Strömungen bei Flut aus der West-Ostichtung in südöstliche bzw. später südliche Richtung abgebogen. Bei Ebbe ist der Vorgang umgekehrt. In diesen Hauptstromrichtungen haben sich auch die großen natürlichen Stromrinnen gebildet, welche als Fahrwasser für die Schifffahrt benutzt werden.

Hier erreichen die Stromgeschwindigkeiten in den Rinnen bei normalen Tiden Werte bis 1,50 m/s oder auch etwas mehr. Derartige Stromgeschwindigkeiten sind in der Lage, die anstehenden feinen Sande aufzuwirbeln und in Bewegung zu halten. Sie bewegen sich in den Stromrinnen bei Flutstrom nach dem Land zu, bei Ebbe nach See zu. Da die Richtung der Stromrinnen bzw. die Richtung und Lage des Hauptstromstrichs innerhalb der breiten Stromrinnen bei Flut- und Ebbestrom häufig verschieden sind, und sich ggf. auch kreuzen, findet ein kompliziertes Zusammenspiel von Seegang, Brandung und Strömung statt, deren resultierende Wirkung die Richtung und das Ausmaß der Sandverlagerungen bestimmt. Diese Zusammenhänge und sich hierbei etwa ergebende Entwicklungstendenzen können nur durch ständige örtliche Messungen und Beobachtungen geklärt werden.

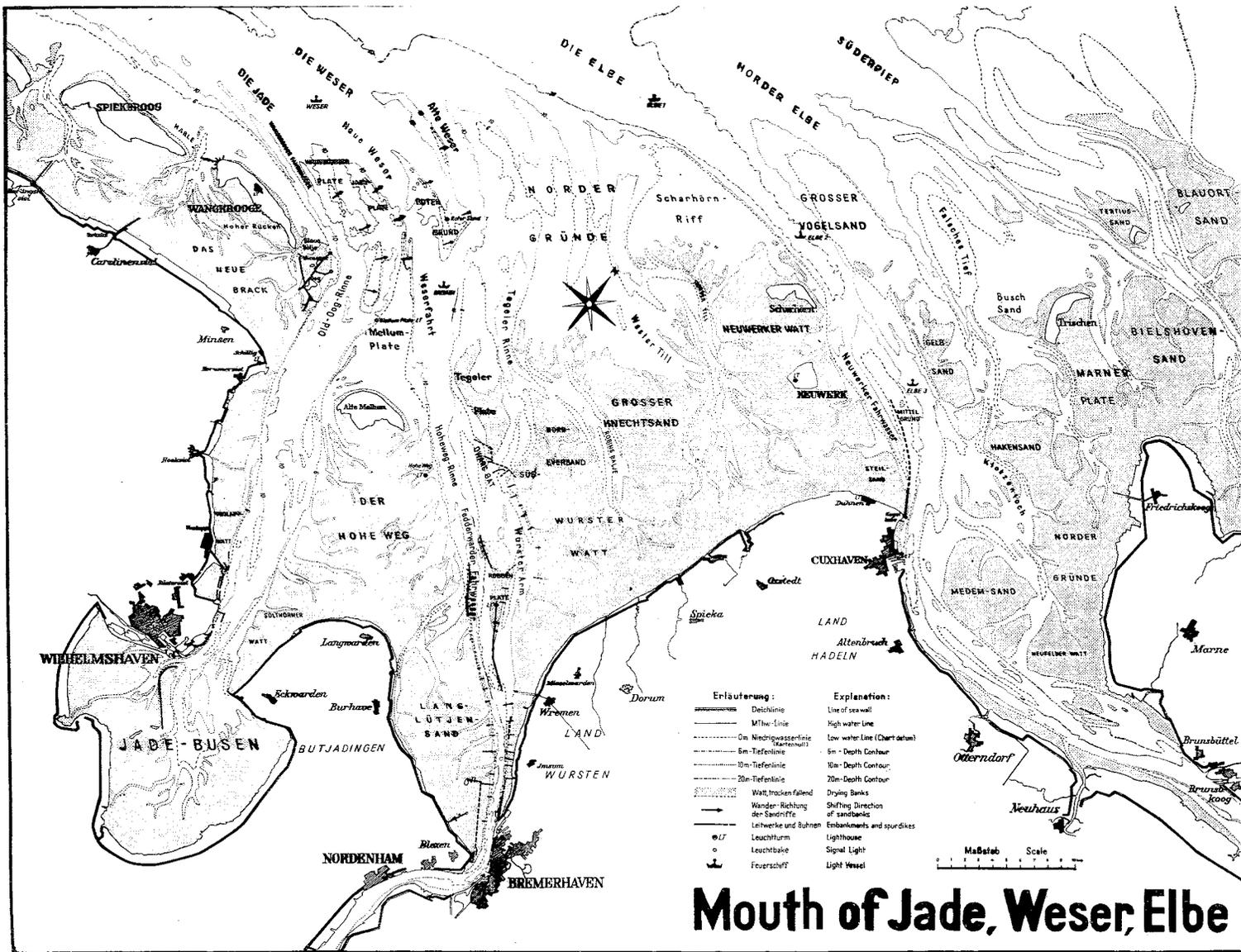
Die Kette der westfriesischen (niederländischen) Inseln ist von der der ostfriesischen (von Juist bis Wangerooge) durch den Einschnitt der beiden Emsmündungsarme (einschl. der von ihnen umschlossenen Insel Borkum) deutlich abgesetzt. In Nordsüdrichtung gemessen beträgt der Sprung etwa 15 km. (Bild 2). Von den beiden die Insel Borkum umfassenden Ströme, Wester- und Osterems, ist der letztere hydrologisch gesehen heute nicht mehr als Emsmündungsarm anzusprechen; er ist nur noch ein Seegatt für das zwischen Juist und dem Festland sich ausdehnende große Wattengebiet.

Die Westerems ist durch langgestreckte Sände, die durch die die Strommündung kreuzenden Sandmassen ständig genährt werden, in zwei Rinnen aufgeteilt: das Hubertgatt und die Westerems (im engeren Sinn). Am Punkt ihres Zusammentreffens, dort, wo der äußere Mündungsbereich in die Mündungsbucht übergeht, ist das Fahrwasser abgknickt; hier lehnt es sich an die Sandinsel Borkum an. Die Insel Borkum gewährleistet die feste Lage des Fahrwassers an dieser Stelle und wird mit aus diesem Grunde bewußt durch Schutzmaßnahmen gehalten. In der Mündungstrecke sind infolge der groß durchströmenden Wassermengen von Natur aus überall ausreichende Wassertiefen vorhanden, so daß hier keine besonderen Maßnahmen erforderlich sind.

Während sich im Bereich der Inselkette der größte Teil der Sandwanderung bis zu einer Wassertiefe von etwa 6 m längs der Küste vollzieht, formieren sich beim Eintritt in den äußeren Mündungsbereich der Jade die Sandmassen in große Sandbänke von sichelförmiger Gestalt, die sich auf eine Zone von 10—15 km Breite verteilen. Mit ihren Südausläufern speisen sie die am Rande der Wattzungen gelegenen hohen Sände und Wattinseln. Ihre Hauptmasse überquert die in eine Reihe von Stromrinnen aufgespaltenen Mündungen der Jade und Weser in nordöstlicher Richtung, bis sie schließlich zur Elbmündung gelangen (Bild 3). Hierbei finden periodische Verlagerungen der tiefen Stromrinnen statt, bei denen in Zeitabschnitten von etwa 60—70 Jahren etwa gleiche Zustände auftreten.

Die äußeren Stromrinnen in diesem Gebiete, wie das „Wangerooger Fahrwasser“, die „Neue Weser“ und die dazwischen liegenden Rinnen, haben eine vom WNW nach OSO weisende Richtung, während die anschließenden Rinnen, die „Old-Oog-Rinne“ von NNW nach SSO und die „Weserfahrt“ von NW nach SO gerichtet sind. An den Knickpunkten dieser Rinnen besteht eine verstärkte Neigung zur Bildung von Barren. In besonderer Form ist das nördlich von Minsener Oog der Fall, wo sich der von Westen nach Osten wandernde Sand unter dem Einfluß der Blauen Balje sammelt und periodisch in Form von Platen die Wanderung in nordöstlicher Richtung antritt.

So ist die Lage der Sandbänke und der Stromrinnen (und ihrer Talwege) zwischen „Wangerooge“ und der „Alten Weser“ ständigen Veränderungen unterworfen. Es ist schwierig, in diesem äußeren Bereich durch Baggerungen oder Baumaßnahmen beständige und ausreichend tiefe Fahrwasser zu schaffen. In dem jetzigen Hauptfahrwasser



Mouth of Jade, Weser, Elbe

Bild 3
Mündung von Jade, Weser, Elbe

der Jade konnte das nur durch die Festlegung der unmittelbar östlich Wangerooge verlaufenden Rinnen, des Wangerooger Fahrwassers und der Old-Oog-Rinne geschehen. Die hier durchgeführten Baumaßnahmen und die im Gang befindliche Vergrößerung der Wassertiefen auf 12 m werden im Abschnitt C näher beschrieben.

In den beiden Mündungsarmen der Weser, der „Neuen Weser“ und der „Alten Weser“, in deren Gabelung der „Rote Sand“ liegt, haben sich ausreichende Tiefen zumeist von selbst gehalten, wengleich sich auch die Lage dieser Rinnen in längeren Zeiträumen verändert und die Wassertiefen wechseln.

Sowohl in den Mündungsrinnen der Jade wie auch der Weser ist es möglich gewesen, in der Jade durch regelmäßige, in der Weser nur durch gelegentliche Baggerungen Wassertiefen von mindestens 10 m unter Kartennull (= MSpr.Tnw) aufrecht zu erhalten. Die „Alte Weser“ weist sogar seit längeren Jahren ohne Nachhilfe von Baggerungen durchgehende Wassertiefen von 12 bis 13 m auf.

Die Mündung der „Elbe“ weist demgegenüber im äußeren Bereich bereits eine sehr stabile Lage, eine große Breite und reichliche Wassertiefen auf; von See bis nordöstlich von Scharhörn sind Wassertiefen von 20 m vorhanden. Die Ursache für diese günstigen Verhältnisse liegt einmal darin, daß sich zwischen der Weser- und Elbmündung die heranwandernden Sandmassen auf den „Norder Gründen“, dem „Großen Knechtsand“ und dem von Cuxhaven bis Scharhörn reichenden großen Watrücken des „Neuwerker Watts“ auf ein sehr großes Gebiet verteilen können, und daß zum anderen die Elbe erheblich größere Wassermengen zur Verfügung hat als die anderen Ströme. Daher kann sich hier eine breitere und tiefere Stromrinne ausbilden bzw. halten.

Im ganzen läßt sich feststellen, daß im äußeren Mündungsbereich von Jade, Weser und Elbe sowohl die Wassertiefen wie auch die Stabilität der Stromrinnen von Westen nach Osten zunehmen. In diesem Bereich waren in der Jade zur Offenhaltung einer Wassertiefe von zunächst 10 m umfangreiche Regulierungsbauwerke und regelmäßige Baggerungen notwendig, die Wassertiefen in der „Neuen Weser“ halten sich zumeist ohne Baggerungen auf 10 m, in der „Alten Weser“ auf 12 bis 13 m und in der Elbe außerhalb von Scharhörn auf 20 m.

3. Die Mündungsbuchten von Ems, Jade, Weser und Elbe

In den Mündungsbuchten verlaufen die Stromrinnen zwischen den bei jeder Ebbe trocken fallenden Wattgebieten. Hier besteht schon die Möglichkeit, durch den Bau von Leitwerken und Bühnen im Verein mit Baggerungen die Lage und die Wassertiefen der Stromrinnen wirksam zu beeinflussen, jedoch sind die Verhältnisse in den betrachteten Mündungen sehr verschieden.

Die Mündungsbucht der Ems reicht von Borkum bis zum Dollart. Die Erhaltung des Fahrwassers hängt wesentlich vom Bestand des Dollarts mit seiner Spülwirkung (120 Mill. m³) ab. Der Dollart ist durch einen hohen Watrücken, die Geise, von der Ems — dem sogenannten Emder Fahrwasser — fast vollkommen abgeschlossen.

Für die Ems ist das Vorhandensein jeweils zweier Stromrinnen nebeneinander, von denen die eine bogenförmig, die andere gerade (Sehne) verläuft, charakteristisch. Es folgen nacheinander die Alte Ems und das Randzelgatt mit dem Möwensteert dazwischen, der Emshörnbogen und das Dukegatt, die die Emshörnplate einschließen, und schließlich die Bucht von Watum und das ostfriesische Gatje mit dem Paapsand und dem Hund dazwischen. In jüngster Zeit (seit etwa 100 Jahren) haben sich die Sehnen, die die Mäanderbogen abschneiden, auf deren Kosten immer stärker ausgebildet. Das Hauptfahrwasser verläuft daher jetzt vorwiegend in den Sehnen, Randzelgatt, Dukegatt und

ostfriesisches Gatje. Nur an den Übergängen — vor allem vom ostfriesischen Gatje nach dem Emder Fahrwasser — gibt es zeitweise Versandungen, die aber durch Baggerung behoben werden können. Der Fahrwasserbogen südlich des ostfriesischen Gatje an der Knock zeigt von jeher Verlagerungen und Verwilderungen. Durch einen an der Innenseite des Bogens hergestellten Leitdamm sind die Verhältnisse zwar verbessert, doch nicht stabilisiert worden (1).

In der Jade zwischen Mellum und Wilhelmshaven hat sich von jeher durch die Spülwirkung der Flut- und Ebbwassermengen des Jadebusens (399 Mill. m³) eine breite und zumeist mehr als 13 m tiefe Stromrinne offen gehalten. Die natürliche Offenhaltung der Hauptrinne wird auch durch einige unbedeutendere Nebenrinnen bei der Geniusbank und der Hocksielplate nicht entscheidend gestört. Die Spülwirkung wird dadurch besonders wirksam, daß die gesamten Flut- und Ebbwassermengen bei Wilhelmshaven durch die nur rd. 4 km breite Ausflußöffnung des Jadebusens ein- und ausströmen müssen.

In der Außenweser zwischen Leuchtturm „Hoher Weg“ und Bremerhaven sind beiderseits der Robbenplate zwei Stromrinnen, der Wurster-Arm mit dem Dwarsgat und der Fedderwarder-Arm vorhanden, von denen seit 1929 der letztere als Hauptfahrwasser dient. Da die Ebbwassermenge der Weser bei Bremerhaven mit 132 Mill. m³ bedeutend geringer ist als in der Jade bei Wilhelmshaven, sind im Gegensatz zur Jade hier die Voraussetzungen für die Offenhaltung größerer Wassertiefen ungünstiger. Seit 1893 mußten daher zwischen Bremerhaven und dem Nordende der Robbenplate umfangreiche Leitdämme und Buhnen errichtet und Baggerungen durchgeführt werden, um das heutige Fahrwasser der Außenweser von 10 m Wassertiefe bei Kartennull zu schaffen. Die Fahrwassertiefe von 10 m ist in der Außenweser heute von See bis Bremerhaven vorhanden und kann auch mit vertretbaren Baggerkosten aufrecht erhalten werden. Über die durchgeführten und geplanten Baumaßnahmen vgl. Abschnitt C.

Die Mündungsbucht der Außenelbe von Scharhörn bis Cuxhaven bzw. bis zur Oste-Mündung weist eine verhältnismäßig große Breite auf. Die Hauptstromrinne hat sich auf diesem Abschnitt in ausreichender Breite im allgemeinen auf 11 m Wassertiefe bei Kartennull, in der Flußkrümmung oberhalb von Cuxhaven sogar erheblich tiefer, gehalten. Nur auf einer Strecke von etwa 15 km Länge ist die hier angestrebte Wassertiefe von 11,0 m unter Kartennull von Natur aus nicht ständig vorhanden. Unterhalb von Cuxhaven im Gebiet des Mittelgrundes, wo eine erhebliche Ausweitung der Querschnitte eintritt und die Hauptstromrinne aus WNW-OSO-Richtung in die Richtung NW-SO umschwenkt, verlaufen Ebbe- und Flutrinne getrennt, so daß hier infolge Stromspaltung Barrenbildungen auftreten. Die hierdurch veranlaßten Arbeiten werden in Abschnitt C näher beschrieben.

4. Der Unterlauf von Ems, Weser und Elbe.

Im Unterlauf der Ems, dem sogenannten Emders Fahrwasser, liegen die Hauptschwierigkeiten für Erstellung bzw. Erhaltung der geforderten Wassertiefe. Von Natur aus waren auf dieser Strecke oberhalb des Wirkungsbereichs des Dollarts als Spülbecken, nur geringe Fahrwassertiefen vorhanden. Erst umfangreiche Strombaumaßnahmen, ein Längswerk mit Buhnen auf der Geise, der Bau eines Seedeichs von Emden bis zur Knock, und Baggerungen haben hier das Fahrwasser mit der Zeit von 2,5 bis 3 auf 7,2 m unter Kartennull gebracht. Zur Zeit werden Regulierungsbauwerke erstellt und Baggerungen durchgeführt, wodurch eine Wassertiefe von 8 m erreicht werden soll. An das Emders Fahrwasser schließt an der Emders Hafenskanal, der zusammen mit den alten und neuen Umschlagbecken den Emders Seehafen bildet.

Der obere Teil der *J a d e* (Jadebusen) ist eine Meeresbucht, deren innerer Teil nicht mehr der Großschiffahrt dient. Die großen Flut- und Ebbwassermengen des Jadebusens reichen aus, um — wie beschrieben — von Wilhelmshaven nach See zu in der Mündungsbucht ein breites Fahrwasser von ausreichender Tiefe offenzuhalten.

Der Unterlauf der *W e s s e r* von Bremen bis Bremerhaven (*U n t e r w e s e r*) hat eine Länge von rd. 67 km. Der Strom verläuft zwischen festen Ufern. Die Wasserspiegelbreite bei MThw beträgt bei Bremen etwa 200 m und wächst bis Nordenham auf etwa 1000 m an. Dieser Abschnitt dient als Zufahrtstraße zu den Häfen in Bremen-Stadt, Brake und Nordenham. Von Natur aus war die Unterweser in den Jahren vor 1887 nur für den Verkehr von Schiffen mit 2 bis 3 m Tiefgang geeignet. Seitdem sind umfangreiche Regulierungsarbeiten durchgeführt worden, so daß heute das Fahrwasser eine Wassertiefe von rd. 8,0 m unter Kartennull und unter Hinzurechnung des Tidehubs von über 11,00 m bei mittlerem Tidehochwasser aufweist. Die durchgeführten Regulierungsarbeiten bedeuten erhebliche Eingriffe in die Stromverhältnisse und hatten starke Veränderungen der hydrologischen Faktoren zur Folge (vgl. Abschnitt C).

Die *U n t e r e l b e* hat von Hamburg bis Cuxhaven eine Länge von rd. 100 km. Der Flußlauf weitet sich bereits dicht unterhalb von Hamburg zu Wasserspiegelbreiten bei MThw von 1,5 bis 2,0 km aus; diese erreichen bei Brunsbüttelkoog 2,5 km. Unterhalb von Brunsbüttelkoog erfolgt dann der Übergang in die breite Mündungsbucht. Durch diese große Ausdehnung des Unterlaufs sind die großen Flut- und Ebbwassermengen (bei Cuxhaven 592 Mill. m³) bedingt, durch welche auch in der Unterelbe die Voraussetzungen zur Offenhaltung einer breiten Stromrinne gegeben sind. Die verhältnismäßig große Gesamtbreite des Unterlaufs begünstigte allerdings die Bildung von Nebenrinnen und Barren. Zur Schaffung und Offenhaltung der jetzt vorhandenen Wassertiefe von 10,0 m im Hauptfahrwasser, deren Vergrößerung auf 11,0 m im Gange ist, waren seit Jahrzehnten umfangreiche Stromregulierungsarbeiten und Baggerungen erforderlich (vgl. Abschnitt C).

C. Ausbaumaßnahmen in den Strommündungen

1. Die Ems

In der Ems sind Ausbaumaßnahmen zur Verbesserung der Fahrwasserverhältnisse bisher ausschließlich im Raume der Knock und oberhalb hiervon getroffen worden. Als erste Maßnahme dieser Art wurde Ende des vorigen Jahrhunderts (1870—1890) das alte Geiseleitwerk auf der Geise errichtet. Hierauf folgte in den Jahren 1899—1901 in Anpassung an die natürliche sich immer deutlicher abzeichnende Verlagerung des Stromes aus der Bucht von Watum in das Ostfriesische Gatje die Durchbaggerung der südlichen Barre des Ostfriesischen Gatje, die zu einem vollen Erfolg führte (2). Im Zuge des weiteren Ausbaues des Emders Fahrwassers wurden, abgesehen von Baumaßnahmen im Hafengebiet Emden selbst, nacheinander der Seedeich Emden-Knock (1914—1922), das Leitwerk an der Knock (1930—1932), das neue Leitwerk auf der Geise nebst Bühnen am Leitwerk und am Seedeich (1932—1933) errichtet und schließlich im Jahre 1934 eine Erhöhung des Leitwerkes an der Knock um rd. 1,0 m auf + 3,0 m über Kartennull vorgenommen. Im Laufe der Jahre ist hierdurch eine Erhöhung der natürlichen Wassertiefe im Emders Fahrwasser von 3,0—3,5 m unter Kartennull auf 5,5—6,0 m eingetreten. Auf einzelnen Strecken haben sich sogar Wassertiefen von 6,5—7,0 m eingestellt. Für die Herstellung bzw. Erhaltung einer durchgehenden Fahrwassertiefe von mindestens 7,0 m waren auf der genannten rd. 10 km langen Strecke jährliche Unterhaltungsbaggerungen von $1,0—1,2 \times 10^6$ m³ erforderlich, die fast ausschließlich auf bestimmte festliegende Strecken beschränkt blieben.

Zur Zeit ist der Ausbau des Emdrer Fahrwassers für eine Wassertiefe von 8,0 m durch verstärkte Baggerungen und den weiteren Einbau von Regulierungsbauwerken (Erneuerung und hochwasserfreier Ausbau des Leitwerkes auf der Geise, sowie bühnenartige Einbauten zu beiden Seiten des Fahrwassers) im Gange. Über die Grundsätze dieses Ausbaues sowie die besondere Problematik, die auf dieser im Brackwassergebiet der Ems liegenden Strecke vorliegt, wird im Teil II ausführlich berichtet. Auf die Bedeutung des Dollart als Spülbecken für die Erhaltung der Fahrwassertiefen unterhalb der Knock wurde bereits hingewiesen. Eine Eindeichung des Dollart zum Zwecke der Landgewinnung, wie sie zeitweise besonders von niederländischer Seite angestrebt wurde, würde zur Folge haben, daß die heutige Spülwirkung des Dollart mit 120 Mill. m³ Fassungsvermögen wegfällt. Untersuchungen über die sich hierbei ergebenden veränderten Strömungsverhältnisse in den Querschnitten unterhalb des Dollart wurden in einem Tidemodell mit fester Sohle im Maßstab 1 : 100 für die Tiefen und 1 : 500 für die Breiten und Längen durchgeführt. Als Ergebnis wurde festgestellt, daß bei einer Eindeichung die Stromgeschwindigkeiten, insbesondere die Ebbgeschwindigkeiten unmittelbar unterhalb des Dollart bis auf weniger als 50 % ihres bisherigen Wertes vermindert werden, wobei das Verhältnis Ebbgeschwindigkeit/Flutgeschwindigkeit zugunsten letzterer verschlechtert wird. Die mit der Flut eindringenden Sandmengen können dann vom Ebbstrom nicht mehr ausreichend geräumt werden, d. h. eine schnelle Versandung der unterhalb des Dollart gelegenen Strecke wäre die unausbleibliche Folge. Auch Versuche mit Teileindeichung des Dollart führten zu ungünstigen Ergebnissen. Nur durch umfangreiche und kostspielige Regulierungsbauten in der Ems bis in das Dukegatt hinein, die in keinem Verhältnis zum erzielbaren Nutzen stehen, könnte dieser ungünstigen Wirkung entgegengesetzt werden. Der Gedanke einer Eindeichung des Dollart wurde deshalb fallengelassen.

2. Die Jade

Wie bereits ausgeführt, ist der Jadebusen für die Unterhaltung und den Ausbau des Jadedefahrwassers lebensnotwendig. Es werden und dürfen aber auch keine Eindeichungen, die den Speicherraum verkleinern würden, in ihm vorgenommen werden. Ein Leitwerk im Jadebusen führt einen Teil des ein- und ausströmenden Gezeitenwassers an den Wilhelmshavener Hafeneinfahrten vorbei, wodurch die Zufahrten zu diesen offengehalten werden.

Während des 1. Ausbau-Abschnittes, der von 1903—1918 reicht, bildete die „Alte Jade“, die jetzt noch als Nebenrinne benutzt wird, das Hauptfahrwasser. Dieses verlief zwischen den Sänden im äußeren Mündungsgebiet der Jade und konnte nur durch Baggerungen aufrecht erhalten werden. Seit 1909 wurde auf Minsener Oog zur Festlegung der Insel ein Bühnen- und Leitwerkssystem von insgesamt 11 km Länge gebaut (Bild 3). Auf dem hohen Watt wurde Packwerk verlegt, in tiefen Lagen und namentlich an den Köpfen der Dämme wurden Sinkstücke verwendet. Eine aufgesetzte Steinkiste machte die Hauptwerke befahrbar. Das Korrektionswerk sollte gleichzeitig auch regulierend auf die eingangs erwähnte ständige Sanddrift von West nach Ost an der Nordseite der ostfriesischen Inseln einwirken. Das angestrebte Ziel war damals, ein 10,5 m unter Kartennull tiefes Fahrwasser zu schaffen und zu erhalten. Die hierzu erforderlichen jährlichen Baggermengen stiegen von zunächst etwa 500 000 m³/Jahr bald an und erreichten 1916 mit 4,2 Mill. m³ ein Maximum. Insgesamt wurden von 1903—1918 16,6 Mill. m³ oder 1,04 Mill. m³/Jahr gebaggert. Eine Zeit lang hielt sich das Fahrwasser auch ohne Baggerung noch auf 10 m Tiefe, verlandete dann aber (ab 1922) rasch und wurde schließlich durch das jetzige Hauptfahrwasser (Wangerooger Fahrwasser und Old-Oog-Rinne) abgelöst.

Der 2. Ausbau-Abschnitt umfaßt die Zeit von 1926 bis 1942. Durch Baggerungen, die im Jahre 1926 begannen, wurde 1931 in dem neuen Fahrwasser wieder eine Tiefe von 8,5 m unter Kartennull, 1941 eine Tiefe von 10 m erreicht. Die Baggermengen betragen in der Zeit von 1926—1942 insgesamt 26,6 Mill. m³ oder 1,39 Mill. m³/Jahr. Hierbei ist zu beachten, daß die Baggermengen mit dem Wirksamwerden des erwähnten Korrektionswerkes auf Minsener Oog geringer wurden. Betrug die durchschnittliche Baggermenge in der Zeit von 1926—1936 noch 1,54 Mill. m³/Jahr, so sank sie in der Zeit von 1937—1942 auf 1,11 Mill. m³/Jahr.

In der letzten Kriegs- und in der Nachkriegszeit wurden am Fahrwasser keine Unterhaltungsarbeiten mehr unternommen, das Fahrwasser versandete wieder. Die Bauwerke wurden nicht nur nicht unterhalten, sondern z. T. sogar zerstört.

Der 3. Ausbau-Abschnitt endlich umfaßt die Wiederherstellung des Fahrwassers in Verbindung mit der Errichtung einer Umschlaganlage für große Öltanker in der Jade. Ein schon im Jahre 1940 erwogener Plan der Herstellung einer Fahrwassertiefe von 12 m wurde wieder aufgegriffen. Das Ausbauziel konnte nach Instandsetzung des in Verfall geratenen Korrektionswerkes auf Minsener Oog durch Baggerungen im wesentlichen erreicht werden. In den Jahren 1957 bis 1960 wurden zu diesem Zweck im Gebiete des Wangerooger Fahrwassers bei einer Fahrwasserbreite von 300 m auf einer Strecke von 16 km Länge rd. 8,0 Mill. m³ gebaggert. Die rechnerische Baggermenge nach den vor der Baggerung durch Peilung festgestellten Tiefenverhältnissen betrug hierbei rd. 3,0 Mill. m³, d. h. die tatsächliche Baggermenge war um mehr als 100% größer als die rechnerische. In der Innenjade wurden gleichzeitig bei 300 m Fahrwasserbreite und 22 km Baggerstrecke 3,7 Mill. m³ bei 1,5 Mill. m³ rechnerischer Baggermenge gebaggert. Die Mehrbaggerungen sind auf die laufenden Sandeintreibungen zurückzuführen, die zugleich auch einen Anhalt für die voraussichtlich in Zukunft erforderlichen Unterhaltsbaggerungen geben. Zuverlässige Voraussagen können aber nicht gemacht werden.

Untersuchungen über einen weiteren Ausbau auf 13 m sind im Gange. Zur Einschränkung der dann voraussichtlich erforderlichen vermehrten Unterhaltsbaggerungen sowie zur Stabilisierung der Verhältnisse werden sich weitere umfangreiche und kostspielige Baumaßnahmen, wozu vielleicht auch eine Durchdämmung der Blauen Balje gehört, nicht vermeiden lassen. Da der Meeresgrund an der Ausmündung des Wangerooger Fahrwassers in der offenen See auf 14—14,5 m unter Kartennull liegt, dürfte dies die überhaupt größte Tiefe sein, für die ein Ausbau des Jadedfahrwassers noch sinnvoll ist.

3. Die Weser

Das Fahrwasser der Unter- und Außenweser hat in früheren Jahrhunderten für den Verkehr der damaligen Seeschiffe genügt. Als die Schiffe größer wurden, gründete Bremen nach verschiedenen Zwischenlösungen im Jahre 1827 an der Mündung der Weser den Vorhafen Bremerhaven, bis zu dem sich dann der eigentliche Verkehr mit Seeschiffen abwickelte. Die Güter wurden seitdem auf der Unterweser zwischen Bremen und Bremerhaven auf Leichtern befördert.

Bremen strebte jedoch auch nach 1827 immer danach, den unmittelbaren Anschluß der Stadt an die Seeschiffahrt wieder zu gewinnen. Um dieses Ziel zu erreichen, ergab sich die Notwendigkeit, eine durchgreifende Korrektur zunächst der Unterweser vorzunehmen, später aber wurde auch auf der Außenweser von Bremerhaven nach See das Fahrwasser den wachsenden Schiffsgrößen anzupassen.

In den 80er Jahren des vorigen Jahrhunderts hatte die Unterweser bei Niedrigwasser Wassertiefen von nur 2,5 bis 3,5 m. Unter Ausnutzung der Tide konnten damals

Seeschiffe bis zu 3,0 m Tiefgang bis Bremen gelangen. Im Jahre 1887 wurde mit dem ersten Ausbau der Unterweser nach Plänen und unter Leitung von Ludwig Franzius begonnen. Bei diesem Ausbau sollte die Wassertiefe so vergrößert werden, daß unter Ausnutzung der Tide Seeschiffe mit 5,0 m Tiefgang bis Bremen verkehren konnten. Grundsatz war hierbei, durch Beseitigung von Nebenarmen, Engstellen und starken Krümmungen ein geschlossenes Fahrwasser zu schaffen und gleichzeitig den Tidehub zu vergrößern, um damit die größeren Flut- und Ebbwassermengen zur Offenhaltung des Fahrwassers auszunutzen. Zur Herstellung und Sicherung des Fahrwassers war die Vornahme umfangreicher Baggerungen sowie der Bau von zahlreichen Leitwerken und Bühnen erforderlich. Die Bauarbeiten wurden bis 1895 beendet und führten zu einem vollen Erfolg.

In den folgenden Jahrzehnten wurden in Anpassung an die weiter wachsenden Schiffsgrößen weitere Vertiefungen und Verbreiterungen der Unterweser vorgenommen. Der letzte Ausbau wurde Ende 1958 abgeschlossen. Heute beträgt die Wassertiefe rd. 8,0 m unter Kartennull. Die Breite des Fahrwassers vergrößert sich nach See zu. Sie beträgt in der Sohle

von Bremen bis zur Lesum-Mündung	100 m,
von der Lesum bis zur Hunte-Mündung	120 m,
von der Hunte-Mündung bis Bremerhaven	150 m.

Die neuen Ausbaumaßnahmen erforderten wiederum die Durchführung umfangreicher Baggerungen.

Auf großen Strecken der Unterweser war im Lauf der Jahrzehnte zur Erreichung des heutigen Zustandes eine Vertiefung der früheren Flußsohle um insgesamt 6 bis 8 m erforderlich. Der anfallende Baggerboden wurde teils verklappt, zum größten Teil aber zur Aufhöhung von Ufergelände aufgespült. Die zur Erhaltung der Fahrwassertiefe erforderlichen laufenden Baggermengen halten sich in mäßigen Grenzen. In den letzten Jahren wurden zwischen Bremen und Nordenham jährlich 800 000 bis 1 000 000 m³ Boden gebaggert. Schwerpunkte für die Unterhaltungsbaggerungen liegen zwischen der Lesum- und Hunte-Mündung, unterhalb von Brake und insbesondere oberhalb von Nordenham. Oberhalb von Nordenham sind die häufigen Baggerungen durch die Lage der Brackwasserzone und die über normal große Breite des Strombetts bedingt.

Das Ziel der Korrektionsarbeiten mußte es sein, die laufenden Baggerungen für die Erhaltung der Fahrwassertiefe möglichst gering zu halten. Dieses wurde an der Unterweser durch die schon genannten Regulierungsbauwerke in befriedigendem Maße erreicht. Es wurden bereits durch Franzius sogenannte „Korrektionslinien“ festgelegt, durch welche die Breite des Stromes in der Niedrigwasserlinie bestimmt wird. Der Abstand dieser Korrektionslinien wird von Bremen nach See zu entsprechend dem Anwachsen der Flut- und Ebbwassermengen größer.

Von Bremen bis unterhalb von Brake sind in diesen Korrektionslinien zur Festlegung der Fahrwasserbreite streckenweise Leitwerke gebaut, die, soweit erforderlich, nach rückwärts durch Querdämme an das Ufer angeschlossen und nach dem Fahrwasser zu durch Bühnen gesichert wurden.

Unterhalb von Brake sind in den letzten Jahrzehnten auch auf Strecken, wo keine Leitwerke vorhanden sind, zahlreiche Bühnen errichtet, die, vom festen Ufer ausgehend, bis an die Korrektionslinien über MTnw liegen, nach dem Fahrwasser zu aber unter Wasser bis in die Tiefe des Stromes reichen (Unterwasser-Bühnen). Hierdurch wird eine schärfere Zusammenfassung der Strömung im Fahrwasser und eine Verminderung der Baggerungen erreicht.

Die Oberkante der Leitwerke liegt im allgemeinen 50 bis 80 cm über dem MTnw. Sie bestehen aus Buschpackung, die mit Draht und Pfählen im Untergrund verankert wird. Diese Bauart ist jedoch wenig widerstandsfähig. Sie wird sowohl durch Eisgang wie auch durch die bei dem gewachsenen Schiffsverkehr mit großen Schiffen größeren Sog- und Fahrtwellen in verstärktem Maße angegriffen, so daß die Lebensdauer oft nur wenige Jahre beträgt. Es werden zur Zeit Versuche mit widerstandsfähigeren Bauweisen unter Verwendung von Steinen durchgeführt.

Bei den Buhnen war früher auch die Buschbauweise und die weitgehende Verwendung von Sinkstücken üblich. Heute werden Sinkstücke als Unterlage für die unter Wasser liegenden Teile der Buhnen verwendet, die Buhnenkörper selbst bestehen jedoch aus Schüttsteinen. Über Niedrigwasser werden ebenfalls Schüttsteine verwendet, die erforderlichenfalls als Packwerk versetzt werden.

In früheren Jahrzehnten bestand an der Unterweser nur auf kürzeren, dem Stromangriff besonders ausgesetzten Teilstrecken die Notwendigkeit zur Sicherung der Ufer bis über die Höhe des mittleren Tidehochwassers. Da aber sowohl die Zahl der verkehrenden Schiffe wie auch ihre Größe und Wasserverdrängung und die Fahrtgeschwindigkeit stark gewachsen sind, haben auch die Angriffe auf die Ufer beträchtlich zugenommen. Zwischen Bremen und der Hunte-Mündung sowie auf Teilstrecken weiter unterhalb werden daher in den kommenden Jahren umfangreiche Uferbefestigungen gebaut werden müssen. Einfache Schüttsteinböschungen mit der Neigung 1 : 3 haben sich im engen Fahrwasser der Weser als ungenügend erwiesen. Es werden daher Pflasterböschungen oder auch Befestigungen mit Bitumen gewählt werden müssen. Die Böschungsbefestigungen sollen hierbei 1,0 bis 1,25 m über das mittlere Tidehochwasser hochgeführt werden.

Die an der Unterweser ausgeführten Ausbaumaßnahmen bedeuteten starke Eingriffe in den natürlichen Zustand dieses relativ kleinen Tidestromes. Infolgedessen sind auch starke Veränderungen der Tideverhältnisse eingetreten. Während bei Bremerhaven seit 1887 der mittlere Tidehub mit 3,30 bis 3,40 m praktisch unverändert geblieben ist, hat er sich in Bremen von 0,20 bis 0,30 m auf rd. 3,20 m vergrößert. Die Tidehubvergrößerung wurde hauptsächlich durch eine entsprechende Senkung der Niedrigwasserstände hervorgerufen.

Das Fahrwasser der Unterweser hat heute, bezogen auf Kartennull, eine Wassertiefe von rd. 8,00 m. Rechnet man den mittleren Tidehub hinzu, dann sind bei mittlerem Tidehochwasser Wassertiefen von über 11,0 m vorhanden. Unter Ausnutzung der Tide können daher im jetzigen Zustand bei enger Anpassung an das Tidehochwasser und bei normalen Tiden Schiffe bis zu 9,60 m Tiefgang mit 20 000 bis 22 000 t Tragfähigkeit bis Bremen verkehren.

Untersuchungen über eine weitere Vertiefung des Fahrwassers der Unterweser um 0,50 m auf 8,50 m bei Kartennull sind z. Z. im Gange.

In der A u ß e n w e s e r haben sich die Lage und Bedeutung der Stromrinnen im Laufe der Jahrhunderte zum Teil wesentlich verändert. Als Fahrwasser wurde im 19. Jahrhundert der „Wurster Arm“ und das „Dwars Gat“ benutzt (Bild 3). Als in den 80er Jahren Schnelldampfer mit 7,8 m Tiefgang ab Bremerhaven eingesetzt wurden, genügte das Fahrwasser in seinem natürlichen Zustand nicht mehr. Es wurden seit 1890 von Bremerhaven ausgehend umfangreiche Regulierungsbauwerke und Baggerungen ausgeführt. Im Jahre 1893 wurde gegenüber von Bremerhaven in etwa 6 km Länge ein Leitdamm, der sogenannte „Franzius-Damm“, ausgeführt, durch den auf diesem Abschnitt ein geschlossenes Fahrwasser geschaffen wurde.

In den folgenden Jahrzehnten wurde immer wieder versucht, durch Baggerungen und Regulierungswerke ein ausreichendes Fahrwasser im Wurster Arm und Dwars Gat auszubauen und offen zu halten. Diese Bemühungen hatten keinen Dauererfolg. Zeitweise mußten jährlich mehr als 4 Mill. m³ Sand gebaggert werden. Inzwischen deutete sich jedoch von Natur aus eine Zunahme der Wassertiefen in dem westlich der „Robbenplate“ liegenden „Fedderwarder Arm“ an. Hier bahnte sich der Flutstrom in der Sehne des durch Wurster Arm und Dwars Gat gebildeten Bogens eine tiefer werdende Stromrinne. Im Jahre 1922 wurde daher das Hauptfahrwasser auf einer Länge von 19 km vom Wurster Arm in den Fedderwarder Arm verlegt und letzterer von 1922—27 durch Herstellung von Strombauwerken und Ausführung von Baggerungen auf 10,0 m Wassertiefe, bezogen auf Kartennull, gebracht. Diese Fahrwassertiefe ist heute als Mindesttiefe von See bis Bremerhaven in mindestens 200 m Breite überall vorhanden.

Die Offenhaltung des Fahrwassers erforderte in den 30er Jahren laufende Baggerungen von etwa 2,5 Mill. m³ jährlich. In den letzten Jahren brauchten jedoch nur noch 1,0 bis 1,4 Mill. m³ jährlich gebaggert zu werden. Die Unterhaltungsbaggerungen erstrecken sich überwiegend auf die Stromstrecke zwischen Bremerhaven und Robbenplate. Auf dieser Strecke muß in der Hauptsache an der Nordschleuse, an der Abzweigung des Wurster Armes vom Hauptfahrwasser sowie westlich der Robbenplate (seitliche Eintreibungen) gebaggert werden. Die Baggerungen werden von Hopper-Saugbaggern ausgeführt. Der Baggerboden wird außerhalb des Fahrwassers verklappt.

Im Bereich des Fedderwarder-Armes wurde die Festlegung des Fahrwassers durch Anlage von Leitdämmen in einer Gesamtlänge von mehr als 11 km am Nord- und Südende der Robbenplate sowie am Nordausläufer des „Langlütjen Sandes“ gesichert. Auf der Robbenplate wird auf Grund der neueren Entwicklung die Verbindung der beiden Leitdämme am Nord- und Südende erforderlich. Die Oberkante dieser Leitdämme liegt etwa 70—80 cm über Kartennull. Die Leitdämme selbst und die übrigen Uferstrecken zwischen Bremerhaven und Robbenplate sind durch zahlreiche, bis ins tiefe Wasser reichende Buhnen gesichert; diese Arbeiten werden in den kommenden Jahren noch ergänzt. Die Bauweise der Leitdämme und Buhnen entspricht der an der Unterweser: Sinkstücke als Grundlage, auf denen Schüttsteine in der erforderlichen Stärke aufgelagert werden. Soweit erhältlich, wird hier auch Bleischlacke aus einer nahe gelegenen Hütte mit Erfolg verwendet.

Das Fahrwasser der Außenweser hat heute überall eine Wassertiefe
von mindestens 10 m bei Niedrigwasser
und über 13 m bei mittl. Tidehochwasser.

Diese Tiefen sind auch im äußeren Mündungsbereich in den beiden Zufahrtsrinnen der „Alten Weser“ und der „Neuen Weser“ mit „Weserfahrt“ vorhanden. Sie gestatten bis Bremerhaven unter Ausnutzung der Tide den Verkehr von Schiffen mit 11,0 bis 11,5 m Tiefgang und 45 000 t Tragfähigkeit (für Tanker) bzw. 40 000—42 000 t Tragfähigkeit (für Trockenfrachter).

Erwogen wird eine weitere Vertiefung des Fahrwassers auf 11,0 m bzw. später 12,0 m. Die Voraussetzungen hierfür sind verhältnismäßig günstig. Wie in Abschnitt B bereits angedeutet, haben sich in der „Alten Weser“, östlich des „Roten Sandes“, seit längeren Jahren bereits durchgehende Wassertiefen von 12 bis 13 m unter Kartennull in ausreichender Breite eingestellt. Tiefen von 12,0 m sind größtenteils auch bis zum Südende der Robbenplate vorhanden. Größere Ausbauarbeiten zur Erreichung der angestrebten Fahrwassertiefen werden daher auf dem Stromabschnitt Bremerhaven bis zum Südende der Robbenplate von nur 10—12 km Länge beschränkt bleiben können. Ob und wann

weitere Maßnahmen hier durchgeführt werden, wird davon abhängen, ob die zukünftige Entwicklung des Güterumschlages in Bremerhaven und Nordenham den Einsatz größerer Schiffe erfordert.

4. Die Elbe (Bild 4)

Die ersten künstlichen Eingriffe in die Stromlandschaft entsprangen dem Wunsche des Menschen, möglichst große Teile der Marschen für die Besiedelung reif und zugleich kulturfähig zu machen. Sie beschränkten sich auf Deichbauten. Vermutlich waren solche Deicharbeiten um das Jahr 1000 bereits im Gange. In den folgenden Jahrhunderten ausgeführte strombautechnische Maßnahmen galten zunächst vornehmlich dem Hochwasserschutz des Marschenlandes.

Kennzeichnend für den Strom waren die zahlreichen Sände. Die Wassertiefen oberhalb der Schwingemündung waren gering. An vielen Stellen waren bei Niedrigwasser nur 2—3 m Wassertiefe vorhanden, so daß die Schiffe nur unter Ausnutzung der Tidewelle solche Stellen passieren konnten. Erstmals im 16. und 17. Jahrhundert war als klare Zielsetzung der Arbeiten am Strom die Verbesserung der Fahrwasserverhältnisse im Interesse der inzwischen sehr lebhaft gewordenen hamburgischen Schifffahrt richtungweisend. Eine Verbesserung der Fahrwasserverhältnisse auf der Unterelbe versuchte man zunächst allein durch Baggerungen zu erreichen. Beachtliche Verbesserungen wurden mit diesen aber erst erreicht, nachdem Hamburg 1833 und 1837 auf Anraten englischer Ingenieure jeweils einen Dampfbagger beschafft hatte. Zwei weitere Bagger deutscher Bauart kamen 1845 und 1859 hinzu. Seit dieser Zeit stiegen die jährlichen Baggerleistungen ständig. 1848 wurden erstmalig 1 Mill. m³ Boden auf der Unterelbe gebaggert, 1899 wurde die 2 Mill.-Grenze überschritten. Die Fahrwassertiefe der Unterelbe ist in dieser Zeit allein durch Baggerungen auf 8 m unter MThw gebracht worden.

Um die Jahrhundertwende erforderten die mit der Zunahme der Seeschifffahrt sehr schnell anwachsenden Tiefgänge der Schiffe auch größere Fahrwassertiefen, die nur in Verbindung mit entsprechenden Regulierungsmaßnahmen hergestellt bzw. gehalten werden konnten. So begann man den Strom planmäßig auszubauen und zu regeln. Das Ziel, das man sich damals für diesen Ausbau setzte, war die Schaffung eines möglichst sich selbst erhaltenden Fahrwassers von mindestens 10 m Tiefe unter Kartennull bei einer Sohlenbreite von 200 m oberhalb und 400 m unterhalb der Störmündung. In der Außenelbe unterhalb von Cuxhaven wurde eine Fahrwassertiefe von 11 m unter Kartennull angestrebt.

Als allgemeiner Grundsatz für den Ausbau galt wie bei der Weser, daß die Flutwassermenge zu vermehren sei und zu diesem Zweck der Flutwelle zur Belebung ihres Laufes nach oben möglichst alle Hindernisse aus dem Wege zu räumen seien, woraus sich die Ausbildung eines von oben nach unten allmählich sich trichterförmig verbreiternden Stromlaufes mit schwachen Krümmungen ableitet. Die Regulierungslinien sind dem natürlichen Lauf des Fahrwassers unter Abschwächung der vorhandenen starken Krümmungen weitgehend angepaßt. Als Regulierungsbreite wurden unterhalb des Hamburger Hafens 370 m und bei der Schwingemündung 1100 m angenommen, wobei der Öffnungswinkel der Regulierungslinien nicht gleichmäßig, sondern auf Strecken mit übergroßen Querschnitten um $\frac{1}{3}$ bis $\frac{1}{2}$ kleiner als auf den übrigen Strecken bemessen worden ist.

Auf der Elbstrecke unterhalb der Schwingemündung waren auf großen Strecken von Natur aus so große Stromtiefen vorhanden, daß sie bis zum Beginn des 20. Jahrhunderts den damaligen Ansprüchen der Seeschifffahrt genügten. Sie wurde aus diesem Grunde auch nicht in den Plan einer durchgehenden Regelung einbezogen in der Annahme, daß

auf absehbare Zeit an den Stellen mit unbefriedigenden Fahrwasserverhältnissen die erforderlichen Tiefen mit erträglichen Mitteln durch Baggerungen hergestellt und erhalten werden könnten.

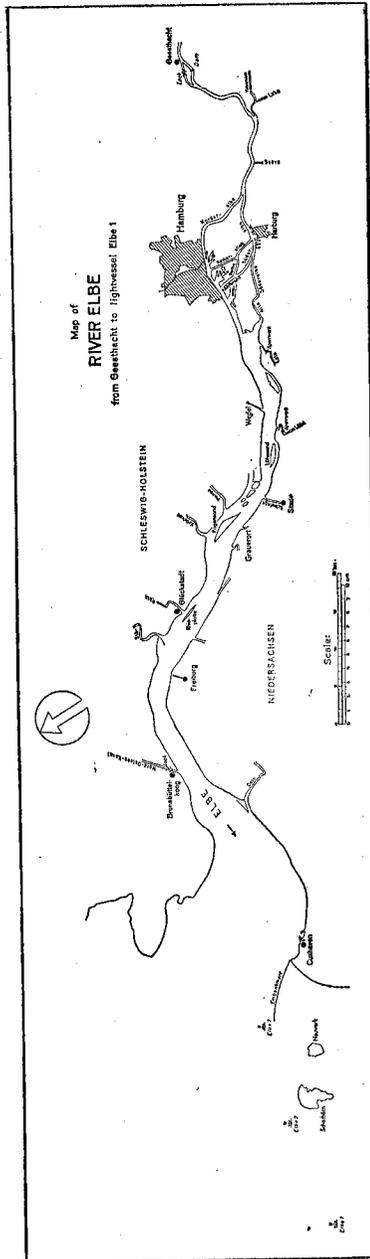


Bild 4
Die Elbe von Geesthacht bis zum Feuerschiff Elbe 1

Die Regulierungsmaßnahmen erstreckten sich daher zunächst nur auf den oberen Teil der Untereibe von Hamburg-Altona bis zur Schwingemündung (1901—1914). Gleichzeitig wurden im Hamburger Hafen neue Wasserflächen von rd. 5,3 Mill. m² geschaffen. Diese Maßnahmen führten im Hamburger Gebiet zu einer Absenkung des Niedrigwassers, während das Hochwasser nicht wesentlich beeinflusst wurde. Hierdurch erhöhte sich der Tidehub in Hamburg um 18 cm.

Schon 13 Jahre später ergab sich jedoch die Notwendigkeit, auf zwei Stromstrecken unterhalb der ausgebauten Strecke, im Stromspaltungsgebiet der Insel Pagensand und im Gebiet der Ostebank unterhalb Brunsbütelkoogs, durchgreifende Teilregulierungen vorzunehmen, weil an diesen Stellen die jährlichen Baggerungen das wirtschaftlich vertretbare Maß zunehmend überschritten und außerdem nicht von bleibendem Erfolg begleitet waren. Diese Stromregulierungen wurden in der Zeit von 1926—1936 mit Erfolg durchgeführt.

In der Außenelbe wurde zur Behebung eintretender Verflachungen im Gebiet des Mittelgrundes, auf die bereits eingangs (B, 3) hingewiesen ist, im Jahre 1939 mit dem Bau eines Leitwerkes von 9,2 km Länge (Kugelbakendamm) begonnen. Von Cuxhaven ausgehend, führt dieser Damm längs des Neuwerker Wattes; er soll das Neuwerker Fahrwasser an seinem oberen Ende abschließen und damit die Bildung einer einheitlichen Stromrinne begünstigen. Aus Mangel an hinreichenden Erfahrungen für den Bau eines derartigen rd. 9 km langen und durch seine Lage zur offenen See besonders gefährdeten Strombauwerkes sah der im Jahre 1938 aufgestellte Entwurf unter Übertragung der bisher oberhalb von Cuxhaven und auf den anderen Seewasserstraßen des Nordseegebietes angewendeten Bauweise eine Kronenhöhe von 0,50 m über MThw vor. Auf Grund der im Laufe der mehr als 20jährigen Entwicklung seit Beginn der Bauarbeiten gesammelten Erkenntnisse wird eine Höherlegung der Krone auf MThw erwogen, da die Durchströmung des alten Neuwerker Fahrwassers zur Elbe hin bisher praktisch noch kaum geschwächt ist. Die Untersuchungen hierüber sind jedoch noch nicht abgeschlossen.

In der Oberelbe, d. h. oberhalb von Hamburg, ist infolge der Baumaßnahmen im Hamburger Hafengebiet und in der Untereibe eine rückschreitende Erosion der Flußsohle eingetreten. Diese führte zu einer Absenkung der Wasserstände, insbesondere des Tnw. Letzteres ist in Geesthacht, 41 km oberhalb von Hamburg, in der Zeit seit der Jahrhundertwende um rd. 80 cm abgesunken. Bei Fortschreiten der Erosion, deren Ende noch nicht abzusehen war, war mit Trockenschäden auf den angrenzenden landwirtschaftlich genutzten Gebieten zu rechnen. Aus diesem Grunde sowie zur Verbesserung der Schifffahrtswege auf der Oberelbe wurde die Abschleusung der Elbe durch den Bau einer Staustufe bei Geesthacht beschlossen und durchgeführt. Die Staustufe nebst Schleuse wurde im Jahre 1959 in Betrieb genommen.

Infolge der in der Tide-Elbe angeführten Baumaßnahmen in den letzten Jahrzehnten, wie Stromregelungen, Baggerungen und Hafengebauten, und infolge der hieraus eingetretenen natürlichen Erosion sind teilweise erhebliche Querschnittsveränderungen, vorwiegend Vergrößerungen, eingetreten. Diese Veränderungen hatten wieder Rückwirkungen auf den Tideverlauf, auf die Größe des Tidehubes, auf die Tidewassermengen bei Flut- und Ebbstrom und damit auf die Tideströmungen, auf die Sohlenmorphologie und auf die resultierende Sandwanderung. So ist der Tidehub in Hamburg seit der Jahrhundertwende um rd. 40 cm größer geworden und zwar im wesentlichen durch entsprechendes Absinken des Tideniedrigwassers, während das Tidehochwasser nur unbedeutend um etwa 9 cm angestiegen ist. Oberhalb von Hamburg sind zum Teil wesentlich größere Veränderungen des Tidehubes bis zu 90 cm Vergrößerung (Zollenspieker) eingetreten. Unterhalb von Hamburg haben sich die Tidehübe, bedingt durch die unterschiedliche Wirkung einer Ausbaumaßnahme, ob diese unterhalb oder oberhalb der

betrachteten Stelle durchgeführt wird, verschieden entwickelt. So ist in Glückstadt eine Verringerung des Tidehubes um 26 cm festzustellen, die vermutlich darauf zurückzuführen ist, daß die in diesem Gebiet vor dem Ausbau der oberhalb gelegenen Strecke wirksame Reflexion durch diesen mehr oder weniger abgebaut worden ist. In Cuxhaven ist in der gleichen Zeit das MThw um 9 cm und gleichzeitig das MTnw um 11 cm angestiegen. Dieser Anstieg der Wasserstände ist im wesentlichen wohl auf die relative Verschiebung des Meeresspiegels zum Festland zurückzuführen, die in Cuxhaven rd. 22 cm in 100 Jahren beträgt. Die Verminderung des Tidehubes um 2 cm dürfte ihre Ursache in Veränderungen der Außensände haben. Bemerkenswert erscheint hieran, daß auch die Häufigkeit der Sturmfluten (= Wasserstände höher als 1 m über MThw) in Hamburg relativ zu Cuxhaven angestiegen ist, wobei dieser Anstieg sich nur auf die mittleren Sturmfluten bis etwa 2,0 m über MThw zu erstrecken scheint. Für höhere Sturmfluten konnte ein solcher Anstieg bisher nicht festgestellt werden.

Die mit dem Ausbau erstrebte Vermehrung der Flutwassermenge ist nur im oberen Teil der Ausbaustrecke eingetreten, während unterhalb eine Verkleinerung zu verzeichnen ist. Seit Beginn des Ausbaues hat sich der Gesamtflutraum der Elbe Hamburg/Cuxhaven um 4,5 v. H. verkleinert. Gleichwohl ist der Ausbau hinsichtlich der Fahrwasservertiefung erfolgreich gewesen, was zu dem Schluß berechtigt, daß eine Vergrößerung der Flutwassermenge für den Erfolg einer Regelung dann keine unbedingte Voraussetzung ist, wenn diese bereits ausreicht, um einen Durchflußquerschnitt mit der angestrebten Wassertiefe zu erhalten.

Als Regulierungsbauwerke sind bei den Fahrwasserregelungen der Unterelbe in erster Linie Bühnen gebaut worden, die als einfache, aus Schüttsteinen von 25—40 kg Gewicht bestehende Steinkörper mit einer Kronenbreite von 1—2 m, Seitenböschungen 1 : 1 und Kopfneigungen 1 : 4 ausgebildet und in der Regel auf einer Sinkstückunterlage geschüttet worden sind. Auch der Leitdamm unterhalb von Cuxhaven wird in ähnlicher Weise, hier wegen der starken Brandungsangriffe jedoch in einer Kronenbreite von 7 m, einer Böschungsneigung 1 : 2 zum Watt und 1 : 3 zum Strom hin, mit Abdeckung durch schwere Felsen oder Betonklötze ausgebildet. Bei der Ostebankregelung — zwischen der Ostemündung und Brunsbüttelkoog — ergab sich wegen der im Brackwassergebiet vor sich gehenden sehr schnellen Verlandung zwischen den Bühnen die Möglichkeit, den ganzen Bühnenkörper mit Ausnahme des Kopfes bis zu einer Höhe von 1 m unter MTnw aus Sinkstücken, deren cbm-Preis gegenüber dem Schüttsteinpreis seinerzeit wesentlich billiger war, herzustellen.

Hinsichtlich der Höhenlage der Bühnenkronen ist früher davon ausgegangen worden, daß von einem allmählichen Ansteigen der Kronenhöhen von der Mündung aufwärts eine zunehmende stärkere Konzentrierung der Strömung auf das Fahrwasser bei Ebbe und Flut erwartet wurde. Demzufolge sind die Bühnen von der Köhlbrandmündung im Hamburger Hafen aufwärts auf Mittelwasser und abwärts von Mittelwasser gleichmäßig auf etwa 1 m über MTnw bei der Schwingemündung abnehmend gelegt worden. Nach diesem Grundsatz sind auch die Bühnen bei den Teilregelungen bei Pagensand 0,70 m und oberhalb der Ostemündung 0,50 m über MTnw gewählt worden. Neuere Erkenntnisse haben jedoch gezeigt, daß es zur Erzielung tunlich großer Stromgeschwindigkeiten und eines für die Räumung erforderlichen möglichst großen Verhältnisses der mittleren Ebbstromgeschwindigkeit zur mittleren Flutstromgeschwindigkeit richtiger ist, die Kronen der Strombauwerke im Bereich des Tidegebietes, in dem die Kenterpunkte nicht mit MThw und MTnw zusammenfallen, möglichst nicht über MTnw hochzuführen, abgesehen von verwilderten Stromstrecken, die einer Stromführung auch bei höheren Wasserständen bedürfen, oder daß wegen einer leichteren Unterhaltungsmöglichkeit eine Höhenlage etwas über MTnw erwünscht ist.

Leit- und Deckwerke sind bei den Stromregelungen im Untereibegebiet nur in geringem Umfange zur Ausführung gekommen, obwohl diese eine bessere Stromführung als Bühnen gewährleisten, die durch die großen Abstände, ihren Verlauf quer zur Stromrichtung und die Kolkbildung vor ihren Köpfen eine glatte Wasserbewegung behindern. Der Grund liegt im wesentlichen darin, daß die Regulierungslinien ganz überwiegend nicht gleichzeitig auch die Begrenzung des Fahrwassers bilden, da dieses nur einen Teil der Regulierungsbreiten einnimmt, andererseits bei Bühnen leichter die Möglichkeit zu nachträglicher Veränderung der Ausbaulinie besteht. Für die Wahl eines Leitdammes für die Außenelberegulierung sprachen außer den oben erwähnten Vorteilen vor allem die wesentlich geringeren Kosten gegenüber einem Bühnen-Ausbau und die Unsicherheit eines festen Anschlusses der Bühnenwurzeln im Watt, deren Bestand durch Prillbildung und Hinterströmung gefährdet wäre.

Die nachstehende Zusammenstellung gibt eine Übersicht über die auf der Unter- und Außenelbe auf der 140 km langen Strecke zwischen Feuerschiff „Elbe 1“ und Hamburg — jedoch ohne die Häfen — im Laufe der Jahrzehnte im Fahrwasser gebaggerten Mengen. Hierbei sind die im Zusammenhang mit den Ausbaumaßnahmen durchgeführten einmaligen Neubaggerungen einbegriffen:

Zeitraum	Baggerungen	Fahrwassertiefe unter Kartennull
1871—1880	5,8 Mill. m ³	6 m
1881—1890	9,5 Mill. m ³	
1891—1900	13 Mill. m ³	
1901—1910	41,7 Mill. m ³	10 m
1911—1920	35 Mill. m ³	
1921—1930	24 Mill. m ³	
1931—1940	39 Mill. m ³	
1941—1950	18 Mill. m ³	
1951—1959 *)	22 Mill. m ³	10 bzw. 11 m

*) Im Jahre 1957 sind die Baggerungen zur Erstellung einer Fahrwassertiefe von 11 m in Angriff genommen worden.

An reinen Unterhaltungsbaggerungen waren im Durchschnitt der letzten 12 Jahre (1945—1956) vor Inangriffnahme der Vertiefung des Fahrwassers auf 11 m jährlich 1,7 Mill. m³ zu baggern. Die in diesem Zeitraum jährlich angefallenen Mengen waren dabei keineswegs gleichmäßig. Sie schwankten zwischen ~ 1,0 Mill. m³/Jahr und über 2,0 Mill. m³/Jahr. Bild 5 zeigt eine Gegenüberstellung der jährlichen Baggermengen,

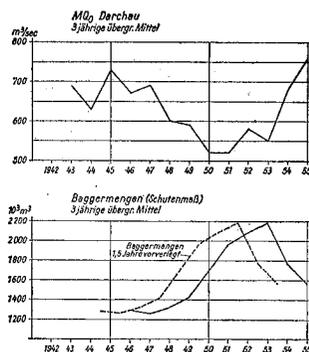


Bild 5

Jährliche Baggermengen und mittlere Oberwasserführung der Elbe

aufgetragen als 3jährige übergreifende Mittel, mit der jeweiligen mittleren Oberwasserführung der Elbe. Ein enger Zusammenhang zwischen beiden Größen ist unverkennbar. Mit abnehmender Oberwasserführung steigt die Baggermenge. Die Ursache hierfür ist darin zu sehen, daß die Strömungsgeschwindigkeiten vom Oberwasser merkbar beeinflußt werden. Mit abnehmendem Oberwasser wird der Flutstrom gestärkt und der Ebbstrom geschwächt. Das für die resultierende Geschiebebewegung maßgebliche Verhältnis von Ebbgeschwindigkeit zur Flutgeschwindigkeit wird zugunsten letzterer verändert und damit die Transportkraft des Flusses nach See zu geschwächt.

D. Entstehung und Herkunft der Bodenablagerungen, Grenzgeschwindigkeiten, Bodensedimente, Korngrößenverteilung und Sinkstofftransport (Untersuchungsergebnisse)

Forscht man nach den Gründen der Entstehung der durch Baggerungen laufend zu beseitigenden Ablagerungen im Fahrwasser, dann fällt bei den wesentlichen Baggerstellen auf, daß offenbar Unstetigkeiten (überbreite Querschnitte, Spaltungen des Flußbettes) in erster Linie beteiligt sind, so in der Unteren Elbe beim Hanskalbsand, beim Lühesand, beim Dwarsloch, am Süden de von Pagensand und bei der Rhineplate — soweit nicht der Sand durch während des Tideablaufes zeitweilig auftretende Querströmungen in die Fahrrinne eingetrieben wird. In diesem Zusammenhang wurde auch die Frage einer für die natürliche Offenhaltung des Fahrwassers hinreichend großen Strömungsgeschwindigkeit untersucht. Es wurde der Versuch unternommen, eine Korrelation zwischen jährlicher Versandungshöhe und der jeweilig örtlich zugehörigen mittleren Ebbstromgeschwindigkeit v_{em} herzustellen. Bild 6 zeigt entsprechende Auftragungen für

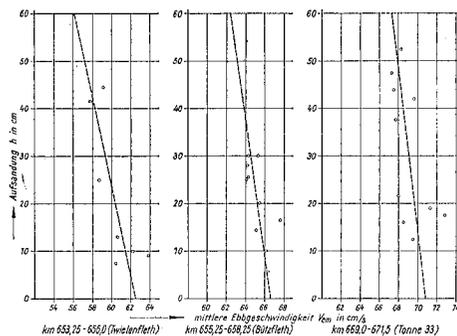


Bild 6

Korrelation zwischen jährlicher Versandungshöhe und der örtlich zugehörigen mittleren Ebbstromgeschwindigkeit für drei charakteristische Baggerstellen der Unteren Elbe

einige charakteristische Baggerstellen der Unteren Elbe. Als Versandungshöhen sind hierbei die Mittelwerte für den Zeitraum 1945 bis 1956, in denen besondere Ausbaumaßnahmen nicht zur Durchführung gekommen sind, eingetragen. Sie wurden errechnet aus den jährlich erforderlichen Baggermengen. Eine gewisse Abhängigkeit der genannten Größen voneinander, Zunahme der jährlichen Aufsandung mit abnehmender örtlicher Geschwindigkeit, ist erkennbar. Hiernach müßten in den fraglichen Gebieten mittlere Ebbgeschwindigkeiten von mindestens 63—67 m/s (zwischen Schulau und Bützfleth) vorhanden sein, um eine Selbsträumung des Flusses zu gewährleisten. Unterhalb dieser Strecke (Tonne 33) liegen sie offenbar höher, bei etwa 71 cm/s.

Untersuchungen über die Herkunft der jährlich aus der Elbe zu baggernden Bodenmengen haben zu folgenden Schlußfolgerungen geführt:

Das im Flußbett wandernde bzw. sich ablagernde Material stammt im wesentlichen aus 3 Bereichen.

1. Im Gebiet der Oberelbe, in dem noch keine Tidebewegung vorhanden ist, besteht das Geschiebe aus Quarzsanden mit einer mittleren Korngröße von 0,6—1 mm. Dieses wandert in Form von Bänken mit einer Geschwindigkeit von 60—80 m in 4 Wochen stromabwärts. Die Höhe der Strombänke beträgt in diesem Streckenabschnitt selten mehr als 0,5—1,0 m. Die auf diese Weise transportierten Feststoffmengen sind jedoch verhältnismäßig klein gegenüber den Mengen, die in Suspension als Sinkstoffe oder Schwebstoffe wandern. Im ganzen wird die jährliche Feststoffmenge, die aus der Elbe oberhalb der Tidegrenze kommt, auf 2 Mill. t geschätzt.

Mit dem Übergang in das Tidegebiet ändert sich auch der Vorgang der Sandwanderung grundsätzlich. Von nun an ist Richtung und Größe der Resultierenden aus Ebbe- und Flutstrom maßgebend für die Richtung der Sandbewegung und die transportierte Menge. Oberhalb von Hamburg überwiegt jedoch die abwärts gerichtete Bewegung noch erheblich. Ein Großteil des Oberelbegeschiebes wird am und unterhalb des Überganges vom binnenschiffstiefen zum seeschiffstiefen Wasser, d. h. im Hamburger Hafengebiet, abgelagert und durch Baggerungen wieder beseitigt. Hierbei handelt es sich im wesentlichen um die Korngrößen von 0,5 mm und größer. Es ist deshalb in der Hauptsache nur die Sinkstoff- und Schwebstofffracht, die von der Oberelbe her insbesondere bei Hochwasser in das untere Tidegebiet gelangt.

2. Es besteht kein Zweifel, daß der Sand in der Außenelbe, sowie auch zum großen Teil in der Unterelbe, aus der Nordsee stammt. Die Ergebnisse eingehender petrographischer, sowie sedimentologischer Untersuchungen, das Auffinden von Foraminiferen und Seeigeltaschen auf dem Schwarztonnensand lassen schließen, daß der Sandeintrieb von See bei Pagensand noch eine große Rolle spielt. Das Auffinden der leichten großen Diatomeen der Küstenzone im Schlick des Hamburger Hafens gibt den Hinweis, daß Schwebstoffe der Nordsee sogar bis Hamburg gelangen können.
3. Der Ursprung der Baggermengen ist aber auch an Ort und Stelle zu suchen, sie stammen sowohl aus der Sohlenerosion sich vertiefender Strecken, sowie aus dem Abbruch der Wattkanten und Vorländer und schließlich aus der Neubildung von Schlick in der Brackwasserzone aus den im Flußwasser kolloidal gelösten Substanzen. Wie stark die Sedimentation von Schlick in der Brackwasserzone sein kann, geht aus der Verschlickung der Schleusenvorhöfen von Brunsbüttelkoog hervor, in denen der Schlickbefall 70 cm im Monat beträgt.

In der Ems, Jade, Weser und Elbe sind seit längerem umfangreiche Untersuchungen über Art, Zusammensetzung bzw. Kornverteilung der Sedimente auf der Flußsohle und auf den Watten ausgeführt, sowie auch Messungen des Sinkstofftransportes selbst vorgenommen worden. Im einzelnen kann hier auf die Messungen selbst nicht näher eingegangen werden, nur deren wichtigste Ergebnisse sollen mitgeteilt werden.

In den Mündungsgebieten herrscht unterhalb der Brackwasserzone im allgemeinen Feinsand ($< 0,2$ mm) vor. Nach See zu werden die Sedimente, namentlich in den Stromrinnen, etwas gröber, mit Korngrößen bis zu 1,0 mm. Auf den Watten sind sie im allgemeinen feiner. In der Brackwasserzone überwiegt der Anteil an Schluff ($< 0,06$ mm) stark, mit Ausnahme einiger Gebiete stärkerer Strömungen, in denen ebenfalls Feinsande anstehen. Eine Kornanalyse der Bodensedimente im Fahrwasser der Elbe zwischen Schnakenburg, rd. 300 km oberhalb der Elbmündung, und Scharhörn in der Elbmündung

ergab eine Abnahme der mittleren Korngröße von 1 mm bei Schnakenburg auf 0,15 mm bei Glückstadt. Hierbei ist beim Übergang vom binnenschiff tiefen zum seeschiff tiefen Wasser in Hamburg ein deutlicher Abfall der mittleren Korngröße von etwa 0,7 mm auf 0,3 mm erkennbar. In der Brackwasserzone zwischen Glückstadt und Cuxhaven schwankt der Korndurchmesser zwischen 0,15 und 0,05 mm. Erst unterhalb von Cuxhaven treten in den Stromrinnen wieder Korngrößen bis zu 1 mm auf. Hieraus ergibt sich eine Sortierung des Bodensedimentes vom Groben zum Feinen stromab bis Glückstadt, ein Zeichen für den auf dieser Strecke überwiegend stromab gerichteten Transport. Unterhalb findet offenbar eine mit der Oberwasserführung und der jeweiligen Flutwassermenge schwankende Ein- und Ausfuhr von Sand statt. Zu dem gleichen Ergebnis haben auch eingehende petrographische Untersuchungen geführt.

Der Sinkstofftransport wurde an mehreren Stellen sowohl in der Ems wie auch in der Elbe durch Messung der Verteilung des Sinkstoffgehaltes in der Vertikalen, in den verschiedenen Tidephasen und bei gleichzeitiger Messung der jeweiligen Stromgeschwindigkeiten bestimmt. Bild 7 zeigt eine entsprechende Sinkstoffgehaltskurve für eine Meß-

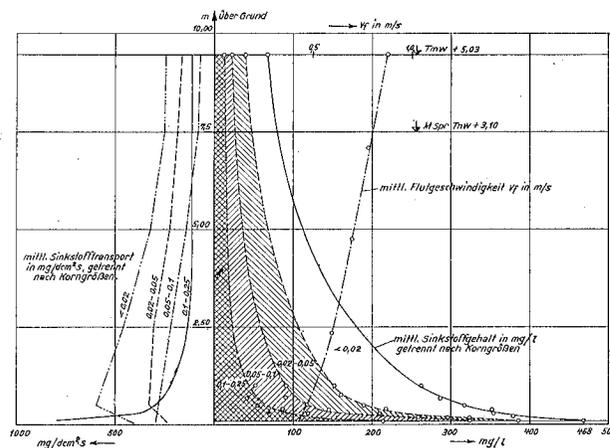


Bild 7

Sinkstoffgehaltskurve für eine Meßstelle in der Elbmündung

stelle in der Emsmündung. Die Sinkstoffproben wurden hierbei in 8 Tiefenstufen und in Zeitabständen von je 20 Minuten entnommen, wobei besonderer Wert auf die Verhältnisse in Bodennähe gelegt wurde. Hier wurde in 10, 20, 30, 40, 50, 70 und 100 cm Höhe über Grund gemessen. Jede Probe wurde auch kornanalytisch bestimmt. Eingetragen wurden die über die ganze Tide gemittelten Werte. Auf der linken Seite der gleichen Darstellung ist der entsprechende Sinkstofftransport dargestellt. Aus der Darstellung erkennt man, daß der Transport des sandigen Anteils ($> 0,05$ mm) in der Nähe des Bodens stark anwächst. Für den schluffigen Anteil ($< 0,05$ mm) ergab sich ein Maximum 30 bis 50 cm über Grund. Andererseits sieht man aber auch, daß die Schicht unmittelbar über die Sohle (0—10 cm über Grund), in der keine Messungen vorgenommen werden können, für den Gesamttransport ohne große Bedeutung ist. Etwa 95% des Sinkstofftransportes erfolgen oberhalb dieser Schicht. Zur Berechnung der Gesamttransportmenge genügt es daher völlig, die Sinkstoffgehaltskurve bis zur Sohle zu extrapolieren, wie es in diesem Falle geschehen ist (3). Die Messung wurde in einem Gebiet beweglichen Feinsandes ausgeführt, die Kurve zeigt daher die Form, wie sie am häufigsten im Mündungsgebiet mit starker Sandbewegung und geringem Schlammanteil

vorkommt. Bei anderer Beschaffenheit des Untergrundes und der Korngrößen, z. B. fester Untergrund bzw. hoher Schlickanteil, können sich auch andere Sinkstoffgehalts- bzw. Sinkstofftransportkurven ergeben (4).

Die vorbeschriebene Art der Messung gibt nur Auskunft über den Sinkstofftransport an der Meßstelle selber. Um festzustellen, wie sich die Sände im Mündungsgebiet von Jahr zu Jahr verlagern und welche Sandmassen dabei bewegt werden, wurde noch ein anderer Weg eingeschlagen. Die Peilpläne zeitlich aufeinander folgender Jahre werden miteinander verglichen und die Differenz in Stufen von 5 dm aufgetragen. Man erhält eine Karte, die die Veränderungen der Topographie der Flußsohle während eines Jahres wiedergibt. Von der Unter- und Außenelbe sind alle Peilpläne seit 1910 in dieser Weise bearbeitet worden. Auf diese Weise war es möglich, einen Einblick in den Sandhaushalt größerer Gebiete und auf einen längeren Zeitraum zu erhalten. Diese sich über Jahrzehnte erstreckenden Untersuchungen haben ergeben, daß die Sandzufuhr aus der Nordsee unregelmäßig und stoßartig vor sich geht, während sich der Ausgleich durch Abtrieb im allgemeinen auf mehrere Jahre verteilt. Die zeitlichen Abstände, in denen sich der Ausgleich vollzieht, wechseln; Materialansammlung und Ausräumung erfolgen meistens nicht gleichzeitig.

Offenbar ist die zu beobachtende Sandwanderung im wesentlichen abhängig von der Zufuhr von Sand aus der Nordsee. Ist die mit dem west-östlich gerichteten Küstenstrom an den äußersten Rand der Flußmündung transportierte Sandmenge groß, dann wandert auch in größerem Umfange Sand in das untere Tidegebiet ein. Ist das Angebot an Nordseesand am Eingag in die Flußmündung gering, dann findet unter Umständen eine Sandausfuhr statt. Die Erklärung für solche Schwankungen ist möglicherweise in wechselnden meteorologischen Verhältnissen über der Nordsee zu suchen. Jedenfalls haben die Windbeobachtungen beim Feuerschiff „Elbe 1“ gezeigt, daß Westwind die Sandeinfuhr in das Elbe-Ästuar fördert, während Ostwind das Gegenteil bewirkt.

Als Ergebnis der geschilderten und anderer zahlreicher Messungen über den Geschiebe- bzw. den Sinkstofftransport in den genannten Stromgebieten kann folgendes festgestellt werden:

1. Die Sinkstoffbewegung im Tidegebiet spielt sich hauptsächlich in schwebender Form, d. h. im gesamten Querschnitt, ab, während die Geschiebebewegung unmittelbar auf der Sohle für den Gesamttransport ohne Bedeutung ist, weil im allgemeinen die Korngrößen im Mündungsgebiet klein sind. Nur dort, wo größeres Geschiebe ($> 0,2$ mm) vorherrscht, kann auch die Geschiebebewegung unmittelbar an der Sohle von Bedeutung sein.
2. Die Sinkstoffbewegung ist örtlich verschieden, sie hängt außer vom Korndurchmesser und der Kornform der Sedimente vom jeweiligen Schlickgehalt sowie von der Beschaffenheit der Flußsohle ab. Die Grenzgeschwindigkeit v_0 , bei der die Bewegung beginnt, wurde für einen mittleren Korndurchmesser von 0,11 bis 0,15 mm zu etwa 15 cm/s (gemessen 0,5 m über Grund) und für einen mittleren Korndurchmesser von 0,3 bis 0,4 mm zu etwa 20 cm/s gefunden.
3. Eine gesetzmäßige Beziehung zwischen dem mittleren Sinkstofftransport und der mittleren Stromgeschwindigkeit ist bei sonst gleichen örtlichen Bedingungen nur für den Fein- und Mehlsandgehalt ($> 0,05$ mm), nicht dagegen für den Anteil an schluffigen Sinkstoffen ($< 0,05$ mm), gegeben. Als Annäherung für den Sinkstofftransport S (sandiger Anteil) kann die Beziehung genannt werden:

$$S = C \cdot v^\alpha \left(1 - \frac{v_0}{v}\right).$$

worin C eine von den örtlichen Bedingungen abhängige Konstante, v die mittlere und v_0 die Grenzgeschwindigkeit, bei der die Bewegung beginnt, bedeuten. α ergab sich für Sand zu ~ 4 .

4. In der Lotrechten verhält sich der Gehalt an Fein- und Mehlsand ($> 0,05$ mm) in 10, 30, 50 und 70 cm über Grund etwa wie 100 : 51 : 37 : 29 (Ems-Messung), Werte, wie sie ähnlich auch van Veen angibt (100 : 54 : 34 : 28) (5). Der Gehalt an Mehlsand und Schluff ($< 0,05$ mm) erreicht demgegenüber bei 30 bis 50 cm über Grund sein Maximum.

E. Folgerungen

Zusammenfassend kann gesagt werden, daß die jahrzehntelangen Bemühungen, in den deutschen Nordseehäfen ausreichende Fahrwassertiefen zu schaffen und zu erhalten, bisher erfolgreich gewesen sind. Die Fahrwassertiefen konnten hierbei von einer ursprünglich vorhandenen natürlichen Tiefe von etwa 3—3 $\frac{1}{2}$ m auf 8 m (Ems-Fahrwasser, Weser) bzw 11 m (Elbe) vergrößert werden. Die Erfolge wurden durch Baggerungen in Verbindung mit Regulierungsmaßnahmen erzielt. Als Regulierungsbauten kamen Bühnen und Leitwerke zur Anwendung.

Für den Ausbau in den Unterläufen der Flüsse waren hierbei folgende Grundsätze maßgebend:

Vermehrung der Flutwassermenge durch Beseitigung aller Hindernisse, wie Nebenarme, Engstellen, starke Krümmungen,

Bildung eines von oben nach unten allmählich sich trichterförmig verbreiternden Stromlaufes mit schwachen Krümmungen,

Herstellung eines der jeweils zur Verfügung stehenden Tidewassermenge angepaßten Querschnittes, so daß die für die Selbstströmung des Flusses erforderliche Stromgeschwindigkeit gewährleistet ist.

Auch in den äußeren Bereichen der Flußmündungen, in denen der Fluß keine feste Führung mehr hat, waren den örtlichen Verhältnissen angepaßte Ausbaumaßnahmen erfolgreich. So in der Außenjade, in der durch Errichtung eines Korrektionswerkes auf Minsener Oog eine Stabilisierung des Jadedefahrwassers erreicht werden konnte. In der Außenweser (Ausbau des Fedderwarder Arms) durch Herstellung von Strombauwerken auf der Robenplate. Das letztere Beispiel zeigt aber, daß in diesem Gebiet Ausbaumaßnahmen nur dann von Erfolg sind, wenn sie der von Natur aus sich anbahnenden natürlichen Entwicklung entgegenkommen. Die jahrelangen Bemühungen, in dem parallel zum Fedderwarder Arm verlaufenden Wurster Arm ein ausreichendes Fahrwasser offenzuhalten, blieben erfolglos. Es ist also wichtig, besonders in diesem Gebiet durch eingehende und lang andauernde Beobachtungen und Kartenvergleiche, die Richtung und Intensität der immer vorhandenen Tendenz zur Verlagerung der Hauptstromrinnen zu erforschen. Die in der Außenelbe in Angriff genommenen Arbeiten zur Errichtung eines Leitdammes haben bisher noch nicht zum gewünschten Erfolg geführt. Untersuchungen über zusätzliche Maßnahmen sind im Gange. In den letzten Jahren in Angriff genommene umfangreiche Baggerungen in der Außenjade zur Erzielung einer Fahrwassertiefe von 12 m waren erfolgreich. Die Bewährung dieser Maßnahmen bleibt abzuwarten.

Die Ausbaumaßnahmen haben außer z. T. erheblichen Veränderungen der Wasserstände, z. B. Vergrößerung des Tidehubes von 0,20—0,30 auf rd. 3,20 m in Bremen bzw. von 2,00 auf rd. 2,40 m in Hamburg, Veränderungen der Tidewassermengen und auch eine Verschiebung der Brackwasserzone stromauf zur Folge gehabt. Die Tidehubvergrößerun-

gen wurden hierbei hauptsächlich durch entsprechende Senkungen der Niedrigwasserstände hervorgerufen.

Lage und Gestalt der Zufahrten in den Mündungsgebieten werden durch die dort vorhandene starke Sandverdriftung beeinflusst. Berechnungen über den Sandhaushalt in der Elbmündung haben ergeben, daß eine erhebliche Ein- und Ausfuhr von Sand mit dem Gezeitenstrom stattfindet, wobei zeitweise die Einfuhr und zeitweise die Ausfuhr überwiegt. Eine gewisse Abhängigkeit von den jeweiligen meteorologischen Verhältnissen scheint hierbei gegeben.

Wenn auch der Geschiebehaushalt in den Flußmündungen über lange Zeiträume gesehen, wie die Massenberechnung auf Grund der Tiefenänderungspläne der letzten 50 Jahre in der Elbemündung ergeben hat, ausgeglichen zu sein scheint, so fordert doch die Seeschifffahrt eine Fahrrinne von stets gleichbleibender Tiefe. Hierdurch entsteht die praktisch nicht zu verwirklichende Forderung nach einer Stromrinne mit völlig stetigem Verlauf der Geschwindigkeiten im Sinne einer resultierend stromab gerichteten Sandverfrachtung.

Da dieses Idealziel nicht erreichbar ist, wird man auch in Zukunft mit mehr oder weniger großen Unterhaltungsbaggerungen besonders in den Strommündungen rechnen müssen. Stromregulierungswerke werden in den Mündungsgebieten wegen der sehr hohen Kosten nur dort, wo mit vertretbarem technischem Aufwand eine Unterhaltung des Fahrwassers allein durch Baggerungen nicht mehr möglich ist, in Betracht zu ziehen sein.

II. Über eine Möglichkeit, in der Brackwasserzone tideunterworfenener Ästuarien durch Beeinflussung der Richtung bzw. Größe der vorhandenen Räumungskraft die Fahrwassertiefe zu verbessern bzw. zu erhalten.

Im Tidefluß ist die relative Lage der Sohle der Schifffahrtsrinne zur gewölbten Fläche des „Seekarten-Nulls“ (= MSprTnw) ständiger Veränderung unterworfen, auch dort, wo sie — im Endeffekt — für längere oder kürzere Zeiten stabil erscheint. Sie lebt im Rhythmus der Gezeiten, deren 2 Tideströmungen — der Flut- und der Ebbstrom — sie täglich verändern und, so wie der stete Tropfen den Stein höhlt, so führen die kleinsten jede Tide erzeugten Veränderungen der Sohlenhöhenlage zu Vertiefungen bzw. Erhöhungen derselben. Bleibt der Tidefluß sich überlassen, nimmt die Lebendigkeit der Sohle im allgemeinen ab und strebt einer Gleichgewichtslage zu, sofern nicht erneutes Leben des gesamten Flußbettes durch seitliche Verlagerungen der Rinnen, Stromspaltungen, Bildung und Veränderung von Sanden, Platen und Watten eintritt, was dann mitunter zu schlagartigem Aufleben des Spiels der Tiefenveränderungen führen kann.

Wir betrachten nicht diesen Fall, sondern Tideflüsse bzw. Flußabschnitte, deren Hauptschifffahrtsrinnen keine kurzfristigen horizontalen „Schlangebewegungen“ durchführen, sondern solche, in denen trotz ziemlicher Stabilität im Grundriß die Schifffahrtsrinne in vertikaler Hinsicht lebendig ist, d. h. an gewissen Stellen sich vertieft und an anderen immer wieder versandet. Immer wieder heißt: Auch dann wieder, wenn man der Versandung durch Baggerung begegnet. Eine Ausbaggerung — und gar eine besonders tiefgreifende, besonders schnell erfolgende oder besonders kurzstreckige — stört den, den pendelnden Geschiebetrieb bewirkenden Energiehaushalt des Flusses und muß dadurch die Sohle zu verstärktem Leben anregen. Denn mit jeder Sohlenänderung ist, da sie eine Querschnittsveränderung bedeutet, auch eine Geschwindigkeitsveränderung, also eine Änderung der potentiellen Ursache zur Geschiebeverlagerung, verbunden. Der

örtlich in seinem Eigenleben gestörte Fluß „reagiert“, um — so schnell als er kann — gleich- und auch andersortige Veränderung zur Wiederherbeiführung seines ihm eigenen Regimes vorzunehmen. Seine Antwort auf den künstlichen Eingriff kann nur eine Versandung sein, zunächst eine Neuansandung in der Baggerstelle, aber auch Verstärkungen oder das Neuauftreten anderweitiger Versandungen. Keine Menschenhand würde diese Erscheinung verhindern können, sie vermag bestenfalls lenkend auf sie einzuwirken.

Sowohl für solche störungsbedingten wie auch für solche aus dem Naturgeschehen entspringenden Versandungen bezieht der Tidefluß das die Sohlenaufhöhungen bildende Sandmaterial aus seinen Materialeingängen, wenn auch der erste Zugriff in die Eigenvorräte des Ästuars greift. Selbst dann, wenn weder die See noch das Oberwasser Sandlieferanten wären, könnten in Tideflüssen Versandungen — jedoch mit Ausräumungen an anderen Orten verbunden — stattfinden, denn die Tideflußsohle besteht aus Sand (von Natur aus unbewegliche, etwa felsige Flußsohlen sollen hier von der Betrachtung ausgeschlossen bleiben), der unvermeidbar von den Flut- bzw. Ebbströmungen aufgewirbelt und hin und her geführt wird (es sei denn, die Tideströmungen wären so gering, daß keine das Sandkorn aufhebende Turbulenz entsteht). Nicht immer aber halten sich die Sandtransporte aus der eigenen Masse im Gleichgewicht. Die Tidestromdauern und die Form der beiden Äste der Tidekurve sprechen da als primäre Erscheinungen ein großes Wort für das Zustandekommen bzw. das Nichtzustandekommen eines solchen Gleichgewichtes mit.

Aber das die Versandung in Tideflüssen bildende Sandkorn wird nicht im Ästuar geboren. Es stammt in erster Linie aus den Sandverdriftungen in der freien See, die entlang der Küste an den Flußmündungen vorbeiführen und welche die in die Flußmündung eindringenden Flutströme mächtig mit turbulent transportierten Geschiebefrachten nähren. Wenn diese Frachten auch mit einem Flutstrom höchstens auf die Länge des Flutweges eindringen und mit dem darauffolgenden Ebbstrom ungefähr gleich weit zurückgetrieben werden, so dringt ein Teil doch im Endergebnis stromauf weiter vor und muß irgendwo verbleiben. (In der Ems z. B. bestreitet der bei Borkum eindringende Seesand bis Emden — also auf rd. 50 km Flußlänge — den Aufbau der Flußmorphologie, von Verschlickungen abgesehen. Günstigenfalls könnten diese Sandmengen sich — theoretisch gedacht — gleichmäßig über die ganze Breite des Emsmündungstrichters verbreiten und würden dann diese jährlich in der Größenordnung von ungefähr 1 cm aufhöhen). De facto sind es immer bestimmte Gebiete, in denen die Versandungen auftreten. Und wenn diese der Schifffahrtsrinne gefährlich werden, muß — will man hier die Versandungserscheinung vertreiben — ihre „Ursache an Ort und Stelle“ gesucht bzw. erkannt werden. Die Frage des nach Abhilfe ausschauenden Ingenieurs muß lauten: Warum wird das bewegte Sandkorn abgelagert und warum gerade hier? Die Frage nach der Herkunft des Sandkorns wird dem Ingenieur wenig Ratschläge erteilen können, wie er die Ablagerungen an diesem Ort vermeiden kann. Denn man wird z. B. die Invasion des Seesandes — wenn man sie nicht selbst verschuldet hat (etwa durch Entzug von Flutspeicherraum) — in einem Mündungstrichter nie vermeiden können. Aber man kann die Eindringlinge bei ihrer örtlichen Passage beeinflussen. An der Marschrichtung wird man nicht viel ändern können, wohl aber allerhand an dem Marschtempo, genauer gesagt, an den beiden Marschtempos in Flut- und Ebbstromrichtung. Diese beiden werden von den Stromgeschwindigkeiten beider Strömungen beeinflusst, und hier muß der Hebel angesetzt werden.

Ein zunächst allgemein dargelegtes Beispiel soll zeigen, wie man — und zwar auf ungewöhnliche Art — die Fahrwasserhältnisse verbessern kann, und zwar in einem in der Brackwasserzone befindlichen Abschnitt eines Tideflusses, in welchem bei Nichtvorhandensein von Stromspaltungen, bei mäßiger Breite und beim Bedürfnis nach

Sohlenvertiefung letztere nicht durch eine für die Schifffahrt nicht mehr tragbare Breiten-einschränkung erreicht werden kann.

Diese Verbesserung kann wegen unerlaubter Breiten-einschränkung nicht durch Vertiefung bei gleichbleibender Querschnittsgröße erreicht werden. Eine Vergrößerung der Querschnittsfläche ist daher unvermeidlich. Sie wird aber dann unvermeidlich zur Versandung führen bzw. eine evtl. vorher vorhandene Versandungstendenz vergrößern, wenn sie lediglich im alleinigen, vertiefenden Ausbaggern besteht. In diesem Falle würde nicht mehr als ein ständiges, diesen ganzen Abschnitt umfassendes Baggerbedürfnis entstehen.

Es ist interessant, daß man dieses für die Verbesserung unvermeidliche Baggerbedürfnis zwar nicht aus der Welt schaffen, aber aus diesem Abschnitt heraus verlagern kann. Hierzu bedarf es einer solchen Querschnittsveränderung, die bei mäßig verengenden Einbauten so vertieft, daß im Endeffekt die vorhin erwähnte Querschnittsvergrößerung entsteht. Die neuen vergrößerten Querschnitte werden dann nicht zu Versandungen führen, wenn durch sie erreicht wird, daß die sandverlagernde Wirkung einer der beiden Tideströmungen die der anderen überwiegt, und zwar längs des ganzen Abschnittes in gleichem Ausmaß überwiegt, d. h. man muß Ebb- oder Flutüberlegenheit erzeugen (d. h. Stabilität der Sohle bei einseitigem Durchmarsch des Sandes). Gleich große zu Null resultierende Sandtransporte der Ebbe und der Flut erzeugen zu wollen, wäre unangebracht, da eine solche die Absicht zur Verlagerung der Versandung zu nichte machen würde. Nun kann man das Überwiegen eines der beiden Sandtransporte über den anderen durch Querschnittsgestaltung so erzeugen, daß es der Ebbstrom oder der Flutstrom ist, welcher den resultierend abgelagerungsfreien Durchmarsch des Sandes bewirkt. Mit klassischen Hilfsmitteln kann man grundsätzlich beides erreichen. Für Ebbstabilität (Ebbräumung) ist erforderlich, daß der Niedrigwasserquerschnitt verkleinert und der — hierdurch allerdings unten verkleinerte — Hochwasserquerschnitt in seinem oberen Teil vergrößert wird. Eine Niedrigwasserquerschnitt-Verkleinerung ist aber bei unveränderter Sohlenbreite mit der Vertiefung nicht vereinbar. Deshalb kommt es im vorliegenden Fall nicht in Frage, die Ebbstromgeschwindigkeiten relativ zur Flutströmung verstärken zu wollen, zumal die in der Brackwasserzone im unteren Querschnittsteil den Ebbstrom bremsende Dichteströmung (Brackwassereffekt) hierdurch nicht beseitigt werden kann. Außerdem hieße das, der bereits erwähnten Sandinvasion entgegenarbeiten zu wollen.

Ungewöhnlich, aber nach dem eben Gesagten sich mit greifbar naher Logik direkt anbietend, ist es dagegen, sich des Flutstromes zu bedienen, d. h. auf die Erzeugung einer Flutstabilität (oder auch Fluträumung) hinzuzielen. Der hierfür nötigen Niedrigwasserquerschnittvergrößerung wird bereits durch die angestrebte Sohlenvertiefung Rechnung getragen. Die erforderliche Verkleinerung des oberen Teiles des Hochwasserquerschnittes läßt sich durch Einbauten — die überdies zur Vergleichmäßigung der Vorgänge im Strom willkommen sind — bewerkstelligen. Im Gegensatz zu einer Ebbräumung wird jetzt der Brackwassereffekt ausgenutzt, denn er wirkt besonders in der an Geschiebeführung reichen Sohlennähe flutstromverstärkend, und die von See her eindringenden Sande passieren jetzt störungsfrei den Regulierungsabschnitt. In beiden Fällen wird in der Regulierungsstrecke nicht gebaggert werden müssen. Durch beide Regulierungsarten wird das jedoch nicht vermeidbare Baggerbedürfnis verlagert, bei der Ebbräumung aus dem Abschnitt nach See hin, bei der Fluträumung nach oberhalb hin. In beiden Fällen hat man es in der Hand, durch Querschnittsvergrößerung — natürlich durch tunlichst erreichbare Verbreiterung bzw. Vertiefung — den an der Ablagerung in der Regulierungsstrecke gehinderten Sand eine Falle zu stellen. Gelingt es, diesen Sandfang möglichst kurz zu gestalten, dann hat man den Vorteil der Konzentrierung

der Baggerungen gewonnen, und wenn dem so ist, daß die zu regulierende Strecke am Ende des Seeschiffahrtsweges liegt, dann bringt eine Fluträumung noch den Vorteil, daß der Bagger aus dem Fahrwasser verschwinden kann.

So einleuchtend an diesem Beispiel die Empfehlung einer Fluträumung ist, es ist leichter gesagt als getan. Die Dimensionierung der Querschnitte — übrigens bei der Ebbräumung schwieriger — erfordert eine ausgezeichnete Kenntnis der durch sie herbeigeführten Geschwindigkeiten. Insonderlich auf ihren unterschiedlichen zeitlichen Verlauf (die alleinige Erfassung ihrer Mittelwerte genügt nicht) bei Ebbe und Flut kommt es an; denn dieser Unterschied reguliert die Erscheinungen von Versandung, Räumung und Stabilität.

Überlegungen, rechnerische Untersuchungen und Modellversuche haben gezeigt, daß es der zeitliche Verlauf dieser Geschwindigkeiten ist, der bestimmend dafür wird, ob der örtliche Sandtransport in der Ebbstrom- oder in der Flutstromrichtung überwiegt. Dabei kommt es gar nicht so sehr darauf an, mit welchem Formelansatz man die „Geschiebefracht“ des Augenblicks erfaßt, sondern daß man sie tatsächlich in allen Augenblicken erfaßt. Es ist auch gar nicht nötig, diese Geschiebefracht überhaupt mengenmäßig zu erfassen (bzw. dies zu versuchen), es genügt, einen ihr proportionalen Wert heranzuziehen. Ob man nun für eine solche „Geschiebefrachtproportionale“ mit dem

Geschiebetriebansatz $B \cdot \int_0^D v^2 (v - v_0) dt$ (darin $B =$ Flußbreite, $D =$ Tidestromdauer,

$v =$ eine tiefenmäßig ausgesuchte Stromgeschwindigkeit, $v_0 =$ eine kornaufhebende Grenzgeschwindigkeit, $t =$ Zeit) verwendet, oder allein mit Ansätzen wie

$$B \cdot \int_0^D v^3 dt \quad \text{oder} \quad B \cdot \int_0^D v^4 dt$$

arbeitet, ist gar nicht so ausschlaggebend. Wesentlich ist eine genaue, vielortige Kenntnis des zeitlichen Verlaufs von v , wofür Messungen allein nicht ausreichend sind, schon deshalb, weil sie in der erforderlichen Dichte und erforderlichen Querschnittszahl nie gleichzeitig erfolgen können.

Seit aber die modernen Tidewellenberechnungsmethoden (6) (7) und sichere Kubisierungsverfahren (8) zur Verfügung stehen, bildet — sowohl für Nachberechnungen (des Naturzustandes) wie auch für Vorausberechnungen (von Regulierungszuständen) — die sehr genaue Berechnung des v -Verlaufs in beliebig eng gelegten Flußquerschnitten kein Problem mehr. Die für die Berücksichtigung des Brackwassereffektes notwendigen Grundlagen sind durch Messungen sehr gut erfaßbar.

Die für die Kenntnis des Geschwindigkeitsverlaufs nach der Regulierung erforderliche Tidewellenvorausberechnung steht jedoch vor der Schwierigkeit, die bei ihr benötigten neuen (durch den Eingriff veränderten) Widerstandswerte des Flusses zu erraten bzw. anzunehmen. Diese Schwierigkeit ist — besonders hier bei der großen Empfindlichkeit der Geschiebefrachtproportionalen auf feinste Unterschiede im v -Verlauf — nicht zu unterschätzen. Jedoch durch iterative Zusammenarbeit von Modellen und Tidewellenberechnung läßt sie sich hinreichend aus der Welt schaffen, allerdings nur dann, wenn man im Modell — nobel im Maßstab und unermüdet bei der Herbeiführung der für die Naturähnlichkeit notwendigen „Überhöhungsrauhigkeit“ — mit überaus präzisen und nicht sparsam placierten, vor allem die Sohlennähe erfassenden Geschwindigkeitsmessungen arbeitet und auch in der Lage ist, die Brackwasserverhältnisse nachzuahmen.

Daß eine Tideflußregulierung in einem unzulänglich tiefen, trotz laufender Ausbaggerung stets wieder aufsandenden Ästuarabschnitt mit dem Ziel der flutseitigen Ausräumung — verbunden mit der Verlagerung des Bagger-Erfordernisses nach oberhalb — kein Phantasie-Projekt darstellt, zeigt die zur Zeit in Deutschland im Bau befindliche Regulierung des rd. 10 km langen, in der Brackwasserzone gelegenen Abschnittes „Emder Fahrwasser“ der Ems. Hier traten bei der Planung, iterativ zusammenarbeitend, also sich gegenseitig gleiches Gewicht zusprechend, Berechnung und Modell in Aktion. Es ist interessant, daß gerade hierdurch — völlig unabhängig voneinander — nach den ersten Schritten der Zusammenarbeit Modell und Rechnung als wirksamste Lösung des Ziels (Verhinderung der Versandungen und Vertiefung) die oben herausgestellte flutseitige Räumung mit oberhalb anschließendem künstlichen Sandfang anrieten, ein m. E. erstmaliges Unterfangen. Die Modellversuche wurden von Prof. Hensen im Franzius-Institut der Technischen Hochschule Hannover, die Rechnung vom Wasser- und Schiffsamt Emden durchgeführt.

Die Zusammenarbeit beginnt nach Wahl einer für maßgeblich erachteten Tide mit der rechnerischen rohen Ermittlung geeigneter Querschnitte durch eine Tidevorausberechnung, für welche eine vorangegangene Tidewellennachberechnung des Naturzustandes Annäherungswerte für die Widerstandsbeiwerte des Flusses eingebracht hat. Sowohl die Tide der Nachberechnung wie jene der Vorausberechnung gelangt jetzt in das Modell, (welches — aus Maßstabsgründen nicht bis zur Tidegrenze reichend — der beiderseitigen Beschickung mit Tidekurven bedarf). Erstere, damit die Naturähnlichkeit des Modells für den Naturzustand — als Voraussetzung für die spätere Erreichung der Naturähnlichkeit von sowohl Modell wie Rechnung für den Ausbauzustand — gewährleistet ist, und letztere, um für den nächsten Iterationsschritt der die erste Querschnittsannahme verbessernden Rechnung verbesserte Widerstandsbeiwerte des Regulierungszustandes zu liefern. Für diese nach jedem, falls erforderlich, weiteren Iterationsschritt nötige Querschnittsverbesserung bietet die sogenannte „Räum betrachtungslinie“ eine sehr praktische Handhabe zur Kontrolle, ob bzw. wie weit das Ziel — die Fluträumung — erreicht worden ist. Diese Linie, welche in der Auftragung der Differenz (Flutwert minus Ebbwert) der bereits erwähnten Geschiebefracht-Proportionalen über der Flußachse besteht, muß bei Fluträumung tunlichst ohne Gegengefälle nach See hin flach abfallen. Für Flutstabilität (also für Sohlenstabilität bei flutseitig resultierendem Transportdurchgang) könnte sie auch horizontal verlaufen, doch gibt man ihr sozusagen „als Reserve“ die leichte Neigung, um die Flußsohle zur Selbstvertiefung anzuregen.

So einfach das Rezept klingt, so groß sind seine Ansprüche auf hohen Rechenaufwand, fleißiges Kubizieren, höchste Modellpräzision und auf beiden Seiten Unermüdlichkeit im Ausfeilen des noch nicht voll befriedigend Erreichten.

Da die Modelltechnik bereits in der Lage ist, von sich aus (direkt modellbeobachtend, nicht modellrechend) Voraussagen über künftiges Geschiebeverhalten durch effektive Geschiebenachahmung (Vestyron) und durch Brackwassernachahmung zu machen, ist eine zusätzliche Möglichkeit für die Beurteilung der rein rechnerischen — in Zusammenarbeit mit dem Modell gewonnenen — Voraussagen über das Sohlenverhalten nach der Regulierung gegeben. Bei der Planung der Regulierung des Emders Fahrwassers hat die Modellaussage das Vertrauen in die rechnerische Aussage gestärkt.

Schrifttumsverzeichnis

- (1) Wetzel, Günter: „Die Ems als Seeschiffsstraße“. Handbuch für Hafenbau und Umschlagtechnik. Band 4, Hamburg 1959, Seite 88.
- (2) Niebuhr, Wulf: „Über die neuere Entwicklung der Außenems und ihre vermutlichen Ursachen“. Die Küste, März 1952. Band I, Heft 1, Seite 43—62.
- (3) Niebuhr, Wulf: „Beobachtungen über den Sandtransport in der unteren Ems“. Die Küste, Jahrg. 4/1955, Seite 67—92.
- (4) Lucht, Fritz: „Hydrographische Messungen in der Außenelbe“. Die Wasserwirtschaft (früher Deutsche Wasserwirtschaft). Sonderheft: Vorträge auf der gewässerkundlichen Tagung am 19./20. Sept. 1951 in Hamburg, Seite 22—26.
- (5) van Veen, Joh.: „Eenige Opmerkingen over het Zandtransport van Stroomen“. Tijdschrift van Het Koninklijk Nederlandsch Aardrijkskundig Genootschap, Amsterdam 1936, Seite 161—172.
- (6) Schnoor, Ernst: „Anwendung des Differenzenverfahrens bei der Tidewellenberechnung in den von den Gezeiten beeinflussten Flüssen“. Der Bauingenieur 34 (1959) Heft 6, Seite 231—240.
- (7) Hensen, Walther: „Die Berechnungen von Tidewellen in Tideflüssen“. Die Küste, Lg. 7, Doppelheft 1958/1959, Seite 1—19.
- (8) Schnoor, Ernst: „Leitfaden für das Kubizierungsverfahren“. Mitteilungen der Hanoverschen Versuchsanstalt für Grundbau und Wasserbau Franzius-Institut der Technischen Hochschule Hannover, Heft 16, 1959, Seite 144—190.

Abteilung II — Seeschifffahrt

Mitteilung 3

Methoden zur Bestimmung der Sand- und Schlickbewegung entlang den Küsten, in den Flußmündungen und den Tideflüssen. — Anwendung moderner Mittel wie radioaktive Isotope, Luminophore usw.

Von Dr.-Ing. Karl Lüders, Regierungsdirektor, Niedersächsisches Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, Hannover; Dr.-Ing. Walter Hensen, Professor, Ordinarius für Grundbau und Wasserbau an der Technischen Hochschule Hannover; Dr.-Ing. Hans-Achim Klein, Oberregierungsbaurat, Wasser- und Schiffahrtsdirektion Hamburg; Dipl.-Ing. Johann Kramer, Regierungsbaurat, Leiter der Forschungsstelle Norderney; Dr.-Ing. Claus Magens, Wasser- und Schifffahrtsamt Kiel, Hafenbau, abteilung Schlei, Ellenberg über Kappeln/Schlei; Dr.-Ing. Marcus Petersen, Oberregierungsbaurat, Landesamt für Wasserwirtschaft, Kiel; Dipl.-Ing. Heinz Schulz, Oberregierungsbaurat, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz; Dr. rer. nat. Gerhard Ströhl, Dipl.-Chem., Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz.

Zusammenfassung

A. Schwebstoff- und Schlickbewegung

Die Bestimmung des Schwebstoffgehaltes durch Untersuchung von Einzelproben ist zeitraubend und umständlich. Erheblich einfacher ist die photoelektrische Schwebstoffmessung, bei der die Trübung des Wassers zur Charakterisierung des Schwebstoffgehaltes benutzt wird. Dieses Verfahren ist heute so weit entwickelt, daß es unter bestimmten Voraussetzungen für praktische Zwecke ausreichend genaue Ergebnisse liefert, und zwar für die Untersuchung von Einzelproben wie auch für Messungen in situ.

Die für seebauliche Arbeiten ebenso bedeutungsvolle wie schwierige unmittelbare Beobachtung des Schlickfalles wurde mit „Schlickfallen“ ausgeführt. Diese sind durchsichtige Kunststofftrichter, die in Abständen von 1 m, untereinander angeordnet, als Meßkette ins Wasser gehängt werden. Der in den Trichtern aufgefangene Schlick kann als Einzelprobe weiter untersucht werden.

Die Schlickbewegung in einem Tidefluß, in der Oste, ist mit Erfolg mittels radioaktiver Leitstoffe beobachtet worden. Neben wichtigen Erkenntnissen über den Einfluß der Dichteströmungen und der Unterschiede der Wasserturbulenz zwischen Flut- und Ebbe-strömung auf die Schlickbewegung in dem Tidefluß haben die Untersuchungen auch weitere Erfahrungen über die praktische Anwendung dieses Verfahrens ergeben.

B. Sandwanderung

Für die unmittelbare Messung der Sandwanderung auf der Gewässersohle, die unter ständiger Wasserbedeckung liegt, steht z. Z. nur die Sandfalle zur Verfügung. Prüfungen dieses Gerätes im Laboratorium haben gezeigt, daß quantitative Bestimmungen des Sandtransportes mit diesem Gerät nicht zu erreichen sind; es können nur qualitative Aussagen gewonnen werden.

Eine andere Möglichkeit, den Sandtransport im tieferen Wasser unmittelbar zu verfolgen, bietet die Anwendung radioaktiver Leitstoffe, bei der die radioaktive Komponente von außen auf das Sandkorn aufgebracht wird, ohne dessen Form zu ändern (Anlagerungsmethode). Hierfür wurde bisher das Nuklid Cr^{51} verwendet. Der Wanderweg des gekennzeichneten Materials läßt sich mit Hilfe der emittierten Strahlung durch Verwendung von Sonden feststellen. Im allgemeinen wird man derartige Messungen von

Bord eines Meßschiffes ausführen. Ein unbedingt sicherer Strahlungsschutz für Mensch und Tier ist zu fordern. Die Meßergebnisse werden entweder in Zeit-Weg-Plänen oder durch Isolinien dargestellt. Diese Meßmethode befindet sich noch in ihren Anfängen. Es ist anzustreben, neben einer Verbesserung der Empfindlichkeit der verwendeten Detektoren möglichst zu einer quantitativen Aussage über den Sandtransport zu gelangen.

Zur Beobachtung des Sandtransportes auf der Gewässersohle, die zeitweise über Wasser liegt (Watt), können das Verfahren der Sandfärbung oder die Verwendung luminophorer Leitstoffe in Betracht kommen. Diese Verfahren geben Hinweise auf die Ausbreitung und Umlagerung des oberflächigen Sedimentes innerhalb eines räumlich engbegrenzten Gebietes in einer kurzen Zeit (1 bis 3 Tage).

Die Methoden der mittelbaren Beobachtung des Sandtransportes sind zahlreich (morphologische, hydrographische, petrographische, biologische Methoden).

Bei der morphologischen Methode werden die aus verschiedenen Zeiten stammenden Vermessungs- oder auch Luftbildpläne eines bestimmten Gebietes miteinander verglichen und nach verschiedenen Gesichtspunkten durch Anfertigung z. B. von Differenzplänen, Tiefenänderungsplänen, Zeit-Weg-Plänen ausgewertet.

Die hydrographischen Untersuchungen können benutzt werden, um die Kräfte zu deuten, welche die Änderung der Morphologie der Gewässersohle verursachen.

Bei den petrographischen Untersuchungen werden Korngrößen, Schwermineralien, Kornrundung, Ätzwerte, Sedimentfarbe u. a. bestimmt und diese Werte in Lagepläne eingetragen, um hieraus z. B. die Bewegungsrichtung des Sandes abzuleiten.

Ebenso werden biologische Faktoren verwendet, um beispielsweise aus dem Wanderweg der Muschelschalen Schlüsse auf den Transportweg des Sandes zu ziehen.

Um die Veränderung der oberen Sedimentschichten eines größeren Wattgebietes zu verfolgen, wird die zu untersuchende Fläche biologisch kartiert. Hierbei werden u. a. der Besiedlungs- und Erhaltungszustand und die Besiedlungsdichte der kennzeichnenden Lebensgemeinschaften untersucht und in Karten dargestellt, deren Auswertung eine Aussage über die Entwicklungstendenz des untersuchten Gebietes ermöglicht.

C. Modelluntersuchungen

Trotzdem es nicht möglich ist, in einem Modell mit beweglicher Modellsohle morphologische Vorgänge quantitativ zu untersuchen, werden dennoch Versuche mit beweglicher Sohle gemacht, weil die Naturvorgänge in vielen Fällen weitgehend unklar sind und auch qualitative Ergebnisse bei vorsichtiger Ausdeutung wichtige Anregungen für die Baupraxis liefern zu können. Die größte Schwierigkeit bei der Bestimmung des Geschiebetransportes bereitet die gleichzeitige Messung der Geschiebe- und Schwebstoffbewegung. Im Modellversuch lassen sich jedoch die grundsätzlichen Vorgänge bei der Geschiebebewegung durch strömendes Wasser untersuchen. Entsprechende Versuche sind im Franzius-Institut für Grund und Wasserbau der TH Hannover in den Jahren 1958/59 durchgeführt worden. Die Versuche sind zur Zeit noch nicht abgeschlossen.

Inhalt

	Seite
A. Methoden zur Bestimmung des Schwebstoffgehaltes und des Schlickfalles	239
1. Schwebstoffmessung	239
1.1 Photoelektrische Schwebstoffmessungen	239

	Seite
1.11 Messung an Hand von Einzelproben	240
1.12 Messung in situ	240
1.2 Schwebstoffseparator	242
2. Schlickfallmessung	243
3. Beobachtung der Schlickbewegung mittels radioaktiver Leitstoffe	243
B. Methoden zur Bestimmung der Sandbewegung	249
1. Unmittelbare Methoden	249
1.1 Messungen	249
1.2 Färbungen	249
1.3 Luminophore Leitstoffe	250
1.4 Radioaktive Leitstoffe (siehe Abschnitt B 3)	250
2. Mittelbare Methoden	250
2.1 Morphologische Untersuchungen	250
2.2 Hydrographische Untersuchungen	251
2.3 Petrographische Untersuchungen	252
2.4 Biologische Untersuchungen	253
2.41 Schilluntersuchung	253
2.42 Biologische Wattuntersuchung	255
3. Beobachtung der Schlickbewegung mittels radioaktiver Leitstoffe	257
3.1 Verfahren	257
3.2 Auswahl des Nuklids	257
3.3 Herstellung radioaktiver Partikel	259
3.4 Messung der Radioaktivität im Gewässer	259
3.5 Strahlenschutz	260
3.6 Berücksichtigung der bewegenden Kräfte	260
3.7 Darstellung der Meßergebnisse	263
3.8 Bisherige Ergebnisse	264
3.9 Schlußbetrachtung	265
C. Modelluntersuchungen	265
1. Allgemeines	265
2. Versuche über Geschiebe- und Schwebstoffbewegung in einem Modellgerinne	267
2.1 Allgemeines	267
2.2 Geschiebebewegung an der Sohle in „Transportkörpern“ (Riffeln oder Bänke)	268
2.3 Bewegung des Geschiebes in Suspension	268
2.4 Beurteilung der Berechnungsmöglichkeiten und -grundlagen des Sandtransportes im Tidegebiet aufgrund der Versuche	269
3. Versuche über den Geschiebetrieb an einem idealisierten Modellstrand	270

A. Methoden zur Bestimmung des Schwebstoffgehaltes und des Schlickfalles

Bei der Planung von Schiffahrtsanlagen in den Ästuaren ist die Kenntnis der Schwebstoffführung und des Schlickfalles von besonderer Bedeutung.

1. Schwebstoffmessung

Die Bestimmung des Schwebstoffgehaltes im Wasser durch Filtrieren einer Wasserprobe, Trocknen und Wiegen ist zeitraubend und umständlich. Da der Schwebstoff im allgemeinen nicht gleichmäßig über den Querschnitt und in der Fließrichtung verteilt ist, müssen sehr viele Proben entnommen werden, um ein zutreffendes Bild zu erhalten. Das von der Sohle aufgewirbelte Material verteilt sich nach einer E-Funktion über den Querschnitt, wenn die senkrechte Geschwindigkeitskomponente sich mit der Zeit nicht ändert. Letzteres ist jedoch keineswegs der Fall, so daß der Schwebstoff mit den „Turbulenzballen“ in deutlichen Wolken transportiert wird und die theoretische Verteilung im allgemeinen nur aus Mittelwerten vieler Proben über eine längere Zeit beobachtet werden kann. Um die Zahl der Proben zu reduzieren, wurden integrierende Wasserschöpfer konstruiert, die einen Mittelwert über einen bestimmten Zeitabschnitt ergeben.

1.1 Photoelektrische Schwebstoffmessungen

Sehr einfach dagegen ist die Messung der Trübung des Wassers. Sie kann in situ und registrierend oder an Hand von Einzelproben sehr schnell mit Hilfe der Photozelle oder des Photoelements durchgeführt werden. Besonders in der Ozeanographie wurde diese Methode angewendet. Als man sie auch in den Ästuarien einführte und die Trübung zur Charakterisierung des Schwebstoffgehaltes benutzte, wurden sehr bald und mit Recht kritische Stimmen laut. Bekanntlich gibt ein und derselbe Schwebstoffgehalt im Wasser eine ganz verschieden starke Trübung, je nachdem, ob das Material sehr fein verteilt oder grobkörnig ist. Daneben spielt natürlich auch die Färbung des Wassers eine Rolle. Klein hat Wege zur Überwindung dieser Schwierigkeiten aufgezeigt und die Beziehung zwischen Korngröße und Trübung untersucht¹⁾.

Wenn sich die Korngröße der Schwebstoffe nicht wesentlich verändert, kann der Schwebstoffgehalt des Wassers mit einer für praktische Zwecke ausreichenden Genauigkeit aus der Trübung ermittelt werden. Dies ist besonders dann der Fall, wenn im Wasser neben dem Schlick Sand nur in geringem Ausmaß suspendiert wird. In der Unteren Hunte, im Ästuar der Oste und in der Unterelbe im Gebiet zwischen Glückstadt und Brunsbüttelkoog konnte eine solche, genügend enge Beziehung zwischen Trübung und Sinkstoffgehalt nachgewiesen werden. Die Abweichungen gegenüber der mittleren Beziehung zwischen Trübung (Extinktion) und Schwebstoffgehalt betrug z. B. bei rd. 200 Vergleichsmessungen in der Elbe bei Schelenkuhlen und Glückstadt, abgesehen von einigen Ausnahmen, nicht mehr als ± 30 mg/l bzw. ± 15 mg/l im Mittel. Das auf Grund dieser Messungen entworfene Diagramm von Bild 1 gestattet die Ablesung des Schwebstoffgehaltes bei einer bestimmten, gemessenen Extinktion (bzw. Lichtauslöschung in %) für eine beliebige Meßstrecke (d. h. Schichtdicke des vom Lichtstrahl durchdrungenen Wassers).

Die Gültigkeit des Lambert-Beerschen Gesetzes, d. h. eine proportionale Änderung der Extinktion mit dem Schwebstoffgehalt, wurde von Klein¹⁾ nur bis zu einem

¹⁾ Klein, H.-A.: Schwebstoffmessungen mit dem lichtelektrischen Trübungsmesser. Mitteilung Nr. 38 der Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz, Dez. 1952.

Extinktionskoeffizienten $k = 0,25 \text{ cm}^{-1}$ bestätigt gefunden. Bei sehr hoher Schwebstoffkonzentration ist mit einer Abweichung von der geradlinigen Beziehung zwischen Extinktion und Schwebstoffgehalt zu rechnen.

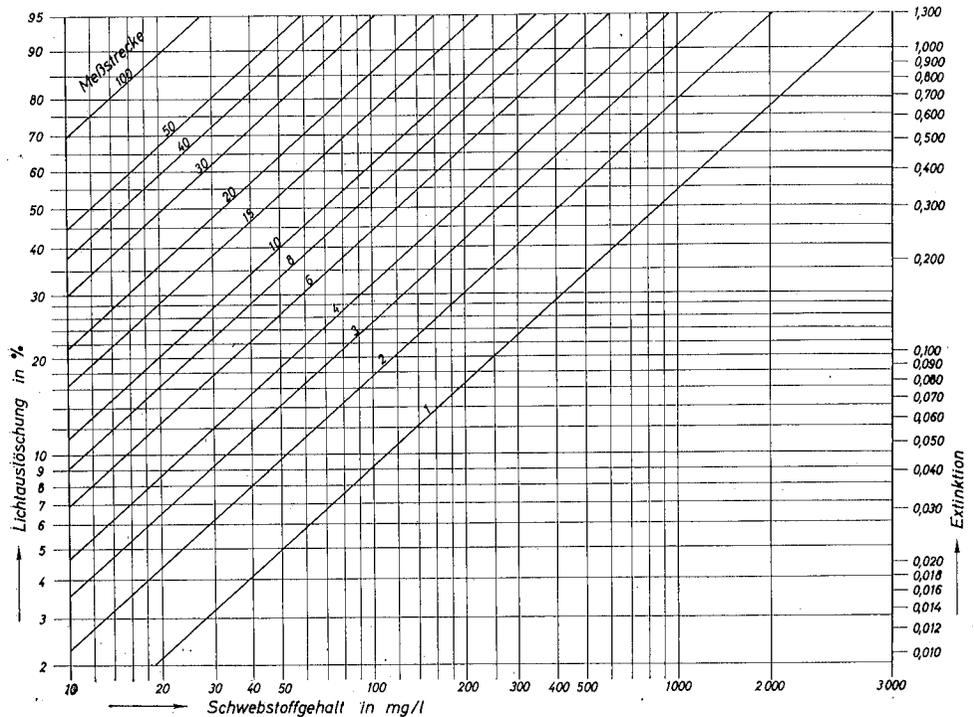


Bild 1

Beziehung zwischen Extinktion (beziehungsweise Lichtauslöschung in ‰) und dem Schwebstoffgehalt in der Unterelbe bei verschiedenen Meßstrecken

1.11 Messung an Hand von Einzelproben

Zur Messung von Einzelproben wurde ein lichtelektrisches Kolorimeter nach B. L a n g e benutzt, das für die Verwendung an Bord entsprechend umgebaut wurde¹⁾. Um Fehler durch die Färbung des Wassers auszuschalten, wurde als Vergleichslösung abgefiltertes Flußwasser verwendet. Zur genauen Messung dienten rechteckige Küvetten; für schnelle Reihenuntersuchungen (z. B. Strömungsmessungen) wurden runde Durchlaufküvetten benutzt. Die Messung einer Wasserprobe dauerte etwa 1 Minute. Das Gerät wurde an der Unteren Hunte, der Oste und der Unterelbe eingesetzt.

Es soll in diesem Zusammenhang nicht unerwähnt bleiben, daß ein, wenn auch geringer Einfluß der Größe der Küvetten auf die Beziehung zwischen Extinktion und Schwebstoffgehalt festgestellt wurde.

1.12 Messung in situ

Zur Messung der Schwebstoffverteilung in der Lotrechten während einer Tide wurde in der Oste ein von J o s e p h²⁾ entwickeltes Durchsichtigkeitsmeßgerät verwendet. Mit

²⁾ J o s e p h, J.: Meereskundliche Meßgeräte. Naturforschung und Medizin in Deutschland 1939—1946, Bd. 18 Geophysik, Teil II.

dem Gerät kann in situ die Extinktion laufend gemessen werden. Die Meßstrecke ist verstellbar und betrug 20 cm. Nach den Ergebnissen der Messungen, die mit Unterstützung des Deutschen Hydrographischen Instituts durchgeführt wurden, konnte das Schema des Bildes 2 entwickelt werden.

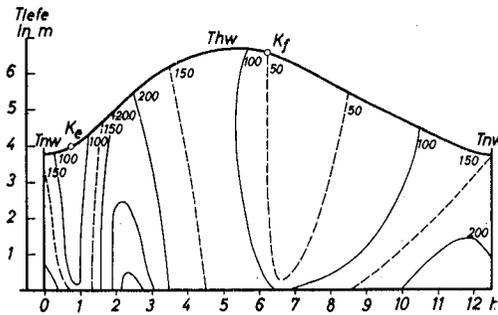


Bild 2

Schema der Schwebstoffverteilung in der Oste km 77,5 in mg/l (nach photoelektrischen Trübungsmessungen)

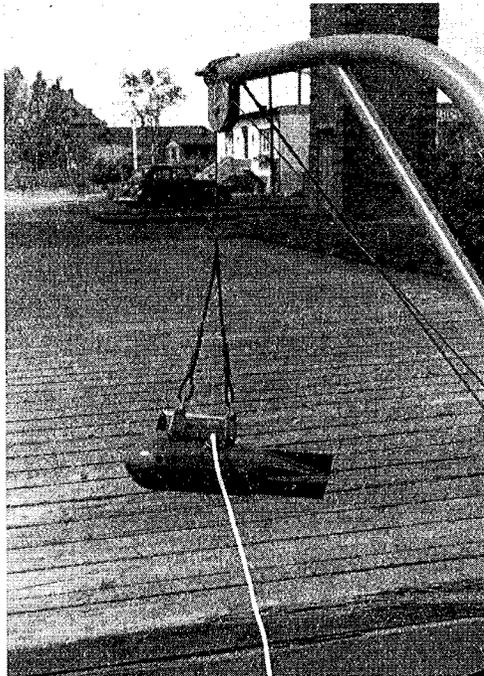


Bild 3

40 kg schwerer Meßkopf des lichtelektrischen Trübelements

Zur Untersuchung der Frage, wie dem Eintrieb und der Ablagerung von Schlick in den Schleusenvorhöfen des Kiel-Kanals (Nord-Ostsee-Kanal) besser als durch fortlaufende Baggerung begegnet werden kann, wurden in den Jahren 1955 und 1956 in der Elbe

und in den Schleusenvorhöfen die Extinktion und damit der Schwebstoffgehalt mit einem besonderen Gerät gemessen. Es bestand aus einem torpedoförmigen Schwimmkörper mit Leitflossen, der an einem Drahtseil in verschiedene Tiefen, ähnlich einem Ott-Schwimmflügel, abgelassen werden konnte (Bild 3). In dem Schwimmkörper war eine konstante Lichtquelle und eine Photozelle untergebracht. Die Helligkeit des Lichtes vor und hinter einer 2 cm langen Meßstrecke wurde auf elektrischem Wege miteinander verglichen und der Unterschied auf einer Ampèreskala sichtbar gemacht.

Zur zuverlässigen quantitativen Auswertung der gemessenen Extinktion waren erhebliche Voruntersuchungen notwendig. Eine große Anzahl im Untersuchungsbereich entnommener Wasserproben wurden sowohl gefiltert als auch ihre Extinktion untersucht, so daß eine für örtliche Verhältnisse zutreffende Beziehung zwischen Extinktion und Schwebstoffgehalt gewonnen wurde. Die weiteren Messungen erfolgten nunmehr nur noch lichtelektrisch, indem die Meßstrecke mit Lichtquelle und Photozelle vom Schiff aus ins Wasser gelassen und an Bord die Extinktion abgelesen wurde. Der Meßkopf mußte der zeitweilig auftretenden starken Strömung wegen sehr schwach sein, damit die Messung auch in größeren Tiefen möglich war.

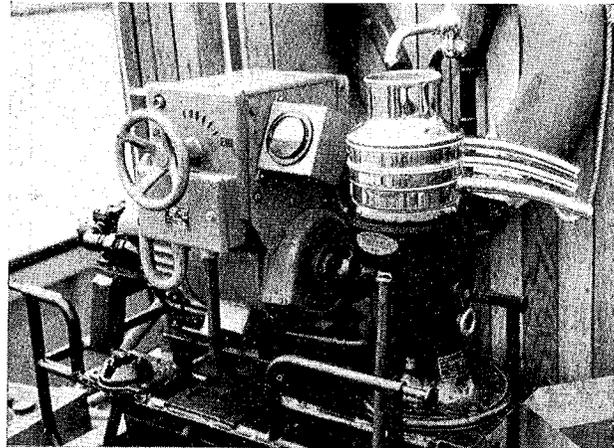


Bild 4

Schwebstoffseparator, angetrieben durch 12-V-Gleichstrommotor

Die Anzeige der Extinktion war außerordentlich empfindlich, so daß die abgelesenen Werte nicht selten sehr stark streuten. Dies lag vor allem daran, daß der Schwebstoff wolkenartig auftrat. Es wurde deshalb daneben ein integrierendes Verfahren zur Feststellung des mittleren Schwebstoffgehaltes angewandt:

1.2 Schwebstoffseparator

Aus der jeweiligen Meßtiefe wurden mittels Saugschlauch 20 l Wasser durch einen Separator mit 1400 Umdr./Min. gepumpt (Bilder 4 u. 5). Der aus dem durchlaufenden Wasser im Separator ausgefüllte Schlick wurde entnommen, getrocknet und gewogen. Dieses Verfahren besitzt gegenüber dem Filtern von Wasserproben erhebliche Vorteile: Einmal fällt die Entnahme, die Entkeimung und die zeitraubende Filterung der Wasserprobe fort, zum anderen entfällt die Unsicherheit in der Feststellung der äußerst geringen Filtergewichte, die sich infolge der Feuchtigkeitsaufnahme der Filter aus der

Luft während des Abwägens verändern, zum dritten sind die Wägefeler bei größeren Proben aus 20 l Wasser erheblich geringer als bei Proben von wenigen mg Gewicht, und schließlich erhält man einen über Menge und Zeit integrierten Mittelwert des Schwebstoffgehaltes des zu untersuchenden Wassers.

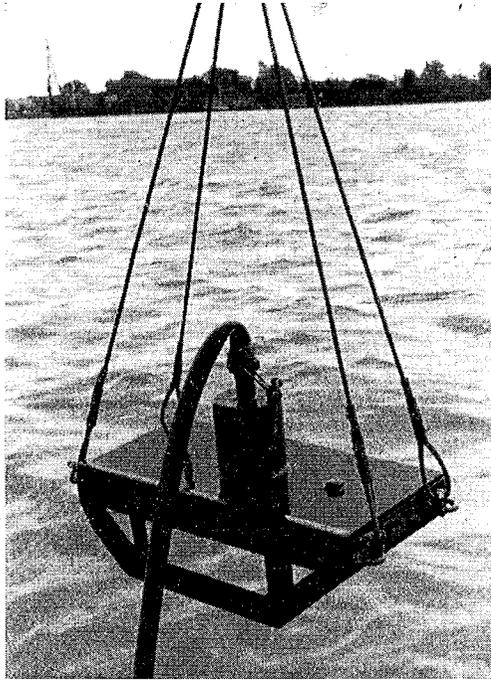


Bild 5

Saugkorb für die Wasserentnahme auf beschwertem Grundschlitten

2. Schlickfallmessung

Der Ausfall von Feststoffen aus dem Wasser im Vorhafen von Brunsbüttelkoog wurde gemessen, indem zwischen kleinen Ketten im Abstand von einem Meter durchsichtige Kunststofftrichter senkrecht aufgehängt wurden. Am unteren Ende der Ketten befand sich ein Gewicht, damit die Kette lotrecht hing. Diese Trichterketten, „Schlickfallen“ genannt, konnten an Leitwerken, Reibepfählen, Dalben und auch am Schiff aufgehängt werden (Bild 6). Die Durchsichtigkeit der Trichter erlaubte ein schnelles Ablesen der Höhe des in ihrem unteren, schmalen Zylinderteil gesammelten ausgefallenen Schwebstoffes. Das Trockengewicht des ausgefallenen Schlicks wurde an Einzelproben ermittelt.

3. Beobachtung der Schlickbewegung mittels radioaktiver Leitstoffe.

Die günstigen Erfahrungen, die man in den Jahren 1954 und 1955 bei der Verwendung von radioaktivem Scandiumglas zur Beobachtung des Schlicktransportes in der Themse gemacht hatte, veranlaßte die Wasser- und Schiffahrtsdirektion Hamburg, einen ähnlichen Versuch in der Oste zu unternehmen³⁾.

³⁾ Klein, H.-A.: Beobachtung des Schlicktransportes in einem Tidefluß mit Hilfe radioaktiver Leitstoffe. Die Wasserwirtschaft, 50. Jg., H. 4, April 1960.

Die Oste erreicht, von links aus der Geest kommend und zwischen den Ländern Hadeln und Kehdingen als Tidefluß das Moor- und Marschgebiet querend, die Unterelbe kurz vor deren Mündung in die Nordsee. Die Tidegrenze der Oste liegt bei Bremervörde, rd. 75 km oberhalb ihrer Mündung (Bild 7).

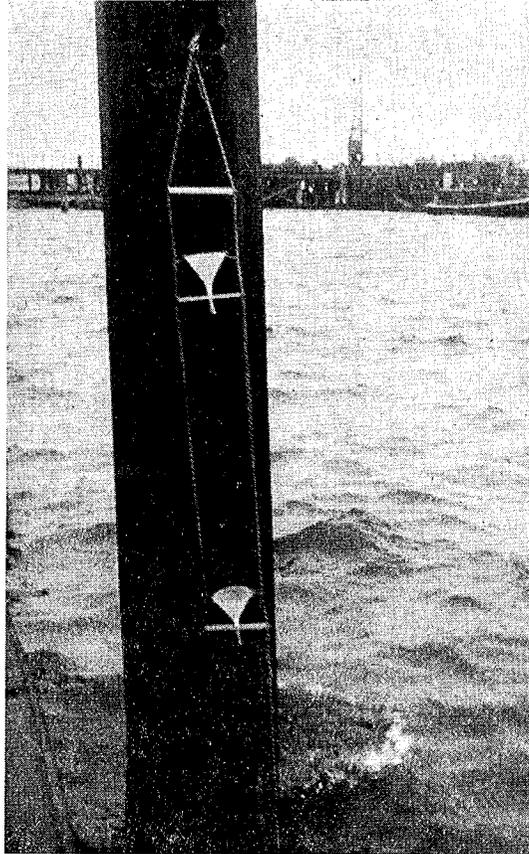


Bild 6

Schlickfalle am Pfehl ausgehängt — 5 Trichter befinden sich im Wasser

Bei einer petrographischen Kartierung des Flußbettes der Oste, die man im Zusammenhang mit Vorarbeiten für eine Abschleusung des Flusses an seiner Mündung durchführte, fand man von km 18 bis km 70 ausgedehnte Schlickablagerungen, deren Herkunft sich nicht ohne weiteres erklären ließ. Von oberhalb — dem Geest- und Moorgebiet — konnte das Material kaum stammen. Aus der Elbe, wie es der Geologe vermutete, sollte es eigentlich nicht so weit hochwandern, da das Elbwasser nur bis etwa km 63 in die Oste eindringt und die Resultierende der Tidebewegung wegen des Oberwasserzuflusses (i. M. $10 \text{ m}^3/\text{s}$) nach der Mündung zu gerichtet ist. Man entschloß sich daher, die Schlickbewegung mit radioaktiven Leitstoffen nachzuprüfen.

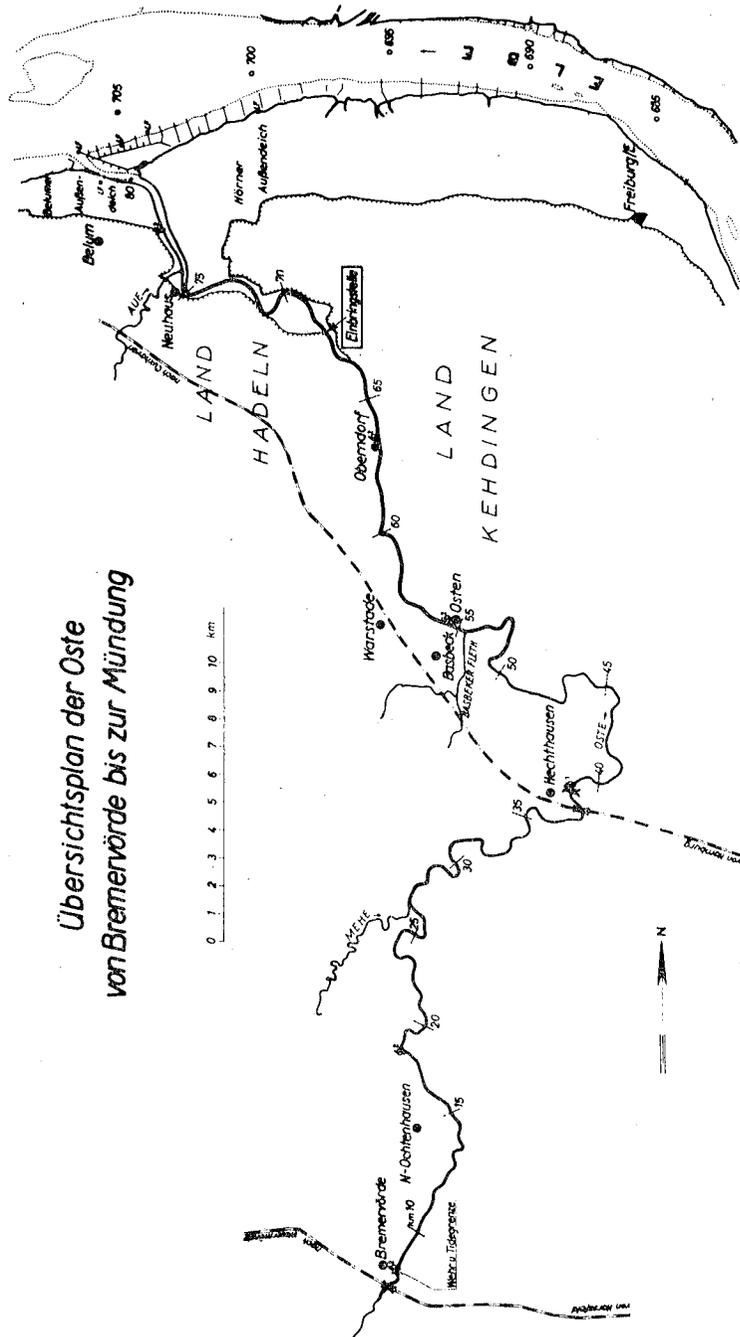


Bild 7
Übersichtsplan der Ooste von der Tidegrenze bis zur Mündung

Verwendet wurden nach dem Themsevorbild 100 g Scandiumglas, das 5% Sc_2O_3 enthielt. Es wurde auf die Korngröße des Osteschlicks (0,01 bis 0,02 mm) gemahlen und in Harwell (England) in einem Kernreaktor auf 4 Curie aktiviert. Das entstandene Scandium 46 ist im Wasser nahezu unlöslich, hat eine geeignete Halbwertszeit von 84 Tagen und sendet genügend energiereiche Gammastrahlung aus, deren beide Banden bei 0,89 und 1,12 MeV liegen.

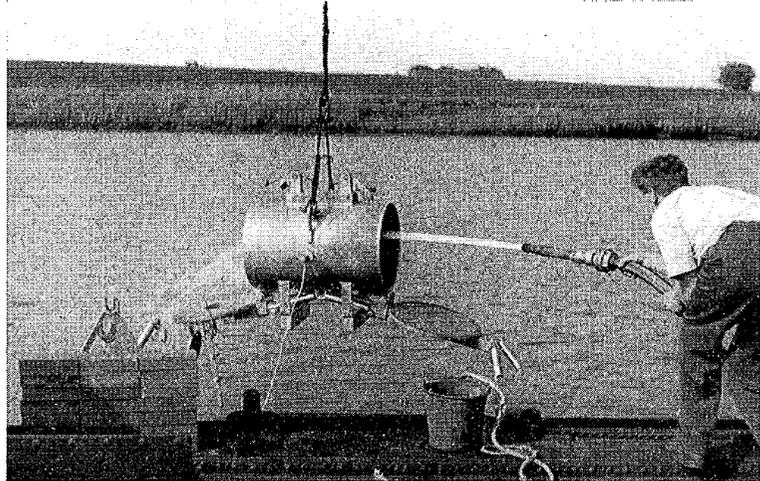


Bild 8

Misch- und Einbringegerät nach dem Versuch beim Entseuchen

Das radioaktive Material wurde an Bord eines Kranschliffes in einem besonderen Gefäß (Bild 8) mit 50 l Schlick gemischt und am 13. 5. 1959 in der Oste bei km 68,05 auf der Flußsohle ausgebracht. Als Zeitpunkt wurden 2 Stunden nach Tidehochwasser bei einsetzendem stärkeren Ebbstrom gewählt, der den radioaktiven Schlick sehr bald restlos aus dem mit dem Kranschliff abgelassenen Einbringefäß spülte. Durch das Einbringen bei Ebbe wurde verhütet, daß konzentriertes Material auf den Vorländern abgelagert und Weidevieh gefährdet werden konnte. Die Oste ist an der Einbringstelle etwa 120 m breit bei einer mittleren Wassertiefe von 3,5 m. Die mittlere Strömungsgeschwindigkeit beträgt etwa 0,6 m/s.

Die Bewegung des eingebrachten Schlicks wurde durch einen Meßschlitten verfolgt (ein zweiter lag als Reserve bereit). Er bestand aus einem 95×100 cm großen Bodenblech mit einem Messingkasten, in dem 2 GM-Zählrohre von 50 cm Länge und ein Vorverstärker mit Kathodenfolger untergebracht waren (Bild 9). Die Verbindung zum Meßplatz (Zähler mit Ratemeter und Schreiber) an Bord des Meßschiffes, von dem aus der Schlitten auf die Flußsohle abgesenkt werden konnte, stellte ein 50 m langes Kabel her. Eine Zählrate von 1 Imp./min entsprach etwa $1,2 \times 10^{-13} \text{C/g}$ Trockengewicht des Schlicks. Vor Beginn des Versuches wurde der Nullwert des Flußbettes unter Beachtung des Einflusses der Wassertiefe bestimmt.

Der eingebrachte Schlick wanderte zunächst in einem 2—3 m breiten Streifen auf der Flußsohle mit dem Ebbstrom flußabwärts. Am Schluß der Ebbe hatte die Spitze, die sehr

deutlich verfolgt werden konnte, einen Weg von rd. 1000 m zurückgelegt. Am Ufer wurden keine erhöhten Aktivitäten gemessen. Durch die anschließende Flut wurde das Material stärker verteilt und bis etwa 650 m oberhalb der Einbringstelle getragen. Die weitere Ausbreitung ist aus Bild 10 zu ersehen. Der radioaktive Schlick wanderte je Tide etwa 0,82 km flußab- und 0,95 km flußaufwärts.

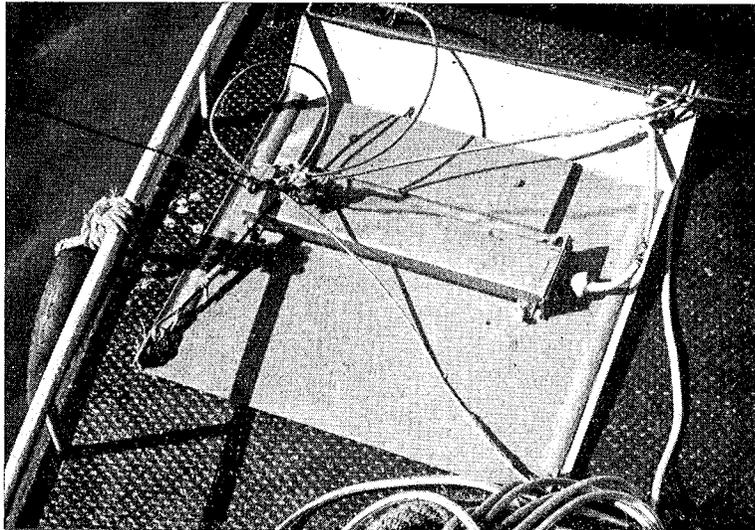


Bild 9

Meßschlitten mit zwei 50 cm langen GM-Zählrohren, Vorverstärker mit Kathodenfolger und 50 m Kabel

Bis zum 15. Mai ließ sich die Grenze der Ausbreitung bis auf ± 100 m genau angeben. Später fand sich das aktive Material an einzelnen Stellen, meist am ausbuchtenden Ufer, wieder, wo sich Schlick abzulagern pflegt. Der eingebrachte Schlick konnte bis km 18 nachgewiesen werden (1,5facher Nullwert) und ist damit bis in die Nähe der Flutstromgrenze gelangt. Dieses Ergebnis bestätigte die auf Diatomeenanalyse begründete Vermutung der Geologen und Biologen, daß in einem Tidefluß der Schlick auch oberhalb der Brackwasserzone bis nahe an die Flutstromgrenze hinaufwandern kann. Es entspricht den aus den erwähnten Themseversuchen gemachten Erfahrungen. Als Ursachen für das Aufwärtswandern des Schlicks kommen neben den Dichteunterschieden in der Brackwasserzone die größere Turbulenz und damit der erhöhte Schwebstoffgehalt des Flutstromes sowie die überwiegend stromaufwärts gerichtete Strömung in der Wasserwechselzone des Ufers in Frage.

Die verwendeten Geräte und die Versuchsmethode haben sich sehr gut bewährt. Im Wasser oder am Ufer traten nirgendwo Aktivitäten auf, die eine Gefährdung für Mensch oder Tier bedeutet hätten, so daß man auch eine wesentlich höhere Aktivität hätte anwenden können. Schwierigkeiten entstanden nur beim Öffnen des Schraubdeckels der Aluminiumdose, in der das Scandiumglas-Pulver aktiviert und befördert worden war. Offenbar war der Verschuß durch die Strahlung korrodiert. Das Glaspulver war z. T.

in kleineren Klümpchen zusammengebacken, die aber im Wasser sofort wieder vollständig zerfielen. Nach den gemachten Erfahrung empfiehlt sich folgendes:

Das aktivierte Material sollte vor dem Einbringen in ein Isotopenlabor gebracht, dort die Aluminiumdose geöffnet und die Kornzusammensetzung kontrolliert werden. Falls dies nicht möglich ist, wird man zumindest an der Einbringstelle ein Fernbedienungsgerät zum Aufschneiden der Dose bereithalten. Zweckmäßig wäre auch eine Umfüllung in eine leicht zu öffnende Büchse, einen Plastikbeutel oder ein Glasampulle. Letztere könnte im Mischgefäß zerschlagen und damit die Gefahr des Stäubens durch den Wind, der fast immer an der Einbringstelle herrschen wird, gebannt werden. Das gefährliche Stäuben kann man auch durch Zugabe von Wasser in die Aluminiumdose verhindern. Bei der Umfüllung und Mischung mit dem Schlick ist es immer möglich, daß radioaktives Material das Schiffsdeck verseucht. Eine Abdeckung des Füllortes mit einer Plastikfolie ist daher sehr zweckmäßig. Die verseuchten Gegenstände (Gummihandschuhe, Alu-Büchse und dergl.) sollten, falls ihre Aktivität größer ist als einige μ C, nicht in den Fluß geworfen, sondern in bereitgehaltene Behälter gegeben werden.

B. Methoden zur Bestimmung der Sandbewegung

1. Unmittelbare Methode

1.1 Messungen

Sandfängergeräte zur quantitativen Bestimmung des Sandtransportes auf der Sohle von Wattströmen und auf dem Vorstrand wurden in der Versuchsrinne geprüft mit dem Ergebnis, daß diese Geräte nur einen geringen und stark schwankenden Teil des auf der Sohle wandernden Sandes erfassen. Auch Vergleichsmessungen in der Natur mit zwei Sandfallen, die in einem Rahmen nebeneinander oder an beiden Seiten eines Meßschiffes ausgesetzt wurden, zeigten sehr unterschiedliche Sandmengen.

1.2 Färbungen

Auf dem Watt vor der Wurster Küste wurde die Sedimentverfrachtung durch Färbung des Sedimentes mit „Methylen-Blau B-extra“ untersucht. Das sandige Sediment wurde an der Untersuchungsstelle entnommen, getrocknet und mehrmals mit zwischenzeitlicher Trocknung eingefärbt. Beim Ausbringen wurde das gefärbte Material in dünner Schicht als „Farbfleck“ auf der Wattoberfläche ausgestrichen, nachdem es vorher mit Seewasser angefeuchtet worden war, um das Verwehen des Farbmateriale bis zur nächsten Überflutung zu verhindern.

Aus den Untersuchungen ging hervor, daß in zwei Drittel aller Fälle nach zweimaliger Überflutung (2 Tiden) der Farbfleck im Zentrum noch vorhanden, aber nach 2 bis 3 Tagen endgültig verschwunden war. Bei einem Drittel aller Fälle war die Umlagerung infolge stärkerer Wasserbewegung (Wellen bei Windstärke 5—6 Beaufort) so groß, daß der Farbfleck nach einmaliger Überflutung praktisch verschwunden war. Allerdings konnte auch dann die Verlagerung noch bestimmt werden, da die Ausbringungsstelle zusätzlich markiert war und bei der Auszählung auf einer Zählplatte unter dem Binokular die Farbsandkörner noch nachzuweisen waren.

Das Ergebnis wurde in einem polaren Koordinatensystem mit Linien gleicher Farbsandhäufigkeit (Zahl der Körner/cm²) aufgetragen.

Dieses Verfahren gibt Hinweise auf Ausbreitung und Umlagerung des oberflächigen Sedimentes innerhalb eines räumlich sehr begrenzten Gebietes und einer sehr kurzen Zeit (1—3 Tage).

1.3 Luminophore Leitstoffe

Um am Nordstrand von Norderney die Bewegungsrichtung einer Plate zu bestimmen, wurde mit „Sudanrot-A“ (benzollöslich) gefärbter Sand benutzt. Diese Farbe fluoresziert bei der Bestrahlung mit Quarzlicht.

Der gefärbte Sand wurde als Farbstreifen in der Größe von 15×1 m auf der Oberfläche der Plate ausgebracht. Nach zwei Tagen war der Farbstreifen mit dem Auge nicht mehr erkennbar. Infolge der Fluoreszenz des Sudanrot-A konnten die gefärbten Körner auch noch nach sieben Tagen in den Sandproben, die auf einer Glasplatte ausgebreitet waren und von unten mit Quarzlicht bestrahlt wurden, nachgewiesen werden. Die Häufigkeit der Farbkörner (Zahl der Körner/Gramm Probematerial) wurde ausgezählt, woraus auf die Transportrichtung geschlossen werden konnte.

Dieses Verfahren ist geeigneter als das vorher beschriebene, jedoch ist seine räumlich und zeitliche Anwendung ebenfalls begrenzt.

1.4 Radioaktive Leitstoffe

s. Abschnitt B 3

2. Mittelbare Methoden

2.1 Morphologische Untersuchungen

Die Formen der Küsten mit ihren Stränden, Watten, Flußmündungen, Wattströmen und Vorstränden sind dauernden Veränderungen unterworfen. Aussagen über Entwicklungstendenzen ermöglichen Vergleiche von Karten, die zu verschiedenen Zeiten auf Grund von Vermessungen gefertigt worden sind. Historische Karten sind mehr oder weniger zufällig überliefert worden. Die ältesten für unsere Betrachtungen verwertbaren Karten reichen etwa bis 1500 zurück.

Um den Ablauf der Formänderungen erkennen zu können, sind systematische Vermessungen erforderlich. Diese werden am Strand und auf den Watten sowohl nivellitisch als auch photogrammetrisch durchgeführt. Beide Meßverfahren sind auf Gebiete beschränkt, die dauernd oder zeitweilig vom Wasser freigegeben werden. Durchsichtiges Wasser (Ostsee) ermöglicht die Erfassung des Vorstrandes bis etwa 5 m Wassertiefe. Größere Wassertiefen müssen gelotet werden.

Die Messungen werden um so wertvoller, wenn möglichst große, zusammenhängende Küstengebiete möglichst gleichzeitig gemessen werden können (Vorteil der Luftbilder).

Für eine zutreffende Deutung der morphologischen Entwicklung eines Küstenabschnitts sind mehrere vergleichbare (möglichst gleichwertige) Küstenkarten notwendig.

Die Meßgenauigkeit der Nivellements an den Stränden und auf den Watten entspricht der der normalen Landvermessung. Die Höhenänderungen werden aus dem Vergleich zweier zeitlich nacheinander gemessenen Zustände ermittelt und lagegetreu in den Höhenlinienplan der Erstvermessung übertragen, dann werden die Linien gleicher Höhenänderungen gezeichnet. In dem so entstandenen „Differenzenplan“ sind Auftrag- und Abtragflächen mit Höhenmaß versehen, die sich in Nordfriesland aus den Wathöhenänderungen eines etwa 20jährigen Zeitraumes ergaben. Der Differenzenplan hat einen qualitativen Aussagewert.

Eine quantitative Untersuchung (Massenbilanz) von Hundt unter Verwendung von Höhendifferenzen im Gebiet der Eidermündung steht vor dem Abschluß. Eine solche Untersuchung setzt die Erfassung eines in sich geschlossenen Gebietes (physiographische

Einheit) voraus. Die Grenzen solcher Gebiete richtig zu bestimmen, stößt besonders nach der freien See hin auf Schwierigkeiten.

In den Flußmündungen, Wattinnen und tieferen Vorstrandgebieten werden die Bodenformen durch Lotungen gewonnen. Die Topographie zu zwei verschiedenen Zeiten übereinander gezeichnet, läßt den „Tiefenänderungsplan“ entstehen. Auch hierbei wird von dem ältesten oder älteren Plan ausgegangen. Dieses Verfahren wurde z. B. im unteren Tidegebiet der Elbe für einen Zeitraum von 20 Jahren angewandt, um die Sandumlagerung in den Stromrinnen und auf den Platen zu bestimmen. Das zu untersuchende Gebiet wird in kleine Einzelflächen aufgeteilt, deren Veränderungen für sich berechnet und dann summiert werden. Die Schwankungen der Zu- und Abnahme konnten mit den Windverhältnissen in der Außen-Elbe (Differenz der West- und Ostwindkomponente am Feuerschiff „Elbe I“) in Beziehung gesetzt und eine befriedigende Übereinstimmung gefunden werden. In gleicher Weise wurde vorgegangen, um innerhalb des Riffgürtels vor Norderney, der durch den West-Ost-Transport des Sandes zwischen den Ostfriesischen Inseln Juist und Norderney entsteht, die Verlagerungsgeschwindigkeit der Sandbänke zu bestimmen.

Die transportierte Sandmenge, die z. B. dem Strand der Insel jährlich zugeführt wird, läßt sich daraus nur aproximativ schätzen, weil der Transport über die Grenzen des untersuchten Gebietes (Zu- und Abfuhr) unberücksichtigt bleibt.

Im Gegensatz zu den Tiefenänderungsplänen, in denen nur zwei topographische Zustände gegenübergestellt werden, ist es möglich, in „Zeitwegplänen“ den zeitlichen Ablauf einer Entwicklung — allerdings nur in einem Punkt oder Profil — darzustellen. Zeitwegpläne haben sich dort wertvoll erwiesen, wo aus einer längeren Beobachtungsreihe die Entwicklungstendenz abgeleitet werden soll, z. B. für einen Rinnenquerschnitt, ein Strandprofil o. ä. Zweckmäßig ist meistens, die sich stark ändernden Werte auszugleichen, um periodische Vorgänge in der Sandzufuhr, dem Sandverlust u. ä. erkennen zu können.

Entzerrte Luftbildpläne wurden vom gesamten deutschen Küstengebiet der Nord- und Ostsee in den Maßstäben 1 : 10 000 bis 1 : 25 000, z. T. auch bereits durch Wiederholung der Luftbildmessungen, hergestellt. Der Luftbildplan gibt im Gegensatz zur Land- oder Seekarte eine vorzügliche Übersicht über die Morphologie besonders der amphibischen Küstenabschnitte, weil alle Formen bis in die feinsten Verästelungen aufgenommen werden. Der Luftbildplan gibt deshalb sehr wertvolle Hinweise auf die hier herrschende Dynamik.

2.2 Hydrographische Untersuchungen

Wenn irgendwelche Eingriffe in den natürlichen Sandhaushalt an der Küste vorgenommen werden sollen, so ist eine umfassende Kenntnis über die Änderung der Morphologie und der diese Änderung bewirkenden Kräfte eine notwendige Voraussetzung für den Erfolg einer Maßnahme. Die Kräfte sind ursprünglich kosmischer (Gezeiten) und meteorologischer (Stürme) Art; sie verursachen horizontale und vertikale Bewegungen des Wassers.

Über die horizontalen Wasserbewegungen im Küstenbereich geben Strömungsmessungen wertvolle Aufschlüsse. Die Entwicklung der Meßverfahren hat von der punktförmigen Einzelmessung an einem Tage über die Gruppenmessung zur synoptischen Messung an 10 und mehr Stationen gleichzeitig über 2—3 Wochen geführt. Auf dieser Weise wurden Meßwerte erzielt, die ohne Umrechnung unmittelbar miteinander vergleichbar sind; denn die Messungen fanden unter den gleichen meteorologischen, hydrologischen und hydrographischen Bedingungen statt.

Synoptisch werden auch an möglichst vielen Stellen der Küste laufend die Wasserstände registriert. Für Sonderuntersuchungen wurden in das stationäre Netz noch weitere Behelfspegel eingeschaltet, so daß dieses Beobachtungsmaterial Einblicke in die Gefällunterschiede während des Ablaufes einer Sturmflut oder einzelner Tiden unter verschiedenen Wetterbedingungen ermöglichte.

Die morphologischen und hydrographischen Untersuchungen werden aus Gründen der Zweckmäßigkeit auf einen einheitlichen Horizont, nämlich auf Normal-Null (NN) der Landesaufnahme, bezogen. Dadurch können örtliche und auch zeitliche Unterschiede unmittelbar, d. h. ohne Umrechnung zahlreicher Werte, erkannt werden. Dies erleichtert eine zutreffende Deutung der Vorgänge.

2.3 Petrographische Untersuchungen

Um die Umlagerung der Sande im Seengebiet vor Norderney und auf der Insel zu untersuchen, wurde eine große Anzahl von Proben bearbeitet. Das untersuchte Meeresgebiet unterliegt wechselnden Strömungseinwirkungen, während auf dem Westteil der Insel durch menschliche Eingriffe die natürlichen Verhältnisse stark verändert worden sind. An petrographischen Untersuchungen wurden ausgeführt:

a) Korngrößenanalysen zur Unterscheidung von

Feinstfraktion	< 0,06 mm
Feinfraktion	0,06—0,10 mm
Mittelfraktion	0,10—0,20 mm
grober Mittelfraktion	0,20—0,25 mm
Grobfraktion	> 0,25 mm

b) Schwermineralabtrennung aus Sandproben mit dem Scheidetrichter, wobei als Trennflüssigkeit Bromoform mit dem spezifischen Gewicht 2,816 g/cm³ verwendet wurde. Die Schwerminerale wurden nach Reinigung und Trocknung zu mikroskopischen Präparaten verarbeitet und unter dem Polarisationsmikroskop unterschieden und ausgezählt nach:

1. Erze
2. Granate
3. Trübe Minerale
4. Restminerale

c) Bestimmung der Rundung an Erz- und Granatkörnern, wobei kantige, mehr oder weniger gerundete sowie vollkommen gerundete Erzkörner unterschieden wurden. Die Granate wurden als kantige oder vollkommen gerundete Körner ausgezählt.

d) Bestimmung der Ätzwerte der Granate durch mikroskopische Betrachtung und Trennung in

1. nicht oder kaum angeätzte Granate,
2. mehr oder weniger angeätzte Granate und
3. stark angeätzte Granate.

e) Bestimmung der Sedimentfarbe der Fraktion 0,10—0,20 mm und Unterscheidung nach

1. helle bis mittlere Graufärbung
2. rötliche bis bräunliche Färbung,
3. grau mit rötlich-braunem Anteil und
4. grau mit grünlichem Anteil

Sämtliche Analysenwerte mit Ausnahme der Korngrößen wurden in Lageplänen durch Signaturen dargestellt, deren Auswertung auf die Verteilung und Bewegungsrichtung des Sandmaterials schließen ließ. Als Ergebnis konnten die Haupttransportrichtungen des Sandes im Seegebiet vor der Insel (Bild 11) und die Phasen der Dünenentwicklung (Bild 12) bestimmt werden.

Das Verfahren, bisher nur an gezeitenfreien Küsten angewandt, erscheint brauchbar, in Verbindung mit kartographischen Untersuchungen qualitativ eine Vorstellung des Sandtransportes zu geben.

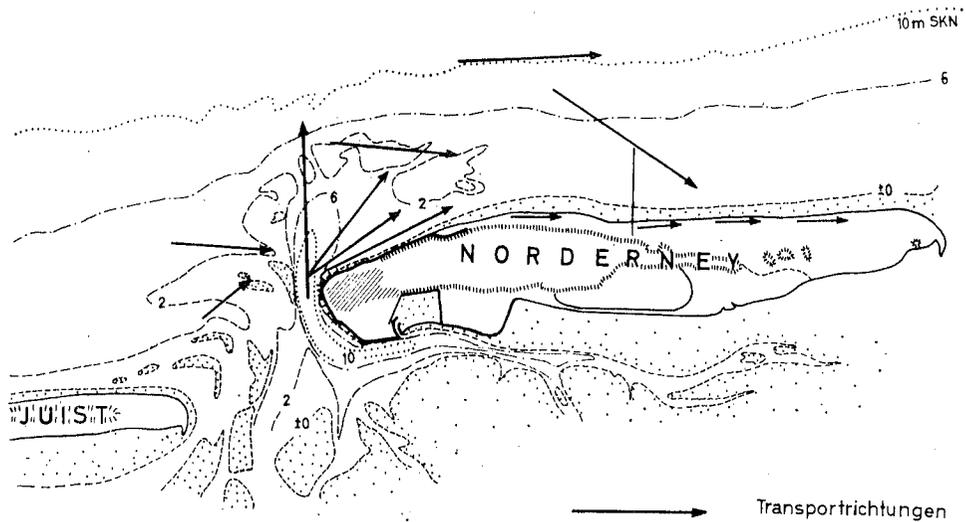


Bild 11
Haupttransportrichtungen des Sandes vor Norderney

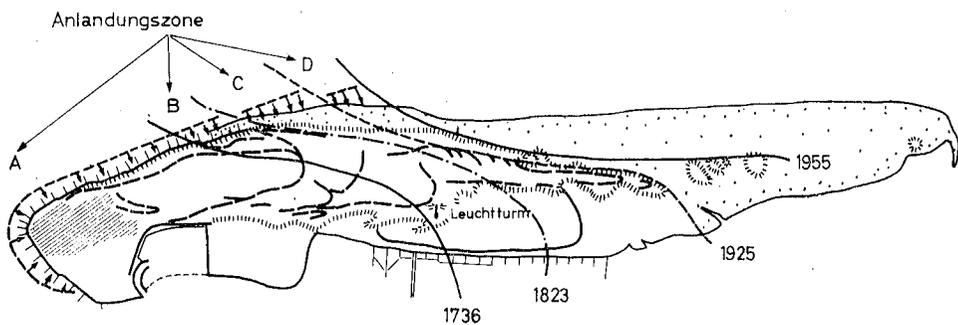


Bild 12
Phasen der Dünenentwicklung auf Norderney

2.4 Biologische Untersuchungen

2.41 Schilluntersuchung

Die Wanderwege der Muschelschalen (Schill), einerseits die der vorherrschend im Wattenmeer lebenden Tiere in seewärtiger Richtung und andererseits die der in der

offenen See lebenden Formen in das Wattenmeer hinein, wurden verfolgt und daraus Schlüsse auf den Transport von Sandmaterial auf der Meeressohle gezogen. Derartige Untersuchungen wurden im Seegebiet von Norderney und in der Außen-Ems unternommen. Mit dem 0,1 m² Bodengreifer nach VAN VEEN wurden an einer Vielzahl von Stellen des Untersuchungsgebietes Bodenproben entnommen. An schillarmen Stellen mußte eine Dredsche benutzt werden, die, über Grund geschleppt, eine größere Materialausbeute ergab.

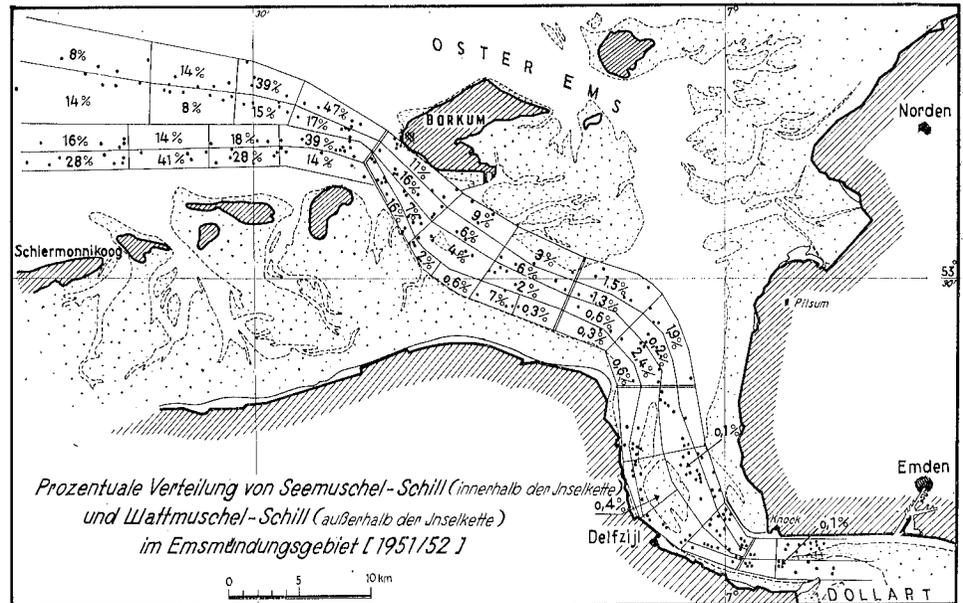


Bild 13

Prozentuale Verteilung von Seemuschel- und Wattmuschelschill im Ems-Mündungsgebiet (1951/52)

Ausgezählt wurden neben den leben Muscheln nur die im Gesamtschill vorhandenen, einwandfrei bestimmbaren Muschel-Einzelklappen, soweit diese mit guter Eindeutigkeit als rezent angesehen werden konnten. Das Untersuchungsgebiet wurde entsprechend der morphologischen Gestaltung in Bezirke unterteilt, auf die jeweils eine genügend große und somit prozentuale Angabe rechtfertigende Menge an Muschelschill entfiel. So wurden für die Emsmündung 335 Grundproben ausgewertet und insgesamt 58 157 Muscheleinzelklappen bestimmt (Bild 13). Aus der Veränderung der Anteile von See- oder Wattmuscheln von Bezirk zu Bezirk kann die Verfrachtungsrichtung festgelegt werden (Bild 14).

Die aus der Schillverfrachtung abgeleiteten Transportrichtungen des Sandes an der Meeressohle stimmen gut mit denen überein, die aus anderen Untersuchungen ermittelt wurden. Das Ergebnis wird subjektiv durch die Auswahl der Muschelarten und die Aufteilung des Untersuchungsgebietes beeinflusst. Anzustreben ist daher die Einbeziehung möglichst vieler Muschelarten und die Aufteilung des Gebietes in möglichst viele Einzelflächen.

2.42 Biologische Wattuntersuchung

Die flächenmäßige Kartierung der tierischen und pflanzlichen Lebensgemeinschaften, die das bei Tideniedrigwasser trockenfallende Watt besiedeln, gibt Hinweise auf Veränderungen der oberen Sedimentschicht. Untersucht werden der Besiedlungs- und Erhaltungszustand und die Besiedlungsdichte der Lebensgemeinschaften. Schlüsse auf Abtra-

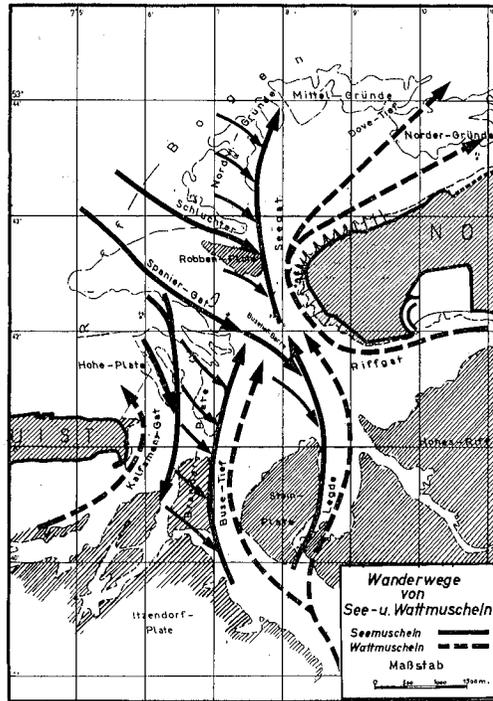


Bild 14

Wanderwege von See- und Wattmuscheln im Norderneyer Seegat

gungen oder Aufhöhungen geben die Tierarten und deren Wohntiefe im Boden, Staffelungs- und Verfestigungsgrad der Wohnröhren bestimmter Würmer sowie Wandinkrustierungen, Freispülung bestimmter Muscheln, Totengesellschaften usw. Kennzeichnende Lebensgemeinschaften auf dem Watt an der Nordseeküste sind:

a) *Scoloplos*-Variation:

Scoloplos-Siedlung: Tiefe Lage im Watt, meist direkt an der Niedrigwasserkante. Sediment sandig, dauernden Umlagerungen unterworfen. Trockenfallzeit nicht über 30 %. Boden gut durchlüftet. Oberflächenrippelung.

Arenicola-Siedlung: Sandiger Boden ohne Schlickbeimengungen, meist bis in die Nähe der MTnw-Linie reichend. Trockenfallzeit nicht über 50 %. Gute Durchlüftung. Oberflächenrippelung.

b) *Arenicola-Variation:*

- Arenicola-Siedlung: Sandiger Boden mit Feinsand- bzw. Schllickbeimengungen, der keinen großen Umlagerungen mehr unterworfen ist. 1,0—2,0 m über MTnw. Keine Oberflächenrippelung. Boden noch instabil. Oxydationszone 3—5 cm tief. Trockenfallzeit bis 60 %.
- Cardium-Siedlung: Siedlungen in allen Wattgebieten, da die Trockenfallzeit im Verein mit der Nahrungskonkurrenz nur eine Rolle für die Dichte der Siedlung spielt. Oberfläche durch Siedlungsspuren kenntlich. Oxydationszone 3—5 cm tief. Boden darf keinen zu großen Umlagerungen ausgesetzt sein.
- Pygospio-Siedlung: Lagerungsbeständiges Sediment. Meist in höheren Lagen. Nicht sedimentabhängig, aber Sandkomponente bevorzugt. Von Trockenfallzeit unabhängig.
- Lanice-Siedlung: Im gesamten Watt, dicht bewohnte Siedlungen aber nur im unteren Teil Bevorzugung größerer Sedimentes durch Larven.

c) *Mya-Variation:*

- Mya-Siedlung: Bestandbildende Siedlungen in stark schllickhaltigem, lagestabilem Sediment, daher meist in höheren Lagen. Unabhängig von Trockenfallzeit.
- Corophium-Siedlung: Unabhängig von Wasserbedeckungszeit. Schllicksandiges Sediment, meist höhere Lage. Reiche Besiedlung durch viele Arten.

d) *Corophium-Variation:*

- Corophium-Siedlung: An lagestabilen, schllickreichen Stellen. Unabhängig von Wasserbedeckungszeit. Als häufige Begleitform nur Nereis und Mya.
- Nereis-Siedlung: Schllickiges Sediment sehr unterschiedlicher Zusammensetzung. Unabhängig von Wasserbedeckungszeit. Schlechte Bodendurchlüftung. Besiedlung extremer Lokalitäten.
- Heteromastus-Siedlung: Weicher, lagebeständiger Schllick in allen Lagen. Von Wasserbedeckungszeit unabhängig. Resistenz gegen Verunreinigungen. Oberfläche durch Kothaufen gekennzeichnet.
- Scrobicularia-Siedlung: Siedlungen eng lokal begrenzt, in schllickigem Sediment. Von Wasserbedeckungszeit unabhängig. Bis zur Hochwasserlinie.

e) *Epibiosen:*

- Mytilus-Bank: Auf lagestabilem Schllick nahe MTnw-Linie. Großer Einfluß auf Sediment.
- Zostera-Wiese: Meist auf lagebeständigen hohen Wattflächen. Bodenbeeinflussend.
- Verlandungsregion: Lange Trockenfallzeit. Großer Einfluß auf das Sediment.

Ausgedehnte Wattflächen wurden untersucht und die Verteilung der Lebensgemeinschaften kartographisch dargestellt. Die Auswertung ergab eine Aussage über die Entwicklungstendenz des untersuchten Gebietes (Auf- oder Abtrag, Verlagerung von Watt-rinnen usw.).

Zum Verfahren ist zu bemerken, daß es gegenwärtig auf andere Weise nicht möglich ist, durch eine nur einmalige Untersuchung zu Aussagen über die morphologische Entwicklungstendenz eines Wattes zu kommen. Das Verfahren gewinnt an Bedeutung, besonders nachdem es im gewissen Umfange gelungen ist, den subjektiven Einfluß auf den Befund auszuschalten.

3. Beobachtung der Sandbewegung mittels radioaktiver Leitstoffe

3.1 Verfahren

Bei der Untersuchung der Sandwanderung mittels radioaktiver Leitstoffe haben sich hauptsächlich 2 Methoden für die Beimischung des radioaktiven Nuklids zum Geschiebe herausgebildet:

- a) die Inkorporationsmethode, bei der sandkornähnliche Partikel, die das radioaktive Element enthalten, verwendet werden und
- b) die Anlagerungsmethode, bei der das radioaktive Element meist durch chemische Bindung an Sandkörner angelagert wird, die dem Untersuchungsgebiet entnommen sind.

Der Anlagerungsmethode wurde aus folgenden Gründen der Vorzug gegeben:

- (1) Für die Verwendung des Geschiebes, dessen Wanderung bestimmt werden soll, werden sämtliche Unterschiede hinsichtlich Kornform, spezifischem Gewicht usw. vermieden.
- (2) Durch eingehende Versuche ist von uns nachgewiesen worden, daß das radioaktive Material mit ausreichender Haftfähigkeit an den Sand angelagert werden kann.
- (3) Es lassen sich ohne Schwierigkeiten beliebig große Mengen Untersuchungsmaterial herstellen.
- (4) Die Herstellungskosten für den Untersuchungsstoff werden bei dieser Methode am niedrigsten, da lediglich das zu aktivierende Material in den Reaktor gebracht werden und eine verhältnismäßig nur kleine Menge radioaktiven Stoffes auf dem meist langen Wege vom Reaktor zum Versuchsort befördert werden muß.
- (5) Störstrahlungen durch die Aktivierungen von Verunreinigungen werden vermieden.

3.2 Auswahl des Nuklids

Von den heute bekannten über 1000 instabilen Nukliden eignen sich nur wenige für den beabsichtigten Zweck. Die Strahler haben folgenden Forderungen zu entsprechen:

1. Die Halbwertszeit darf nicht zu kurz sein, weil sonst hohe Anfangsaktivitäten verwendet werden müssen, was einen erheblichen Aufwand an Schutzmaßnahmen erforderlich macht, und weil andererseits das schnelle Abklingen der Strahlung eine erfolgreiche Beobachtung in Frage stellt. Andererseits darf die Halbwertszeit nicht zu groß sein, da sonst eine lang anhaltende Infizierung des Beobachtungsobjektes eintritt und die Wiederholung eines Experimentes verhindert. Die geeigneten Halbwertszeiten liegen etwa zwischen 20 und 80 Tagen.

2. Gamma-Strahlung muß die vorherrschende sein; ihre Energie soll möglichst niedrig liegen. Als obere Grenze wird 0,6 MeV als zweckmäßig angesehen.
3. Das verwendete Element muß biologisch neutral sein, es darf nicht incorporiert, d. h. als Bestandteil in ein Körperorgan eingebaut werden. Sollte es von einem Lebewesen mit der Nahrung aufgenommen werden, so besteht die Sicherheit, daß es auf schnellstem Wege über den Magen-Darmkanal wieder ausgeschieden wird. Besondere Vorkehrungen sind ggf. gegen das Einatmen radioaktiven Staubes zu treffen.

γ -Energie und Halbwertzeit verschiedener radioaktiver Isotope

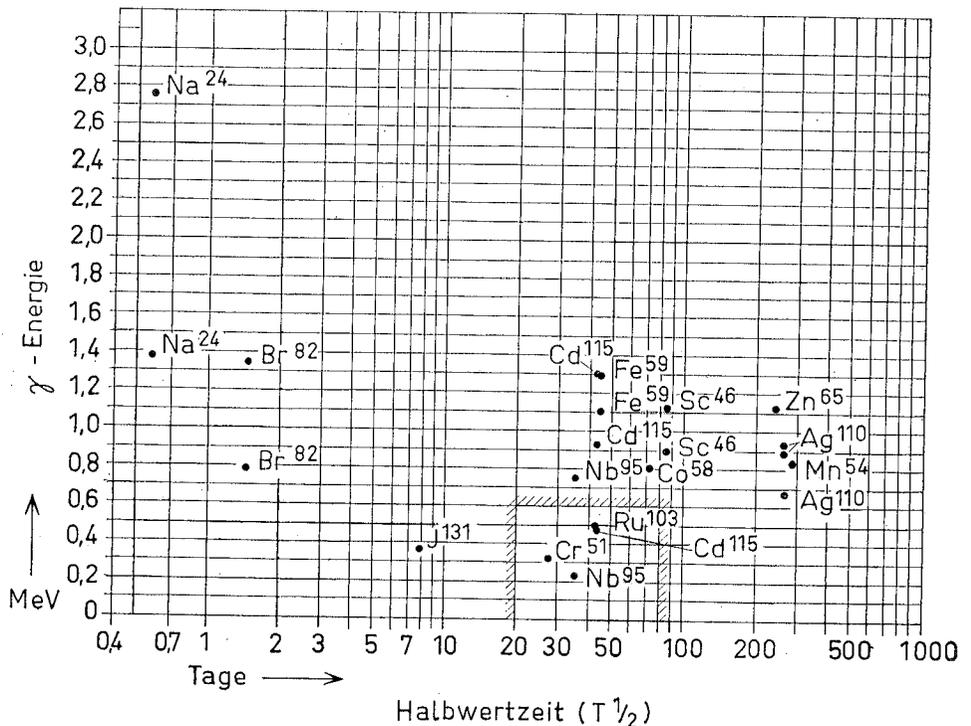


Bild 15

γ -Energie und Halbwertzeit verschiedener radioaktiver Isotope

In Bild 15 sind bisher bei Strömungs- und Sandwanderungsuntersuchungen verwendete sowie weitere erforderlichenfalls in Betracht zu ziehende Nuklide nach der Größe ihrer Halbwertzeit und der Energie ihrer γ -Strahlung dargestellt. Aus diesem Bilde gehen auch die günstigen Eigenschaften des von uns bisher verwendeten Cr⁵¹ hervor. Es hat eine Halbwertzeit von 27,8 Tagen und eine γ -Energie von 0,32 MeV. Es ist in metallischer Form leicht und preiswert zu bekommen. Die Darstellung läßt erkennen, daß außer Cr⁵¹ auch Ru¹⁰³ in dem gezogenen Toleranzbereich liegt. Ebenso liegt Nb⁹⁵, dessen Energiespektrum eine Strahlung mit 0,75 MeV enthält, mit einer Halbwertzeit von 42 Tagen nicht ungünstig. Co⁵⁸ könnte auch in Betracht gezogen werden. Cd¹¹⁵ mit einer Halbwertzeit von 43 Tagen ist erheblich energiereicher und damit ein harter Strahler. Weiterer Untersuchungen bedarf noch die biologische Wirksamkeit dieser Stoffe, sowie der Einfluß ihrer chemischen Eigenschaften.

3.3 Herstellung radioaktiver Partikel

Wie bereits ausgeführt, wird die Aktivierung des Materials nach der Anlagerungsmethode durchgeführt. Die radioaktive Komponente wird also von außen auf das Korn aufgebracht, ohne dessen Form zu verändern. Zwei Hauptforderungen sind an eine derartige Methode zu stellen:

- (1) Es soll möglichst viel Aktivität am Korn adsorbiert bzw. an das Korn gebunden werden.
- (2) Die gebildete Schicht soll möglichst abriebfest sein.

Da die Bildung eines bestimmten Nuklids an Sand oder Schlack ein chemischer Vorgang ist, läßt sich kein allg. gültiges Arbeitsverfahren angeben. Die zu wählende Methode muß sich vielmehr nach den chemischen Eigenschaften des Nuklids und des zu aktivierenden Materials richten.

In den meisten Fällen ist es erforderlich, die einzelnen Körner des Materials zunächst mit einer besonderen Schicht zu umgeben, die die Bindung des radioaktiven Nuklids erhöht. Schichten aus Agar-Agar oder Natrium-meta-Silikat sind für Sandkörner verwendet worden. Dabei hat das meta-Silikat den Vorteil, besonders oberflächenaktiv und abriebfest zu sein. Einzelne Aktivierungsvorschriften sind in der Literatur bereits in hinreichendem Umfange angegeben. (Siehe z. B. Schulz-Ströhl, Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen).

3.4 Messung der Radioaktivität im Gewässer

Die Wanderung des gekennzeichneten Materials läßt sich mit Hilfe der emittierten Strahlung durch Verwendung geeigneter Sonden verfolgen. Dabei gelangen zwei Sondentypen zur Anwendung:

- (1) Großflächenzählrohre für härtere γ -Strahlung
- (2) Szintillationssonden für weichere γ -Strahlung

Anzahl und Größe der Sonden richtet sich nach der Art des Versuches. So wird man z. B. in einer rel. engen Flußmündung mit einer Tauchsonde auskommen. Werden dagegen Messungen im offenen Meer durchgeführt, so sind mehrere Sonden, die ev. in einem Meßschlitten fest eingebaut sind, erforderlich. Das auch vor allem deshalb, weil die stärkere Strömung im freien Gewässer eine entsprechende schwere Halterung der Sonden erfordert, um diese stets in konstanter Höhe über Grund zu halten.

Die Registrierung der aufgenommenen Impulse, die ein Maß für die jeweils vorhandene Aktivität sind, wird mit geeigneten Zählgeräten durchgeführt. Für orientierende Messungen reichen Verstärker mit automatischer Mittelwertanzeige aus. Diese Instrumente können gleichzeitig mit einem Schreiber versehen werden, der die Impulsrate kontinuierlich aufzeichnet. Im allg. werden die Messungen von Bord eines Meßschiffes aus durchgeführt. Gleichzeitige Registrierung der Wassertiefe und des Kurses sollte daher möglich sein.

Neben der Mittelwertanzeige ist die Einzelimpulszählung zweckmäßig. Das vor allem immer dann, wenn bestimmte Punkte besonders gründlich untersucht werden müssen. Ein entsprechendes Zählgerät mit elektronischer Anzeige läßt sich der Mittelwert-Schreiber-Anordnung ohne weiteres anfügen. Es kann aber auch der Fall eintreten, daß Küstenstreifen oder Sand- und Wattflächen bei Ebbe durch Begehung vermessen werden müssen. In diesen Fällen sind tragbare Geräte erforderlich, die möglichst klein und handlich und gegen Witterungseinflüsse widerstandsfähig sein müssen.

Eine weitere Vervollkommnung der meßtechnischen Ausrüstung stellt die Anwendung eines Einkanaldiskriminators dar, der in die vorhandene Meßanordnung eingebaut werden kann. Da es sich bei der verwendeten Aktivität nur um monoenergetische γ -Strahlung handelt, läßt sich mit einem solchen Gerät durch entsprechende Einstellung der Kanallage eine Art von Filter schaffen, das nur diese spezielle Strahlung hindurchläßt. Es ist also auf diese Weise möglich, von vornherein nur die Strahlung zu messen, die von der verwendeten Leitsubstanz stammt.

Vor Beginn der Versuche muß der Nulleffekt im Beobachtungsgebiet genau vermessen werden. Er ist bei der späteren Auswertung der Versuche in Abzug zu bringen.

3.5 Strahlenschutz

Für die Durchführung derartiger Versuche ist ein absolut sicherer Strahlenschutz für Mensch und Tier die Hauptvoraussetzung. Entsprechende Überlegungen sind bereits bei der Versuchsplanung anzustellen. Die Auswahl des radioaktiven Leitstoffes muß so getroffen werden, daß ein Minimum an Gefährdungsmöglichkeiten besteht.

Es sind daher nach Möglichkeit Nuklide mit niedriger biologischer Halbwertszeit und geringer Energie zu verwenden. Besonders nachhaltige Maßnahmen sind während der Präparation des Sandes oder Schlicks zu beachten: Das Arbeitspersonal muß durch ausreichend dicke Schutzschichten aus Blei oder Beton vor der direkten Strahlung geschützt sein. Alle Hantierungen müssen mit Greifwerkzeugen durchgeführt werden. Das offene Präparat darf auf keinen Fall verspritzt oder direkt mit der Oberhaut in Berührung gebracht werden. Natürlich darf auch keine Inkorporation erfolgen. Für das Personal sind daher auch Schutzanzüge aus Kunststoff oder dergleichen erforderlich. Während aller Manipulationen muß die Dosisleistung ständig mit einem Meßinstrument kontrolliert werden.

Entstehen flüssige oder feste Abfallstoffe, so müssen diese in geeigneten Behältern an einem geschützten Platz abgestellt werden, bis die Aktivität über mindestens 10 Halbwertszeiten abgeklungen ist. Erst danach dürfen diese Reste entfernt werden. Sämtliche Anzüge, Zangen, Behälter usw., die bei der Arbeit verwendet werden und noch merkliche Aktivität aufweisen, müssen ebenfalls sicher abgestellt werden. Der Transport des aktivierten Materials bis zum Ausbringort muß in strahlensicheren Behältern erfolgen. Auch hierbei ist Sorge zu tragen, daß kein Material verlorengeht. Die erforderlichen Sicherheitsabstände müssen bei allen Manipulationen wie z. B. Umfüllen, Entleeren usw. eingehalten und mit einem Meßinstrument überprüft werden. Die radioaktive Komponente muß am ausgebrachten Material völlig unlöslich sein, damit eine Inkorporation durch Seetiere mit Sicherheit ausgeschlossen ist.

Versuchsort und -zeit müssen so ausgewählt werden, daß die Anlagerung von aktivem Material an Badestrände unterbleibt. Wird trotz aller Vorsichtsmaßnahmen bei der Vorbereitung oder beim Versuch selbst aktives Material in gefährdender Weise verbreitet, so ist das betreffende Gebiet für einen entsprechenden Zeitraum zu sperren.

3.6 Berücksichtigung der bewegenden Kräfte

Um feststellen zu können, inwieweit die sich zeigenden Wanderungstendenzen charakteristisch für den Normalzustand sind, oder ob diese das Ergebnis einer besonderen hydrographischen Lage darstellen, müssen die die Sinkstoffe bewegenden Kräfte, im wesentlichen Seegang und Strömungen, während der Versuchszeit laufend beobachtet werden. Während für die Strömungen Dauermeßgeräte in Form von Schaufelrädern zur Verfügung stehen, sind Wellenmeßgeräte für Dauerbeobachtungen noch stark in der Entwicklung. Zwischen Strömungen und Tidehub bzw. Steig- oder Fallgeschwindigkeit

bestehen in Tidegewässern meist gute Zusammenhänge, so daß diese an Pegeln leicht zu beobachtenden Werte als Maßstab genommen werden können. Beim Seegang, für den Dauermessungen fast ganz fehlen, muß man sich mit visuellen und mit Windangaben behelfen. Im übrigen werden häufiger wiederholte Versuche mit Leitstoffen einen besseren Einblick in die Zusammenhänge verschaffen.

Einen ersten Überblick über die Strömungsverhältnisse gibt ein Vergleich des während des Beobachtungszeitraumes aufgetretenen mittleren Tidestiegs und Tidefalls mit dem mittleren Tidehub. So wurden z.B. folgende Werte bei einer unserer Untersuchungen festgestellt:

Im Beobachtungszeitraum	Abweichung vom langj. Mittel (3,64 m) in %	
	Tidestieg	Tidefall
1	2	3
Mittelwert	+ 1,9	+ 1,9
Höchster Wert	+ 13,5	+ 15,4
Niedrigster Wert	- 10,4	- 16,5

Für die mit Schaufelrädern in diesem Zeitraum gemessenen Geschwindigkeiten ergaben sich die in Bild 16 dargestellten Beziehungen zwischen den mittleren und den maximalen Flutstromgeschwindigkeiten und dem Tidestieg, sowie zu den entsprechenden Ebbstromgeschwindigkeiten und dem Tidefall. Die Darstellungen lassen deutlich die Unterschiede an den 3 Beobachtungsstationen I, II und III erkennen.

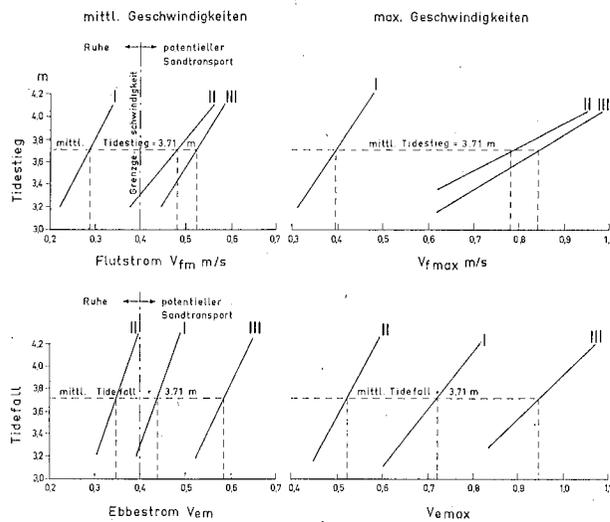


Bild 16

Strömungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Tidehub

Die Bilder 17 und 18 zeigen die Ergebnisse einer Untersuchung der Häufigkeitsverteilung für die verschiedenen Geschwindigkeitsklassen und der daraus entwickelten Dauerlinien. Wird die kritische Geschwindigkeit, die für den Gewässergrund an der

untersuchten Stelle etwa 0,4 m/s betragen dürfte, in die Darstellungen eingetragen, so erkennt man die Ausdehnung des Bereichs des potentiellen Sandtransports und seiner Abgrenzung gegen den Ruhebereich.

Diese Untersuchungen müssen noch weiter vertieft werden, besonders in den Fällen, in denen die Kenterung der Strömungen nicht mit Thw oder Tnw zusammenfällt. Hierbei wird die Tidestieg- bzw. Tidefallgeschwindigkeit mit einer geeigneten Dimension (m/h oder cm/min) verwendet.

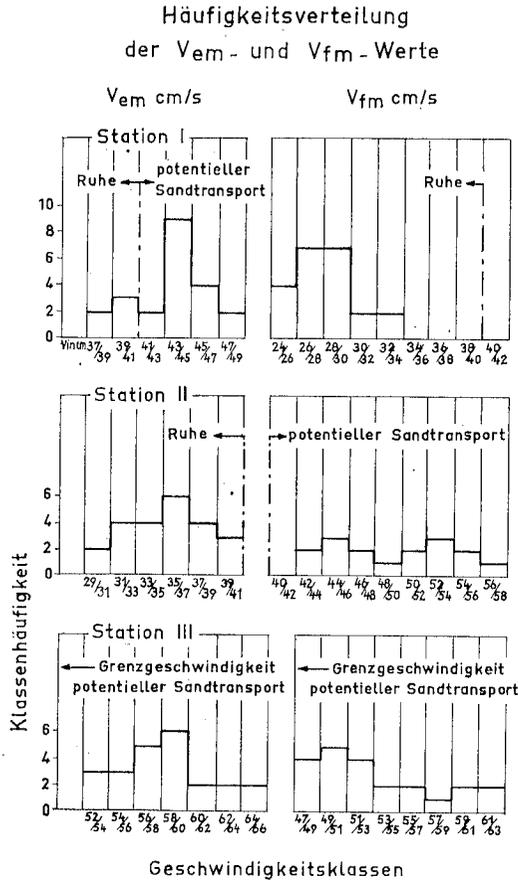


Bild 17

Häufigkeitsverteilung einzelner Geschwindigkeitsklassen

Für die Charakterisierung der Wellenbewegung sind Verfahren noch in der Entwicklung, deren Meßwerte von den verwendeten Geräten abhängen. Wird der vertikale Weg eines Punktes der Wasseroberfläche gemessen, so wird die Bewegung in Meter in einem bestimmten Zeitraum (z. B. 10 min) angegeben. Man kann auch eine feste Weggröße annehmen (z. B. 100 Meter) und die Zeiten messen, in denen dieser Weg zurückgelegt wird. Bei Wellenmeßgeräten, die nach dem Beschleunigungsprinzip arbeiten, werden Beschleunigungssummen in einem gleichbleibenden Zeitabschnitt gemessen. Sollte ein Wellenpegel mit radioaktiven Strahlungen zum Einsatz gelangen, so wird die Intensitäts-

summe der Strahlungen je Zeiteinheit als Maßstab dienen. Grundsätzlich wird also nicht die Einzelwelle, sondern ein Summenwert als Charakteristikum verwendet werden, da es notwendig ist, die Wellenbewegung für einen längeren Zeitraum zu bestimmen; nur so kann ihr Einfluß auf die Verlagerung der Sandmengen erkannt werden.

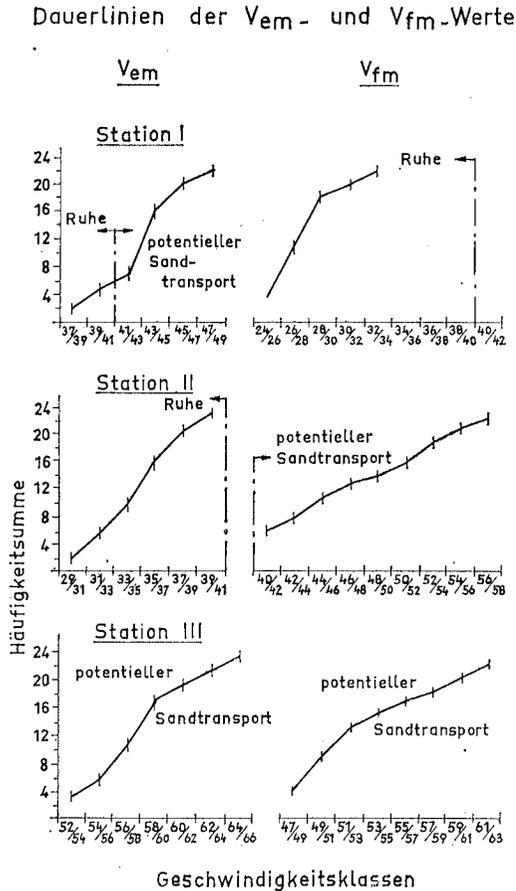
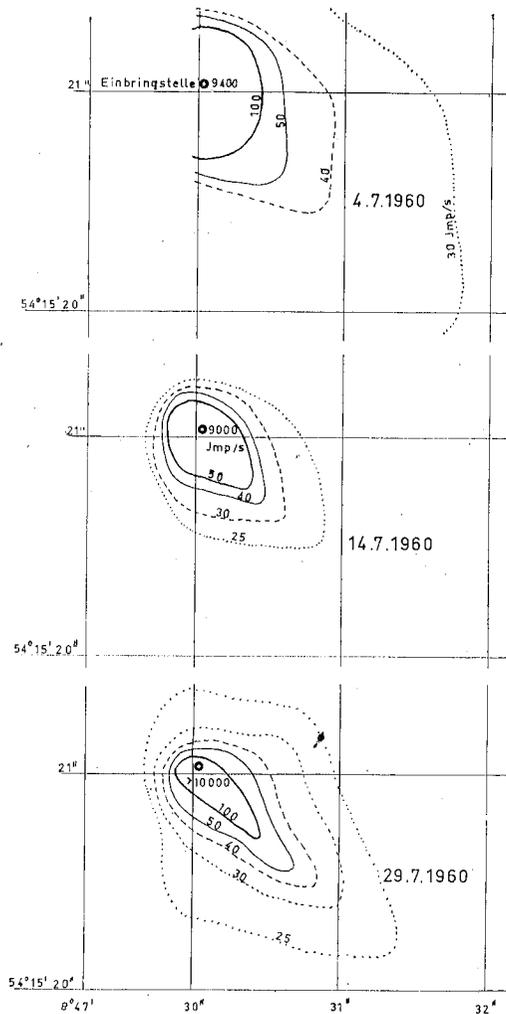


Bild 18
Dauerlinien der Geschwindigkeitsklassen

3.7 Darstellung der Meßergebnisse

Bei der Untersuchung von Gewässern, bei denen die Breitenausdehnung gegenüber der Längenausdehnung vernachlässigt werden kann, wird die Darstellung im wesentlichen auf einen Zeit-Wegplan hinauslaufen. Ist die Breitenausdehnung zu berücksichtigen, so werden die Ergebnisse in Isolinien dargestellt. Aus dem Verlauf und dem Wert der Linien gleicher Aktivität, die in besonders für jeden Zeitpunkt gefertigte Lagepläne eingetragen werden, lassen sich eingehende Aufschlüsse über die vermutliche Wanderung der Feststoffe gewinnen. Sobald die Versuchsdauer einen wesentlichen Teil der Halbwertszeit überschreitet, muß die Abnahme der Strahlungsintensität berücksichtigt werden, um vergleichbare Ergebnisse zu erhalten.

Die Bilder 19 bis 21 zeigen die Ausbreitung radioaktiven Sandes auf einer Wattfläche der Eidermündung in der Zeit vom 4. 7. bis 29. 7. Das Material war am 27. 6. eingebracht worden. Die Linien lassen deutlich die Hauptwanderungsrichtung nach Südosten erkennen.



Bilder 19 bis 21

Ausbreitung des radioaktiven Sandes auf einer Wattfläche

3.8 Bisherige Ergebnisse

Mit Hilfe der ausgeführten Untersuchungen konnte bisher folgendes allgemein erkannt werden:

Baggerstellen, besonders wennn sie in stromlosen Nebengewässern oder im Stromschatten liegen, ziehen Sinkstoffe mit großer Kraft an.

In weiträumigen Gewässern hat man es sinkstofftechnisch gesehen mit einem System von Erosions-, Sedimentations- und Durchzugsgebieten zu tun. Es scheinen keine ausgeprägten Transportbeziehungen in Form von festen Sinkstoffströmen zu bestehen, die ein bestimmtes Erosionsgebiet mit einem bestimmten Sedimentationsgebiet verbinden. Vielmehr wird der im Wasserstrom bewegte Sinkstoff in dem Umfange an den Sedimentationsstellen ausgeschieden, wie er der „Anziehungskraft“ der betreffenden Stelle unterliegt.

3.9 Schlußbetrachtung

Das geschilderte Verfahren befindet sich noch in seinen Anfängen. Wichtig ist eine Verbesserung der Empfindlichkeit der verwendeten Detektoren. Sodann muß versucht werden, möglichst zu einer quantitativen Aussage zu gelangen, wozu ein Vordringen in die 3. Dimension notwendig ist.

C. Modelluntersuchungen

1. Allgemeines

Bei Regelungen von Tideflüssen, Flußmündungen und bei Sicherungen abbruchgefährdeter Küstenstrecken interessieren nicht nur die möglichen oder zu erwartenden Veränderungen der allgemeinen hydraulischen Größen, sondern zugleich der damit verbundene Einfluß auf die Geschiebe- und Schwebstoffverteilung und die Morphologie der Flußsohle oder des Strandquerschnittes. Sowohl mit Modellversuchen im geeigneten Maßstab als auch bis zu einem gewissen Grade mit Rechenverfahren sind heute qualitative und quantitative Voraussagen über die Veränderungen hydraulischer Größen durch bestimmte Ausbau- und Regelungsmaßnahmen im Tidegebiet möglich. Die erforderlichen Eingangswerte zum Bau und Betrieb von hydraulischen Tidemodellen (Peilungen der Flußsohle, Tidekurven von mehreren Schreibpegeln, Angaben des Oberwasserzuflusses und Strommessungen im Untersuchungsgebiet) können mit verhältnismäßig geringem Aufwand beschafft und die Meßwerte durch die Ähnlichkeitsmechanik mit hinreichender Genauigkeit auf die Natur umgerechnet werden. Sobald allerdings die für derartige Modelle übliche feste Modellsohle durch eine bewegliche ersetzt und morphologische Vorgänge an der Gerinnesohle nachgebildet oder untersucht werden sollen, besteht zwischen Modell und Natur keine mathematische Ähnlichkeit und somit keine quantitative Übertragungsmöglichkeit. Außerdem ist bei den feinen Sanden der deutschen Tideflüsse und Küstenstrecken ein starker Materialtransport in Suspension vorhanden, der sich wegen des unterschiedlichen turbulenten Austausches in Natur und Modell nicht nachbilden läßt. Trotz dieser Schwierigkeiten werden aber dennoch Versuche mit beweglicher Modellsohle gemacht, weil die Naturvorgänge in vielen Fällen weitgehend unklar sind und auch qualitative Ergebnisse — bei entsprechend vorsichtiger Ausdeutung und Übertragung auf die Natur — für die Beurteilung und Ausführung von Regelungsmaßnahmen wertvolle Hinweise und Anregungen geben können. Selbstverständlich sollte man jedoch mit dem Begriff der „qualitativen Naturähnlichkeit“ vorsichtig sein, wenn Vergleichsmöglichkeiten mit der Naturlösung wegen mangelnder Kenntnis der Naturvorgänge im allgemeinen oder in einem besonderen Falle nicht gegeben sind.

Für den sinnvollen Betrieb von Geschiebemodellen ist deshalb die Beschaffung der Eingangsgrößen — vor allem Aussagen über die Sandwanderung — wesentlich aufwendiger und auch schwieriger als bei rein hydraulischen Modellen. Bis heute ist die genaue Messung der Geschiebebewegung an der Sohle eines Naturgerinnes nicht möglich; die in Suspension beförderten Mengen kann man zwar durch die üblichen Schweb-

stoff-Fanggeräte erfassen, jedoch sind derartige Messungen sehr aufwendig, wenn z. B. in einem bestimmten Querschnitt eines Stromes zu einem bestimmten Zeitpunkt der Sinkstoffgehalt in einem hinreichend dichten Punktnetz erfaßt werden oder gar eine Messung über eine ganze Tide hinweg ausgeführt werden soll.

Auf die größte Schwierigkeit bei der Bestimmung des Geschiebetransportes in der Natur und auch im Modell soll hier nur kurz eingegangen werden: auf die gleichzeitige Messung der Geschiebe- und Schwebstoffbewegung. Es ist allgemein bekannt, daß beide Bewegungsarten, also der Transport von Feststoffen an der Gerinnesohle und der in Suspension — vor allem bei höheren Strömungsgeschwindigkeiten — nicht klar gegeneinander abgegrenzt werden können. Wie schon gesagt, kann bis heute die Geschiebebewegung an der Sohle in der Natur nicht genau gemessen werden. Im Modell ist dies wegen der viel kleineren Massen über einfache Geschiebefänge jedoch möglich. Das gleiche gilt für die Sandwanderung an Küstenstrecken, die wegen der erwähnten meßtechnischen Schwierigkeiten in ihren Grundvorgängen bis heute verhältnismäßig unerforscht ist.

Die mathematische Behandlung der Schwebstoff- und Geschiebebewegung bezieht sich in fast allen bisherigen Ansätzen auf stark vereinfachende Annahmen (stationäre und gleichförmige Strömung, Gleichgewicht im Feststofftransport) mit eindimensionaler Berechnungsgrundlage. Da keine dieser Annahmen im Tidegebiet und in Flußmündungen zutrifft, sind diese Berechnungsverfahren nur zur Klärung von Grundsatzfragen geeignet.

Im Küstengebiet schließlich sind die physikalischen Zusammenhänge zwischen der Sandwanderung und den hydraulischen Vorgängen (Triff- und Tideströmungen, Wellenangriff und Brandungsströmung) noch verwickelter, weil zur vollständigen Erfassung aller Randbedingungen unbedingt von einem dreidimensionalen Bezugssystem ausgegangen werden muß. Der an den meisten Küstenabschnitten gleichzeitig vorhandene Quer- und Längstransport des Geschiebes sowie die Vorgänge bei der Entstehung einer strandparallel gerichteten Brandungsströmung und die durch Ungleichförmigkeiten der Strände bedingten Rippströmungen und Pulsationen erschweren sowohl jede umfassende mathematische Behandlung als auch allein deren qualitative Beurteilung und Deutung. Die Möglichkeiten von Modellversuchen mit beweglicher Sohle für Küstengebiete oder idealisierte Modell-Strände (Grundsatzversuche) sind deshalb naturgemäß — zumindest im gegenwärtigen Zeitpunkte — beschränkt. In der eigentlichen Sandwanderungszone des Längstransportes, also zwischen der äußeren Brecherlinie und dem Ufer, konnten bisher keine brauchbaren Ähnlichkeitsgesetze entwickelt werden. Wegen mannigfaltiger Schwierigkeiten (Suspensionsgrad des Geschiebes, Energievernichtung beim Brechen der Natur- und Modellwellen, turbulenter Austausch in der Zone der Brandungsströmung), die hier nicht näher dargestellt werden sollen, besteht auch wenig Hoffnung, derartige Übertragungsgesetze, mit denen man praktisch arbeiten kann, jemals zu finden. Wenn dennoch auch Küstenmodelle mit beweglicher Sohle und Untersuchung der Geschiebebewegung hier und da betrieben werden, so liegt das daran, daß

- a) selbst über die grundsätzliche Wirkung verschiedenster Regelungsmaßnahmen an Abbruchküsten (z. B. über den Bau von Strandbuhnen) bis heute noch keine Klarheit besteht und man auf allen nur möglichen Wegen nach Beurteilungsmaßstäben sucht und daß
- b) bei Bauvorhaben an bestimmten Küstengebieten über den unsichersten aller zu berücksichtigenden Faktoren, die Sandwanderung, auch qualitative Aussagen eines Modells im geeigneten Maßstab wertvoll sein können.

Naturmessungen im unmittelbaren Küstenbereich und vor allem in der Brandungszone sind äußerst aufwendig, schwierig und z. T. bis heute nicht durchführbar.

Für die Feststellung der Sandverfrachtung stehen in vielen Fällen nur Tiefenkarten- oder Querschnittsvergleiche zur Verfügung. Wegen der Schwierigkeiten bei der Abgrenzung des Sandwanderbereiches im Küstenvorfeld und dem meist gleichzeitig wirkenden Quer- und Längstransport können aus derartigen Peilvergleichen nur schwer Aussagen über die tatsächlichen Sandumlagerungen und die dabei auftretenden Wanderwege und Wanderzonen abgeleitet werden.

Im Modell lassen sich entsprechende Messungen, auf die noch weiter unten eingegangen wird, selbstverständlich durchführen; ob und wie weit dabei Ähnlichkeit zwischen Modell und Natur besteht, muß gegenwärtig in vielen Fällen zweifelhaft bleiben. Die Möglichkeit zur Messung der Sandwanderung mit Isotopen oder Luminophoren schafft allerdings neue Beurteilungsmaßstäbe.

Auf eine weitere Schwierigkeit, die ganz allgemein bei Modellen für großräumige Tidemündungen zwangsläufig entsteht, muß in diesem Rahmen ebenfalls hingewiesen werden: Die Berücksichtigung der alle Strömungsvorgänge beeinflussenden Corioliskräfte. Im wasserbaulichen Versuchswesen gibt es zwar Verfahren, die auch in dieser Beziehung bis zu einem gewissen Grade Naturähnlichkeit erzielen, z. B. der Bau eines derartigen Modells auf eine drehbare Scheibe; man kann jedoch sagen, daß diese Wege noch in mancher Beziehung schwierig sind.

Im Versuchslaboratorium besteht die Möglichkeit, die grundsätzlichen Vorgänge bei der Geschiebebewegung durch strömendes Wasser, den Transportmechanismus, den Einfluß von Änderungen der Strömungsrichtung oder -geschwindigkeit, vom Salzgehalt und der Temperatur des Wassers im Maßstabe 1:1, allerdings nur mit beschränkter Wassertiefe, zu untersuchen. Derartige Erkenntnisse sind sowohl für die Aufstellung von Untersuchungsprogrammen bei Messungen in der Natur als auch bei der Beurteilung des erforderlichen und hinreichenden Aufwandes wertvoll, besonders wenn es gelingt, Meßwerte mit Rechenverfahren zu verbinden oder durch die Aufdeckung funktionaler Zusammenhänge die Zahl der erforderlichen Messungen zu vermindern.

Zu diesem Zweck wurden im Franzius-Institut für Grund- und Wasserbau der Technischen Hochschule Hannover in den Jahren 1958/59 Grundsatzversuche über allgemeine Probleme der Geschiebe- und Schwebstoffbewegung bei stationärer und instationärer Strömung durchgeführt. Die Versuche wurden von Dr.-Ing. Dillo ausgewertet, ihre Ergebnisse sind in Heft 17 der „Mitteilungen“ des Franzius-Instituts, S. 135 bis 253, veröffentlicht. Im folgenden Abschnitt wird ein kurzer Überblick dieser Arbeit gegeben.

2. Versuche über Geschiebe- und Schwebstoffbewegung in einem Modellgerinne

2.1 Allgemeines

Aufgabe und Ziel der Untersuchung war es, die theoretischen und praktischen Möglichkeiten einer Voraussage der Gleichgewichtsbedingungen des Feststofftransportes im Tidegebiet zu untersuchen und ein möglichst umfassendes Bild der dabei auftretenden Bewegungsvorgänge zu entwerfen. Die Versuche wurden in einem 0,60 m breiten, 1,0 m tiefen und 35 m langen geschlossenen waagrecht umlaufenden Gerinne mit Strömungsgeschwindigkeiten bis zu 1,30 m/s durchgeführt. Als Geschiebe wurden gleichförmige Mittel- und Feinsande der deutschen Nordseeküste verwendet.

Der Vergleich der Versuchsergebnisse mit drei neueren Geschiebegleichungen („Bed load function“ von EINSTEIN, Gleichung von MEYER-PETER und die sogenannte „Regime theory“, ein empirisches Verfahren mit Grundgleichungen von LACEY) läßt für die Vorgänge bei der Schwebstoff- und Geschiebebewegung in Tideflüssen folgende Schlußfolgerungen zu:

2.2 Geschiebebewegung an der Sohle in „Transportkörpern“ (Riffeln oder Bänke)

- a) Jeder Strömungsgeschwindigkeit läßt sich im hinreichend langen stationären Zustand unabhängig von der Ausgangssohle ein bestimmtes Sohlenbild (Form und Größe der Transportkörper) zuordnen.
- b) Wird die Strömungsgeschwindigkeit von einem Wert u_1 auf einen Wert u_2 erhöht, so wird das zu u_2 gehörende Sohlenbild sehr viel schneller aufgebaut, als es bei einer Verminderung der Geschwindigkeit von u_2 auf u_1 wieder auf die zu u_1 gehörende Form zurückgebildet wird.
- c) In einem bestimmten Bereich der Strömungsgeschwindigkeit, der von der Größe und Zusammensetzung des Geschiebes abhängt, bilden sich Riffeln; in einem anderen, klar dagegen abgegrenzten Bereiche Bänke, deren Größenordnung die der Riffel um ein Mehrfaches übersteigt. Der Übergang von einer Transportkörpergröße in eine andere geht sprunghaft vor sich.
- d) Mit zunehmender Geschwindigkeit werden die Höhen der Transportkörper geringer, bis diese schließlich völlig abgeschliffen werden.
- e) Zwischen der mittleren Strömungsgeschwindigkeit u_m und der Wandergeschwindigkeit v_m der Transportkörper besteht eine Beziehung, die durch die Exponentialfunktion

$$v_m = c \cdot u_m^B$$

wiedergegeben werden kann, c und B sind dabei Konstanten, die von der Kornverteilung des Geschiebes abhängen.

- f) Bei der Nachbildung instationärer Tidenströmungen zeigte sich, daß eine mit Transportkörpern bedeckte Gerinnesohle im Laufe einer Tide vollständig umgebildet wird, wenn die Strömungsgeschwindigkeiten sowohl bei Flut- als auch bei Ebbestrom groß genug sind.

In der Natur, z. B. in den deutschen Tideflüssen, ist eine solche Umbildung während einer Tide bei großen Transportkörperformen (Bänken) nicht so eindeutig festzustellen. Unklar ist noch, ob die Bänke in der Natur überwiegend durch kurzzeitig wirkende Geschwindigkeitspitzen des Ebbe- oder Flutstromes in ihrer charakteristischen Form ausgeprägt werden oder nicht. Wenn eine hinreichend genaue Ortsbestimmung gelingt, sollten derartige Untersuchungen am zweckmäßigsten in der Natur durchgeführt werden.

2.3 Bewegung des Geschiebes in Suspension

Die Schwebstoffkonzentration wurde bei den Versuchen durch Entnahme von Proben in einem dichten Punktnetz über den Querschnitt ermittelt. Elektrische Meßverfahren, wie sie heute z. B. bei der Messung der Geschiebefracht in Rohrleitungen möglich sind (Konzentrationsmeßsonden), wurden wegen der Größe des Querschnittes nicht angewendet.

Bei allen untersuchten Modellsanden wuchs der Geschiebetransport ungefähr mit der 4. bis 5. Potenz der mittleren Strömungsgeschwindigkeit. Die Nachrechnung eines Modellfalles nach dem Verfahren von EINSTEIN ergibt unter sonst gleichen Bedingungen, daß der Transport annähernd mit der 4. Potenz der Geschwindigkeit wächst.

Bei Versuchen mit instationären (Tide-) Strömungen zeigte sich, daß eine schrittweise Berechnung der transportierten Geschiebemengen aus den augenblicklichen mittleren Strömungsgeschwindigkeiten wegen des Beschleunigungseinflusses nur eine grobe

Abschätzung der bewegten Gesamtmenge liefern kann. In der Natur kann natürlich auch eine über den gesamten durchflossenen Querschnitt gemittelte Geschwindigkeit die tatsächlichen Verhältnisse eines flachen und breiten Tidestromes nicht richtig wiedergeben. Der oft unternommene Versuch, den Feststofftransport aus einer örtlich gemessenen Strömungsgeschwindigkeit an der Sohle herzuleiten, ist wegen der turbulenten Längsschwankungen, die in Sohlnähe besonders bei topographischen Unregelmäßigkeiten (Bänke) sehr groß sind, unzweckmäßig und nicht hinreichend.

In Sonderversuchen wurde der grundsätzliche Zusammenhang zwischen Geschiebetransport, Wassertemperatur und Salzgehalt des Wassers untersucht. Es zeigte sich, daß mit zunehmender Temperatur und damit abnehmender Zähigkeit des Wassers wegen der größeren Fallgeschwindigkeit der suspensierten Sandkörner die Schwebstoffkonzentration abnimmt. Frühere Versuche von HO PANG YUNG hatten ergeben, daß der Geschiebetransport bei größeren Sanden und damit geringerer Suspensionsdichte mit steigender Temperatur zunimmt. Allerdings wurde bei diesen Versuchen mit größerem Sand und nur mit Strömungsgeschwindigkeiten bis etwa 60 cm/s gearbeitet.

Die Versuche mit verschiedenen Salzkonzentrationen zeigten, daß mit steigendem Salzgehalt bei sonst gleichen Bedingungen die Schwebstoffkonzentration ansteigt.

2.4 Beurteilung der Berechnungsmöglichkeiten und -grundlagen des Sandtransportes im Tidegebiet aufgrund der Versuche

Wenn man berücksichtigt, daß im Tidegebiet einer Flußmündung an jeder Stelle Strömungsrichtung und -geschwindigkeit, Wasserstand, Salzgehalt, Temperatur, Sohlentiefe und auch möglicherweise die Form der Sohle (Transportkörper) ständigen periodischen und aperiodischen Veränderungen unterworfen sind, wird verständlich, daß es bisher nicht möglich war, die Größe des Sandtransportes im Tidegebiet vorauszuberechnen. Läßt man zunächst die besonders schwierigen Verhältnisse des Brakwassergebietes unberücksichtigt, so sollten durch weitere Laboratoriums- und Naturmessungen folgende Fragen näher untersucht werden:

- a) Wie beeinflußt die Sohlenmorphologie (Transportkörper) den Fließwiderstand?
- b) Wie verändern sich diese Widerstände während der Tide?
- c) Welchen Einfluß hat die Beschleunigung des strömenden Wassers während der Tide auf dem Geschiebetransport?

Für praktische Messungen in der Natur wird in der Arbeit von DILLO ein Verfahren angegeben, das die Bestimmung der Geschwindigkeits- und Schwebstoffverteilung in einem senkrechten Schnitt theoretisch schon mit zwei Meßpunkten gestattet. Es wäre somit verhältnismäßig leicht, die Änderungen der Geschwindigkeiten und der Schwebstoffverteilung während einer Tide zu verfolgen und aus diesen Messungen ein Zahlenmaterial zu gewinnen, das Schlüsse auf den gesamten Fließvorgang und die Sandwanderung zuläßt. Voraussetzung dazu ist, daß die Geschwindigkeitsverteilung in dem natürlichen Gerinne mit dem logarithmischen Verteilungsgesetz von v. KARMANN (Konstanten nach KEULEGAN), das auch EINSTEIN⁴⁾ verwendet, hinreichend übereinstimmt und daß sich die Schwebstoffverteilung hinreichend genau durch die von ROUSE⁵⁾ angegebene Gleichung beschreiben läßt. Bei Verwendung eines geeigneten Funktionspapiertes ist die Überprüfung dieser Voraussetzungen auch in der Natur durch einfachen Vergleich der Meß- und Rechenwerte leicht möglich.

⁴⁾ EINSTEIN, H. A.: The bed-load function for sediment transportation in open channel flows. U. S. Dept. of Agri. Techn. Bull. 1026 (1950).

⁵⁾ ROUSE, H.: Modern conceptions of the mechanics of fluid turbulence. Trans. ASCE, Vol. 102 (1937).

3. *Versuche über den Geschiebetrieb an einem idealisierten Modellstrand*

Wie bereits angedeutet, müssen gegen Modellversuche mit beweglicher Sohle für bestimmte Küstenabschnitte der Natur nach dem heutigen Stande unserer Kenntnisse und Möglichkeiten gewisse Bedenken erhoben werden. Für größere Gebiete sind solche Untersuchungen meist nur dann möglich, wenn das Modell verzerrt und der Maßstab so klein gewählt wird ($< 1 : 500$), daß sich die tatsächlichen Wellengrößen nicht mehr nachbilden lassen. Im allgemeinen wird dann auch die geometrische Ähnlichkeit, z. B. die Lage der Brecherzone, nicht mehr voll gesichert sein.

Im Franzius-Institut werden seit einigen Jahren an einem etwa 20 m langen Modellstrand grundsätzliche Versuche über die Wirkung von Seebuhnen durchgeführt. Es wurde dabei teils mit beweglicher und teils mit fester Modellsohle gearbeitet. Feste Modellmaßstäbe werden dabei nicht angegeben, weil sich unter Berücksichtigung aller wirksamen Faktoren für den gleichen Modellzustand durch einfache Vergleiche geometrischer Abmessungen des Strandes und der angreifenden Wellen die verschiedensten Maßstäbe in weiten Grenzen konstruieren lassen.

Es gelang bei den Versuchen, die Wellengrößen, die Korngröße des Geschiebes und die geometrischen Abmessungen des Versuchsstandes so aufeinander abzustimmen, daß bei schrägem Wellenangriff der gesamte Geschiebetransport in Form einer strandparallelen Längswanderung zwischen der Modell-Brecherlinie und dem Ufer verlief. Gemessen wurde der Sandtransport mit Sandfangkästen am Ende des Modellstrandes.

Für die grundsätzliche Beurteilung von Strandbuhnen an abbrechenden Küstenstrecken muß hinreichend bekannt sein, in welchem Bereich die Sand-Längswanderung am stärksten ist. Die Annahme konstanter Verfrachtungsintensität zwischen Brecherlinie und Strandwall ist sicher falsch. Im Modell bewegten sich etwa 70 % der Geschiebefracht im Längstransport im unmittelbaren Bereiche des Riffes längs der Brecherlinie (das Modell ist so ausgelegt, daß nur ein Riff entsteht). Selbstverständlich gilt diese Angabe vorerst nur für die besonderen Randbedingungen (z. B. Korngröße des Geschiebes) des Modells, sie kann nicht unmittelbar auf Naturverhältnisse übertragen werden, solange keine Naturmessungen vorliegen. Es ist deshalb nicht nur für die Praxis, sondern auch für das Versuchswesen äußerst wichtig, solche Meßergebnisse in die Hand zu bekommen.

Die oben beschriebenen Versuche sind noch nicht abgeschlossen, so daß umfassendere Aussagen noch nicht gegeben werden können.