

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 Manövrierhilfen 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 Manöviereigenschaften 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 Manövrierfähigkeit 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
5.3.1 Allgemeines	124
5.3.2 Meßverfahren	125
5.3.3 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.

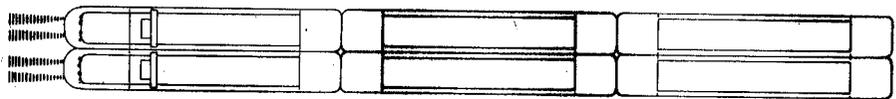


Bild 1

Motorleichter-Schubverband (starre Formation)

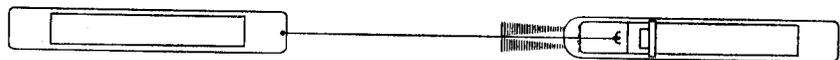
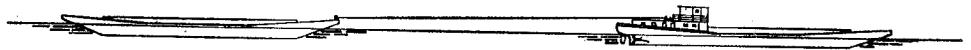


Bild 2

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

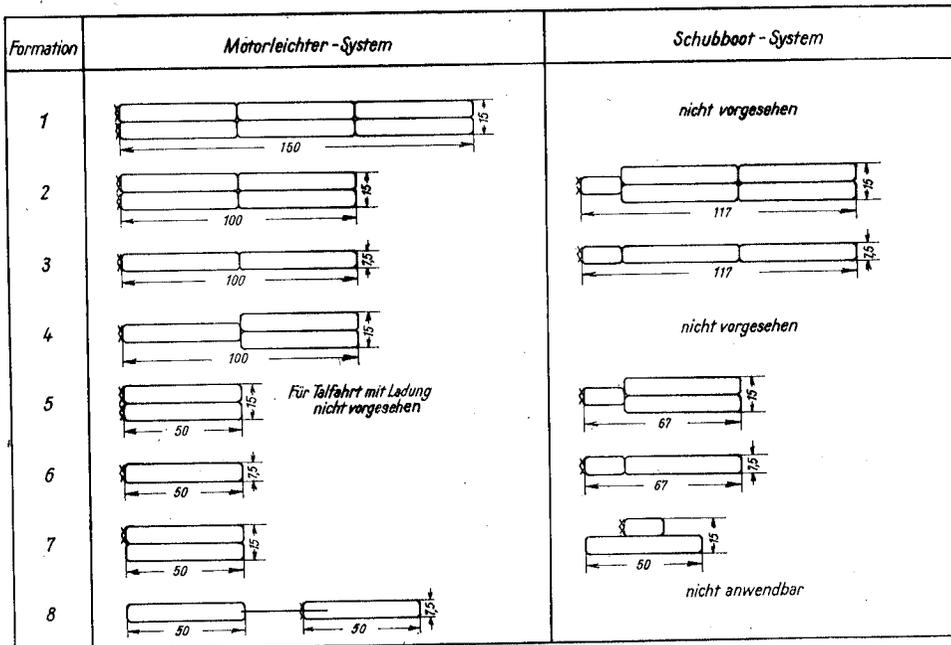


Bild 3

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

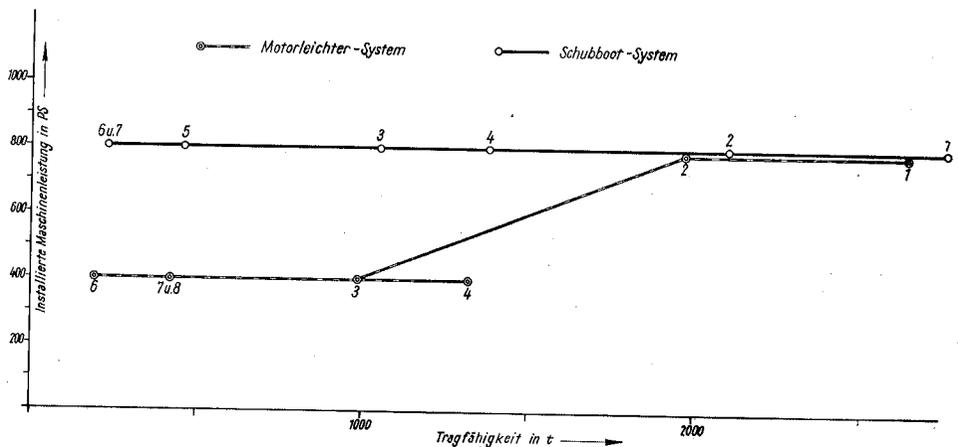


Bild 4

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 Manövrier-eigenschaften 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.

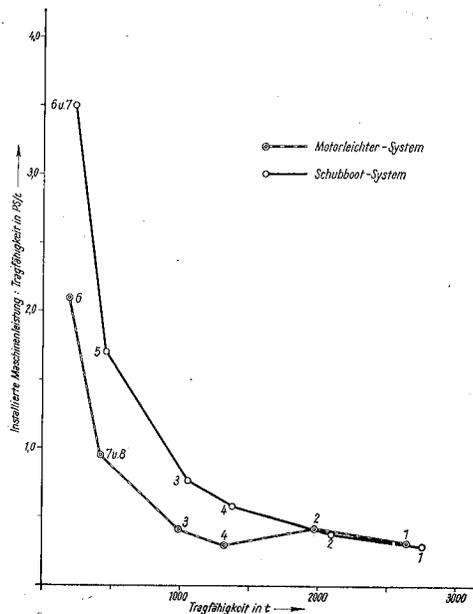


Bild 5

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 Größtabmessungen 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).

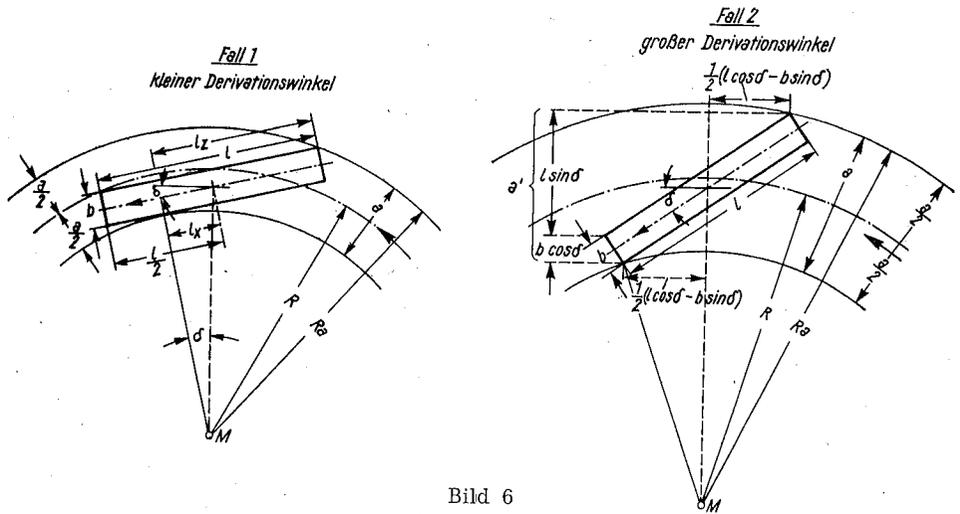


Bild 6
Fahrt durch Krümmungen

Die Formeln für den Fahrstreifen in der Krümmung lauten:

Fall 1

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

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

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

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.

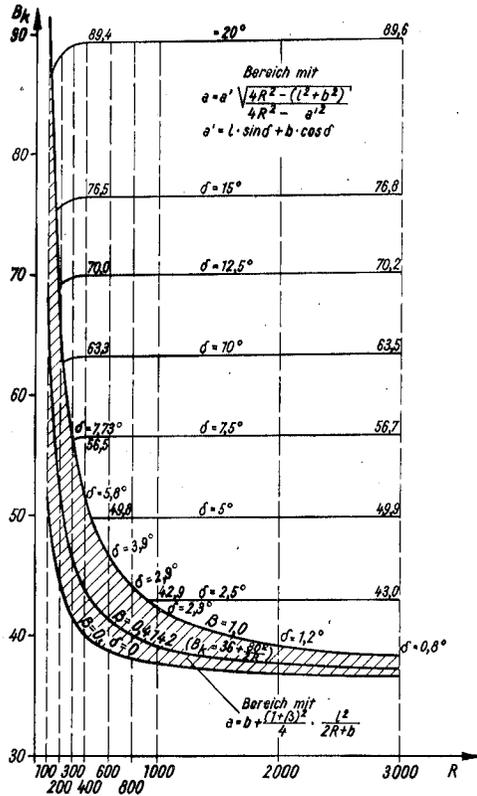


Bild 7

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. Herrenschmidt	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:

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

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

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

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

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.

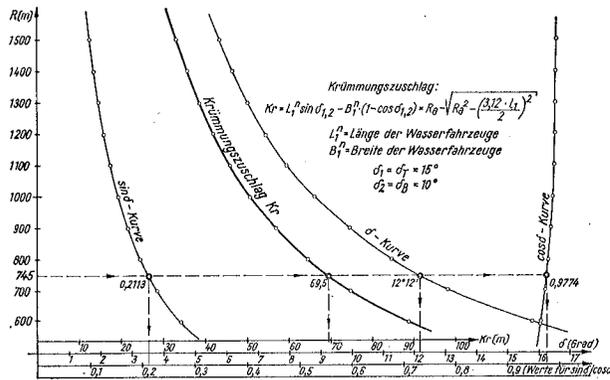


Bild 9

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 $B_v = \frac{80^2}{2 R}$
- Krümmungszuschlag zur Ermöglichung eines probeweisen Verkehrs von kleineren Schubverbänden $B_v = \frac{142^2}{2 R}$
- 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.

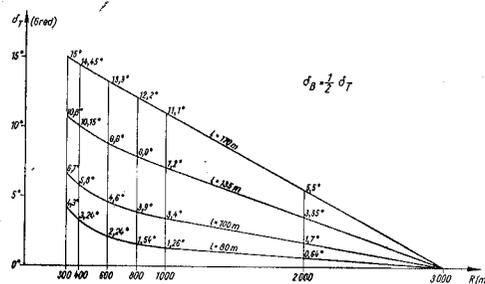


Bild 10

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:

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

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.

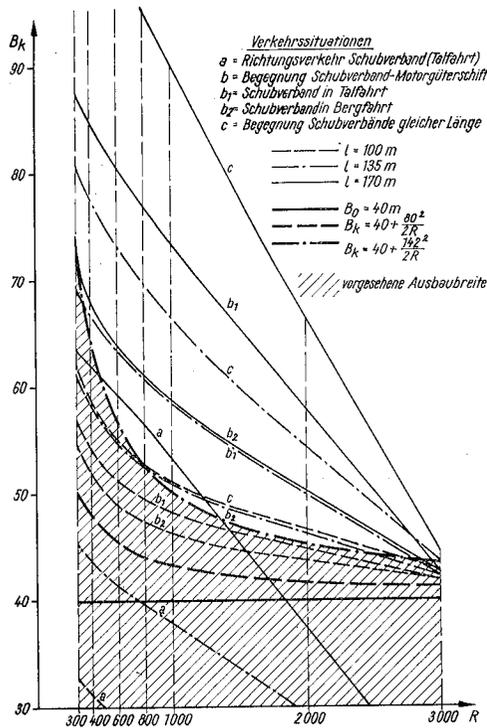


Bild 11

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

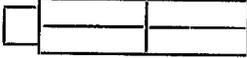
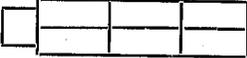
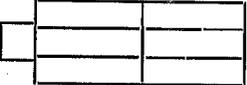
In Abschnitt 2 ist darauf hingewiesen worden, daß bei den Schubverbänden des Typs „Wasserbüffel“ eine Gleichwertigkeit hinsichtlich des Schiffswiderstandes im Vergleich zum Schleppverband erst erreichbar ist, wenn die Gesamtlänge das Maß von 200 m überschreiten könnte. Dieser Vergleich bezieht sich auf 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 Vorfahrt 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 Lateralfäche 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.

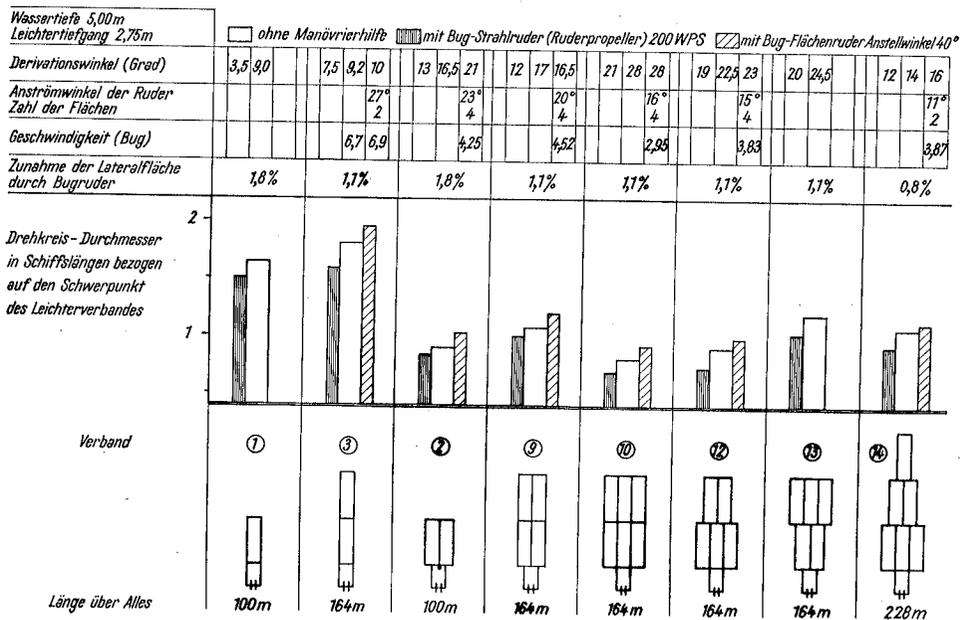


Bild 12

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.

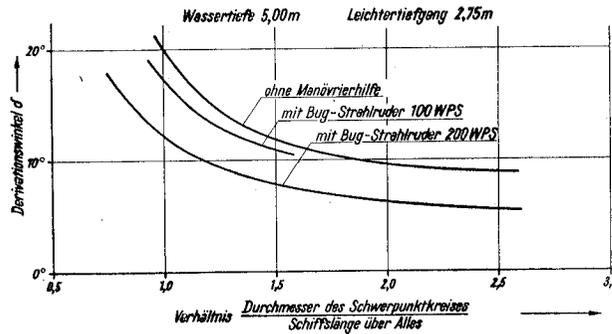


Bild 13

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 Besatzung 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 Besatzung 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 Festmachemöglichkeiten (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 Manöviereigenschaften 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.