

Wellen- und Strömungsbilder im Main-Donau-Kanal

Von Dr.-Ing. E. Schäle

125. Mitteilung der Versuchsanstalt für Binnenschiffbau e.V.,
 Duisburg — Institut an der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule, Aachen

1. Einleitung

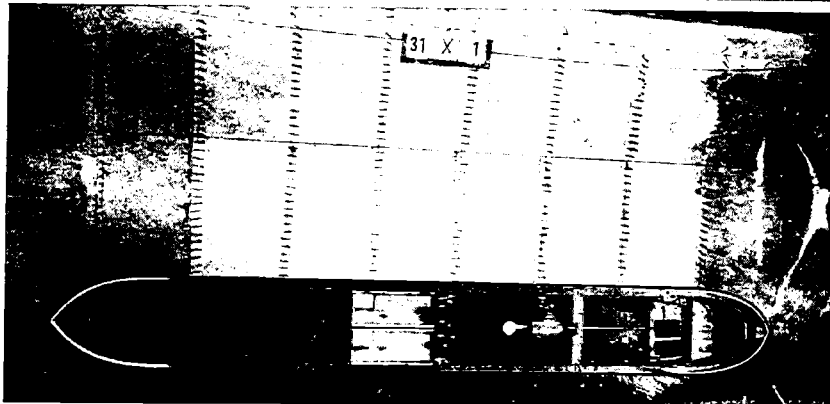
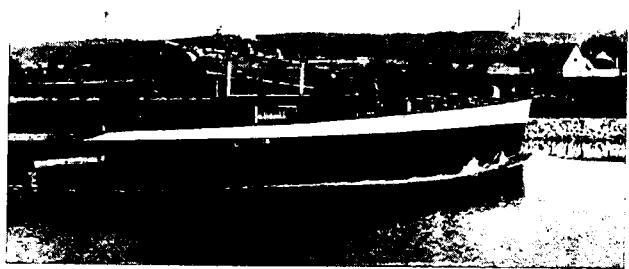
In der 96. Mitteilung der VBD [1] hat der Verfasser die Ergebnisse der Strömungsmessungen veröffentlicht, die in dem ersten fertigen Kanalabschnitt bei Bamberg im Jahr 1967 durchgeführt wurden. Anlaß hierzu waren die bei Modellversuchen im gleichen Kanalquerschnitt für einen Privatkunden beobachteten Eigenarten der Sohlenströmung [2] sowie diesbezügliche Fragen der Rhein-Main-Donau AG hinsichtlich der Standfestigkeit des Kanaldeckwerkes, das in dieser Haltung noch aus Schüttsteinen bestand.

Die qualitativ und quantitativ (vektoriell) dargestellten Meßergebnisse ließen sehr eindeutig den dreidimensionalen Charakter der Strömungsvorgänge erkennen, und anhand der Geschwindigkeiten und Beschleunigungen konnten auch Rückschlüsse auf die mögliche Beanspruchung von Sohle und Böschung gezogen werden. Sie bestätigten vor allem die Richtigkeit der von der Rhein-Main-Donau AG bereits vorher beschlossenen Maßnahme, vor allem Auftragsstrecken mit der notwendigen Dichtung in aufwendigerer Verbundbauweise herzustellen, wobei Asphaltbeton als wesentlichster Baustoff diente [3], [4].

allein für den Verkehrswasserbau und die Schifffahrt zusammengefaßt werden.

2. Modellversuche

Während der für Westhaus (s. nochmals [2]) ausgeführten Modellversuche wurden zur Beobachtung der Sohlen- und



Links: Abb. 1

Oben: Abb. 2

Die Versuchsergebnisse, die vielseitigen Beobachtungen am Rande des Versuchsgeschehens sowie die daraus resultierenden Erörterungen unter dem am Gesamtvorhaben beteiligten Personenkreis führten sehr schnell zu der Erkenntnis, daß die Fragen der Wechselwirkung zwischen Schiff und Kanal unter den Aspekten einer höheren Fahrgeschwindigkeit der größeren, leistungsstärkeren Einheiten sowie der neuen Schiffsrumpfformen und Schiffsverbände noch nicht so umfassend beantwortet werden können, um daraus sowohl für die nautische Sicherheit der Schifffahrt als auch für die dauerhafte Standfestigkeit des Kanaldeckwerkes verbindliche und allgemeingültige Kennzahlen zu bilden.

Gegenstand heftiger Diskussionen während der damaligen Versuchsfahrten war vor allem das bei hohen Fahrgeschwindigkeiten der Motorgüterschiffe kräftig ausgebildete primäre Wellensystem, zu erkennen an der tiefen Wasserspiegelabsenkung sowie an der oft mit Aufstockung versehenen, am Ufer mitlaufenden Heck-Querwelle, die den Übergang zum sekundären Wellensystem kennzeichnet, mit Höhendifferenzen von mehr als einem Meter zwischen den vertikalen Grenzwerten. So fanden auch die Anträge auf Detailuntersuchungen in Karlsruhe und Duisburg bei den zuständigen Ministerien, aber auch bei der Deutschen Forschungsgemeinschaft Gehör, und beiden Versuchsanstalten wurden Mittel bewilligt, um in den Jahren 1970/71 diese spezifischen Fragen einer Klärung näherzubringen.

Da die vorliegenden Versuchsergebnisse quantitativ noch nicht fertig ausgewertet sind, sollen gewissermaßen als Vorbericht zunächst einige qualitative Besonderheiten, vor

Böschungsströmung u. a. auch „Wollfädenkämme“ ausgelegt. Mit diesen konnten nicht nur die Strömungsrichtung, sondern auch die Strömungseigenarten vor allem an Bug und Heck des Modellschiffes erkannt werden.

Dabei zeigte sich eine scheinbar außergewöhnliche Besonderheit am Heck, nämlich **nicht** die erwartete Prallwirkung des Propellerstrahls auf die Kanalsohle, sondern ein Hin- und Nachströmen des gesamten unter dem Schiffsboden im Heckbereich befindlichen Wassers zum Propeller bzw. von achtern her zur unteren Hälfte der Propellerdiskfläche. Eine Fotografie läßt räumliche Vorgänge nur schwer erkennen, trotzdem sieht man in Abb. 1 die Richtung des am Modell vorbeiströmenden Wassers, die auf der Böschung sich abzeichnende Wasserspiegelabsenkung sowie das hin- und aufwärtsströmende Wasser in Richtung Propeller. Der letzte Kamm sowie die Spiegelung zeigen die Heckquerwelle an und lassen zumindest das Ausmaß der „Störung“ vermuten. Ebenso deutlich ist auch die selbst beim Modellversuch schäumend mitlaufende eigenartige Brandungswelle im Bereich der Wasserwechselzone zu erkennen. Die hydrodynamischen Kennzahlen sind hierbei folgende:

Kanalabschnitt	F_K	=	176,00 m ²
Wassertiefe	H	=	4,25 m
Schiffstiefgang	T	=	2,50 m
Querschnittsverhältnis	F_K/A_M	=	7,30
Wassertiefentiefgangsverhältnis	H/T	=	1,80
Fahrgeschwindigkeit	V_s	=	3,23 m/s
Stauwellengeschwindigkeit	c_h	=	5,60 m/s
Geschwindigkeitsverhältnis	V_s/c_h	=	0,58
Froude'sche Tiefenzahl	δ_h	=	0,50

Selbst bei mehrstündiger Beobachtung dieser aus anderweitigen Gründen sich ständig, auch mit noch höheren Geschwindigkeiten wiederholenden Modellfahrten konnte nicht ein einziges Mal aus dem Strömungsbild geschlossen werden, daß sich die Charakteristik ändert bzw. der Propellerstrahl die Sohle unmittelbar trifft, was 1967 auch in Bamberg nachgewiesen werden konnte.

3. Naturgroße Versuche

Durch die der VBD von der Deutschen Forschungsgemeinschaft für 1970 bewilligten Mittel, wofür wir auch an dieser Stelle unseren verbindlichsten Dank aussprechen, sollten vorwiegend die Längs- und Vertikalbewegungen der Böschungswellen ermittelt und ihr Energiegehalt analysiert werden, um daraus später, zusammen mit der Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe, die sich mit der Wellen-Querbewegung befaßt und ein um 90° gedrehtes System untersucht, Kennzahlen für die Festigkeit von Trapez-Kanälen sowie deren Deck- und Filterschichten abzuleiten.

So wurde also das in Bamberg begonnene Versuchsprogramm in der Haltung Hausen des Main-Donau-Kanals fortgesetzt, die seinerzeit bereits in der erwähnten Asphaltbauweise hergestellt worden war und damit auch äquivalente Rauigkeit zum Modellkanal besaß.

Um praxisnahe zu bleiben und auch die verschiedenartigsten „Störungen“ prüfen zu können, wurden die Versuchsfahrten mit 5 Schiffstypen bzw. -verbänden ausgeführt

Gr.-Nr.	Schiffsname	Schiffstyp	Maße (m)	Leistung (PS)
10	FS „Fritz Horn“	kl. Fahrgastschiff	20 × 3,5 × 2,3	280
20	MGS „Zufriedenheit“	Mainschiff	52 × 8,3 × 2,0	375
30	MGS „Concordia“	J. Welker	85 × 9,5 × 2,0	880
40	SB „Metz“	Schubverb. (1 Leichter)	96 × 11,2 × 2,3	940
50	SB „Metz“	Schubverb. (2 Leichter)	172 × 11,2 × 2,3	940

Darüber hinaus mußte jedes Schiff die Meßstrecke von 500 m Länge auf drei Achsen durchfahren, und zwar auf der Kanal-Mittelachse sowie auf der linken und rechten Spur, deren Lage sich aus der gedachten Geometrie der Zweischiffigkeit ergab. Der Abstand der Mittschiffsachse vom Böschungsfuß betrug etwa 6, 13 und 20 m, so wie dies bei freier Navigation zu erreichen war. Entsprechend angebrachte Peilungen erleichterten das Kurshalten, so daß die Abweichungen vom Kurs am Meßort selbst nicht größer als ± 1 m waren.

Weitere Angaben über den Inhalt des Versuchsprogramms und der angewandten Meßtechnik folgen in der diesbezüglichen Veröffentlichung; hier die Wellen- und Strömungsbilder dreier, sich grundsätzlich voneinander unterscheidender Einheiten:

3.1 Schiffstyp „Johann Welker“

Das Versuchsschiff MGS „CONCORDIA“ mit den oben angegebenen Maßen entspricht linienmäßig dem im Haus verwendeten Modell. Leider konnte das Schiff von der Reederei nur mit einem Tiefgang von 2,0 m zur Verfügung gestellt werden, so daß das Wassertiefentiefgangsverhältnis günstiger ausfiel. Dafür erreichte die Geschwindigkeit bei gleicher Antriebsleistung etwas höhere Werte, so daß die durch den Kanalquerschnitt am Schiff vorbeiströmende Wassermenge zeitlich annähernd die gleiche wie im Modellversuch war.

Vergleichszahlen für	T	H/T	V_s	δ_h	NW
Modell	2,5 m	1,8	3,23 m/s	0,50	875 PS
„CONCORDIA“	2,0 m	2,1	3,54 m/s	0,55	880 PS

Abb. 2 zeigt die Fahrt des Schiffes auf Kanal-Mittelachse. Die Kontraste am Ufer lassen erkennen, wie die Spiegelungen, die für Flachwasser typische Wasseroberflächenverformung, hervortreten. Sehr deutlich ist auch die staudruck-

bedingte — wenn auch geringe — Aufhöhung vor dem Bug sowie die ausgeprägte Wasserspiegelabsenkung querab vom Schiff am gegenüberliegenden Ufer zu erkennen.

Besondere Bedeutung kommt der Heckwelle zu, deren Krone zum Ufer hin ansteigt und die Gesetze der Wellenschnelligkeit erfüllt.

Wird die Grundgleichung

$$c = \sqrt{g \cdot h}$$

nach h umgestellt, also

$$h = \frac{c^2}{g}$$

und c durch V_s ersetzt (die Absenkungswelle — vom Schiff erzeugt — läuft ja mit Schiffsgeschwindigkeit über die Strecke), lassen sich, unter der Voraussetzung, daß der Querschnitt mulden- oder trapezförmig ist, die Abstandsbereiche angeben, innerhalb derer ein unterkritischer, kritischer und überkritischer Zustand herrscht. Da der Kanalquerschnitt trapezförmig ausgelegt wurde, ist der kritische Zustand hier bei einer Wassertiefe

$$h = \frac{3,54^2}{9,81} = 1,28 \text{ m}$$

erreicht, und da h zum Ufer hin gegen „Null“ geht, wird die Heckquerwelle am Ufer überkritisch laufen. Im überkritischen Zustand kann sich jedoch keine harmonische Welle halten oder ausbilden, infolgedessen „schießt“ das Wasser am Ufer ebenfalls mit Schiffsgeschwindigkeit. Da



Abb. 3

die Böschung mit der Neigung 1:3 verläuft, müßte der kritische Zustand in einem Abstand von rund 3,8 m zu erkennen sein. Die Vergrößerung Abb. 3 weist dies zunächst qualitativ nach, tatsächlich wurde stets ein größerer Abstand gemessen, der sich rechnerisch bestätigt, wenn die Rückstromgeschwindigkeit mit einbezogen wird. Die Heckquerwelle beginnt also vermutlich in den überkritischen Zustand umzuschlagen, wenn

$$h = \frac{(V_s + V_r)^2}{g}, \text{ hier } h = \frac{(3,54 + 1,16)^2}{9,81} = 2,25 \text{ m}$$

beträgt, was einen Abstand = Breite von rd. 6,75 m ergibt.

Nun ist mit dem Umschlag gleichzeitig natürlich auch eine Beschleunigung der im überkritischen Bereich anstehenden Wassermenge verbunden, denn diese läuft ja mit Schiffsgeschwindigkeit. Der dafür notwendige Impuls bzw. letztlich die Leistung muß das Schiff selbst aufbringen; sie geht also dem Vortrieb verloren. Das führt zu der Kuriosität, daß das Schiff nach Erreichen des beschriebenen Zustandes bei weiterer Steigerung der Motorleistung keinen Geschwindigkeitszuwachs erhält, sondern sogar langsamer wird. Im Modellversuch wurde z. B. der Propellerschub verdoppelt — dabei fiel die Geschwindigkeit vom Maximum aus um ca. 20% ab, ein in der Praxis bekanntes Phänomen, hier quantitativ erklärt!

Die unsymmetrische Fahrt bei gleicher Geschwindigkeit erzeugte auf der Schmalseite eine höhere Rückstromge-

schwindigkeit und somit ein noch weiteres Herausrücken des Umschlagpunktes, wie Abb. 4 veranschaulicht. Die hier mitlaufende „Brandungswelle“ ist aufgestockt und tatsächlich mit den typischen Merkmalen der Meereswellen am Strand vergleichbar. Das sind innerhalb des Kanalquerschnitts Maximalzustände, die für die Festigkeitsbestimmung aufschlußreiches Zahlenmaterial liefern werden.

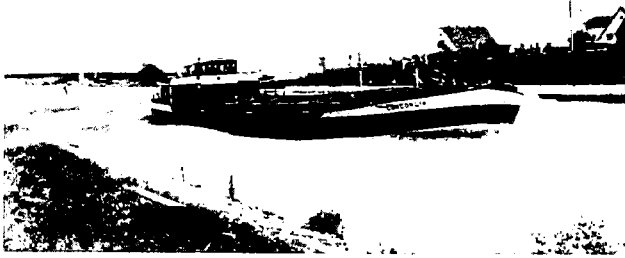


Abb. 4

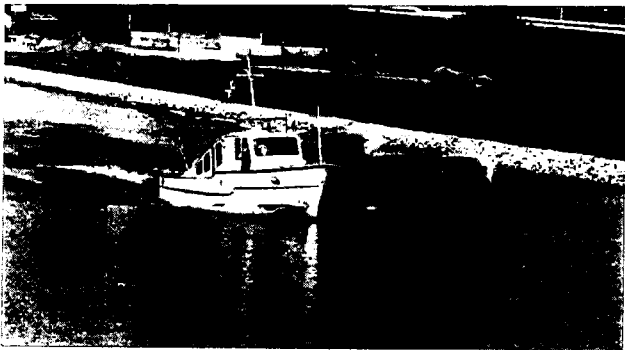


Abb. 5

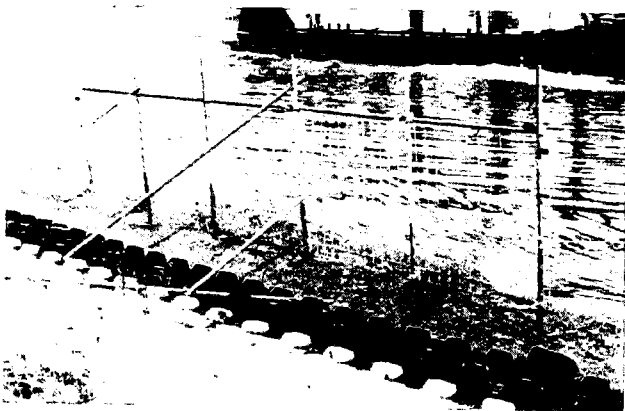


Abb. 6

3. 2 Forschungsschiff „FRITZ HORN“

Wesentlich anders sieht das Wellenbild bei dieser Bootform mit geringem Tiefgang aus; siehe Abb. 5. ($H/T = 4,25$; $V_s = 5,07$ m/s; $\xi_h = 0,786$).

Die relativ hohen Wellen täuschen ähnliche Verhältnisse wie beim MGS vor. Die Messungen zeigten dagegen, daß es sich um reine Oberflächenwellen handelt, die diagonal ablaufen, eine maximale Höhe von nur 0,45 m erreichen, und daß die Wasserteilchen prinzipiell keine Längsbewegung mit Schiffsgeschwindigkeit ausführen. Es bleibt auch in Ufernähe — wenn auch gestörte — Orbitalbewegung. Die Brandung entsteht durch das schräge Auflaufen der Wellenkronen auf die übermäßig rauhe Böschung. Die Fahr-

geschwindigkeit des Schiffes im Kanal ist fast ebenso groß wie die Geschwindigkeit auf flachem, seitlich unbeschränktem Wasser gleicher Tiefe!

3. 3 Schubverband „METZ“

Aus den aufgeführten Berichten der 1967er Versuche ist zu ersehen, daß Schubverbände auch im Kanalprofil andere Wellen- und Strömungsbilder erzeugen als Motorgüterschiffe. Verständlich ist, daß die größeren Längen auch glättende Wirkung ausüben und die völlig andere Triebwerksanordnung maßgebenden Einfluß hat. Die Voraussage, daß dieser Einfluß sehr positiv sein wird, ist vor den damaligen Versuchsfahrten allgemein bezweifelt worden. Erfreulich, daß die Schiffshydrodynamiker Recht behielten und die Schubverbände sogar über das erwartete Maß hinaus günstiger abgeschlossen.

Die Versuche im Jahr 1970 wurden mit größeren Schublechtern, den Typen „EUROPA II“ ($76,5 \times 11,2$ bzw. $11,4$ m) ausgeführt. Aus Vergleichsgründen mit dem MGS wird hier die Ein-Leichter-Formation dargestellt, die nur 11 m länger ist ($SV = 95$ m; $MGS = 84$ m).

Abb. 6 zeigt die Fahrt bei sogar etwas höherer Antriebsleistung, vorbei an einem aus Baustahlgewebe hergestellten Gitter, um gleichzeitig den Nachweis über die geringe Wasserspiegelabsenkung und die relativ „glatte“ Heckwelle zu führen ($H/T = 1,85$; $V_s = 3,7$ m/s; $\xi_h = 4,76$).

Obwohl das Leichterheck bis zur Kimm eine ebene Platte und dort in der Umströmung ein kräftiger Drucksprung nachweisbar ist, führt diese Stelle nicht zu einer ausgeprägten Querwelle. Die Energie geht in die Wirbelschleppe ein, die ihrerseits im oberen Bereich das Triebfahrzeug aufnimmt und diesem sogar einen negativen Widerstand verleiht. Da die Propeller hoch liegen und die Leistung auf beide verteilt ist, scheint die Tiefenwirkung erheblich vermindert zu sein. Außerdem liegen die Propeller auch örtlich nicht wie beim MGS in der Nähe des Druckpunktes, sondern ca. 2 Breiten von diesem entfernt. Es gibt also auch in Längsrichtung gesehen keine Addition der hydrodynamischen Kräfte wie beim herkömmlichen Motorgüterschiff.

Bei dem Zwei-Leichter-Verband sieht es — bedingt durch die fast doppelte Länge — noch etwas günstiger aus. Es entsteht der Eindruck, daß der Schubverkehr überhaupt keine Gefahr für den Bestand künstlicher Wasserstraßen mit sich bringt. Es gibt schon einige Bedenken, doch diese fallen nicht in das Gebiet der Hydrodynamik.

4. Wasserspiegelverformung

Der BAW gelang es, während der 1970er Versuche ein Kamera-Team der TH Karlsruhe zu gewinnen, welches Stereo-Aufnahmen des Heckwellenbereichs der Versuchsschiffe machte und auch die grafische Auswertung vornahm.

Zur Vervollständigung dieses Berichts sowie zum quantitativen Nachweis des Gesagten sind vier Höhengichtlinien-Diagramme — durch Ausstraken von den Oberwellen < 5 cm befreit — und mit einem Längsschnitt über dem Böschungsfuß versehen, beigefügt; Anfänge siehe auch [5].

Abb. 7 zeigt FS „FRITZ HORN“ (vollständig) mit den ausgeprägten Diagonalwellen; Abb. 8 das Wellenbild eines typischen Mainschiffes, das abmessungsmäßig dem MGS-Typ „Karl Vortisch“ ähnelt, aber eine geringere Maschinenleistung aufweist. Den beschriebenen Gegensatz bildet das MGS „CONCORDIA“, Abb. 9, mit der „energiegeladenen“ Heckwelle und ausgleichend zum Schluß mit Abb. 10 der achterliche Bereich eines einspurigen zweigliedrigen Schubverbands.

Literaturangaben für diesen Aufsatz finden Sie auf S. 12

Rechts von oben nach unten:

Abb. 7-10: Höhenlinien der Wasserspiegelverformung im Trapezkanal;
 $\Delta h = 10$ cm

Abb. 7: Fahrgastschiff FS „FRITZ HORN“

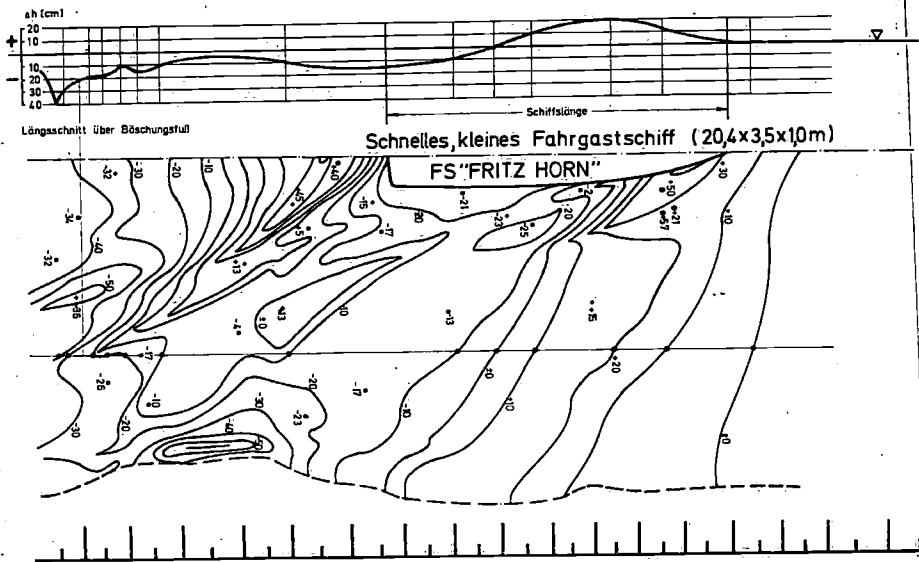


Abb. 8: Motorgüterschiff Typ: „Karl Vortisch“, MGS „ZUFRIEDENHEIT“

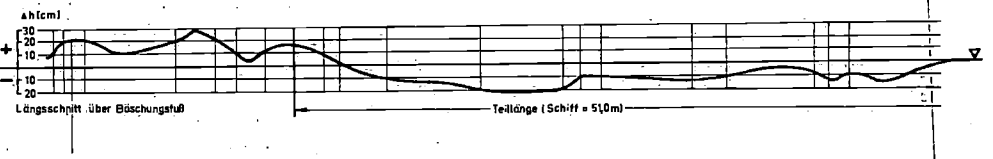


Abb. 9: Motorgüterschiff Typ: „Johann Welker“, MGS „CONCORDIA“

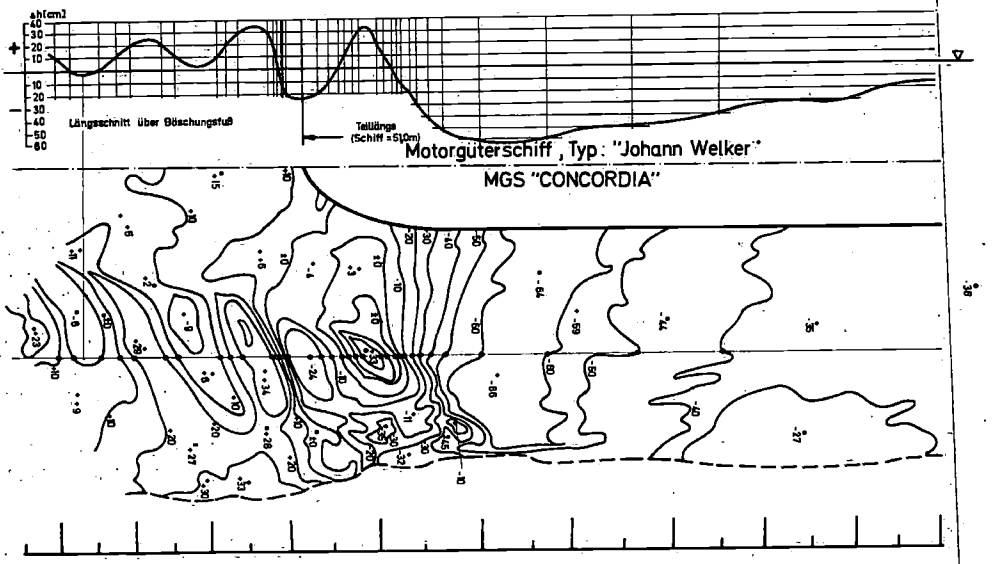


Abb. 10: Schubverband (172 x 11,2 x 2,3 m) bestehend aus Schubboot „METZ“ und 2 Leichtern „Europa II“

