

**ENTWICKLUNG EINES EINLEITUNGS-
BAUWERKES AN EINER BINNENWASSERSTRASSE**

***DEVELOPMENT OF AN OUTFALL STRUCTURE
AT AN INLAND WATERWAY***

von

Tobias LINKE

Antje MÜLLER

Martin DETERT

ABSTRACT

During or after a storm water event with its big amounts of water accumulating in a catchment area during a very short period of time, i. a. the necessity for a hydraulic release of a sewage plant may occur. Among other things, the opportunity exists to discharge these amounts of water into an inland waterway directly. However, due to such a lateral water discharge a transverse flow field will be induced in the waterway, which may affect the manoeuvrability of a ship passing the discharge location and therefore endangering the operational traffic safety possibly. This has to be avoided with a appropriate design of the discharge location in form of an outfall structure.

Within an investigation of the FRANZIUS-INSTITUTE FOR HYDRAULIC, WATERWAYS AND COASTAL ENGINEERING of the UNIVERSITY OF HANNOVER for the CITY OF BAMBERG assessing the prospects of a lateral water discharge into the Main-Danube-Canal on the east side at km 6.2, the opportunities for developing an outfall structure applying analytical and experimental methods were determined. Resulting from this it is to assume, that the development of an outfall structure only on basis of analytical approaches is not significant because of its simplifications. Rather, additional physical model tests are indispensable in order to optimize the shape of an outfall structure developed on basis of analytical approaches and to judge the influence on the ship's traffic quantitatively.

In this case, in the future numerical methods could help to reduce the amount of the very time- and therefore cost consuming experimental methods due to the fact, that these one help to improve the understanding of the flow processes and therefore to contribute to a more focusing development of an outfall structure than with experimental methods for ist own. Nevertheless, physical model tests will be indispensable until further notice to judge the influence on the ship's traffic quantitatively.

ZUSAMMENFASSUNG

Während oder nach einem Starkregenereignis, bei dem innerhalb kurzer Zeit große Wassermengen in einem Einzugsgebiet anfallen, kann u. a. die hydraulische Entlastung einer kommunalen Kläranlage erforderlich werden. Unter anderem besteht die Möglichkeit, diese Wassermengen direkt in eine Binnenwasserstraße einzuleiten. Eine derartige seitliche Wassereinleitung jedoch induziert ein Querströmungsfeld in der Binnenwasserstraße, welches zu einer Beeinflussung des Manövrierhaltens eines die Einleitungsstelle passierenden Schiffes führen kann, wodurch die Sicherheit und Leichtigkeit des Schiffsverkehrs gefährdet sein kann. Dieses ist durch eine geeignete Gestaltung der Einleitungsstelle in Form eines Einleitungsbauwerkes zu verhindern.

Im Rahmen einer Untersuchung des FRANZIUS-INSTITUTS FÜR WASSERBAU UND KÜSTENINGENIEURWESEN DER UNIVERSITÄT HANNOVER für die STADT BAMBERG über die Aussichten einer seitlichen Wassereinleitung in den Main-Donau-Kanal am Ostufer des km 6,2 wurden die Möglichkeiten zur Entwicklung eines Einleitungsbauwerkes auf der Basis analytischer und experimenteller Methoden untersucht. Dabei zeigte sich, daß eine nur auf analytischen Ansätzen basierende Entwicklung eines Einleitungsbauwerkes nicht aussagekräftig ist, da vereinfachende Annahmen zugrunde liegen. Vielmehr sind ergänzende physikalische Modelluntersuchungen unerlässlich, um ein auf der Basis analytischer Ansätze entwickeltes Einleitungsbauwerk in seiner Gestaltung zu optimieren und hinsichtlich der Beeinflussung des Schiffsverkehrs abschließend quantitativ beurteilen zu können.

In diesem Zusammenhang könnten in Zukunft numerische Methoden helfen, den Umfang der sehr zeit- und damit kostenaufwendigen experimentellen Methoden zu reduzieren, da diese zu einem besseren Verständnis der Strömungsvorgänge in einem Einleitungsbauwerk und dadurch zu einer zielsichereren Formgebung des Einleitungsbauwerkes beitragen können als dies allein durch experimentelle Methoden möglich ist. Physikalische Modelluntersuchungen bleiben jedoch bis auf weiteres für eine quantitative Aussage über die Beeinflussung des Schiffsverkehrs unersetzlich.

INHALT

1	EINLEITUNG	7
2	ANWENDUNGSFALL	7
3	EINLEITUNGSBEDINGTE BEEINFLUSSUNGEN DES SCHIFFSVERKEHRS	8
3.1	Verdriftung eines Schiffes	8
3.2	Einleitungsbauwerke	9
3.2.1	Allgemeines	9
3.2.2	Möglichkeiten zur Dimensionierung	9
3.2.2.1	Analytische Ansätze	9
3.2.2.2	Physikalische Modelluntersuchungen	10
3.3	Analyse für den Anwendungsfall	11
4	VORBEMESSUNG	11
4.1	Hauptbauwerksdimensionen	11
4.2	Gestaltung	12
5	PHYSIKALISCHE MODELLUNTERSUCHUNGEN	15
5.1	Modellgrundlage	15
5.2	Versuchseinrichtung	15
5.2.1	Schiffsrinne	15
5.2.2	Modell des Einleitungsbauwerkes	16
5.2.3	Schiffsmodelle	16
5.3	Meßtechnik	16
5.3.1	Spitzentaster	16
5.3.2	Ultraschallmeßsonde	16
5.3.3	Visuelle Registrierung	17
6	UNTERSUCHUNGSPROGRAMM UND VERSUCHSDURCHFÜHRUNG	19
6.1	Untersuchungsprogramm	19
6.2	Versuchsdurchführung	19
7	UNTERSUCHUNGSERGEBNISSE	19
7.1	Eignung des Quelltopfes	19
7.1.1	Allgemeines	19
7.1.2	Analyse	19
7.2	Anordnung der Tauchwand	20
7.2.1	Allgemeines	20
7.2.2	Analyse	20
7.3	Beeinflussung des Schiffsverkehrs	21
7.3.1	Allgemeines	21
7.3.2	Analyse	21
7.4	Schlußfolgerungen	22
8	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	24
9	SCHRIFTUM	25

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abb. 2-1: Verlauf des Main-Donau-Kanals in der Stadt Bamberg (Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes – Wasser- und Schifffahrtsdirektion Süd, 1991)	7
Abb. 2-2: Vorgesehene Einleitungsstelle am Ostufers des km 6,2 des Main-Donau-Kanals	7
Abb. 2-3: Maßgebliche Verkehrssituation am km 6,2 des Main-Donau-Kanal	8
Abb. 3-1: Vereinfachte Darstellung des Bewegungsverhaltens eines Schiffes im Bereich einer seitlichen Einleitung	8
Abb. 3-2: Schematische Ausbildung eines Einleitungsbauwerkes für eine seitliche Einleitung (Schwarze et al., 1984)	9
Abb. 3-3: Einflußgrößen im Bereich einer seitlichen Einleitung (Pulina, 1993)	10
Abb. 4-1: Systemskizze des Einleitungsbauwerkes (Ausgangszustand inklusive Tauchwandvariationen)	14
Abb. 5-1: Schiffsrinne	15
Abb. 5-2: Übersichtsplan der Schiffsrinne (Draufsicht)	15
Abb. 5-3: Modell des Einleitungsbauwerkes in der Versuchsanlage Schiffsrinne	16
Abb. 5-4: Modell des Schiffstyps "Johann Welker"	16
Abb. 5-5: Modell des Schiffstyps "Schubverband (einspurig – zweigliedrig)" bzw. in gekürzter Version des Schiffstyps "Großmotorgüterschiff"	16
Abb. 5-6: Anordnung der Messinstr. im Einleitungsbauwerk (Ausgangszustand inkl. Tauchwandvariationen)	18
Abb. 6-1: Versuch mit dem Modell des Einleitungsbauwerkes	19
Abb. 7-1: Mittlere gemessene und berechnete Überfallhöhe über Wehrkrone in Abhängigkeit von Einleitungswassermenge und Druckhöhe in der Wasserzuführung zum Einleitungsbauwerk	20
Abb. 7-2: Querströmungsfeld in halber Wassertiefe entlang des Einleitungsbauwerkes am bauwerksnahen Fahrspurrand; Tauchwandvariation A_a ; Einleitungswassermenge $6 \text{ m}^3/\text{s} - 12 \text{ m}^3/\text{s}$	20
Abb. 7-3: Mittlere gemessene Querströmungsgeschwindigkeit und Differenz zwischen maximaler und mittlerer gemessener Querströmungsgeschwindigkeit am bauwerksnahen Fahrspurrand in Abhängigkeit von Einleitungswassermenge und Tauchwandvariation	21
Abb. 7-4: Bewegungsverhalten eines das Einleitungsbauwerk passierenden Schiffes (Tauchwandvariation B_a); Schiffstyp „Schubverband (einspurig - zweigliedrig)“; Einleitungswassermenge $12 \text{ m}^3/\text{s}$	21
Abb. 7-5: Verdriftung (translatorisch) und Driftwinkel eines Schiffes relativ zu seiner Ausgangslage bezogen auf den Schiffsmittelpunkt in Abhängigkeit von Einleitungswassermenge und Schiffstyp (Tauchwandvariation B_a)	22
Abb. 7-6: Systemskizze des Einleitungsbauwerkes (Endzustand)	23
Abb. 8-1: 3D-Ansicht des Einleitungsbauwerkes	24
Abb. 8-2: 3D-Ansicht des Main-Donau-Kanals im Bereich des Einleitungsbauwerkes	24
Abb. 8-3: Ausbildung des simulierten Wehrüberfalls im Einleitungsbauwerk bei einer Einleitungswassermenge von $8 \text{ m}^3/\text{s}$	25
Abb. 8-4: Simuliertes Strömungsfeld in halber Wassertiefe im Einleitungsbauwerk und im angrenzenden Main-Donau-Kanal bei einer Einleitungswassermenge von $8 \text{ m}^3/\text{s}$	25
Abb. 8-5: Gemessenes Strömungsfeld in halber Wassertiefe im Einleitungsbauwerk und im angrenzenden Main-Donau-Kanal bei einer Einleitungswassermenge von $8 \text{ m}^3/\text{s}$	25

TAFELVERZEICHNIS

Tafel 3-1: Übertragungsmaßstäbe	11
Tafel 4-1: Grundlegende Parameter zur Ermittlung der Hauptbauwerksdimensionen des Einleitungsbauwerkes auf der Basis des Ansatzes nach Pulina (1993)	12
Tafel 4-2: Zusätzliche Parameter zur Ermittlung der Hauptbauwerksdimensionen des Einleitungsbauwerkes auf der Basis des Ansatzes nach Pulina (1993)	12

SYMBOLVERZEICHNIS

b	=	Breite der Wehrkrone [L]	T	=	Schiffstiefgang [L]
b_E	=	Breite des Einleitungsquerschnittes [L]	v	=	Kinematische Zähigkeit [L^2/T]
c	=	Wellenfortschrittsgeschwindigkeit [L/T]	μ	=	Formabhängiger Überfallbeiwert [-]
g	=	Erdbeschleunigung [M/T^2]	ρ	=	Dichte des betrachteten Stoffes (z.B. von Wasser) [M/L^3]
h	=	Überfallhöhe über Wehrkrone [L]	ζ	=	Mischweg der eingeleiteten Wassermenge [L]
m_G	=	Gesamte zu beschleunigende Schiffsmasse [M]	Δ_{Ges}	=	Verdriftung (translatorisch und rotatorisch) [L]
m_{Schiff}	=	Schiffsmasse [M]	Δ_R	=	Verdriftung (rotatorisch) [L]
r	=	Index für die Verhältniszahl von Natur zu Modell [-]	Δ_T	=	Verdriftung (translatorisch) [L]
v	=	Mittlere Strömungsgeschwindigkeit [L/T]			
v_k	=	Strömungsgeschwindigkeit in der Wasserstraße [L/T]			
v_s	=	Schiffsgeschwindigkeit [L/T]			
\bar{v}_E	=	Mittlere Strömungsgeschwindigkeit im Einleitungsquerschnitt [L/T]			
zul. \bar{v}_E	=	Zulässige mittlere Strömungsgeschwindigkeit im Einleitungsquerschnitt [L/T]			
B	=	Schiffsbreite [L]			
B_F	=	Fahrinnenbreite [L]			
B_W	=	Wasserspiegelbreite [L]			
B_1	=	Fahrspurbreite [L]			
CFD	=	Computational Fluid Dynamics			
DN	=	Nenndurchmesser [L]			
C_y	=	Widerstandsbeiwert eines schräg angeströmten Schiffskörpers [-]			
F	=	Kraftkomponente quer zum Schiff [ML/T^2]			
Fr	=	Froude-Zahl [-]			
GOK	=	Geländeoberkante [L]			
H	=	Wassertiefe [L]			
M	=	Momentenkomponente um das Schiff [ML^2/T^2]			
L	=	Schiffslänge, Charakteristische Länge [L]			
$L_{\text{Öff.}}$	=	Länge der Austrittsöffnungen [L]			
Q	=	Einleitungswassermenge [L^3/T]			
Re	=	Reynolds-Zahl [-]			
S_B	=	Sicherheitsstreifen zwischen den Fahrspurrändern [L]			
S_U	=	Sicherheits- und Sichtabstand zum Ufer [L]			

1 Einleitung

Beispielsweise während oder nach einem Starkregenereignis, bei dem innerhalb kurzer Zeit große Wassermengen in einem Einzugsgebiet anfallen, kann u. a. die hydraulische Entlastung einer kommunalen Kläranlage erforderlich werden. Neben der Speicherung von Abflussspitzen, z.B. in Rückhaltebecken, können große Wassermengen aus dem Einzugsgebiet auch anderweitig abgeführt werden. Unter anderem besteht die Möglichkeit, diese Wassermengen direkt in eine Binnenwasserstraße einzuleiten.

Durch eine derartige Einleitung wird u. a. ein Querströmungsfeld in der Wasserstraße induziert, wodurch die Einleitungsstelle passierende Schiffe in ihrem Bewegungsverhalten beeinflusst werden. Sie erfahren eine Verdriftung. Um eine Gefährdung von Sicherheit und Leichtigkeit des Schiffsverkehrs zu verhindern, ist diese Verdriftung durch eine geeignete Gestaltung der Einleitungsstelle in Form eines Einleitungsbauwerkes zu begrenzen.

Im Rahmen einer Untersuchung des FRANZIUS-INSTITUTS FÜR WASSERBAU UND KÜSTENINGENIEURWESEN DER UNIVERSITÄT HANNOVER für die STADT BAMBERG über die Aussichten einer seitlichen Wassereinleitung in den Main-Donau-Kanal am Ostufer des km 6,2 (Franzius-Institut, 2000) wurden daher die gängigen Möglichkeiten zur Entwicklung eines Einleitungsbauwerkes auf der Basis analytischer und experimenteller Methoden untersucht.

2 Anwendungsfall

Die STADT BAMBERG plant für den Fall von Starkregenereignissen die direkte seitliche Einleitung eines Teils der im Einzugsgebiet anfallenden Wassermengen in den Main-Donau-Kanal. Die Einleitung ist am Ostufer des Main-Donau-Kanals am km 6,2 vorgesehen (Abb. 2-1).

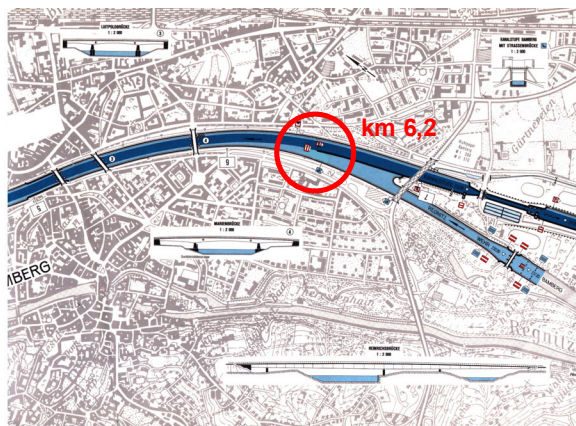


Abb. 2-1: Verlauf des Main-Donau-Kanals in der Stadt Bamberg (Wasser- und Schiffsverwaltung des Bundes – Wasser- und Schiffsdirektion Süd, 1991)

Abb. 2-2 vermittelt einen Eindruck der vorgesehenen Einleitungsstelle. Diese ist durch die unmittelbare Nähe zur Schleuse Bamberg (Abb. 2-1) und damit einhergehend dem Vorherrschen von Begegnungsverkehr auf dem Main-Donau-Kanal geprägt, welches sich in der maßgeblichen Verkehrssituation widerspiegelt (Abb. 2-3).



Abb. 2-2: Vorgesehene Einleitungsstelle am Ostufers des km 6,2 des Main-Donau-Kanals

Diese ist derart spezifiziert, daß zwei Schiffe, die sich jeweils an ihrem zur Mitte des Main-Donau-Kanals liegenden Fahrspurrand bewegen, sich im Falle einer seitlichen Einleitung ohne die Sicherheit und Leichtigkeit des Schiffsverkehrs zu gefährden, begegnen können müssen. Das bedeutet für ein sich in der zum Ostufer des Main-Donau-Kanals liegenden Fahrspur bewegendes Schiff, daß es um nicht mehr als 2 m aus seiner Fahrspur zum Westufer des Main-Donau-Kanals verdriftet werden darf.

Hierbei ist eine Wassertiefe von 3,3 m im Main-Donau-Kanal und ein Schiffstiefgang von 2,6 m anzusetzen. Durch die unmittelbare Nähe der vorgesehenen Einleitungsstelle zur Schleuse Bamberg ist die Schiffsgeschwindigkeit dabei mit maximal 0,833 m/s (3 km/h) anzunehmen. Da verschiedene Schiffstypen auf deutschen Binnenwasserstraßen verkehren, sind die Untersuchungen unter Berücksichtigung der drei typischen, dem „Johann Welker“ mit einer Länge von 85 m bei einer Breite von 9,5 m (Schiffsmasse 1.711.000 kg), dem „Großmotorgüterschiff“ mit einer Länge von 110 m bei einer Breite von 11,4 m (Schiffsmasse 2.900.000 kg) und dem „Schubverband (einspurig – zweigliedrig)“ mit einer Länge von 185 m bei einer Breite von 11,4 m (Schiffsmasse 5.335.000 kg) durchzuführen.

Unter diesen Bedingungen ist eine Einleitungswassermenge von mindestens 6 m³/s (nach Möglichkeit aber bis zu 12 m³/s) in den Main-Donau-Kanal einzuleiten, wobei die Breite des Einleitungsbauwerkes am Böschungsfuß auf maximal 40 m begrenzt ist. Als Längenausdehnung für das Einleitungsbauwerk steht der Bereich bis zum Gelän-

desprung auf Straßenniveau zur Verfügung. Die Wasserzuführung zum Einleitungsbauwerk soll in Form einer Druckrohrleitung mit einem Durchmesser von DN 2200 aus einer Tiefenlage von 2,2 m unterhalb des Sohl-niveaus des Main-Donau-Kanals erfolgen.

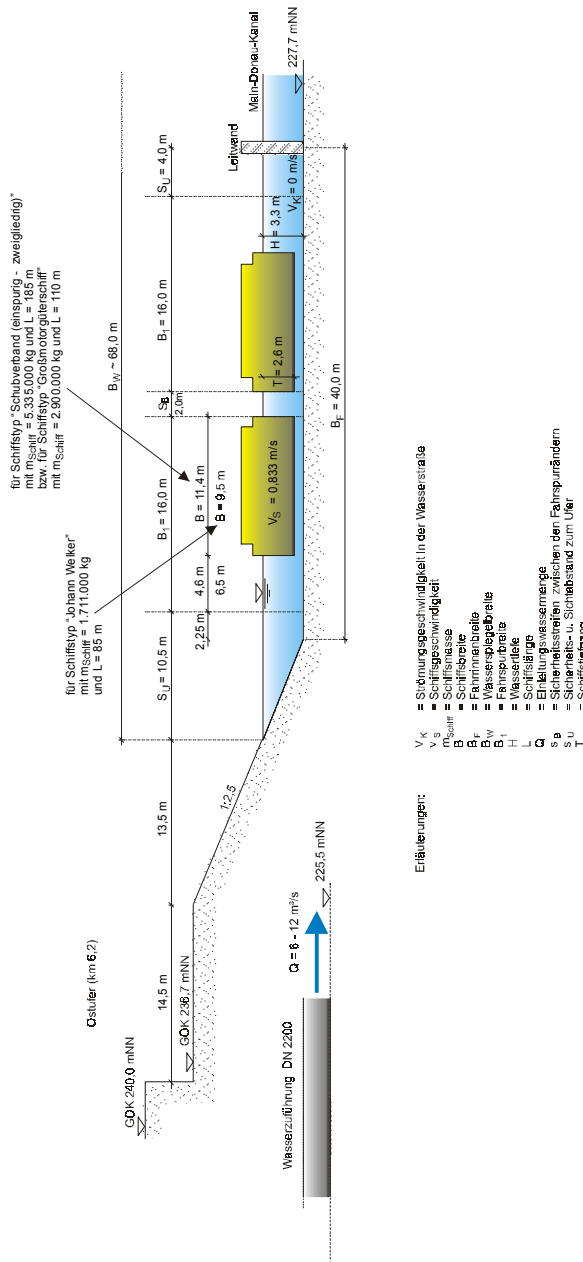


Abb. 2-3: Maßgebliche Verkehrssituation am km 6,2 des Main-Donau-Kanal

3 Einleitungsbedingte Beeinflussungen des Schiffsverkehrs

3.1 Verdriftung eines Schiffes

Durch eine seitliche Einleitung in eine Wasserstraße wird in dieser ein Querströmungsfeld induziert. Infolge dessen wirken hydrodynamische Kräfte auf ein sich im Bereich der seitlichen Einleitung bewegendes Schiff. Diese setzen sich aus zwei Anteilen zusammen, zum einen einer Kraftkomponente quer zum

Schiff und zum anderen einer Momentenkomponente um das Schiff. Bedingt hierdurch wird das Bewegungsverhalten des Schiffes beeinflusst. Es erfährt eine Verdriftung.

Als Folge der zwei Anteile der hydrodynamischen Kräfte setzt sich die Verdriftung eines Schiffes infolge einer seitlichen Einleitung aus einem translatorischen und einem rotatorischen Anteil zusammen. Durch den sich ständig ändernden Angriffspunkt der Kraftkomponente quer zum Schiff unterliegt die Momentenkomponente um das Schiff einer stetigen Änderung, was sich direkt im Bewegungsverhalten des Schiffes ausdrückt. Findet kein Rudereinfluss statt, wird ein Schiff, das in ein Querströmungsfeld hineingelangt, zunächst am Bug ausgelenkt, was eine Verdrehung des Schiffes zur Folge hat. Diese Verdrehung wird um so größer, je weiter das Schiff in das Querströmungsfeld einfährt. Befindet sich das Schiff vollständig im Querströmungsfeld, nimmt die Verdrehung des Schiffes nicht weiter zu. Beim Verlassen des Querströmungsfeldes kommt es zu einer Verdrehung des Schiffes in entgegengesetzter Richtung. Insgesamt ist das Bewegungsverhalten des Schiffes dabei von der seitlichen Einleitung weg gerichtet (Abb. 3-1).

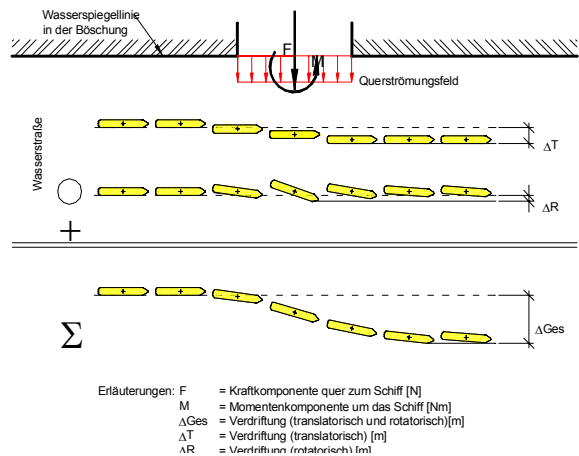


Abb. 3-1: Vereinfachte Darstellung des Bewegungsverhaltens eines Schiffes im Bereich einer seitlichen Einleitung

Bei dieser Darstellung des Bewegungsverhalten eines eine seitliche Einleitung passierenden Schiffes handelt es sich um eine stark vereinfachte Darstellung. Infolge einer seitlichen Einleitung entstehen zusätzlich zum Querströmungsfeld horizontale Kreisströmungen, sogenannte Walzen, in der Wasserstraße, die dadurch bedingt sind, daß zwei Wasserkörper (Wasserkörper der Wasserstraße und Wasserkörper der seitlichen Einleitung) mit unterschiedlichen Strömungseigenschaften aufeinander treffen. In Vergleich zu Flüssen sind Walzen in Kanälen, bei ansonsten gleichen Randbedingungen, stärker ausgeprägt, da die Strömungseigenschaften zwischen den Wasserkörpern hier am unterschiedlichsten sind, denn der Wasser-

körper in Kanälen ist im Gegensatz zu dem in Flüssen nicht in Bewegung. Die Wechselwirkungen von Walzen und Querströmungsfeld und die daraus resultierenden Auswirkungen auf das Bewegungsverhalten eines die seitliche Einleitung passierenden Schiffes sind analytisch nicht zu erfassen und werden zusätzlich durch die spezifischen Gegebenheiten im Bereich der seitlichen Einleitung, wie z. B. eine Wasserstraßenkrümmung, beeinflusst (Zimmermann, 1990).

3.2 Einleitungsbauwerke

3.2.1 Allgemeines

Eine durch eine seitliche Einleitung hervorgerufene Verdriftung eines Schiffes kann die Sicherheit und Leichtigkeit des Schiffsverkehrs gefährden, wenn ein Schiff z. B. in die Fahrspur des Gegenverkehrs gedrängt wird. Aus diesem Grund ist es unerlässlich, seitliche Einleitungen durch eine geeignete Formgebung der Einleitungsstelle in Form eines Einleitungsbauwerkes auszubilden und somit die Verdriftung eines Schiffes zu begrenzen. Ziel dabei ist es, durch das Einleitungsbauwerk eine gleichmäßige geringe Belastung auf ein Schiff im Bereich der seitlichen Einleitung herbeizuführen.

Einleitungsbauwerke werden deshalb in der Regel als nach oben offene, sich trichterförmig zur Wasserstraße aufweitende Gerinne ausgebildet. Die Aufweitung dient der kontrollierten Verringerung der Strömungsgeschwindigkeiten. Durch strömungsvergleichmäßigende Einbauten kann nach Schwarze & Hanisch (1984) eine Auffächerung der eingeleiteten Wassermengen bis zu einem Aufweitungswinkel des Einleitungsbauwerkes von 1:4 erreicht werden (Abb. 3-2).

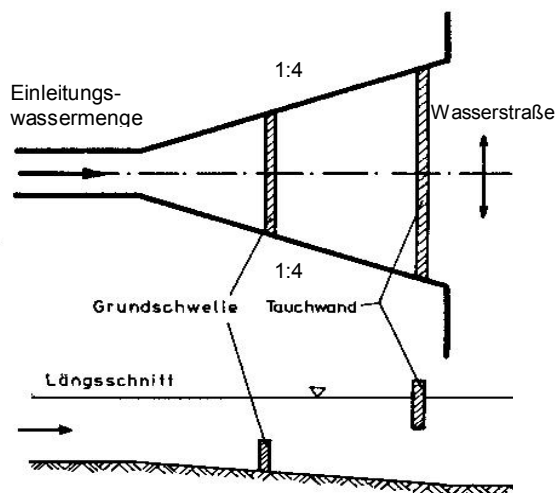


Abb. 3-2: Schematische Ausbildung eines Einleitungsbauwerkes für eine seitliche Einleitung (Schwarze et al., 1984)

Als strömungsvergleichmäßigende Einbauten kommen in der Regel Kombinationen aus Wehrschwelen

und Tauchwänden wie z.B. beim Allerentlaster I am Mittellandkanal (Lasar & Voigt, 1998) zum Einsatz. Die seitliche Einleitung in einen Fluß findet dabei generell unter einem Winkel von 30° bis 60° zur Strömungsrichtung des Flusses statt, da hierdurch die Bildung von Walzen minimiert wird. Bei Kanälen erfolgt die seitliche Einleitung aus dem selben Grund senkrecht zur Kanalachse.

3.2.2 Möglichkeiten zur Dimensionierung

3.2.2.1 Analytische Ansätze

In der Literatur finden sich verschiedene analytische Ansätze zur Bestimmung der maximal zulässigen mittleren Strömungsgeschwindigkeit im Bereich einer seitlichen Einleitung (Ross, 1984; Bakowies, 1987; Pulina, 1993). Durch Kopplung dieser Ansätze mit der Kontinuitätsbedingung, die die Massenerhaltung innerhalb eines Wasserstroms beschreibt, wird es möglich, ein Maß für die Breite eines Einleitungsbauwerkes zu erhalten. Die Längenausdehnung eines Einleitungsbauwerkes ist dagegen nicht zu berechnen, da sie von den spezifischen Gegebenheiten an der Einleitungsstelle abhängt.

Allen oben erwähnten Ansätzen ist gemeinsam, daß sie auf vereinfachenden Annahmen basieren, da eine mathematische Beschreibung der Wechselwirkungen zwischen Querströmungsfeld infolge einer seitlichen Einleitung und daraus resultierendem Bewegungsverhalten eines Schiffes aufgrund der Komplexität analytisch nicht vollständig möglich ist. Das hat zur Folge, daß auch Randbedingungen in den analytischen Ansätzen nur begrenzt spezifiziert werden können. Im Laufe der Zeit wurden die vereinfachenden Annahmen in den analytischen Ansätzen reduziert, wodurch es möglich wurde, Randbedingungen wie die Schiffslänge und Schiffsgeschwindigkeit zu spezifizieren. Allerdings konnten in den Ansätzen häufig elementare Randbedingungen wie die Massenträgheit des Schiffes oder das Wassertiefen-Tiefgangsverhältnis (Ross, 1984) nicht berücksichtigt werden bzw. konnte kein Maß für die Verdriftung spezifiziert werden (Bakowies, 1987).

Diese Probleme sind in dem derzeit umfassendsten Ansatz nach Pulina (1993) kompensiert. Nur mit diesem Ansatz ist es, auch unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten, sinnvoll, die Hauptbauwerksdimensionen eines Einleitungsbauwerkes unter vorgegebenen Randbedingungen zu ermitteln. Allerdings finden auch in diesem Ansatz die Wechselwirkungen zwischen sich infolge einer seitlichen Einleitung bildendem Querströmungsfeld und Walzen und den daraus resultierenden Auswirkungen auf das Bewegungsverhalten eines Schiffes ebensowenig wie die sie zusätzlich beeinflussenden spezifischen Gegebenheiten an der Einleitungsstelle Berücksichtigung.

Keine Beachtung findet auch der Einfluß eines Schiffsruders (Abb. 3-3; Gl. 3-1).

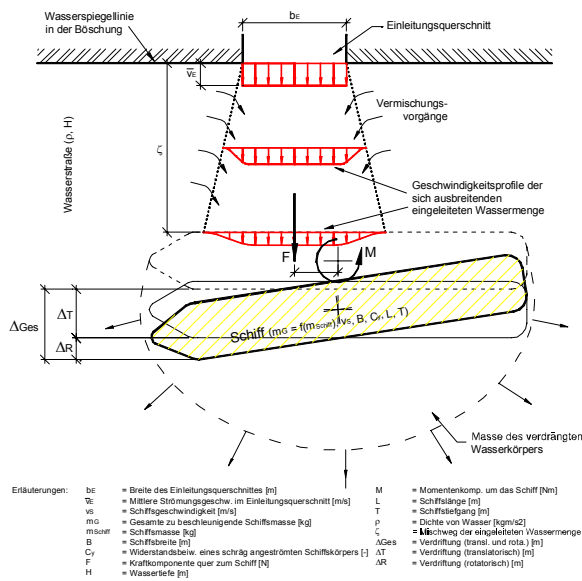


Abb. 3-3: Einflußgrößen im Bereich einer seitlichen Einleitung (Pulina, 1993)

$$\text{zul. } \bar{v}_E = 0,68 \cdot \zeta^{0,25} \cdot v_s \left(\frac{\Delta_{Ges} \cdot m_G}{\frac{\rho}{2} \cdot b_E \cdot T \cdot C_y} \right)^{0,5} \quad \text{Gl. 3-1}$$

mit

- b_E = Breite des Einleitungsquerschnittes [m]
- m_G = Gesamte zu beschleunigende Schiffsmasse [kg]
- v_s = Schiffsgeschwindigkeit [m/s]
- zul. \bar{v}_E = Zulässige mittlere Strömungsgeschwindigkeit im Einleitungsquerschnitt [m/s]
- C_y = Widerstandsbeiwert eines schräg angeströmten Schiffskörpers [-]
- L = Schiffslänge [m]
- T = Schiffstiefgang [m]
- ρ = Dichte von Wasser [kg/m³]
- ζ = Mischweg der eingeleiteten Wassermenge [m]
- Δ_{Ges} = Verdriftung (translatorisch und rotatorisch) [m]

Die gesamte zu beschleunigende Schiffsmasse in Gl. 3-1 errechnet sich nach Ergebnissen der HAMBURGISCHEN SCHIFFBAU-VERSUCHSANSTALT (Grimm, 1955) und setzt sich aus der Schiffsmasse und der Masse des verdrängten Wasserkörpers zusammen. Mit einem für Kanäle üblichen Wassertiefen-Tiefgangsverhältnis von 2,12 gilt (Gl. 3-2):

$$m_G = m_{schiff} \left(1 + 0,814 \frac{16^{T/H}}{B/T^{0,84}} \right) \quad \text{für } H/T \leq 2,12 \quad \text{Gl. 3-2}$$

mit

- m_{schiff} = Schiffsmasse [kg]
- B = Schiffsbreite [m]
- H = Wassertiefe [m]

Die Bestimmung des Widerstandsbeiwertes eines schräg angeströmten Schiffskörpers als Eingangsparameter für Gl. 3-1 erfolgt mit einem Ansatz auf der Basis von Untersuchungen nach Müller (1973) an der VERSUCHSANSTALT FÜR BINNENSCHIFFBAU. Allerdings beschränkt sich der Gültigkeitsbereich dieser Gleichung auf einen Bereich der Schiffsgeschwindigkeit von 2,4 m/s bis 3,2 m/s (Gl. 3-3).

$$C_y = \left(\frac{563}{v_s} - 134 \right) \cdot 0,16^{\frac{H}{T}} > 0,3 \quad \text{für } 3,2 \text{ m/s} \geq v_s \geq 2,4 \text{ m/s} \quad \text{Gl. 3-3}$$

3.2.2.2 Physikalische Modelluntersuchungen

In physikalischen Modelluntersuchungen wird unter Berücksichtigung von Ähnlichkeitsbeziehungen zwischen Natur und Modell ein verkleinertes Abbild der zu untersuchenden Gesamtsituation nachgebildet, wobei Einschränkungen, wie sie bei den analytischen Ansätzen unvermeidlich sind, nicht vorhanden sind.

Für naturähnliche wasserbauliche Modelle ist dabei neben geometrischer und kinematischer Ähnlichkeit auch dynamische Ähnlichkeit notwendig. Geometrische Ähnlichkeit bedeutet, daß alle Längen in der Natur zu den korrespondierenden Längen im Modell in einem konstanten Verhältnis stehen. Kinematische Ähnlichkeit ist gegeben, wenn alle zeitabhängigen Vorgänge im Modell so ablaufen, daß sie den zugehörigen Zeiträumen in der Natur entsprechen. Dynamische Ähnlichkeit besteht, wenn im Modell an allen sich mit der Natur entsprechenden Punkten die auf ein Volumenelement wirkenden Kräfte im gleichen Verhältnis zueinander stehen.

Im wasserbaulichen Versuchswesen sind Trägheits-, Schwere- und Reibungskräfte maßgebend. Die Erfüllung dynamischer Ähnlichkeit setzt voraus, daß Modell und Natur die gleiche Froude-Zahl (Quotient aus Trägheits- und Schwerekräften) und die gleiche Reynolds-Zahl (Quotient aus Trägheits- und Zähigkeitskräften) aufweisen. Eine dynamische Ähnlichkeit, bei der alle drei Kräftearten gleichzeitig ähnlich ausgebildet sind, ist jedoch nur in einem Modell im Modellmaßstab 1:1, also in der Natur selbst, gegeben. Bei Strömungen mit freier Wasseroberfläche überwiegen jedoch die Einflüsse aus Schwere- und Trägheitskräften. Dies führt auf die für physikalische Modelluntersuchungen im wasserbaulichen Versuchswesen im allgemeinen anzuwendende Froude'sche Ähnlichkeitsbedingung (Kobus, 1984; Gl. 3-4):

$$Fr_r = \frac{v_r}{\sqrt{g_r L_r}} = 1 \quad \text{Gl. 3-4}$$

mit

- g = Erdbeschleunigung [m/s²]
- r = Index für die Verhältniszahl von Natur zu Model [-]
- v = Mittlere Strömungsgeschwindigkeit [m/s]
- Fr = Froude-Zahl [-]
- L = Charakteristische Länge [m]

Da die Erdbeschleunigung in Modell und Natur unveränderlich ist, läßt sich hieraus für die mittlere Strömungsgeschwindigkeit folgender Übertragungsmaßstab formulieren (Gl. 3-5):

$$v_r = L_r^{1/2} \quad \text{Gl. 3-5}$$

Die Froude'sche Ähnlichkeitsbedingung liefert weiterhin die in Tafel 3-1 zusammengestellten Übertragungsmaßstäbe.

Geometrische bzw. physikalische Größe	Dimension	Übertragungsmaßstab Modell : Natur
Länge	m	1 : L_r
Zeit	s	1 : $L_r^{1/2}$
Geschwindigkeit	m/s	1 : $L_r^{1/2}$
Querschnittsfläche	m^2	1 : L_r^2
Wassermenge	m^3	1 : L_r^3
Durchfluß	m^3/s	1 : $L_r^{2,5}$

Tafel 3-1: Übertragungsmaßstäbe

Für Strömungen sind die Reibungskräfte (z. B. Sohlreibung), die in der Froude'schen Ähnlichkeitsbedingung keine Berücksichtigung finden, von Bedeutung. Die reibungsabhängige Turbulenz der Strömung wird durch die Reynolds-Zahl charakterisiert (Gl. 3-6):

$$Re = \frac{4Lv}{\nu} \quad \text{Gl. 3-6}$$

mit

$$\begin{aligned} Re &= \text{Reynolds-Zahl [-]} \\ \nu &= \text{Kinematische Zähigkeit [m}^2/\text{s]} \end{aligned}$$

Die Reynolds-Zahl im Modell ist entsprechend der Froude'schen Ähnlichkeitsbedingung maßstabsabhängig und stets kleiner als die in der Natur, wenn die Modellflüssigkeiten identisch sind. Durch eine genügend hohe Reynolds-Zahl im Modell wird die dynamische Ähnlichkeit der Strömungen zwischen Natur und Modell weitestgehend erreicht. Die für das Modell erforderliche Reynolds-Zahl muß sehr viel größer als 3000 sein (Kobus, 1984).

3.3 Analyse für den Anwendungsfall

Die analytischen Ansätze zur Dimensionierung eines Einleitungsbauwerkes unter vorgegebenen Randbedingungen weisen trotz ihrer Verbesserungen im Laufe der Zeit noch immer grundlegende Vereinfachungen auf, weshalb die Dimensionierung eines Einleitungsbauwerkes ausschließlich auf der Basis dieser Ansätze als kritisch zu bewerten ist. Aus diesem Grund sind zur Dimensionierung eines Einleitungsbauwerkes zusätzliche physikalische Modelluntersuchungen unerlässlich, da es nur mit ihnen möglich ist, eine endgültige quantitative Aussage über das Bewegungsverhalten eines Schiffes infolge einer seitlichen Einleitung zu erhalten und somit das Einleitungsbauwerk hinsichtlich der Beeinflussung des Schiffsverkehrs zu beurteilen.

Diese Vorgehensweise wurde daher auch für den hier vorliegenden Anwendungsfall gewählt. Zunächst wurden in einer Vorbemessung auf der Basis des analytischen Ansatzes nach Pulina (1993) die Hauptbauwerksdimensionen des Einleitungsbauwerkes ermittelt. Darauf aufbauend wurde die Formgebung des Einleitungsbauwerkes gewählt. Im Anschluß daran wurden physikalische Modelluntersuchungen durchgeführt, um das Einleitungsbauwerk hinsichtlich der Beeinflussung des Schiffsverkehrs beurteilen zu können.

Hingewiesen sei an dieser Stelle noch auf die Vorgehensweise zur Ermittlung der Bauwerksbreite eines Einleitungsbauwerkes auf der Basis des Ansatzes nach Pulina (1993) und der Kontinuitätsbedingung, die die Massenerhaltung innerhalb eines Wasserstroms beschreibt. Letztere besagt, daß die Wassermenge, die einen Querschnitt passiert, dem Produkt aus dessen Fläche, die sich wiederum aus dem Produkt von Breite und Höhe des Querschnittes zusammensetzt, und der mittleren Strömungsgeschwindigkeit in diesem Querschnitt entspricht. Übertragen bedeutet dies, daß die Wassermenge, die den Einleitungsquerschnitt eines Einleitungsbauwerkes (Abb. 3-3) passiert, dem Produkt aus der mittleren Strömungsgeschwindigkeit im Einleitungsquerschnitt und dessen Fläche, die sich aus dem Produkt von Wassertiefe und Breite des Einleitungsquerschnittes zusammensetzt, entspricht (Gl. 3-7).

$$Q = \bar{v}_E \cdot H \cdot b_E \quad \text{Gl. 3-7}$$

mit

$$\begin{aligned} b_E &= \text{Breite des Einleitungsquerschnittes [m]} \\ \bar{v}_E &= \text{Mittlere Strömungsgeschwindigkeit im} \\ &\quad \text{Einleitungsquerschnitt [m/s]} \\ H &= \text{Wassertiefe [m]} \\ Q &= \text{Einleitungswassermenge [m}^3/\text{s]} \end{aligned}$$

Zur Ermittlung der Bauwerksbreite eines Einleitungsbauwerkes ist der Grenzfall maßgebend, bei dem die mittlere Strömungsgeschwindigkeit im Einleitungsquerschnitt der zulässigen mittleren Strömungsgeschwindigkeit im Einleitungsquerschnitt entspricht, die sich nach Pulina (1993) unter den vorgegebenen Randbedingungen ergibt.

4 Vorbemessung

4.1 Hauptbauwerksdimensionen

Aufgrund der vereinfachenden Annahmen in dem analytischen Ansatz nach Pulina (1993) zur Ermittlung der Hauptbauwerksdimensionen eines Einleitungsbauwerkes wurde in der Vorbemessung die Hauptbauwerksdimensionierung des Einleitungsbauwerkes nur für die minimalen Anforderungen durchgeführt. Im Speziellen bedeutet dies, daß die Hauptbauwerksdimensionen nur für die untere Grenze der Einlei-

tungswassermenge von 6 m³/s ermittelt wurden. Die hierfür verwendeten Parameter sind in Tafel 4-1 zusammengestellt.

Schiffstyp Parameter		„Johann Welker“	„Schubverband (einspurig – zweigliedrig)“
Schiffsmasse (für gegebenen Schiffstiefgang)	m _{Schiff}	1.711.000 kg	5.335.000 kg
Schiffsgeschwindigkeit	v _s	0,833 m/s	0,833 m/s
Schiffsbreite	B	9,50 m	11,40 m
Wassertiefe	H	3,30 m	3,30 m
Schiffslänge	L	80,00 m	185,00 m
Einleitungswassermenge	Q	6 m ³ /s	6 m ³ /s
Schiffstiefgang	T	2,60 m	2,60 m
Mischweg der eingeleiteten Wassermenge	ζ	10,5 + 6,5 = 17,0 m	10,5 + 4,6 = 15,1 m
Dichte von Wasser	ρ	1000 kg/m ³	1000 kg/m ³
Verdriftung (trans. und rot.)	Δ _{Ges}	2,00 m	2,00 m

Tafel 4-1: Grundlegende Parameter zur Ermittlung der Hauptbauwerksdimensionen des Einleitungsbauwerkes auf der Basis des Ansatzes nach Pulina (1993)

Für die weitere Berechnung wurden als zusätzliche Parameter die gesamte zu beschleunigende Schiffsmasse und der Widerstandsbeiwert eines schräg angeströmten Schiffskörpers benötigt, die sich aus den in Tafel 4-1 zusammengestellten Parametern nach Gl. 3-2 und Gl. 3-3 ermitteln ließen (Tafel 4-2).

Schiffstyp Parameter		„Johann Welker“	„Schubverband (einspurig – zweigliedrig)“
Ges. zu beschl. Schiffsmasse	m _G	5.902.950 kg	16.549.170 Kg
Widerstandsbeiwert eines schräg angeströmten Schiffskörpers	C _y	5,288 [-]	5,288 [-]

Tafel 4-2: Zusätzliche Parameter zur Ermittlung der Hauptbauwerksdimensionen des Einleitungsbauwerkes auf der Basis des Ansatzes nach Pulina (1993)

Nach Gl. 3-1 ergaben sich hieraus für die drei zu berücksichtigenden Schiffstypen die zulässigen mittleren Strömungsgeschwindigkeiten im Einleitungsquerschnitt in Abhängigkeit von der Breite des Einleitungsquerschnittes zu (Gl. 4-1; Gl. 4-2; Gl. 4-3):

$$\underline{\underline{\text{zul.}\bar{v}_E, \text{ Joh. Welker}}} = 0,5778 \cdot \sqrt{\frac{1}{b_E}} \quad [\text{m/s}] \quad \text{Gl. 4-1}$$

$$\underline{\underline{\text{zul.}\bar{v}_E, \text{ Großmotorg.}}} = 0,5193 \cdot \sqrt{\frac{1}{b_E}} \quad [\text{m/s}] \quad \text{Gl. 4-2}$$

$$\underline{\underline{\text{zul.}\bar{v}_E, \text{ Schubverband}}} = 0,4188 \cdot \sqrt{\frac{1}{b_E}} \quad [\text{m/s}] \quad \text{Gl. 4-3}$$

mit

zul. \bar{v}_E = Zulässige mittlere Strömungsgeschwindigkeit im Einleitungsquerschnitt [m/s]
 b_E = Breite des Einleitungsquerschnittes [m]

Deutlich zu erkennen ist, daß mit zunehmender Schiffslänge geringere mittlere Strömungsgeschwindigkeiten im Einleitungsquerschnitt zulässig sind, und das, obwohl sich die Schiffsmasse gleichzeitig erhöht. Daher war für die weitere Berechnung der Schiffstyp „Schubverband (einspurig – zweigliedrig)“ maßgebend, da dieser von den drei zu berücksichtigenden Schiffstypen die größte Schiffslänge aufweist.

Die so ermittelte maßgebliche Größe für die zulässige mittlere Strömungsgeschwindigkeit im Einleitungsquerschnitt (Gl. 4-3) wurde zur weiteren Berechnung als Maß für die mittlere Strömungsgeschwindigkeit im Einleitungsquerschnitt in die Kontinuitätsbedingung (Gl. 3-7) eingesetzt, woraus sich die Breite des Einleitungsquerschnittes nach Gl. 4-4 ergab:

$$\underline{\underline{b_E}} = \left(\frac{2,424}{0,4188} \right)^2 = 3251 \approx \underline{\underline{3250}} \quad (\text{gewählt}) \quad [\text{m}] \quad \text{Gl. 4-4}$$

Es sei an dieser Stelle noch einmal darauf hingewiesen, daß die Lage des Einleitungsquerschnittes gemäß Abb. 3-3 in Höhe der Wasserspiegellinie in der Böschung fixiert ist. Entsprechend den in Abb. 2-3 vorgegebenen Randbedingungen verbleiben somit bis zum Böschungsfuß im Main-Donau-Kanal 8,25 m und bis zum Geländesprung auf Straßenniveau 28 m als verfügbare Längenausdehnung für das Einleitungsbauwerk. Für die weiteren Planungen wurden von diesem Raumangebot jedoch auf der sicheren Seite liegend nur 26 m genutzt, da zur Abfangung des Geländesprungs eine Konstruktion in Form einer Winkelstützmauer notwendig werden wird.

4.2 Gestaltung

Unter Berücksichtigung der gängigen Praxis zur Gestaltung von Einleitungsbauwerken in Form einer zur Wasserstraße hin gerichteten trichterförmigen Aufweitung mit einem maximalen Aufweitungswinkel von 1:4 in Verbindung mit einer Wehrschwelle und einer Tauchwand (Abb. 3-2) wurde mit den ermittelten Hauptbauwerksdimensionen das Einleitungsbauwerk gestaltet. Dabei wurde eine senkrechte Anordnung des Einleitungsbauwerkes zum Main-Donau-Kanal gewählt, um so die Bildung von Walzen in der Wasserstraße zu minimieren. Unter diesen Bedingungen ergab sich eine Breite des Einleitungsbauwerkes am Böschungsfuß von etwa 37 m.

Die Lage der Wehrschwelle wurde auf 6,5 m vor der zur Abfangung des Geländesprungs notwendig werdenden Winkelstützmauer festgelegt. Hierdurch entsteht ein Speicherbecken für die dem Einleitungsbauwerk über die Wasserzuführung in Form der

Druckrohrleitung (Abb. 2-3) von unterhalb des Einleitungsbauperkes zuzuführenden Einleitungswassermengen. Dieses erlaubt eine gleichmäßige Verteilung der einzuleitenden Wassermengen über die Wehrschwelle und somit im gesamten Einleitungsbauperk. Die Oberkante der Wehrschwelle wurde auf 0,75 m über dem maßgeblichen Wasserstand im Main-Donau-Kanal festgelegt, um einen Rückstau bzw. einen unvollkommenen Überfall der einzuleitenden Wassermengen über die Wehrschwelle zu vermeiden.

Hinter der Wehrschwelle weitet sich das Einleitungsbauperk mit dem Winkel von 1:4 bis hin zum Böschungsfußpunkt auf. Dabei wurde das Sohlniveau zwischen Wehrschwelle und Tauchwand gegenüber dem des Main-Donau-Kanals um 0,75 m höher gewählt, um hinter der Tauchwand auch in vertikaler Richtung eine gleichmäßige Verteilung der einzuleitenden Wassermengen zu erreichen. Die Anordnung der Tauchwand hinsichtlich einer gleichmäßigen Strömungsverteilung im gesamten Einleitungsbauperk in Verbindung mit der Anordnung der Wehrschwelle kann nur in physikalischen Modelluntersuchungen ermittelt werden. Dabei wurden aus Erfahrungen nach Lasar & Voigt (1998) die möglichen Lagen und Stellungen der Tauchwand (**Tauchwandvariationen**) begrenzt. Für die weiteren Untersuchungen wurden drei mögliche Lagen der Tauchwand zur Wehrschwelle mit jeweils drei möglichen Stellungen zur Sohle lokalisiert. **Lage A** in 2 m Entfernung zur Wehrschwelle und die **Lagen B** und **C** um jeweils weitere 4 m zum Main-Donau-Kanal versetzt sowie die **Stellung a** in 1 m Höhe über der Sohle und die **Stellungen b** und **c** um jeweils weitere 0,5 m erhöht (Abb. 4-1).

Abb. 4-1 zeigt auch die Verbindung zwischen Speicherbecken und Wasserzuführung, d. h. die Ausbildung der Druckrohrleitung mit einem Durchmesser von DN 2200 im Speicherbecken als Quelltopf. Der Quelltopf ist ausschließlich zu den Seiten offen. Dadurch wird der vertikale Impuls des Wasserstroms in einen horizontalen Impuls umgeleitet, um so die einzuleitenden Wassermengen möglichst gleichmäßig im Speicherbecken zu verteilen. Die seitlichen Öffnungen sind in der oberen Hälfte des Quelltopfes angeordnet und wurden in Analogie zur Bemessung von Füllkanälen für Schleusen dimensioniert. Nach Partenscky (1986) läßt sich eine gute Verteilung des Füllwassers erreichen, wenn der Querschnitt eines Füllkanals kleiner als die Summe der Querschnitte der von ihm versorgten Stichkanäle ist. Das optimale Querschnittsverhältnis liegt bei 1:1,02. Unter Berücksichtigung dieses Verhältnisses, dem Maß für die durchströmte Fläche des Quelltopfes von 3,8 m² und einer gewählten Höhe der seitlichen Öffnung von

0,75 m (um eine Verstopfung des Quelltopfes auch bei größeren Teilen in der Wasserzuführung zu vermeiden) ergab sich die notwendige Länge der Austrittsöffnungen nach Gl. 4-5 zu:

$$\underline{L_{\text{Öff.}}} = \frac{1,02 \cdot 3,80}{0,75} = \underline{5,17} \quad [\text{m}] \quad \text{Gl. 4-5}$$

mit $L_{\text{Öff.}}$ = Länge der Austrittsöffnungen [m]

Bei einem Gesamtumfang des Quelltopfes von 6,91 m entspricht dieses Maß einem Öffnungswinkel von 270°. Es verblieben für die Stützpfiler des Quelltopfdeckels somit 90°, die auf drei Stützpfiler verteilt wurden. Ein Pfeiler mit einem Sektor von 60° wurde auf der der Wehrschwelle zugewandten Seite des Quelltopfes angeordnet, um eine Kurzschlußströmung zur Wehrschwelle zu verhindern. Die beiden anderen Pfeiler mit einem Sektor von je 15° wurden auf der der Wehrschwelle abgewandten Seite des Quelltopfes plziert, so daß sich drei gleich große Austrittsöffnungen ergeben. Die Überprüfung des Quelltopfes hinsichtlich einer gleichmäßigen Wasserverteilung über die Wehrschwelle kann dabei ausschließlich in physikalischen Modelluntersuchungen erfolgen.

5 Physikalische Modelluntersuchungen

5.1 Modellgrundlage

Während die Strömungsverhältnisse in einem Einleitungsbauwerk durch die Verwendung strömungsbeeinflussender Einbauten vorrangig aus dem Einleitungsbauwerk heraus in Richtung der Bauwerksachse gerichtet sind, ist dieses in der angrenzenden Wasserstraße nicht der Fall. Die Wasserstraße ist infolge einer seitlichen Einleitung durch ein Querströmungsfeld und damit einhergehenden Walzen geprägt.

Im Rahmen der Vorbemessung konnten lediglich die Einflüsse des Querströmungsfeldes auf das Bewegungsverhalten eines die vorgesehene Einleitungsstelle am Main-Donau-Kanal passierenden Schiffes berücksichtigt werden, nicht jedoch die Wechselwirkungen des Querströmungsfeldes mit den Walzen und die daraus resultierenden Auswirkungen auf das Bewegungsverhalten.

Die physikalischen Modelluntersuchungen für den Anwendungsfall wurden daher so konzipiert, daß im Strömungsmodell alle Strömungseffekte im Bereich der vorgesehenen Einleitungsstelle am Main-Donau-Kanal berücksichtigt werden konnten. Gewählt wurde aus diesem Grund ein Modellmaßstab von 1:25, der auch in vergleichbaren Untersuchungen Anwendung fand (Drewes et al., 1994). Hierdurch war es möglich in der für die physikalischen Modelluntersuchungen zur Verfügung stehenden Schiffsrinne mit einer Länge von 54 m bei einer Breite von 4 m und einer Tiefe von 0,45 m ein Strömungsmodell der vorgesehenen Einleitungsstelle am Main-Donau-Kanal bis etwa 400 m nach Ober- und Unterstrom nachzubilden (Abb. 5-1).



Abb. 5-1: Schiffsrinne

Die erforderliche Reynolds-Zahl im Modell von 3000 wird bei diesem Modellmaßstab nach Gl. 3-6 bei einer Wassertiefe im Main-Donau-Kanal von 3,3 m und einer kinematischen Zähigkeit des Wassers von $10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ in der Natur noch bei Strömungsgeschwindigkeiten in der Natur von 0,0028 m/s nicht unterschritten.

5.2 Versuchseinrichtung

5.2.1 Schiffsrinne

Die physikalischen Modelluntersuchungen wurden in der Schiffsrinne durchgeführt. Es handelt sich um eine 54 m lange, 4 m breite und 0,45 m tiefe Rinne, in der über eine Überfallklappe am Ablauf variable Wasserstände eingestellt und gehalten werden können (Abb. 5-2).

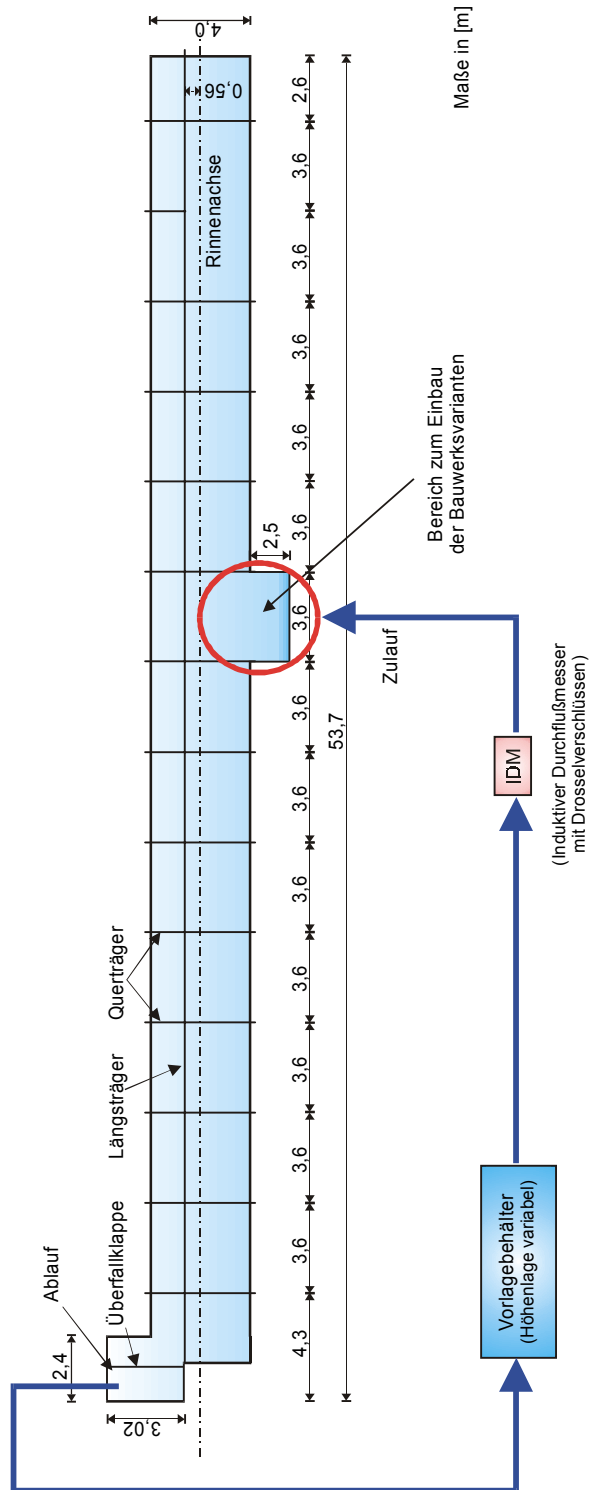


Abb. 5-2: Übersichtsplan der Schiffsrinne (Draufsicht)

5.2.2 Modell des Einleitungsbauwerkes

Unter Berücksichtigung des gewählten Modellmaßstabes von 1:25 wurde das in der Vorbemessung entwickelte Einleitungsbauwerk als Verbundwerkstoffkonstruktionen aus Trovidur, einem thermoplastischen Kunststoff, und Holz mit den für die physikalischen Modelluntersuchungen bedeutsamen Details maßstabsgerecht hergestellt und geometrisch ähnlich in die Schiffsrinne eingebaut.

Zusätzlich wurden jeweils 400 m des Main-Donau-Kanals nach Ober- und Unterstrom der vorgesehenen Einleitungsstelle unter Berücksichtigung des gewählten Modellmaßstabes von 1:25 nachgebildet. Zur Modellierung der Böschungen wurde Material verwendet, welches Schüttsteinen der Wasserbausteinklasse III im Maßstab 1:25 verkleinert entsprach, wodurch eine der Natur ähnliche Rauigkeit der eingebauten Böschungen modelliert wurde (Abb. 5-3).



Abb. 5-3: Modell des Einleitungsbauwerkes in der Versuchsanlage Schiffsrinne

5.2.3 Schiffmodelle

Für die Untersuchungen standen die drei zu berücksichtigenden Schiffstypen, der „Johann Welker“, das „Großmotorgüterschiff“ und der „Schubverband (einspurig – zweigliedrig)“ als Holzmodelle im gewählten Modellmaßstab von 1:25 zur Verfügung (Abb. 5-4; Abb. 5-5).



Abb. 5-4: Modell des Schiffstyps „Johann Welker“



Abb. 5-5: Modell des Schiffstyps „Schubverband (einspurig – zweigliedrig)“ bzw. in gekürzter Version des Schiffstyps „Großmotorgüterschiff“

Alle drei Schiffstypen waren mit Antriebs- und Ruderanlage ausgestattet und konnten mit Hilfe einer Funkfernsteuerung manövriert werden, so daß die physikalischen Modelluntersuchungen mit frei fahrenden Schiffen durchgeführt werden konnten.

5.3 Meßtechnik

5.3.1 Spitzentaster

In den physikalischen Modelluntersuchungen wurde die Wasserspiegellage über der Wehrkrone des Einleitungsbauwerkes an ausgewählten Stellen unter gleichbleibenden Bedingungen erfaßt. Hierzu wurde ein Spitzentaster eingesetzt. Ein Spitzentaster ist ein mechanisches Meßinstrument, bestehend aus einer geraden Zahnstange, an der eine bewegliche Metallspitze und eine Skalierung befestigt ist. Bezogen auf einen Referenzpunkt kann das Verstellmaß der Spitze an der Skalierung visuell erfaßt werden.

Die Differenzen zwischen der Wasserspiegellage über der Wehrkrone zu der Höhenlage der Wehrkrone als Referenzpunkt ergaben die Überfallhöhen. Diese bildeten die Grundlage zur Überprüfung des Quelltopfes hinsichtlich einer gleichmäßigen Wasserverteilung über die Wehrschwelle des Einleitungsbauwerkes.

Beim Einleitungsbauwerk wurde jeweils an fünf Meßpunkten, die über die gesamte Breite der Wehrschwelle verteilt waren, gemessen (Abb. 5-6). Dabei lag ein Meßpunkt in der Mitte der Wehrschwelle (WS_0), zwei an den beiden Enden der Wehrschwelle (WS_{2L} ; WS_{2R}) und zwei in der Mitte zwischen diesen Meßpunkten (WS_{1L} ; WS_{1R}).

5.3.2 Ultraschallmeßsonde

Desweiteren wurden bei den physikalischen Modelluntersuchungen die Strömungsgeschwindigkeiten im Bereich des Einleitungsbauwerkes erfaßt. Dies geschah mit einer Ultraschallmeßsonde bestehend aus einem Meßkopf und einer Auswertungseinheit. Die Sonde arbeitet nach dem Doppler-Prinzip. Zur Ermittlung von Strömungsgeschwindigkeiten wird ein kurzer

akustischer Impuls bekannter Frequenz entlang der vertikalen Achse des Meßkopfes ausgesendet. Partikel im vorbeiströmenden Wasser werfen ein Echo zurück, welches im Meßkopf registriert wird. Von der Auswertungseinheit wird die auftretende Frequenzverschiebung zwischen ausgesendetem Impuls und zurückgeworfenem Echo, die proportional zur Strömungsgeschwindigkeit ist, interpretiert. Strömungsgeschwindigkeiten an einem Meßpunkt können dreidimensional in frei wählbaren Mittelungsintervallen erfaßt werden (Nortek AS, 1996a und 1996b).

Die Strömungsgeschwindigkeiten wurden an ausgewählten Stellen jeweils über ein Mittelungsintervall von 30 Sekunden elektronisch erfaßt und bildeten die Grundlage zur Ermittlung der Anordnung der Tauchwand hinsichtlich einer gleichmäßigen Strömungsverteilung.

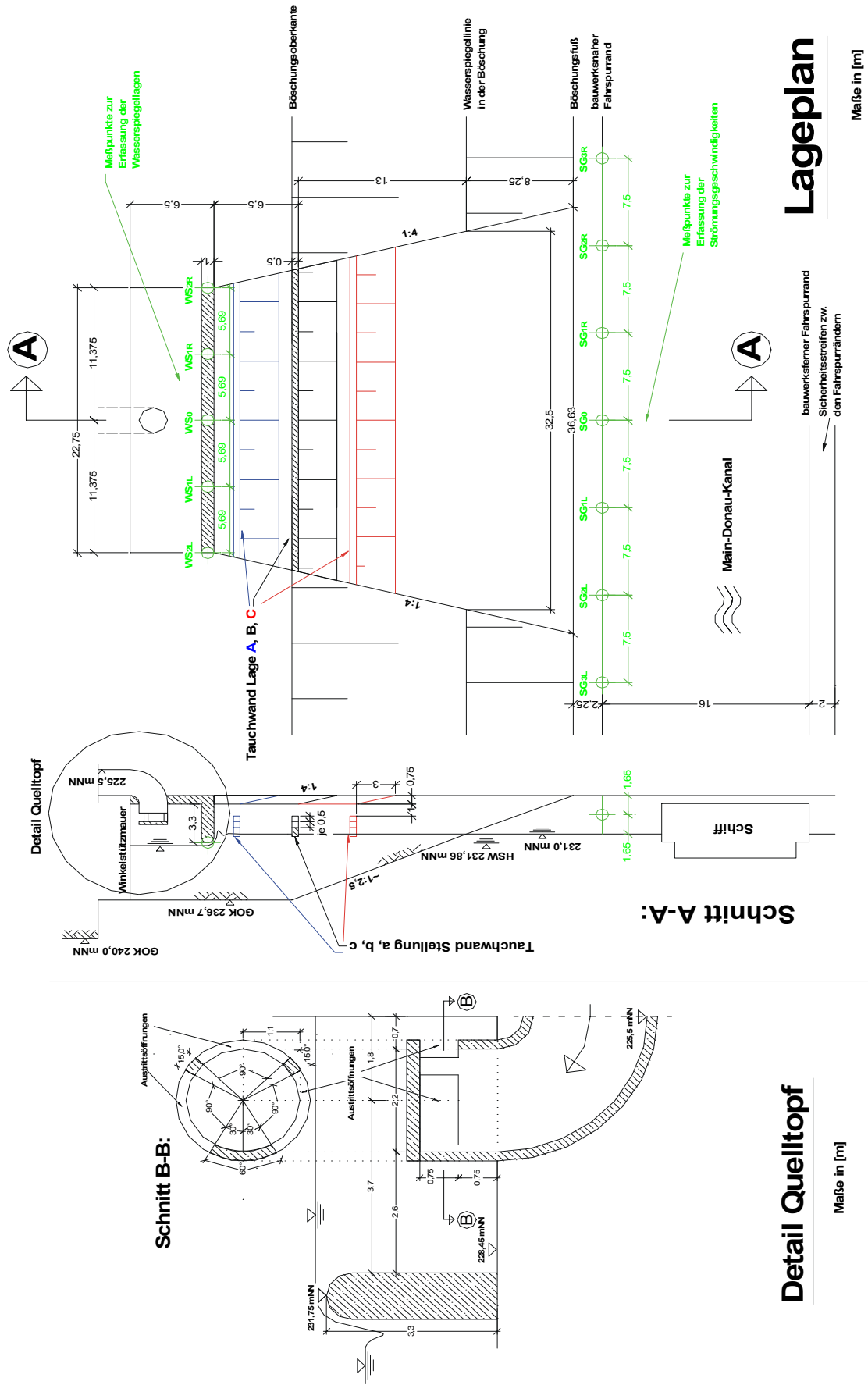
Die Geschwindigkeiten wurden in halber Wassertiefe entlang des bauwerksnahen Fahrspurrandes erfaßt. Gemessen wurde jeweils an einem Meßpunkt in der Mittelachse des Einleitungsbauwerkes und an Meßpunkten, die jeweils um 7,5 m weiter nach Ober- und Unterstrom aus der Mittelachse bis auf Höhe der seitlichen Begrenzungen der Einleitungsbauwerkes verschoben waren (Abb. 5-6). Hieraus ergaben sich für das Einleitungsbauwerk insgesamt sieben Meßpunkte (SG₀; SG_{1L}; SG_{1R}; SG_{2L}; SG_{2R}; SG_{3L}; SG_{3R}).

5.3.3 Visuelle Registrierung

Das Bewegungsverhalten des Einleitungsbauwerkes passierender Schiffe wurde fotografisch festgehalten.

Dabei ließ sich jeweils ein Zeitraum von 60 Sekunden in einer Langzeitaufnahme erfassen. Hierdurch wurde die Beurteilung des Einleitungsbauwerkes hinsichtlich der Beeinflussung des Schiffsverkehrs möglich.

Die visuelle Registrierung erfolgte zentral über der vorgesehenen Einleitungsstelle aus einer Höhe von 5 m.



Lageplan

Maße in [m]

Detail Quelltopf

Maße in [m]

Abb. 5-6: Anordnung der Messinstr. im Einleitungsbauwerk (Ausgangszustand inkl. Tauchwandvariationen)

6 Untersuchungsprogramm und Versuchsdurchführung

6.1 Untersuchungsprogramm

In der Vorbemessung wurden die Hauptbauwerksdimensionen des Einleitungsbauwerkes lediglich für die minimalen Anforderungen ermittelt. Aus diesem Grund lag der Vorbemessung eine Einleitungswassermenge von $6 \text{ m}^3/\text{s}$ zugrunde. Nach Möglichkeit sollte die Einleitungswassermenge jedoch bis zu $12 \text{ m}^3/\text{s}$ betragen. Zum anderen wurden die Hauptbauwerksdimensionen des Einleitungsbauwerkes ausschließlich für den Schiffstyp „Schubverband (einspurig – zweigliedrig)“ ermittelt. Dieser stellt der Theorie nach den ungünstigsten Fall dar, da er von den drei zu berücksichtigenden Schiffstypen die größte Schiffslänge aufweist. Auch erfolgten bei der Gestaltung des Einleitungsbauwerkes Vereinfachungen bezüglich der Ausbildung des Quelltopfes und der Anordnung der Tauchwand.

Aus diesem Grund wurden zur Beurteilung des Einleitungsbauwerkes hinsichtlich der Beeinflussung des Schiffsverkehrs im Vorfeld zwei zusätzliche Untersuchungsschritte durchgeführt. In einem ersten Schritt wurde der Quelltopf hinsichtlich einer gleichmäßigen Wasserverteilung über die Wehrschwelle überprüft. Im Anschluß daran wurde in einem zweiten Schritt die Anordnung der Tauchwand hinsichtlich einer gleichmäßigen Strömungsverteilung im Einleitungsbauwerk ermittelt.

Dabei wurden die Untersuchungen für Einleitungswassermengen zwischen $6 \text{ m}^3/\text{s}$ und $12 \text{ m}^3/\text{s}$ mit Intervallen von $2 \text{ m}^3/\text{s}$ durchgeführt. Zur Überprüfung des Quelltopfes hinsichtlich einer gleichmäßigen Wasserverteilung über die Wehrschwelle wurde zusätzlich die Druckhöhe in der Wasserzuführung variiert. Auf der Basis von Erfahrungswerten wurden Druckhöhen von 0,6 bar, 1 bar und 1,4 bar gewählt. Die Beurteilung des Einleitungsbauwerkes hinsichtlich der Beeinflussung des Schiffsverkehrs erfolgte mit dem Schiffstyp „Schubverband (einspurig – zweigliedrig)“ und dem Schiffstyp „Johann Welker“. Der Schiffstyp „Großmotorgüterschiff“, dessen Abmessungen zwischen denen der beiden anderen Schiffstypen liegen, wurde als nicht maßgebend betrachtet.

6.2 Versuchsdurchführung

Zur Durchführung der physikalischen Modelluntersuchungen wurde das Einleitungsbauwerk in die Schiffsrinne eingebaut (Abb. 6-1). Die zu jedem Versuch gehörenden Druckhöhen und Durchflussmengen wurden auf Modellgröße übertragen und im Modell eingestellt. Unter stationären Bedingungen wurden dann die Untersuchungen durchgeführt. Anzumerken ist, daß dabei die Modellschiffe ohne Rudergabe am Einleitungsbauwerk vorbei geführt wurden, da sowohl

eine um das fünffache kleinere Ruderlegezeit als auch eine um das fünffache kleinere Reaktionszeit des Schiffsführers für den gewählten Modellmaßstab von 1:25 im Vergleich zur Natur im Modell nicht korrekt abzubilden sind. Dies stellt jedoch den ungünstigsten Fall dar.



Abb. 6-1: Versuch mit dem Modell des Einleitungsbauwerkes

7 Untersuchungsergebnisse

7.1 Eignung des Quelltopfes

7.1.1 Allgemeines

Bei jedem Versuch wurde die Verteilung der Überfallhöhe über die gesamte Breite der Wehrkrone ermittelt, die generell nahezu konstant war. Diese Tatsache war jedoch nicht ausreichend, um bereits die Gleichmäßigkeit des Wehrüberfalls bei einem Versuch zu bewerten, da zwischen den einzelnen Meßpunkten Schwankungen in der Überfallhöhe möglich waren.

Aus diesem Grund wurde für die weitere Analyse das arithmetische Mittel der Überfallhöhe über der Wehrkrone für jeden Versuch ermittelt und mit der nach Gl. 7-1 zu berechnenden mittleren Überfallhöhe verglichen (Schneider, 1990). Im Idealfall fallen korrespondierende mittlere gemessene und berechnete Überfallhöhe zusammen, was auf eine gleichmäßige Wasserverteilung über der Wehrschwelle und somit auf die Eignung des Quelltopfes hinweist.

$$h = \frac{2}{3} \left(\frac{1,5Q}{\mu b \sqrt{2g}} \right)^{\frac{2}{3}} \quad \text{Gl. 7-1}$$

mit

- b = Breite der Wehrkrone [m]
- g = Erdbeschleunigung [m/s^2]
- h = Überfallhöhe über Wehrkrone [m]
- Q = Einleitungswassermenge [m^3/s]
- μ = Formabhängiger Überfallbeiwert (0,5) [-]

7.1.2 Analyse

In Abb. 7-1 ist die so gewonnene Datengrundlage für das Einleitungsbauwerk graphisch aufbereitet. In Abhängigkeit von Einleitungswassermenge und Druck-

höhe in der Wasserzuführung zum Einleitungsbauwerk sind die mittleren gemessenen und berechneten Überfallhöhen über der Wehrkrone aufgetragen.

Dabei zeigt sich generell eine maximale Differenz von 4 % zwischen korrespondierenden gemessenen und berechneten Überfallhöhen und das nahezu unabhängig von der Einleitungswassermenge und der Druckhöhe in der Wasserzuführung zum Einleitungsbauwerk. Aus diesem Grund kann für alle Versuche auf eine gleichmäßige Wasserverteilung über der Wehrschwelle geschlossen werden, d. h. die für das Einleitungsbauwerk gewählte Konstruktion des Quelltopfes ist im Einleitungswassermengenbereich von $6 \text{ m}^3/\text{s}$ - $12 \text{ m}^3/\text{s}$ und Druckhöhenbereich in der Wasserzuführung zum Einleitungsbauwerk von $0,6 \text{ bar}$ - $1,4 \text{ bar}$ geeignet.

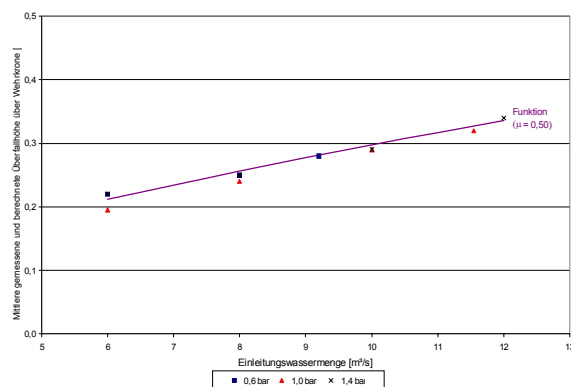


Abb. 7-1: Mittlere gemessene und berechnete Überfallhöhe über Wehrkrone in Abhängigkeit von Einleitungswassermenge und Druckhöhe in der Wasserzuführung zum Einleitungsbauwerk

7.2 Anordnung der Tauchwand

7.2.1 Allgemeines

Bei jedem Versuch wurde das Strömungsfeld dreidimensional in halber Wassertiefe entlang des Einleitungsbauwerkes am bauwerksnahen Fahrspurrand ermittelt. Dabei zeigte sich bei allen Versuchen generell, daß die Querströmungskomponente senkrecht zur Kanalachse gegenüber den Strömungskomponenten in die anderen beiden Raumrichtungen um ein bis zwei Größenordnungen größer war.

Für die weitere Analyse wurde daher nur noch die Querströmungskomponente betrachtet. Exemplarisch ist in Abb. 7-2 das Querströmungsfeld in halber Wassertiefe entlang des Einleitungsbauwerkes am bauwerksnahen Fahrspurrand für die Tauchwandvariation Aa und den Einleitungswassermengenbereich von $6 \text{ m}^3/\text{s}$ - $12 \text{ m}^3/\text{s}$ dargestellt. Mit derartigen Darstellungen für alle Tauchwandvariationen war die Ermittlung der Anordnung der Tauchwand hinsichtlich einer gleichmäßigen Strömungsverteilung jedoch nur begrenzt möglich.

Deshalb wurde für die weitere Analyse für jeden Versuch das arithmetische Mittel des Querströmungsfeldes und dessen Differenz zur maximalen Querströmungsgeschwindigkeit im jeweiligen Querströmungsfeld ermittelt. Im Idealfall ist die Differenz der maximalen Querströmungsgeschwindigkeit zum arithmetischen Mittel in einem Querströmungsfeld gleich Null, was auf eine gleichmäßige Strömungsverteilung im Einleitungsbauwerk hindeutet.

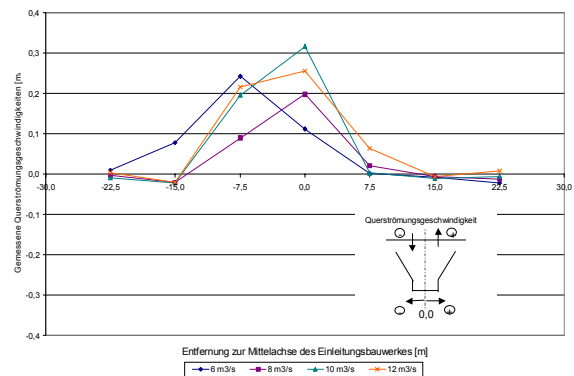


Abb. 7-2: Querströmungsfeld in halber Wassertiefe entlang des Einleitungsbauwerkes am bauwerksnahen Fahrspurrand; Tauchwandvariation Aa; Einleitungswassermenge $6 \text{ m}^3/\text{s}$ - $12 \text{ m}^3/\text{s}$

7.2.2 Analyse

In Abb. 7-3 ist die so gewonnene Datengrundlage für das Einleitungsbauwerk graphisch aufbereitet. Für jede Tauchwandvariation sind die mittleren gemessenen Querströmungsgeschwindigkeiten und die korrespondierenden Differenzen zwischen maximaler und mittlerer gemessener Querströmungsgeschwindigkeit am bauwerksnahen Fahrspurrand in Abhängigkeit von der Einleitungswassermenge aufgetragen.

Dabei zeigt sich für einzelne Tauchwandvariationen ein nicht stetiges Verhalten sowohl im Verlauf der mittleren gemessenen Querströmungsgeschwindigkeiten als auch in deren korrespondierenden Differenzen zwischen maximaler und mittlerer gemessener Querströmungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Einleitungswassermenge. Derartige Tauchwandvariationen sind zu verwerfen, da eine eindeutige Beeinflussung des Querströmungsfeldes nicht erkennbar ist. Die verbleibenden Tauchwandvariationen zeigen ein stetiges Verhalten in der Beeinflussung des Querströmungsfeldes in Abhängigkeit von der Einleitungswassermenge. Allerdings liegen die Differenzen zwischen maximaler und mittlerer gemessener Querströmungsgeschwindigkeit in der Regel um den Faktor drei über den korrespondierenden mittleren gemessenen Querströmungsgeschwindigkeiten.

Tauchwandvariation Ba jedoch weicht hiervon ab. Die Differenz zwischen maximaler und mittlerer gemesse-

ner Querströmungsgeschwindigkeit unabhängig von der Einleitungswassermenge weist eine maximale Abweichung von der korrespondierenden mittleren gemessenen Querströmungsgeschwindigkeit um den Faktor zwei auf. Dieses läßt auf eine gleichmäßige Strömungsverteilung im Einleitungswassermengenbereich von $6 \text{ m}^3/\text{s} - 12 \text{ m}^3/\text{s}$ schließen. Die **Tauchwandvariation Ba** stellt somit die optimale Anordnung der Tauchwand dar und ist maßgebend für die weiteren Untersuchungen.

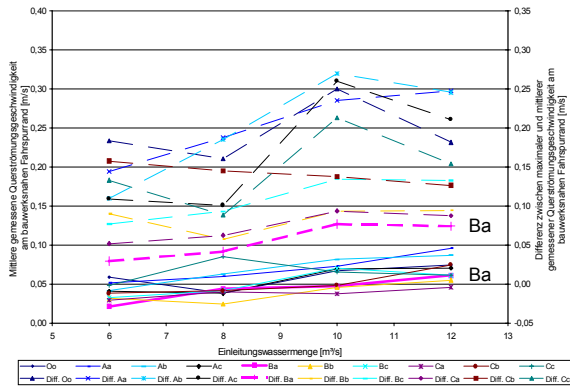


Abb. 7-3: Mittlere gemessene Querströmungsgeschwindigkeit und Differenz zwischen maximaler und mittlerer gemessener Querströmungsgeschwindigkeit am bauwerksnahen Fahrspurrand in Abhängigkeit von Einleitungswassermenge und Tauchwandvariation

7.3 Beeinflussung des Schiffsverkehrs

7.3.1 Allgemeines

Bei jedem Versuch wurde das Bewegungsverhalten passierender Schiffe erfaßt. In der Abb. 7-4 ist exemplarisch das Bewegungsverhalten eines das Einleitungsbauwerk passierenden Schiffes für Tauchwandvariation Ba, den Schiffstyp „Schubverband (einspurig – zweigliedrig)“ und die Einleitungswassermenge $12 \text{ m}^3/\text{s}$ dargestellt.

Die exakte Beurteilung des Einleitungsbauwerkes hinsichtlich der Beeinflussung des Schiffsverkehrs konnte auf der Basis einer rein visuellen Betrachtung dieser Aufnahmen jedoch nicht erfolgen, da ein Schiff nur verschwommen zu erkennen ist. Daher waren in der Mittelachse jedes Schiffes Glühlampen befestigt, eine am Bug, eine am Heck und eine in der Mitte des Schiffes. Deren Bewegungsverhalten ist als farbige Linie in der Abb. 7-4 zu erkennen. Durch Abstands- und Winkelmessungen konnte hiermit die Verdriftung (translatorisch) und der Driftwinkel eines Schiffes relativ zu seiner Ausgangslage bezogen auf den Schiffsmittelpunkt bestimmt werden, woraus sich das Einleitungsbauwerk hinsichtlich der Beeinflussung des Schiffsverkehrs beurteilen ließ.

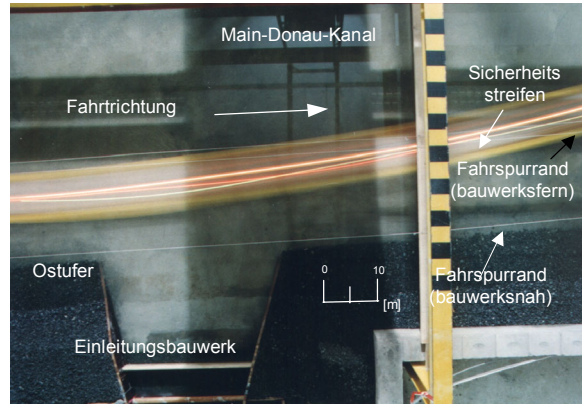


Abb. 7-4: Bewegungsverhalten eines das Einleitungsbauwerk passierenden Schiffes (Tauchwandvariation Ba); Schiffstyp „Schubverband (einspurig - zweigliedrig)“; Einleitungswassermenge $12 \text{ m}^3/\text{s}$

7.3.2 Analyse

In Abb. 7-5 ist die so gewonnene Datengrundlage für das Einleitungsbauwerk (Tauchwandvariation Ba) graphisch aufbereitet. In Abhängigkeit von der Einleitungswassermenge und dem untersuchten Schiffstyp sind die Verdriftung (translatorisch) und der Driftwinkel eines Schiffes relativ zur Ausgangslage bezogen auf den Schiffsmittelpunkt aufgetragen.

Entgegen der Theorie ist dabei zum einen kein eindeutiger Zusammenhang zwischen Einleitungswassermenge und Verdriftung (translatorisch) bzw. Driftwinkel zu erkennen. Zum anderen findet sich auch nicht bestätigt, daß eine größere Schiffslänge ungünstigere Verhältnisse zur Folge hat. Vielmehr zeigt sich, daß im unteren Einleitungswassermengenbereich eine zur jeweiligen Bauwerksvariante hin gerichtete Verdriftung (translatorisch) der Schiffe auftritt. Dies läßt sich dadurch erklären, daß in der Vorbemessung vereinfachende Annahmen getroffen werden mußten, die sich hier bemerkbar machen.

Dies bedeutet, daß zur Bewertung des Einleitungsbauwerkes auch der bauwerksnahe Fahrspurrand in die Betrachtungen einzubeziehen ist. Um diesen Fahrspurrand nicht zu überschreiten, ist beim Schiffstyp „Johann Welker“ eine Verdriftung (translatorisch und rotatorisch) zum Einleitungsbauwerk hin von $6,5 \text{ m}$ zulässig und beim Schiffstyp „Schubverband (einspurig – zweigliedrig)“ von $4,6 \text{ m}$ (Abb. 2-3). Unter Berücksichtigung dieser Aspekte zusätzlich zur Grenze der zulässigen Verdriftung (translatorisch und rotatorisch) von 2 m vom Einleitungsbauwerk weg unabhängig vom Schiffstyp, ist das Einleitungsbauwerk für eine Einleitungswassermenge von $6 \text{ m}^3/\text{s} - 8 \text{ m}^3/\text{s}$ geeignet. Bis zu dieser Grenze ist der Driftwinkel unabhängig vom Schiffstyp nahezu gleich Null, so daß die hiermit verbundene Verdriftung (rotatorisch) nicht berücksichtigt werden braucht.

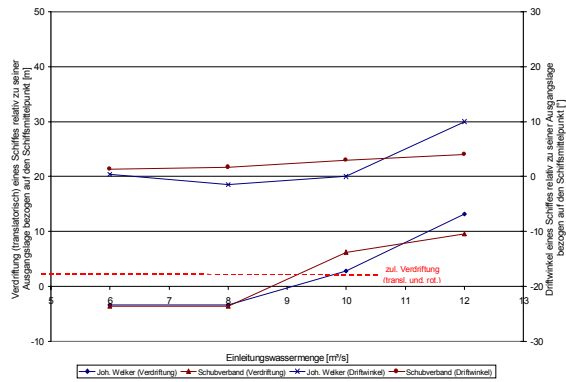
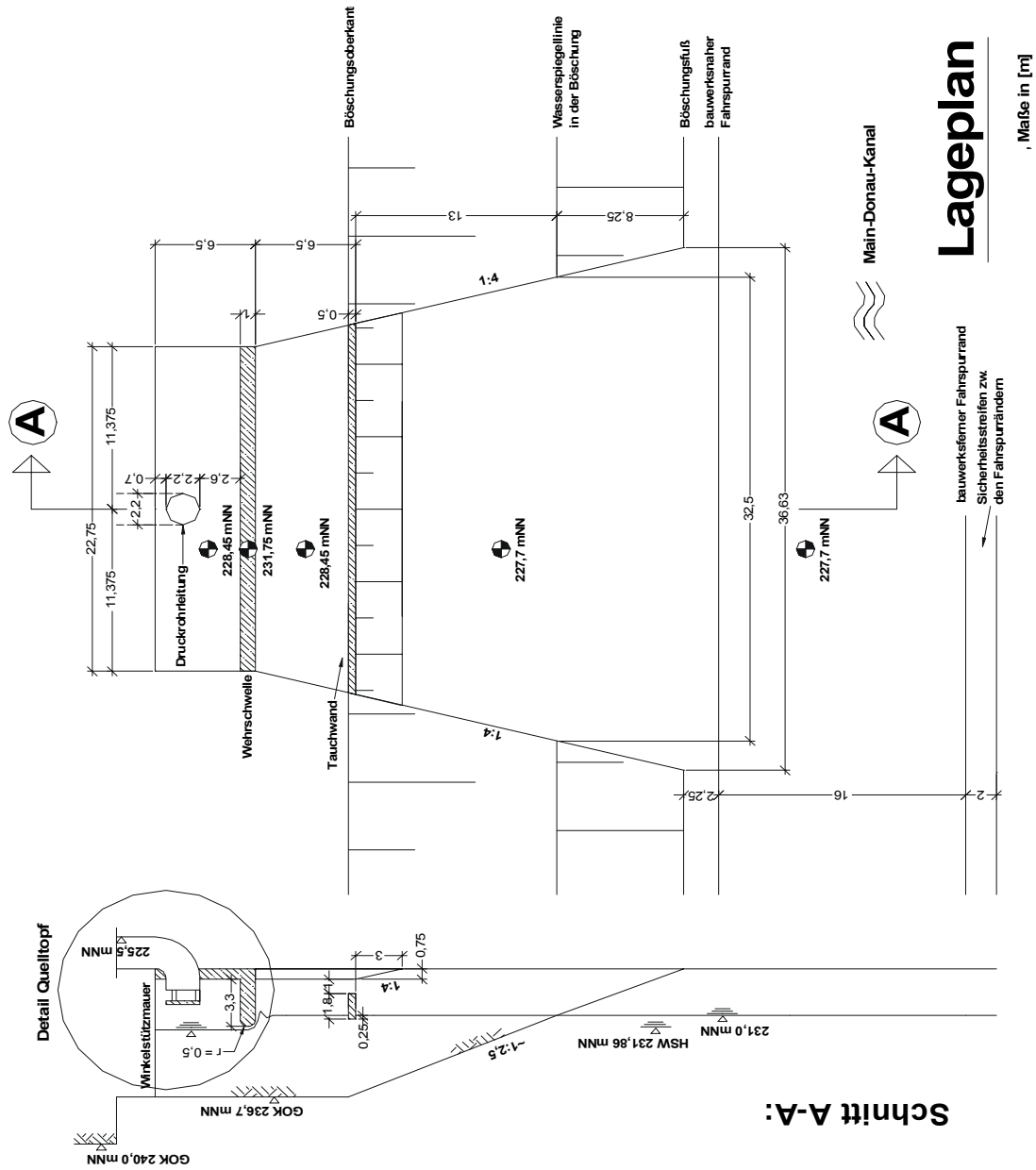


Abb. 7-5: Verdriftung (translatorisch) und Driftwinkel eines Schiffes relativ zu seiner Ausgangslage bezogen auf den Schiffsmittelpunkt in Abhängigkeit von Einleitungswassermenge und Schiffstyp (Tauchwandvariation Ba)

7.4 Schlußfolgerungen

Das auf der Basis der Vorbemessung entwickelte Einleitungsbauwerk wurde in den physikalischen Modelluntersuchungen in einem ersten Schritt in seiner Gestaltung optimiert, wonach es hinsichtlich der Beeinflussung des Schiffsverkehrs beurteilt wurde.

Die Anordnung der Tauchwand wurde dabei mit der Tauchwandvariation Ba gefunden. Dies entspricht einer Lage der Tauchwand 6,5 m vor der Wehrschwelle hin zum Main-Donau-Kanal bei einer Stellung der Tauchwand über der Sohle von 1 m (Abb. 7-6). Hinsichtlich der Beeinflussung des Schiffsverkehrs wurde ermittelt, daß das Einleitungsbauwerk für eine Einleitungswassermenge von $6 \text{ m}^3/\text{s} - 8 \text{ m}^3/\text{s}$ geeignet ist.



Detail Quelltopf

Maße in [m]

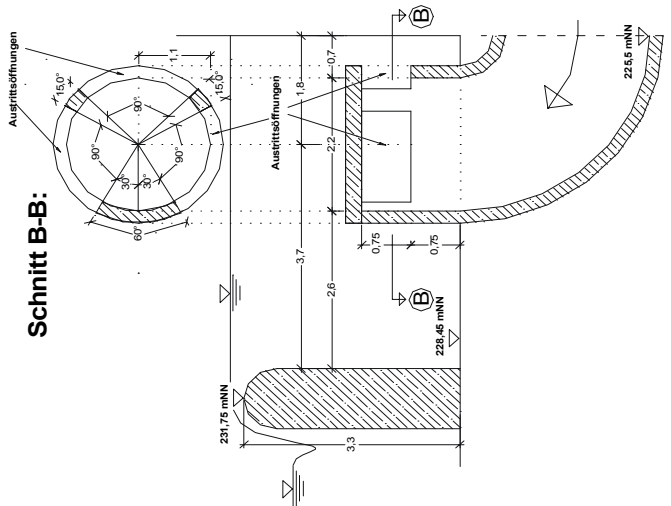


Abb. 7-6: Systemskizze des Einleitungsbauwerkes (Endzustand)

Lageplan

Maße in [m]

8 Zusammenfassung und Ausblick

Beispielsweise während oder nach einem Starkregenereignis, bei dem innerhalb kurzer Zeit große Wassermengen in einem Einzugsgebiet anfallen, kann u. a. die hydraulische Entlastung einer kommunalen Kläranlage erforderlich werden. Unter anderem besteht die Möglichkeit, diese Wassermengen direkt in eine Binnenwasserstraße einzuleiten. Durch eine derartige seitliche Wassereinleitung in eine Wasserstraße wird u.a. ein Querströmungsfeld in dieser induziert, welches das Bewegungsverhalten eines die Einleitungsstelle passierenden Schiffes beeinflusst. Um die Sicherheit und Leichtigkeit des Schiffsverkehrs auf der Wasserstraße nicht zu gefährden, ist das Querströmungsfeld durch eine geeignete Gestaltung der Einleitungsstelle in Form eines Einleitungsbauwerkes zu begrenzen.

Im Rahmen einer Untersuchung des FRANZIUS-INSTITUTS FÜR WASSERBAU UND KÜSTENINGENIEURWESEN DER UNIVERSITÄT HANNOVER für die STADT BAMBERG über die Aussichten einer seitlichen Wassereinleitung in den Main-Donau-Kanal am Ostufer des km 6,2 (Franzius-Institut, 2000) wurden daher die gängigen Möglichkeiten zur Entwicklung eines Einleitungsbauwerkes auf der Basis analytischer und experimenteller Methoden untersucht. Dabei zeigte sich, daß eine nur auf analytischen Ansätzen basierende Entwicklung eines Einleitungsbauwerkes auch mit dem derzeit umfassendsten Ansatz nach Pulina (1993) nicht aussagekräftig ist, da vereinfachende Annahmen, wie die Vernachlässigung der spezifischen Gegebenheiten an der Einleitungsstelle, zugrunde liegen. Ergänzende physikalische Modelluntersuchungen sind daher unerlässlich, um ein auf der Basis analytischer Ansätze entwickeltes Einleitungsbauwerk in seiner Gestaltung zu optimieren und hinsichtlich der Beeinflussung des Schiffsverkehrs abschließend quantitativ beurteilen zu können.

Diese Vorgehensweise jedoch ist mit einem großen Zeit- und damit Kostenaufwand für die physikalischen Modelluntersuchungen verbunden. In Zukunft jedoch könnten numerische Methoden zur einer Reduzierung dieser beitragen, da sie zu einem besseren Verständnis der Strömungsvorgänge in einem Einleitungsbauwerk und dadurch zu einer zielsichereren Formgebung beitragen können als dies allein durch experimentelle Methoden möglich ist. Insbesondere ist hierbei die dreidimensionale numerische Simulation auf der Basis sogenannter Computational Fluid Dynamics (CFD) – Löser zu nennen, die sich dadurch auszeichnen, daß sie die Grundgleichungen zur Beschreibung von Strömungsprozessen, die Erhaltungsgleichungen von Masse, Impuls und Energie, im dreidimensionalen Raum lösen, und damit die Erfassung hochkomplexer Strömungsvorgänge erst er-

möglichen (Versteeg & Malalasekera, 1995). Dies verdeutlichen die Ergebnisse numerischer Simulationen für das im Rahmen der Untersuchung des FRANZIUS-INSTITUTS FÜR WASSERBAU UND KÜSTENINGENIEURWESEN DER UNIVERSITÄT HANNOVER für die STADT BAMBERG über die Aussicht einer seitlichen Wassereinleitung in den Main-Donau-Kanal am Ostufer des km 6,2 entwickelte Einleitungsbauwerk (Abb. 7-6). Dabei wurden die Strömungsvorgänge im Einleitungsbauwerk (Abb. 8-1) sowie im angrenzenden Main-Donau-Kanal (Abb. 8-2) mit dem CFD - Löser StarCD (Star-CD, 1999) unter Berücksichtigung aller vorgegebenen Randbedingungen nach den anerkannten Regeln der Technik numerisch simuliert (Müller & Detert, 2000).

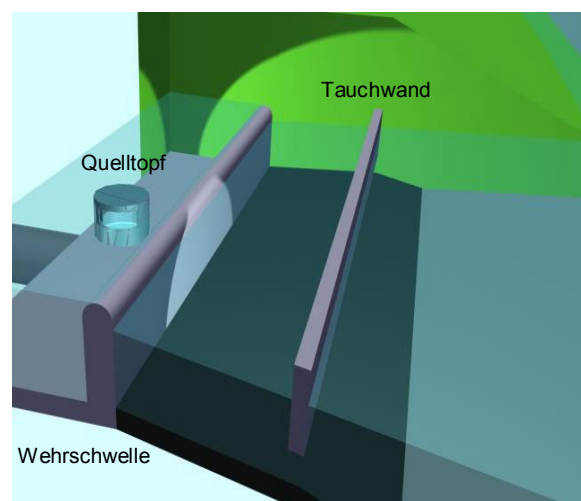


Abb. 8-1: 3D-Ansicht des Einleitungsbauwerkes

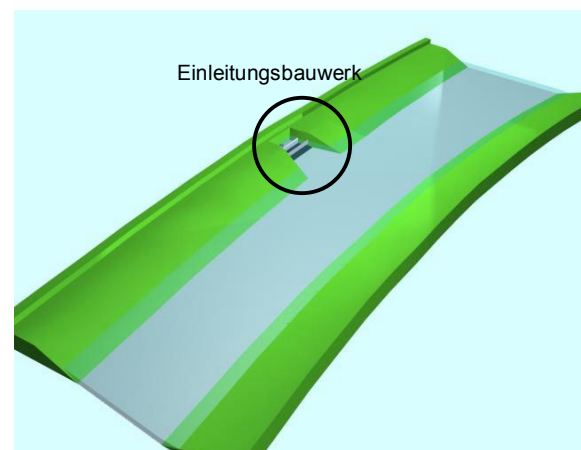


Abb. 8-2: 3D-Ansicht des Main-Donau-Kanals im Bereich des Einleitungsbauwerkes

Abb. 8-3 zeigt die Ausbildung des simulierten Wehrüberfalls im Einleitungsbauwerk exemplarisch für eine Einleitungswassermenge von $8 \text{ m}^3/\text{s}$. Deutlich sichtbar ist ein gleichmäßiger Wehrüberfall über die gesamte Breite der Wehrschwelle. Ähnliches zeigt sich im gesamten Einleitungswassermengenbereich von

6 m³/s – 12 m³/s, wobei die Differenzen zwischen korrespondierenden simulierten und in den physikalischen Modelluntersuchungen gemessenen Überfallhöhen über der Wehrkrone 6 % generell nicht überschreiten.

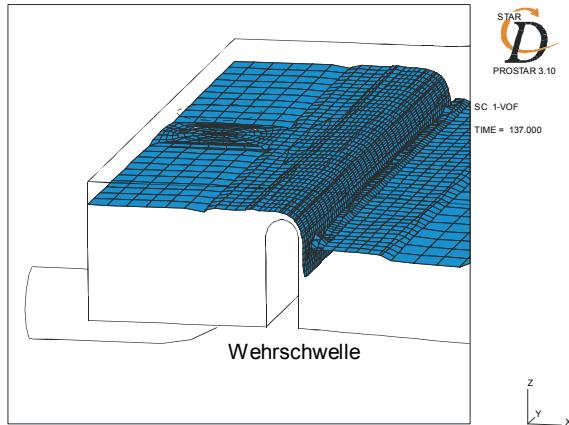


Abb. 8-3: Ausbildung des simulierten Wehrüberfalls im Einleitungsbauwerk; Einleitungswassermenge 8 m³/s

Weiterhin zeigt Abb. 8-4 das simulierte Strömungsfeld in halber Wassertiefe im Einleitungsbauwerk und im angrenzenden Main-Donau-Kanal exemplarisch für eine Einleitungswassermenge von 8 m³/s. Zum Vergleich ist in Abb. 8-5 das in den physikalischen Modelluntersuchungen erfaßte korrespondierende Strömungsfeld dargestellt. Hierbei läßt sich insbesondere im Einleitungsbauwerk eine ausreichende Übereinstimmung sowohl der Strömungsgeschwindigkeiten als auch der Strömungsrichtungen feststellen. Ähnliches zeigt sich im gesamten Einleitungswassermengenbereich von 6 m³/s – 12 m³/s.

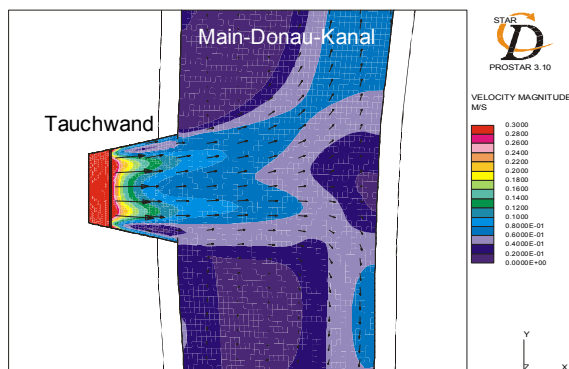


Abb. 8-4: Simuliertes Strömungsfeld in halber Wassertiefe im Einleitungsbauwerk und im angrenzenden Main-Donau-Kanal Einleitungswassermenge 8 m³/s

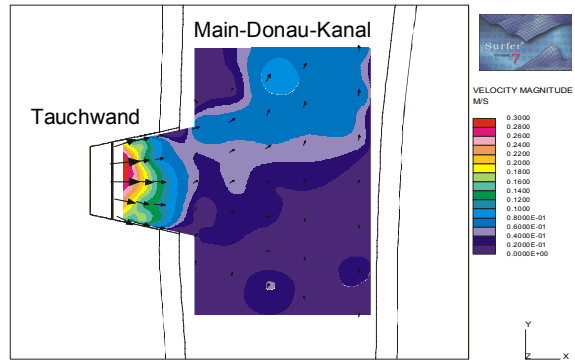


Abb. 8-5: Gemessenes Strömungsfeld in halber Wassertiefe im Einleitungsbauwerk und im angrenzenden Main-Donau-Kanal Einleitungswassermenge 8 m³/s

Abschließend bleibt festzustellen, daß die numerische Simulation physikalische Modelluntersuchungen bei der Entwicklung eines Einleitungsbauwerkes bis auf weiteres nicht vollständig werden ersetzen können, da eine quantitative Aussage über die Beeinflussung des Schiffsverkehrs mittels numerischer Simulationen bisher nicht möglich ist, denn die Simulation der dynamischen Wechselwirkungen zwischen dem durch ein Einleitungsbauwerk induziertem Strömungsfeld und einem das Einleitungsbauwerk passierenden Schiff übersteigen bisher die Möglichkeiten der CFD-Löser. Erste Ansätze hierfür existieren mittlerweile, jedoch besteht weiterhin Forschungsbedarf.

9 Schrifttum

Bakowies, F.: Der Einfluß von Querströmungen auf ein Schiff bei beschränkter Fahrwassertiefe. Mitteilungen des Instituts für Wasserbau und Kulturtechnik, Nr. 176, Universität Karlsruhe, Karlsruhe, 1987

Drewes, U., Mertens, W. & Römisch, K.: Schiffsverkehrsbeeinflussung durch Querströmungen infolge von Wassereinleitungen an Binnenwasserstraßen. Zentralorgan für Binnenschifffahrt, Nr. 19, Hamburg, 1994

Franzius-Institut für Wasserbau und Küsteningenieurwesen: Untersuchungen zu einleitungsbedingten Beeinflussungen des Schiffsverkehrs auf dem Main-Donau-Kanal in der Stadt Bamberg. Abschlußbericht, Nr. 642, Universität Hannover, Hannover, 2000

Grimm, O.: Das Schiff und der Dalben. Schiff und Hafen, Nr. 9, Hamburg, 1955

Kobus, H.: Wasserbauliches Versuchswesen. DWK-Schriften, Nr. 39, Berlin, 1984

- Lasar, S. & Voigt, A.: Gestaltung des Allertlastungsbauwerkes I am MLK. Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau, Nr. 77, Karlsruhe, 1998
- Müller, E.: Schrägschleppversuche auf begrenzter Wassertiefe. Schiff und Hafen, Nr. 9, Hamburg, 1973
- Müller, A. & Detert, M.: Analytische, experimentelle und numerische Untersuchungen zur Entwicklung eines Einleitungsbauwerkes in Binnenwasserstraßen am Beispiel einer Wassereinleitung in den Main-Donau-Kanal in der Stadt Bamberg. Diplomarbeit, Franzius-Institut für Wasserbau und Küsteningenieurwesen der Universität Hannover, Hannover, 2000 (unveröffentlicht)
- Nortek AS: ADV Operation Manual. Handbuch, Vollen, 1996a
- Nortek AS: ADV Software Reference Manual. Handbuch, Vollen, 1996b
- Partenscky, H.-W.: Binnenverkehrswasserbau - Schleusenanlagen. Handbuch, Berlin, 1986
- Pulina, B.: Bestimmung der zulässigen Strömungsgröße für seitliche Einleitungsbauwerke an Bundeswasserstraßen. Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau, Nr. 70, Karlsruhe, 1993
- Ross, C.: Querströmungen und Rückgabebauwerke an Wasserstraßen. DVWK-Schriften, Nr. 67, Hamburg, 1984
- Schneider, K.-J.: Bautabellen mit Berechnungshinweisen und Beispielen. Formelwerk – 9. Auflage, Düsseldorf, 1990
- Schwarze, H. & Hanisch, H.-H.: Querströmungen und Rückgabebauwerke an Wasserstraßen. DVWK-Schriften, Heft 67, Hamburg, 1984
- Star-CD: Methodology. Handbuch, Star-CD Version 3.10A, Computational Dynamics Limited, 1999
- Versteeg, H. K. & Malalasekera, W.: An Introduction to Computational Fluid Dynamics, The Finite Volume Method. Longman Scientific & Technical, London, 1995
- Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes – Wasser- und Schifffahrtsdirektion Süd: Karte der Bundeswasserstraßen 1:10000 – Verkehrskarte – Main-Donau-Kanal – Teil II – km 83,7 – km 170,78 – Kanalstufe Leerstetten – Kehlheim. Würzburg, 1991
- Zimmermann, C.: Zur Frage zulässiger Querströmungen an Bundeswasserstraßen. Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau, Nr. 67, Karlsruhe, 1990