

Schiffsanprall: Beitrag zum Schiffsanprall auf Binnenwasserstrassen und zur Berechnung und Bemessung von durch Schiffsanprall gefährdeten Bauwerken

Autor(en): **Grob, Josef / Hajdin, Nikola**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizer Ingenieur und Architekt**

Band (Jahr): **113 (1995)**

Heft 30/31

PDF erstellt am: **12.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-78751>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Josef Grob, Winterthur, und Nikola Hajdin, Belgrad

Schiffsanprall

Beitrag zum Schiffsanprall auf Binnenwasserstrassen und zur Berechnung und Bemessung von durch Schiffsanprall gefährdeten Bauwerken

Massgebend für die Tragsicherheit von Flusspfeilern im Bereich von Wasserstrassen ist in vielen Fällen der Schiffstoss. Über den Anprall von Schiffen auf Bauwerke gibt es weltweit eine Vielzahl von Arbeiten, wobei Schiffstösse auf Binnengewässern jedoch nur vereinzelt behandelt wurden. Das Tiefbauamt des Kantons Basel-Stadt liess aus diesem Grunde «Richtlinien für Entwurf und Bemessung von durch Schiffsanprall gefährdeten Bauwerken» auf dem schweizerischen Rheinabschnitt ausarbeiten, welche die zurzeit ausführlichste und systematischste Arbeit über den Schiffsanprall auf Binnenwasserstrassen darstellen.

Am 2. Juni 1904 schlug die Geburtsstunde der Gross-Schiffahrt nach Basel. Schon im gleichen Jahr löste sich der Schleppkahn «Christina» beim Wendemanöver vom Schleppdampfer Knipscheer IX und zerschellte an den Eisbrechern der Hüniger Schiffsbrücke.

In den 50er und den 60er Jahren blieben zweimal grosse Güterschiffe an der Johanniterbrücke hängen. Einmal erlitt ein Motorschiff an einem Pfeiler der Wettsteinbrücke Schiffbruch. Zwei vom Hochwasser losgerissene Baggerschiffe beendeten im Jahr 1954 ihre unfreiwillige Fahrt an der Mittleren Brücke. Im Jahre 1958 legte

sich das Motorgüterschiff »Birsigal« mit 1000 Tonnen Koks an Bord vor der Mittleren Brücke quer und sank. Schliesslich folgte im Jahre 1984 der nicht weniger spektakuläre Unfall des mit 930 Tonnen Tonerde beladenen Schubleichters «Corona», welcher sich nach Touchierung eines Brückenpfeilers der Mittleren Brücke durch das Schubboot «Vogel Gryff» von diesem löste, querlegte und sank (Bild 1).

Bestehende Vorschriften

Bestehende Vorschriften schreiben in der Regel statische Ersatzkräfte für die aussergewöhnliche Einwirkung des Schiffsanpralls vor. Sie beruhen auf mehr oder weniger zuverlässigen rechnerischen Abschätzungen oder auf Versuchsergebnissen. Als Beispiele von Ersatzkräften für den Schiffsanprall werden im folgenden der deutsche Erlass [2] und die Weisung der Wasser- und Schifffahrtsdirektion Mainz für den Ausbau der Saar beschrieben.

Der deutsche Erlass [2] legt für die Untersuchung des Schiffsanpralls folgende statischen Ersatzkräfte in Fahrtrichtung fest:

- für Flusspfeiler: 30 MN
- für Vorlandpfeiler: 6 MN

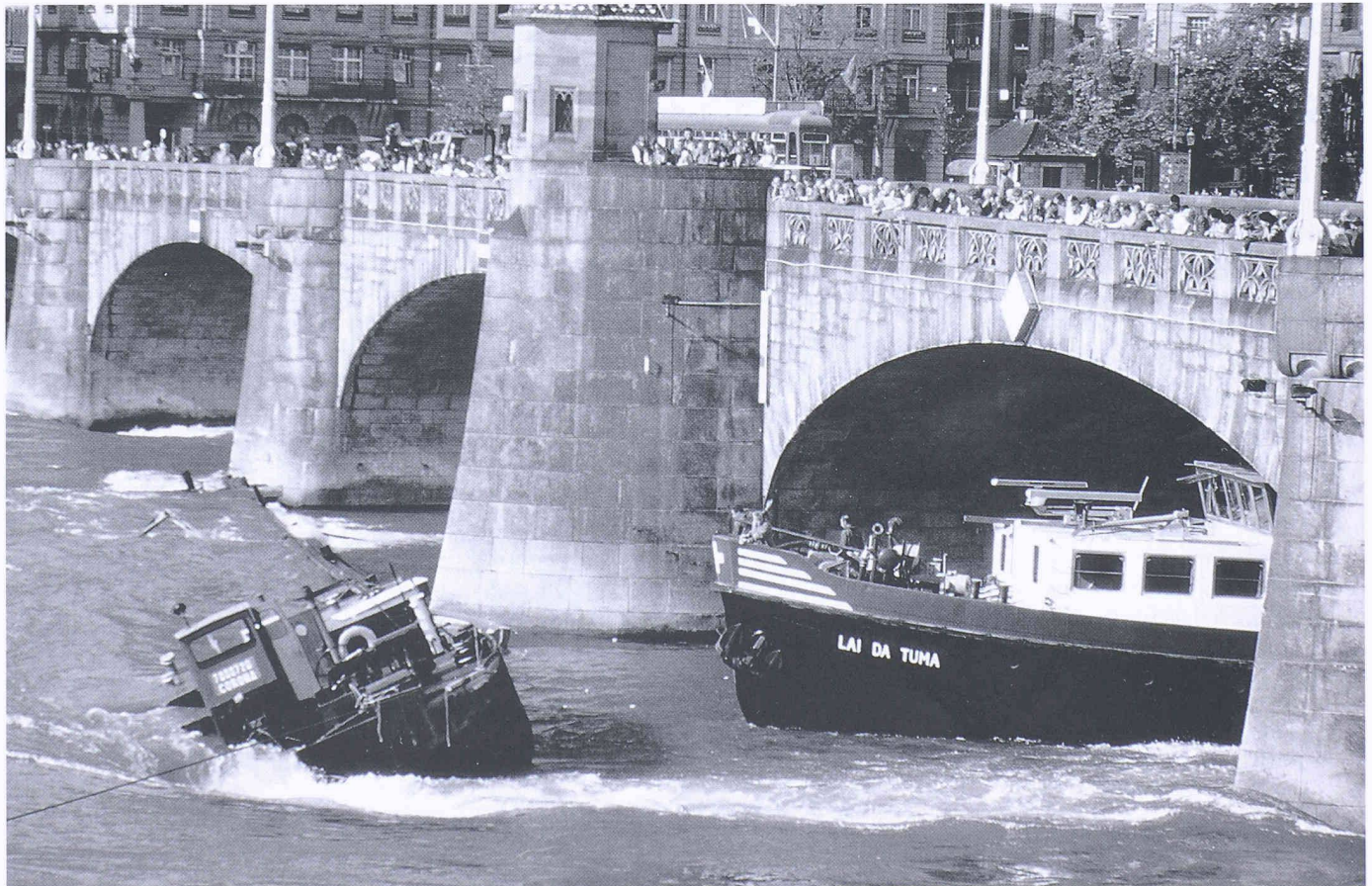


Bild 1.
Unfall des Schubleichters «Corona» an der Mittleren Brücke in Basel

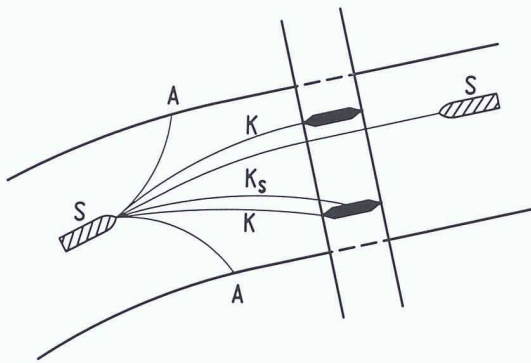


Bild 2. Unfallbahnen

Für Flusspfeiler sind die angegebenen Ersatzkräfte unrealistisch hoch, weil deren Ermittlung auf der völlig falschen Annahme beruht, dass sich die Schiffe beim Anprall «quasielastisch» verhalten. Dabei wurden willkürlich folgende maximale Verformungswege angenommen:

- für Schubverbände: $u_{max} = 4,00$ m
- für Motorgüterschiffe: $u_{max} = 2,00$ m

Für den Ausbau der Saar wurden durch die Wasser- und Schifffahrtsdirektion Mainz völlig von [2] abweichende Ersatzkräfte für die Berücksichtigung des Schiffsanpralls festgelegt. Sie beruhen auf den Untersuchungen [3] und betragen je nach örtlichen Gegebenheiten zwischen 7 MN und 15 MN. Diese Ersatzkräfte sind gut gewählt und liegen im Bereich der später beschriebenen Stossfunktionen.

Gefährdungsbilder

Anprallszenarien

Ausgangspunkt für das Aufstellen der Gefährdungsbilder sind die Fahrgeschwindigkeiten v_f von Schiffen relativ zum Ufer. Höchstwerte der Fahrgeschwindigkeit sind in [2] vorgeschrieben. Sie wurden aufgrund von Geschwindigkeitsmessungen [4] festgelegt. Ausserdem sind auf dem schweizerischen Rheinabschnitt aufgrund von Polizeiverordnungen maximale Fahrgeschwindigkeiten von 10 km/h für Bergfahrt und von 20 km/h für Talfahrt vorgeschrieben, und talwärts fahrende Schubverbände fahren aufgrund von Beobachtungen nicht schneller als 15 km/h.

Damit ergeben sich folgende maximale Fahrgeschwindigkeiten für Schubverbände:

- Bergfahrt: $v_f = 10$ km/h = 2,78 m/sec
- Talfahrt: $v_f = 15$ km/h = 4,17 m/sec

und für Motorgüterschiffe:

- Bergfahrt: $v_f = 10$ km/h = 2,78 m/sec
- Talfahrt: $v_f = 20$ km/h = 5,56 m/sec

Die Strömungsgeschwindigkeit des Rheins beim höchsten schiffbaren Wasserstand (HSW) liegt in Basel bei etwa 2 m/sec. Im Bereich von Brückenbauwerken liegt die kleinste Strömungsgeschwindigkeit (HSW) mit 1,89 m/sec bei der Schwarzwaldbrücke, Höchstwerte werden bei der Wettsteinbrücke erreicht. Sie betragen dort bei:

- Niederwasser (NW): 0,80 m/sec
- Mittelwasser (MW): 1,50 m/sec
- höchstem schiffbaren Wasserstand (HSW): 2,36 m/sec

Vor dem Anprall bewegt sich das Schiff in einer mehr oder weniger unkontrollierten Art auf einer Unfallbahn. Für den Anprall auf Bauwerke sind nur die in Bild 2 gezeigten Unfallbahnen A und K (K = frontal, K_s = seitlicher Anprall) von Bedeutung.

Die Anprallgeschwindigkeit liegt in der Regel tiefer als die Fahrgeschwindigkeit v_f , weil der Kapitän die Geschwindigkeit nach dem Erkennen einer möglichen Anprallgefahr herabsetzt. Laut [2] wird angenommen, dass der Kapitän im Abstand von 50m zum Bauwerk beginnt, das Schiff abzubremsen. Im ungünstigsten Fall gelingt es nur noch, die Maschinen abzuschalten. Dann verringert sich die Fahrgeschwindigkeit infolge des Fahrwiderstandes im Wasser.

Die maximalen Anprallgeschwindigkeiten lassen sich nach [2] oder einem eigenen Rechenverfahren [1] aus den relativen Fahrgeschwindigkeiten zum Wasser und mit Hilfe der Ergebnisse von Widerstandsversuchen [5] zuverlässig abschätzen. Demnach können die maximalen Anprallgeschwindigkeiten auf dem schweizerischen Rheinabschnitt folgendermassen angenommen werden für Schubverbände:

- Bergfahrt: $v_o = 8$ km/h = 2,22 m/sec
- Talfahrt: $v_o = 14$ km/h = 3,89 m/sec

und für Motorgüterschiffe:

- Bergfahrt: $v_o = 8$ km/h = 2,22 m/sec
- Talfahrt: $v_o = 18$ km/h = 5,00 m/sec

Gefahren-Lichtraumprofile

Die Gefahren-Lichtraumprofile begrenzen jene Querschnitte, in denen Bauwerke durch Schubverbände und Motorgüterschiffe gefährdet sind. Leere Schiffe verursachen wegen der geringeren Masse zwar kleinere Anprallkräfte, sie sind jedoch massgebend für

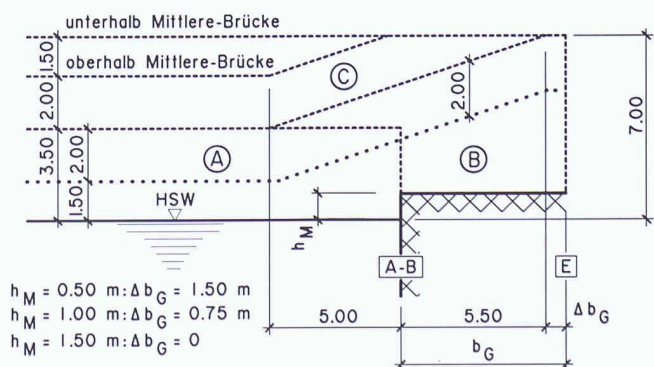
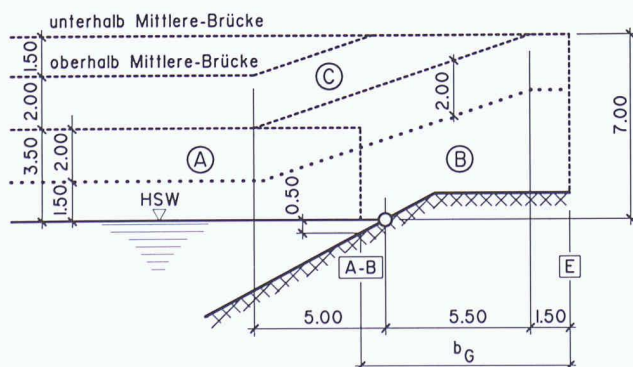


Bild 3. Gefahren-Lichtraumprofile, Uferböschung (links) und Ufermauer (rechts). Zone A: Anprall Schiffsrumpf im Flussbereich, Zone B: Anprall Schiffsrumpf

im Uferbereich, Zone C: Anprall Schiffsaufbauten. Die gepunkteten Linien stellen die Lagen der Anprallkräfte dar

die Festlegung der durch Schiffe gefährdeten Zonen. Im Uferbereich können Schiffe und Leichter, insbesondere mit Pontonbug, über die Uferkante hinaus geschoben werden. Dabei ist neben dem eigentlichen Aufschiebeweg auch der geometrische Überstand des Buges zu berücksichtigen. Die in Bild 3 dargestellten Gefahren-Lichtraumprofile beruhen auf eingehenden Untersuchungen [6] der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) in Karlsruhe. Die Einteilung der Gefahren-Lichtraumprofile in die Zonen A, B und C wurde von den Richtlinien [1] übernommen.

Schadenrisiko und Bauwerksklassen

Die Gefährdungsbilder müssen auf die Grösse des Schadenrisikos (Eintretenswahrscheinlichkeit \times Schadenpotential) zugeschnitten sein. Ein sehr hohes Schadenrisiko erfordert die Berücksichtigung extremer Gefährdungsbilder, bei geringeren Schadenrisiken kommen weniger extreme Gefährdungsbilder in Frage.

Bauten im Bereich von Wasserstrassen werden entsprechend der unterschiedlichen Schadenrisiken in Bauwerksklassen unterteilt:

- Bauwerksklasse I: hohes Schadenrisiko
- Bauwerksklasse II: bedeutendes Schadenrisiko
- Bauwerksklasse III: beschränktes Schadenrisiko

In der Bauwerksklasse I befinden sich Bauten, bei deren Einsturz mit grossen Personen-, Sach- beziehungsweise Umweltschäden oder einschneidenden wirtschaftlichen Auswirkungen gerechnet werden muss. Entsprechend dem Schadenpotential wird bei der Bauwerksklasse I von einer sehr geringen Eintretenswahrscheinlichkeit, also von einem Ereignis ausgegangen, dessen Rückkehrperiode im Bereich von etwa 1000 Jahren liegt. Dies entspricht einer Anprallwahrscheinlichkeit von 10% innerhalb einer angenommenen Lebensdauer des Bauwerks von 100 Jahren.

Es sei hier erwähnt, dass Neubauten im Bereich von Wasserstrassen in erhöhtem Masse anprallgefährdet sind, weil sie für die Schifffahrt neue Hindernisse darstellen.

Massgebende Anprallkräfte (Bauwerksklasse I)

Frontaler Anprall im Flussbereich

Aufgrund statistischer Untersuchungen gemäss [7] und [8] ist für Bauten der Bauwerksklasse I im Rheinabschnitt unterhalb Mittlere Brücke in Basel von einer Anprallenergie von 30 MNm auszugehen. Eine solche kinetische Energie entspricht folgenden Fällen talwärts fahrender Schiffe oder Schubverbände:

- Fall 1: Schweres Motorgüterschiff:
 Masse: $M = 3450 \text{ t}$
 Anprallgeschwindigkeit $v_0 = 15 \text{ km/h}$
- Fall 2: Schnelles Motorgüterschiff:
 Masse: $M = 2400 \text{ t}$
 Anprallgeschwindigkeit $v_0 = 18 \text{ km/h}$
- Fall 3: Schubverband:
 Masse: $M = 4000 \text{ t}$
 Anprallgeschwindigkeit $v_0 = 14 \text{ km/h}$

Der schwerste Leichter (Euroleichter IIa) weist vollgeladen eine Masse von 3000 t auf. Fährt dieser Leichter in einem Doppel-Schubverband, so sollte zusätzlich zum anprallenden Leichter noch ein Teil des seitlich fahrenden Leichters mitberücksichtigt werden. Die Vergrößerung der Anprallmasse um einen Viertel der Masse des seitlichen Leichters (nach deutschen Gepflogenheiten) ergibt auf der sicheren Seite liegende Resultate, weil die Kupplungen der Leichter beim Anprall nachgeben beziehungsweise zerstört wer-

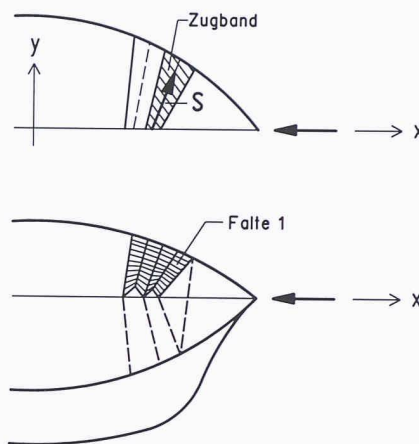


Bild 4. Faltenbildung im Deckblech

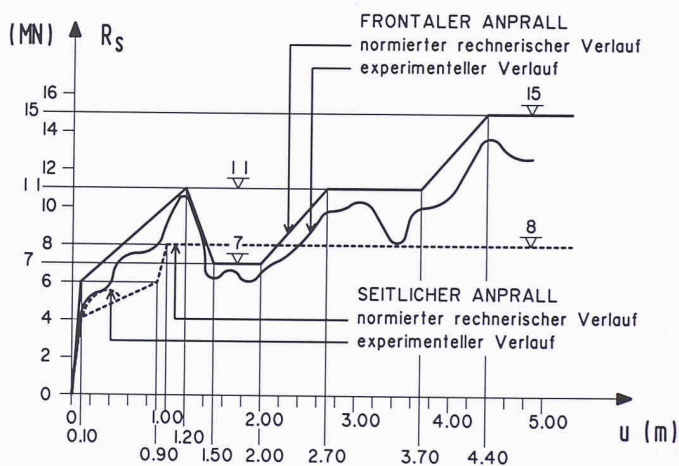


Bild 5. Stauchverhalten des Schiffsrumpfes

den. Als Maximalwert kann dabei eine Masse von 4000 t angenommen werden. Hintereinander fahrende, gekoppelte Leichter beziehungsweise Schiffe verursachen zwar einen länger dauernden Stoss, die auf das Bauwerk wirkenden Anprallkräfte werden jedoch durch hintereinander fahrende Leichter beziehungsweise Schiffe nicht vergrössert, weil jeder Leichter beziehungsweise jedes Schiff eine eigene, ausreichend grosse Knautschzone mit entsprechender Energieaufnahme aufweist. Diese Erklärungen und die in [1] enthaltenen Untersuchungen zeigen, dass im Flussbereich des Rheinabschnittes unterhalb Mittlere Brücke in Basel Fall 1 als massgebend für den Schiffsanprall betrachtet werden kann.

Im schweizerischen Rheinabschnitt oberhalb Mittlere Brücke in Basel, wobei die Mittlere Brücke selbst auch zu diesem Abschnitt gehört, kann wegen des beschränkten Lichtraumes unter der Mittleren Brücke und, weil der weitaus grösste Teil der Schiffe unbeladen oder nur schwach beladen talwärts fährt, von einer geringeren Anprallenergie von 20 MNm ausgegangen werden. Eine solche kinetische Energie entspricht beispielsweise dem Anprall folgender talwärts fahrender Schiffe:

- Fall 4: Motorgüterschiff
 Masse: $M = 2400 \text{ t}$
 Anprallgeschwindigkeit $v_0 = 15 \text{ km/h}$
- Fall 5: Schnelles Motorgüterschiff
 Masse: $M = 1600 \text{ t}$
 Anprallgeschwindigkeit $v_0 = 18 \text{ km/h}$

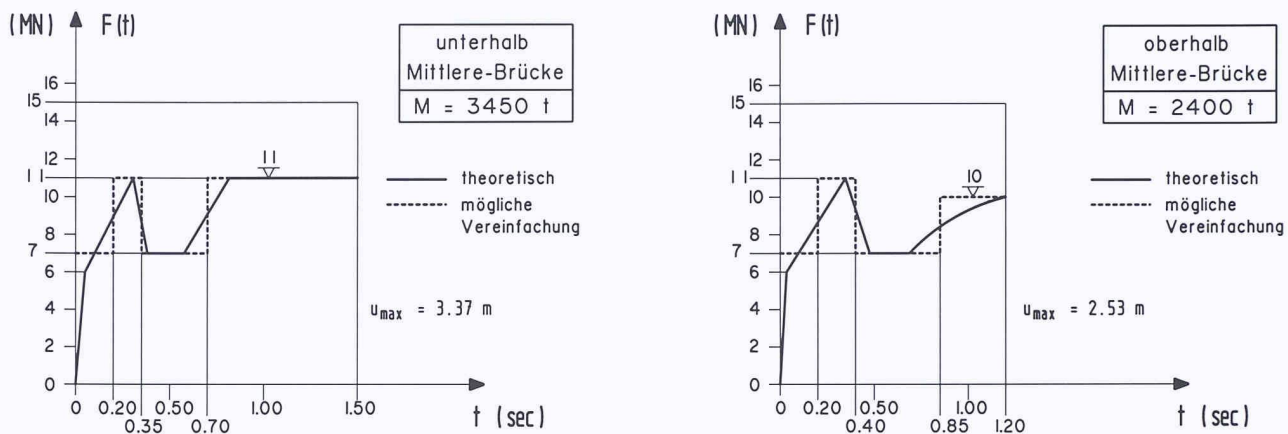


Bild 6.
Massgebende Stossfunktion $F(t)$ für frontalen Schiffsanprall

Im Flussbereich des schweizerischen Rheinabschnittes oberhalb Mittlere Brücke in Basel kann aufgrund der in [1] enthaltenen Untersuchungen Fall 4 als massgebend für den Schiffsanprall betrachtet werden.

Frontaler Anprall im Uferbereich

Im Uferbereich verringern sich die Anprallkräfte infolge der beim Auflaufen auf das Ufer dissipierten Energie. Massgebend sind immer Schubverbände mit unbeladenem vorderen und voll beladenem zweiten Leichter, weil der vordere Leichter so am weitesten auf den Uferbereich aufläuft. Aufgrund statistischer Überlegungen wurde für den Rheinabschnitt unterhalb Mittlere Brücke in Basel folgender Schubverband mit Euroleichtern II als massgebend betrachtet:

Leichter 1 (unbeladen) Masse:	$M_1 = 420 \text{ t}$
Leichter 2 (beladen) Masse:	$M_2 = 2615 \text{ t}$
Schubboot Masse:	$M_S = 2400 \text{ t}$
Gesamtmasse:	$M = 3450 \text{ t}$

Die Resultate der durchgeführten Untersuchungen gemäss [1] sind in Bild 10 dargestellt.

Seitlicher Anprall im Flussbereich

Unter seitlichem Anprall wird der Schiffstoss an eine in Flussrichtung stehende vertikale Wand, beispielsweise Ufer- oder Schleusenwand, oder an eine vertikale, zur Schifffahrtsstrasse parallele Fläche eines Brückenpfeilers verstanden. Der seitliche Schiffsanprall ist im Flussbereich (Zone A, Bild 3) in der Regel wahrscheinlicher als der frontale Anprall.

Bei einem seitlichen Schiffsanprall ist der Anprallwinkel α unter anderem abhängig von der Fahr- beziehungsweise Anprallgeschwindigkeit. Aufgrund eingehender Untersuchungen dürfte im Flussbereich bei einer Anprallgeschwindigkeit $v_0 = 15 \text{ km/h}$ realistischweise mit einem maximalen Anprallwinkel $\alpha = 30^\circ$ gerechnet werden.

Grundlagen

Stauchverhalten des Schiffsrumpfes

Beim Schiffsanprall handelt es sich in der Regel um einem weichen Stoss, bei dem der grösste Teil der kinetischen Energie durch Verformungen des Schiffes (Schiffsrumpfes) aufgenommen wird. Die Anprallgeschwindigkeiten sind relativ klein, so dass die Anprallkräfte weitgehend durch die Stauchkräfte des Schiffes bestimmt werden.

Wertvolle Angaben findet man in den Untersuchungen [3] und [9] bis [12]. Durch Meier-Dörnberg [3] und [9] und Honsberg [10] wurden Modellversuche an Leichtern mit Pontonbug durchgeführt. Ergänzende experimentelle Untersuchungen erfolgten durch Wagner [11] und Meier-Dörnberg [12] an Schiffmodellen mit Spitzbug und an solchen in Doppelhüllen-Bauweise. Die statischen und dynamischen Modellversuche im Massstab 1:4,5 bis 1:6 lieferten nach der Umrechnung auf den Originalmassstab Kraft-Zeitfunktionen für eine wirklichkeitsnahe Berücksichtigung des Schiffsanpralls.

Interessant ist die Feststellung, dass alle der untersuchten Schiffstypen (Bugformen) bei zentrischem Anprall etwa das gleiche Kraft-Verformungsverhalten aufweisen. Ebenso zeigten die statischen und die dynamischen Versuche nur unwesentliche Unterschiede, was aufgrund der geringen Anprallgeschwindigkeiten beim Schiffstoss auch zu erwarten war.

Als typische Erscheinung erkannte man aus den statischen und dynamischen Versuchen, dass sich die Deck- und Bodenbleche in lastverteilende, im Seitenbereich gehaltene Zugbänder zusammenfalteten (Bild 4). Die Ergebnisse der beschriebenen Modellversuche wurden durch die Schiffskollision 1987 mit der Eisenbahnbrücke über den Rhein bei Karlsruhe-Maxau bestätigt.

Eigene Berechnungen [1] haben die vorliegenden Versuchsergebnisse verifiziert und wichtige Zusammenhänge beim Anprallverhalten von Schiffen aufgezeigt. Das Stauchverhalten wurde dabei für frontalen und seitlichen Schiffsanprall bestimmt, bei dem die Schiffsachse mit der gestossenen Wandebene einen Winkel von 40° einschliesst. Dieser Anprallwinkel ergibt für seitlichen Schiffsanprall maximale Stauchkräfte. Den Berechnungen lagen Pläne für das Standard Güterschiff BS6 mit Spitzbug zugrunde.

Bild 5 zeigt die Resultate der experimentellen und theoretischen Untersuchungen. Letztere ergaben nach Vereinfachungen auf der sicheren Seite normierte Kraft-Verformungsdiagramme. Ein Vergleich für den frontalen Anprall zeigt, dass die theoretischen und experimentellen Werte gut miteinander übereinstimmen. Die experimentellen Werte aus [13] für den seitlichen Anprall erstrecken sich leider nur bis zu einer Verformung von 0,45 m, weshalb hier nur ein sehr beschränkter Vergleich möglich ist.

Die in Bild 5 eingetragenen normierten Kraft-Verformungsdiagramme werden für die dynamische Untersuchung des Schiffsanpralls verwendet.

Stossfunktionen

Zur Erleichterung der Untersuchung des Schiffsanpralls sind im folgenden für die massgebenden Anprallfälle die Stossfunktionen angegeben. Diese entsprechen den Anprallkräften (in Grösse und zeitlichem Verlauf) auf ein starres gestossenes Bauteil.

Für frontalen Anprall erhält man die Stossfunktion aus dem normierten Kraft-Verformungsdiagramm (Bild 5) mit Hilfe der Differentialgleichung der Bewegung:

$$M \cdot \ddot{u} + R_S(u) = 0 \tag{1}$$

Dabei bedeuten:

- M Masse des Schiffes
- $R_S(u)$ Stauwiderstand des Schiffsrumpfes
- u Stauweg des Schiffsrumpfes
- \dot{u} Stauengeschwindigkeit des Schiffsrumpfes
- \ddot{u} Staubeschleunigung des Schiffsrumpfes

Mit den Anfangsbedingungen für den Zeitpunkt $t = 0$

$$u = 0 \quad \dot{u} = v_0 \tag{2}$$

lässt sich die Stauchung u und daraus die Stossfunktion $F(t)$ bestimmen:

$$F(t) = M \cdot \ddot{u} \tag{3}$$

Die für frontalen Schiffsanprall massgebenden Stossfunktionen $F(t)$ sind in Bild 6 dargestellt. Beim seitlichen Anprall ist das dynamische Verhalten des Schiffes durch die drei Bewegungsgrössen u , u_T und φ bestimmt.

Dabei bedeuten:

- u Bewegung (Stauchung) in Richtung der Normalen zur Wand
- u_T Bewegung in Richtung der Tangente, also entlang der Wand
- φ Verdrehung des Schiffes

In einer eigenen Untersuchung konnte gezeigt werden, dass die Verdrehung des Schiffes und die hydrodynamischen Effekte beim seitlichen Schiffsanprall vernachlässigt werden können. Damit erhält man die Stossfunktionen aus dem normierten Kraft-Verformungsdiagramm (Bild 5) mit folgenden Differentialgleichungen der Bewegung:

$$M \cdot \ddot{u} + R_S(u) = 0 \tag{4a}$$

$$M \cdot \ddot{u}_T + R_{ST}(u) = 0 \tag{4b}$$

Die Widerstandskraft $R_{ST}(u)$ in Richtung der Tangente ergibt sich infolge Reibung mit einem durch Versuche begründeten Reibungsbeiwert $\mu = 0,30$ zu:

$$R_{ST}(u) = 0,30 R_S(u) \tag{5}$$

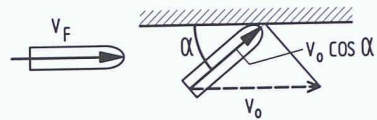


Bild 7.

Anfangsbedingungen beim seitlichen Schiffsanprall

Die Anfangsbedingungen für den Zeitpunkt $t = 0$ lauten nach Bild 7:

$$u = 0 \quad \dot{u} = v_0 \cos \alpha \sin \alpha \tag{6a}$$

$$u_T = 0 \quad \dot{u}_T = v_0 \cos^2 \alpha \tag{6b}$$

Die Stossfunktionen $F_N(t)$ und $F_T(t)$ ergeben sich nach folgenden Beziehungen:

$$F_N(t) = M \cdot \ddot{u} \tag{7}$$

$$F_T(t) = 0,30 F_N(t)$$

Für die Ermittlung der massgebenden Stossfunktionen wird in Gleichung (6) ein Anprallwinkel α von 30° eingesetzt, obwohl bei der Ermittlung des normierten Kraft-Verformungsdiagrammes (Bild 5) ein Anprallwinkel α von 40° verwendet wurde. Diese Unsauberkeit ist für praktische Zwecke annehmbar und entspricht einer Vereinfachung auf der sicheren Seite. Bild 8 zeigt die für seitlichen Schiffsanprall massgebenden Stossfunktionen.

Bei Ermittlung der Stossfunktionen $F_N(t)$ und $F_T(t)$ wurde angenommen, dass sich der Angriffspunkt der Resultierenden beim Anprall nicht verschiebt. Ausserdem wurde stillschweigend vorausgesetzt, dass - unabhängig von der Breite B des Pfeilers in Fließrichtung - die totalen Kräfte $F_N(t)$ und $F_T(t)$ auf den Pfeiler übertragen werden.

Für praktische Zwecke kann die Änderung des Angriffspunktes während des Stossvorganges vernachlässigt werden. Für Brückenpfeiler unterhalb der Mittleren Brücke in Basel ergibt sich für den massgebenden Anprall-Fall eine maximale Kontaktzone Schiff/Pfeiler von 9,00 m Länge. Es stellt sich nun die Frage, ob für Pfeilerbreiten kleiner als 9 m geringere Anprallkräfte zu erwarten sind. Das wird kaum zutreffen, weil in diesem Fall grössere Singularitäten an den Pfeilerenden auftreten. Aus diesem Grunde sollten für Pfeilerbreiten $3 \text{ m} \leq B < 9 \text{ m}$ die vollen Stossfunktionen berücksichtigt werden.

Eine Ausnahme ergibt sich lediglich bei Pfeilerbreiten $B < 3 \text{ m}$. Abhängig von der Bewegung u_T entlang des Pfeilers wird bei kleinen Pfeilerbreiten B nur ein Teil der Stossfunktion aktiviert. Sobald das Schiff den Pfeiler wieder verlässt, wird der Anprallvorgang ab-

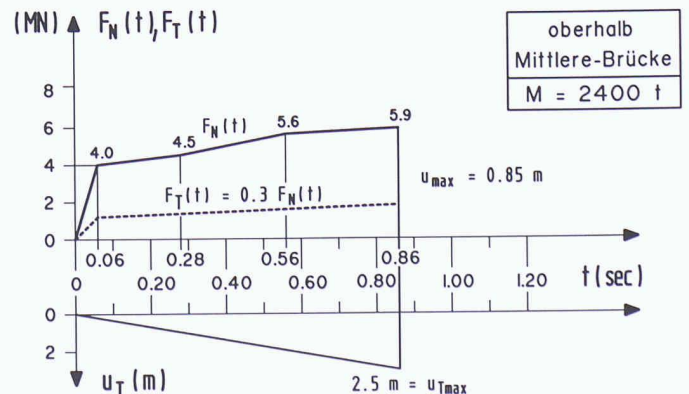
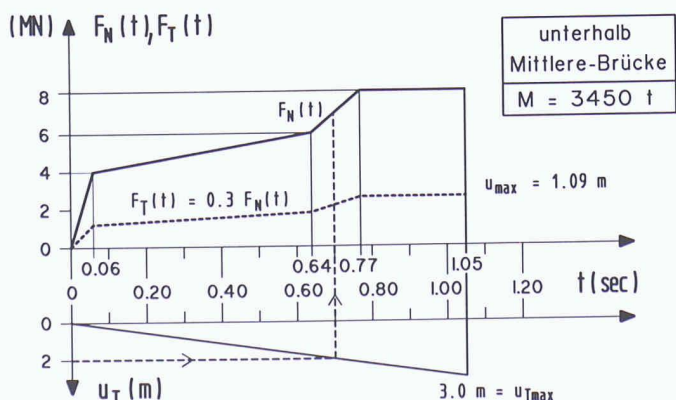


Bild 8.

Massgebende Stossfunktionen $F_N(t)$ und $F_T(t)$ für seitlichen Schiffsanprall

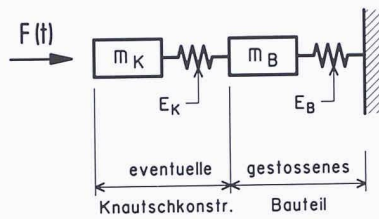


Bild 9. Rechenmodell für Schiffsanprall bei Verwendung einer Stossfunktion $F(t)$

geschlossen. In allen Fällen, bei denen die Pfeilerbreite B kleiner als u_{Tmax} ist, wird die Endordinate $F_N(t)$ beziehungsweise $F_T(t)$ durch die entsprechende Abszisse t begrenzt, welche sich aus folgender Bedingung ergibt:

$$u_T = B \tag{8}$$

So erhält man beispielsweise für eine Pfeilerbreite von 2 m nach Bild 8 (Fall: unterhalb Mittlere Brücke) eine Stossdauer von 0,7 sec. Die Stossfunktion braucht in diesem Falle nur bis $t = 0,7$ sec berücksichtigt zu werden.

Berechnung und Bemessung

Grundsätze

Beim Schiffsanprall handelt es sich um eine aussergewöhnliche Einwirkung gemäss Norm SIA 160 (1989). Im Flussbereich ist

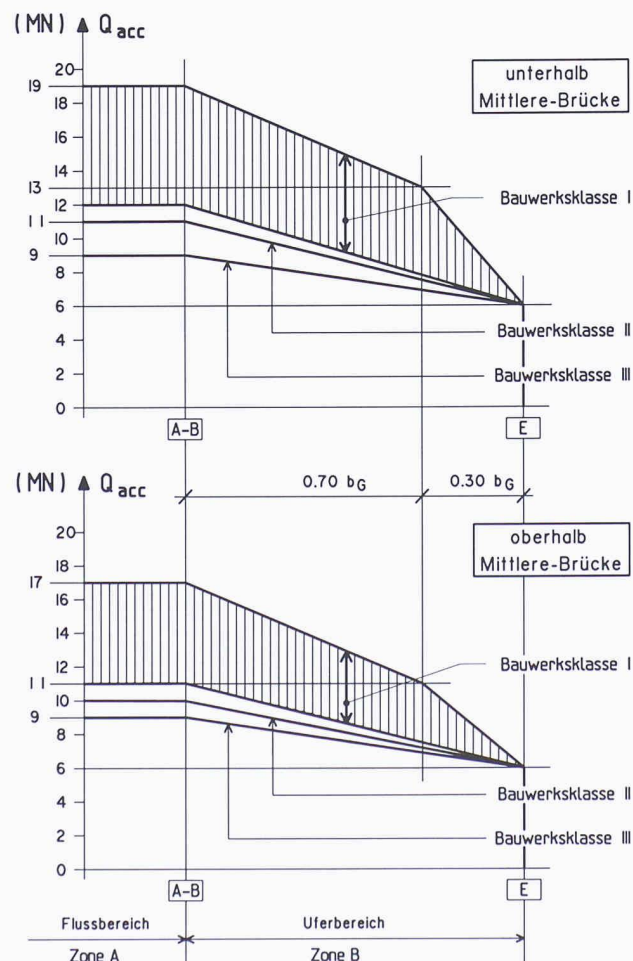


Bild 10. Anprallkräfte für frontalen Schiffsanprall im Fluss- und Uferbereich

in der Regel sowohl ein frontaler als auch seitlicher Anprall zu berücksichtigen.

Standfeste Bauteile, beispielsweise Flusspfeiler, müssen die bei einem Schiffsanprall freiwerdende Energie aufnehmen können. Allfällig vorgelagerte Knautschkonstruktionen können dabei berücksichtigt werden.

Für Bauten der Bauwerksklasse I ist entsprechend des hohen Schadenrisikos von einem schweren Schiffsanprall auszugehen und eine dynamische Analyse erforderlich. Wird keine dynamische Berechnung durchgeführt, so müssen, in Anbetracht der relativ langen Stosszeit und unter Voraussetzung eines linear elastischen Verhaltens des gestossenen Bauteils, dynamisch vergrösserte statische Ersatzkräfte gemäss Bild 10 angenommen werden. Im Gegensatz dazu können für Bauten der Bauwerksklassen II und III weniger schwere Ereignisse angenommen und grössere bleibende Verformungen nach dem Schiffsanprall zugelassen werden. Dementsprechend darf bei Bauten der Bauwerksklassen II und III (Bild 10) mit statischen Ersatzkräften gearbeitet werden.

Für die Ermittlung des Tragwiderstandes sind die Rechenwerte der Baustofffestigkeiten sowie die dazugehörenden Widerstandsfaktoren den entsprechenden Konstruktionsnormen zu entnehmen. Allfällige in Stossversuchen festgestellte höhere Festigkeitswerte dürfen nicht in Rechnung gestellt werden. Dem Verhalten von Druckgliedern ist besondere Beachtung zu schenken (Theorie 2. Ordnung).

Dynamisches Rechenmodell

Masse und Massenverteilung des Schiffes sowie Stauchverhalten und Anprallgeschwindigkeit bestimmen zusammen mit dem Verhalten des gestossenen Bauteils den Anprallvorgang. Das dynamische Rechenmodell muss das Schiff, eine eventuell vorgelagerte Knautschkonstruktion und das gestossene Bauteil umfassen.

Das gestossene Bauteil und die Knautschkonstruktion können durch je ein Masse-Feder-Element mit elastoplastischer Feder dargestellt werden. Für die Modellierung des Schiffes empfiehlt sich eine Unterteilung in mehrere Masse-Feder-Elemente, wobei von den normierten Kraft-Verformungsdiagrammen (Bild 5) ausgegangen werden kann.

Die Untersuchung des Schiffsanpralls kann für Eigenschwingzeiten des gestossenen Bauteils bis maximal 0,4 sec auch mit den in den Bildern 6 beziehungsweise 8 angegebenen Stossfunktionen durchgeführt werden. Für verformbare gestossene Bauteile mit oder ohne vorgelagerter Knautschkonstruktion lässt sich damit die Anprallkraft nach dem in Bild 9 angegebenen Rechenmodell bestimmen. Bei einem verformbaren gestossenen Bauteil ergeben sich infolge seiner Schwingungen über dem Maximalwert der Stossfunktion liegende Anprallkräfte.

Anprallkräfte

Frontaler Anprall

Bei Gefährdung durch frontalen Schiffsanprall sind für die Berechnung und Bemessung standfester Bauteile nach Bauwerksklassen und Zonen (Bild 3) gegliederte Anprallkräfte anzunehmen.

Bild 10 zeigt die Anprallkräfte Q_{acc} im Fluss- und Uferbereich für die Zonen A und B (Anprall des Schiffsrumpfes). Für Bauten der Bauwerksklassen II und III gehen die anzunehmenden Anprallkräfte direkt aus Bild 10 hervor, während sie für Bauten der Bauwerksklassen I je nach Schwingungsverhalten des gestossenen Bauteils variieren. Dabei liegen sie in praktisch vorkommenden Fällen in den schraffiert dargestellten Bereichen von Bild 10. Die Zonen A, B und C sowie der Schnitt A-B sind in den Gefahren-Licht-raumprofilen von Bild 3 festgelegt. Für die Zone C (Anprall von Schiffsaufbauten) können unterhalb und oberhalb der Mittleren Brücke folgende Anprallkräfte Q_{acc} angenommen werden:

Bauwerksklasse I:	$Q_{acc} = 5 \text{ MN}$
Bauwerksklasse II:	$Q_{acc} = 4 \text{ MN}$
Bauwerksklasse III:	$Q_{acc} = 3 \text{ MN}$

Im Flussbereich (Zone A) ist anzunehmen, dass die Anprallkräfte in 1,50 m Höhe über dem höchsten schiffbaren Wasserstand (HSW) in horizontaler Richtung wirken. Die anzunehmenden Lagen der Anprallkräfte für die Zonen A und B sind in Bild 3 für den Fluss- und den Uferbereich dargestellt. Für die Zone C ist die Lage der Anprallkraft durch die Lage des gefährdeten Bauteils definiert. Die Anprallkräfte für die Zonen A bis C dürfen nicht überlagert werden.

Im Flussbereich (Zone A und C gemäss Bild 3) können die Anprallkräfte im Winkelbereich von $\pm 30^\circ$ zur Fließrichtung auftreten. Im Uferbereich (Zone B und C gemäss Bild 3) sind die Anprallkräfte in Richtung von maximal $\pm 60^\circ$ zur Fließrichtung anzunehmen.

Seitlicher Anprall

Bei Gefährdung durch seitlichen Schiffsanprall sind für die Berechnung und Bemessung standfester Bauteile (Zone A gemäss Bild 3) nach Bauwerksklassen gegliederte Anprallkräfte Q_{Nacc} normal und Q_{Tacc} tangential zur gestossenen Wand anzunehmen:

Unterhalb Mittlere Brücke:

Bauwerksklasse I: dynamische Ermittlung der Anprallkraft Q_{Nacc}
($9 \text{ MN} \leq Q_{Nacc} \leq 13 \text{ MN}$)

Bauwerksklasse II: $Q_{Nacc} = 8 \text{ MN}$

Bauwerksklasse III: $Q_{Nacc} = 6 \text{ MN}$

Oberhalb Mittlere Brücke:

Bauwerksklasse I: dynamische Ermittlung der Anprallkraft Q_{Nacc}
($7 \text{ MN} \leq Q_{Nacc} \leq 10 \text{ MN}$)

Bauwerksklasse II: $Q_{Nacc} = 7 \text{ MN}$

Bauwerksklasse III: $Q_{Nacc} = 6 \text{ MN}$

Die gleichzeitig auftretenden Anprallkräfte Q_{Tacc} entlang der gestossenen Wand ergeben sich aufgrund der Gleichungen (5) beziehungsweise (7) zu:

$$Q_{Tacc} = 0,30 Q_{Nacc} \quad (8)$$

Für den seitlichen Schiffsanprall ist im gesamten Flussbereich (Zone A) anzunehmen, dass die Anprallkräfte in 1,50 m Höhe über dem höchsten schiffbaren Wasserstand (HSW) in einer horizontalen Ebene wirken.

Schlussbemerkungen

Beim vorliegenden Aufsatz handelt es sich um eine Kurzfassung der Richtlinien [1] über den Schiffsanprall auf dem schweizerischen Rheinabschnitt. Die aussergewöhnliche Einwirkung des Schiffsanpralls unterscheidet sich für den Rhein und für andere Binnengewässer aufgrund der unterschiedlichen Schiffe und Anprallgeschwindigkeiten wesentlich. Im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen wurden auch die Grundlagen zur Behandlung des Schiffsanpralls und anderer Stössvorgänge bereitgestellt.

Adressen der Verfasser:

Josef Grob, Dr. sc. techn., dipl. Ing. ETH, Dr. J. Grob & Partner AG, Technikumstrasse 73, 8400 Winterthur, und Nikola Hajdin, Prof. Dr., Tetovska 72, YU-11000 Belgrad

Literatur

- [1] Kanton Basel-Stadt: Richtlinien betreffend Entwurf und Bemessung von durch Schiffsanprall gefährdeten Bauwerken, Verfasser: Grob, J., Basel, 1993.
- [2] Bundesministerium für Verkehr (BMV): Sicherung der Pfeiler an Rheinbrücken gegen Rammstöße von Schubverbänden, Erlass W 6/52.12.00/4 DB 74, Bonn, 8. August 1974.
- [3] Meier-Dörnberg, K.-E.: Entwurfsgrundsätze zum Ausbau der Saar, theoretische und experimentelle Untersuchungen zur Ermittlung statischer Ersatzlasten für den Anprall von Schiffen an Bauwerken, TH Darmstadt, 1982-1984 (unveröffentlicht).
- [4] Leitzbach, W.: Verkehr auf Binnenwasserstrassen, Schriftenreihe des Instituts für Verkehrswesen der Universität Karlsruhe, Heft 24, 1982.
- [5] Versuchsanstalt für Binnenschifffahrt: Systematische Widerstands- und Propulsionsversuche mit Keilspant-Leichtverbänden auf begrenzten Wassertiefen, Bericht Nr. 1146, Schlussbericht, Duisburg, 1985.
- [6] Bundesministerium für Verkehr (BMV): Schiffstoss auf Bauwerke, Erlass BW 21/52.12.00/34 BAW 86 (Bundesanstalt für Wasserbau), Bonn, 7. Mai 1986.
- [7] Knott, A.M., Wood F.D., Banyun A.D.: Risk Analysis for Ship-Bridge Collisions. Coastal Zone 85, 4th Symposium, Proceedings ASCE, New York, 1985.
- [8] Kunz, C.: Risikoorientierte Last-Konzeption für Schiffstoss auf Bauwerke. Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau, Nr. 67, Karlsruhe, 1990.
- [9] Meier-Dörnberg, K.-E.: Schiffskollision, Sicherheitszonen und Lastannahmen für Bauwerke der Binnenwasserstrassen. VDI-Berichte Nr. 496, Düsseldorf, 1983.
- [10] Honsberg, J.: Untersuchung über die Schiffstosskräfte beim Anprall von Schiffen an Bauwerke, Schlangenbad, 1985 (unveröffentlicht).
- [11] Wagner, R.: Schiffsanfahrung an Brückenpfeilern, Vergleich: Modellversuch-Havarie. Zeitschrift für Binnenschifffahrt und Wasserstrassen, Nr. 4, Berlin, 1988.
- [12] Meier-Dörnberg, K.-E.: Theoretische und experimentelle Untersuchungen zum Schiffstoss von Motorgüterschiffen (Spitzbug) auf Bauwerke, TH Darmstadt, 1988.
- [13] Meier-Dörnberg, K.-E.: Knautschkräfte und Verformungen der Bugpartien von Motorgüterschiffen beim Anfahren an Pfeiler und Wände, 2. Teilbericht, TH Darmstadt, 1986.
- [14] Saul, R., Svenson, H.: On the Theory of Ship Collision against Bridge Piers, IABSE Proceedings P- 51/82. Zürich, 1982.
- [15] Grob, J.: Beitrag zu Entwurf und Bemessung von Tragwerken bei Gefährdung durch Zugsanprall. Bauingenieur 67, Springer-Verlag, Berlin, 1992.
- [16] Grob, J., Hajdin N., Mandic R.: Beitrag zum dynamischen Verhalten von Zügen nach der Entgleisung. Bauingenieur 68, Springer-Verlag, Berlin, 1992.
- [17] Grob, J., Hajdin N.: Train Derailment and its Impact on Structures. Structural Engineering International 2 / 93, IABSE, Zürich, 1993.