

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Article, Published Version

Kunz, Claus

Risikoorientierte Lastkonzeption für Schiffsstoß auf Bauwerke

Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/102814>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Kunz, Claus (1990): Risikoorientierte Lastkonzeption für Schiffsstoß auf Bauwerke. In: Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau 67. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau. S. 41-70.

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

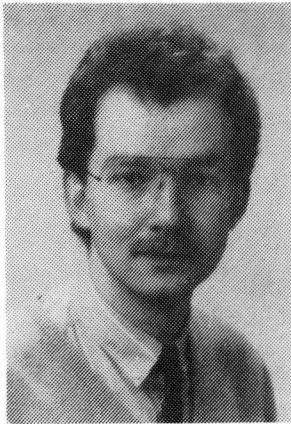
Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



RISIKOORIENTIERTE LAST-KONZEPTION FÜR SCHIFFSSTOSS AUF BAUWERKE

Risk-related design load criteria for impact forces on structures



Claus Kunz, Dipl.-Ing., Baurat, Jahrgang 1958.
Studium des Bauingenieurwesens an der Universität
Karlsruhe (TH) 1978 - 1984; Große Staatsprüfung 1986;
seit Ende 1986 bei der BAW in Karlsruhe.

Veröffentlichungen und Vorträge zu Dimensionierung von
Sohldrainagen, radiographische Untersuchung von Spann-
beton-Bauwerken, Schiffsstoß auf Bauwerke.

Inhaltsangabe

Brückenbauwerke an Wasserstraßen können durch Anprall von Schiffen in ihrer Tragfähigkeit beeinträchtigt werden, wobei ein Risiko für die Brückenbenutzer gegeben ist.

Neuere Untersuchungen über die Stoßverformung von Binnenschiffen erlauben auf der Lasteinwirkungsseite eine realistische Ermittlung von Stoßlasten, für deren Ansatz jedoch noch kein einheitliches Kriterium vorliegt. Für ein Bauwerk entsteht daraus ein Sicherheitsdefizit oder eine Überdimensionierung als mögliche Folge.

Durch eine probabilistische Lastkonzeption kann mit Hilfe der Wahrscheinlichkeitsrechnung ein Entscheidungskriterium für den Ansatz einer expliziten Schiffsstoß-Belastung gefunden werden. Wesentliche Merkmale der Wasserstraße als auch deren Verkehrsentwicklung werden dabei berücksichtigt.

Summary

Ship collision accidents can injure the load bearing capacity of bridges crossing navigable waterways and become a risk to the bridge users.

Recent investigations concerning impact deformation of ships and barges enable to evaluate an actual impact design load, but yet without any standardized criteria. The structure could then be designed with a lack of safety or with exceeded impact loads.

Probabilistic design load criteria may support the decision to a specified impact load by means of a probabilistic approach. Characteristics of the waterway and its traffic flow are considered.

<u>INHALT</u>	Seite
1 Problemstellung	43
2 Handhabung des Lastfalles Schiffsstoß	44
2.1 Stoßbelastung auf Bauwerke	46
2.2 Anfahrung des Uferbaus	48
3 Last-Konzeption zum Ansatz einer Schiffsstoß-Belastung	51
3.1 Modellansatz zur Wahrscheinlichkeit eines Schiffsstoßes	51
3.1.1 Abschätzung der Unfallwahrscheinlichkeit	53
3.1.2 Abschätzung der Unfallbahn	55
3.2 Modellansatz zur Wahrscheinlichkeit der Unfallschwere	55
3.3 Datengrundlagen	56
3.3.1 Unfalldaten	56
3.3.2 Verkehrsstärke- und Verkehrsstruktur-Daten	57
3.3.3 Unfallschweredaten	59
3.4 Ermittlung einer probabilistischen Stoßlast	60
3.5 Verteilungsfunktion der Schiffsstoß-Last	61
4 Entwicklung von Risikogrenzen	61
4.1 Vergleichbare Risikogrenzen	63
4.2 Individuelle Risikogrenzen	64
5 Diskussion und Ausblick	65
6 Literatur	68

1 Problemstellung

Kollisionen von Schiffen mit Brückenbauwerken an Bundeswasserstraßen sind vergleichsweise seltene Ereignisse, die bislang nur begrenzte Schäden an Brücken verursachten. Anfahrungen von Brücken führten jeweils nur zu lokalen Beschädigungen am Brückenüberbau oder an der Pfeilerkonstruktion. Ein Einsturz eines Bauwerkes wurde nur im Falle einer dreifeldrigen Rohrbrücke verzeichnet, als ein vollbeladener Schubverband bei starkem Nebel 1982 den Pfeiler einer Gichtgas-Rohrbrücke bei Richemont/Mosel, etwa 85 m unterstrom der Autobahnbrücke A 31 Metz-Thionville, rammte und die Rohrbrücke zum Einsturz brachte. Nachfolgend ausströmendes Gichtgas führte zum Tod der 7 Besatzungsmitglieder /HONSBURG, 1985/.

Nur aus der internationalen Literatur sind bisher Brückeneinstürze durch Schiffsanfahrungen an Seewasserstraßen bekannt, die nicht nur zu einem immensen materiellen Schaden durch die Unterbrechung der Verkehrswege Straße bzw. Schiene und Wasserstraße, sondern auch zum Verlust zahlreicher Menschenleben durch die in die "Bruchstelle" hineinfahrenden Kraftfahrzeuge führte /FRANSEN, 1983; KNOTT, 1987/.

Spektakuläre Unfälle auf bundesdeutschen Binnenwasserstraßen verliefen harmloser, da rechtzeitige Ausweichmanöver vor dem Aufprall oder vorhandene Schutzbauwerke einen schlimmeren Schaden verhinderten.

Als 1970 ein einspuriger, zweigliedriger Schubverband mit 172 m Länge den linken Stropfpfeiler der Straßenbrücke Thörnich/Mosel (Mosel-km 164) bei plötzlich einfallendem Nebel und hoher Wasserführung frontal rammte, verhinderte der Stoß im weichen Schanzkleid-Bereich, etwa auf Drittels-Stirnbreite zwischen Schubhorn und Außenwand, eine Beeinträchtigung der

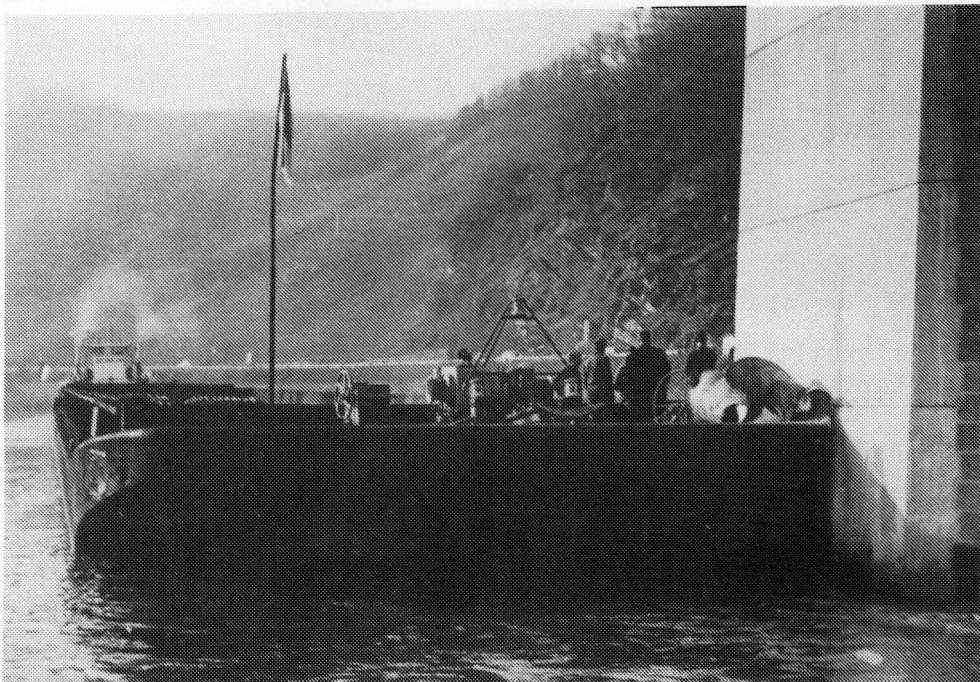


Bild 1 Schiffskollision 1970 an der Straßenbrücke Thörnich/Mosel

Pfeiler-Standsicherheit. Dies wäre bei unmittelbarem Stoß des Schubhornes zu befürchten gewesen (Bild 1) /WSA Trier, 1970/. Am Pfeiler traten lediglich Betonschäden auf.

Die Eisenbahnbrücke über den Rhein bei Karlsruhe-Maxau (Rhein-km 362), seit 1945 ein Provisorium mit 3 jeweils 50 m breiten Durchfahrtsöffnungen, das derzeit durch einen Neubau mit nur einem Randpfeiler ersetzt wird, war zuletzt jeweils 1987 und 1988 von einer Schiffsanfahrung betroffen. 1987 kollidierte bei Hochwasser und Nebel ein Koppelverband, bestehend aus der MS "Orinoko" und dem längsseits gekoppelten Leichter "Pavo" mit dem Brückenspfeiler zwischen Berg- und Talfahrtöffnung, nachdem ein leichter Eisabweiser "abgeräumt" worden war (Bild 2).

Beide Schiffe drehten sich quer ins Fahrwasser, sanken und bewirkten einen Aufstau im Fluß von etwa 80 cm, der einen erhöhten Strömungsdruck nach sich zog. Leichte Betonschäden an der Pfahlkopfplatte des Pfeilers sowie stärkere Auskolkungen im Bereich der Pfahlgründung waren die Folge. Schiffs- und Eisenbahnverkehr waren kurzzeitig unterbrochen /WAGNER,1988/.



Bild 2 Schiffs-kollision 1987 an der Eisenbahnbrücke über den Rhein bei Karlsruhe-Maxau

Die daraufhin an der Brücke neu errichteten, verstärkten Eisabweiser dürften im darauffolgenden Jahr 1988 in einem weiteren Fall einer Schiffsanfahrung einen Schaden ähnlichen oder größeren Umfanges verhindert haben. Hierbei wurde lediglich das Pfahlrohr an der Spitze des im Grundriß dreieckförmig angeordneten Eisabweisers bis zur Unbrauchbarkeit gequetscht.

Derartige Schiffs-kollisionen mit Brückenbauwerken verdeutlichen wegen des damit verbundenen Risikos für die Benutzer der Brücke die Notwendigkeit, den Lastfall Schiffstoß für Bauwerke an Wasserstraßen zu berücksichtigen.

Schiffsstoß wird hierbei als Katastrophenlast verstanden, deren Berücksichtigung das Versagen der Brücken-Konstruktion verhindern und damit Schäden weitreichender Art vermeiden bzw. eingrenzen soll. Eine Bemessung für Belastungen, die nur mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit eintreten, zielt dabei auf Sicherheit und Wirtschaftlichkeit gleichermaßen ab, wobei die Versagenswahrscheinlichkeit das Bemessungskriterium darstellt.

Unter der Abwägung von Sicherheit und Wirtschaftlichkeit ist daher die Bestimmungsgröße der selten wahrscheinlichen Belastung "Schiffsstoß", die für den Entwurf neuer Brücken, für die Sicherheitsbetrachtung bestehender Brücken oder auch für gegebenenfalls erforderliche Sicherungsmaßnahmen von Bedeutung ist, gefragt.

2 Handhabung des Lastfalles Schiffsstoß

Bereits nach geltenden Normen und Erlassen ist ein Lastfall "Schiffsstoß" bei Brückenbauwerken zu berücksichtigen, wobei Festlegungen zu Stoßlasten und freizuhaltenden Lichträumen nur Teilaspekte und Teilbereiche berücksichtigen.

Nach DIN 1072, 1985, werden zwar außergewöhnliche Einwirkungen wie der Anprall von Schiffen nicht erfaßt, den Erläuterungen im Beiblatt 1 ist jedoch ein Hinweis zu seiner Berücksichtigung zu entnehmen.

Die SIA 160, 1989, Einwirkungen auf Tragwerke, weist auf die Beachtung eines Aufpralls hin, wenn sich das Bauwerk im Wirkungsfeld eines beweglichen Körpers befindet. Vorbeugende Maßnahmen, der Nachweis für die Wirksamkeit einer Sicherung sowie für die Ausfall-Sicherheit der Bauwerks-Tragelemente werden erwähnt.

Ein 1974 vom Bundesminister für Verkehr gezeichneter Erlaß "Sicherung der Pfeiler an Rheinbrücken gegen Rammstöße von Schubschiffverbänden" gibt statische Ersatzlasten für Stoßkräfte an. Sie betragen für

Flußpfeiler in Fahrtrichtung	30 MN
senkrecht zur Fahrtrichtung	15 MN
Vorlandpfeiler in Fahrtrichtung	6 MN
senkrecht zur Fahrtrichtung	3 MN

bei einem Kraftangriffspunkt von 1,5 m über dem maßgebenden Wasserstand HSW (= Höchster Schiffahrtswasserstand).

Diese Stoßkräfte wurden unter Annahmen über die Zusammensetzung der Flottenstruktur, der Anfahrgeschwindigkeiten und über zu erwartende Stoßverformungen getroffen /BMV, 1974/. Die Berücksichtigung einer nur rein elastischen Verformung im Schiff über mehrere Meter mußte sehr hohe Stoßlasten ergeben, die nach heutigen Erkenntnissen als Stoßlast weit auf der "sicheren Seite" liegen, wobei das Verhalten des Bauwerkes unter Stoßbelastung pauschaliert wird. Diese Lastangaben wurden in die DS 804, Vorschrift für Eisenbahnbrücken und sonstige Ingenieurbauwerke, 1982, übernommen.

Für den Ausbau der Saar zur Schiffahrtsstraße ließ die zuständige Wasser- und Schiffahrtssdirektion Südwest in Mainz den Themenkreis "Schiffsstoß auf Bauwerke" eingehender untersuchen. Wegen enger Kurvenradien, aber Ausbau der Saar für die Befahrung durch einspurige, zweigliedrige Schubverbände waren nautische Schwierigkeiten zu befürchten, so daß ein Fehlverhalten von

Schubverbänden hinsichtlich

- der Stoßbelastung auf Bauwerke sowie
- der Anfahrung des Uferbaus

untersucht wurden /MEIER-DÖRNBERG, 1984; HONSBURG, 1985/.

Die Besonderheit eines Schubverbandes liegt nicht nur in seinen großen Abmessungen, sondern auch in der Bauform der mitgeführten Schubleichter. Deren Pontonbug überragt in leerer Fahrt die Wasserlinie bis zu 7 m weit und 4 m hoch. Diese Bugform findet sich auch bei einigen selbstfahrenden Motorgüterschiffen wieder.

Pontonbug wie auch mittlerweile weiterverbreitet der Rundspantbug mit Schubhörnern oder aufgesetzter Schubplattform sind zur Schubfähigkeit steif ausgebildet, was wiederum bei der Anfahrung eines Bauwerkes einen stärkeren Verformungswiderstand bei hoher Kontaktkraft nach sich zieht.

2.1 Stoßbelastung auf Bauwerke

Zur Bestimmung dieser Kontaktkraft als ein Stoß auf ein starres Hindernis wurden statische und dynamische Belastungsversuche an Bugmodellen von Schubleichtern durchgeführt /MEIER-DÖRNBERG, 1984; HONSBURG, 1985/. Modellgerecht wurde dabei ein Bugmodell mit rippenversteiften Schottblechen ausgeführt, das sich gegenüber einer alternativen Fachwerkaussteifung durch eine größere Steifigkeit auszeichnet. Die aus den Versuchen ausgewertete normierte Kraft-Verformungskennlinie für den Pontonbug (Bild 3) zeigt im elastischen Bereich einen steilen Kraftanstieg bis auf ca. 6 MN bei ca. 0,1 m Verformung und im plastischen Bereich ein allmähliches Anwachsen der Stoßlast mit einer plastischen Steifigkeitskonstante von 1,6 MN/m /MEIER-DÖRNBERG, 1983/.

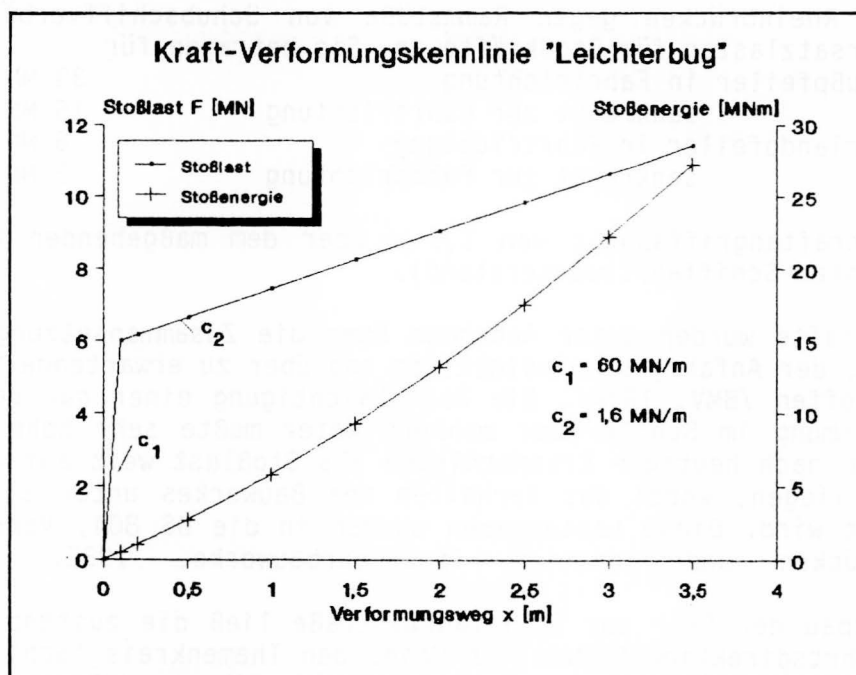


Bild 3 Normierte Stoßkraft-Verformungslinie für Pontonbug-Schiff

Der Kollisionsstoß wird durch die Masse des aufprallenden Schiffes und dessen Geschwindigkeit (Impuls) definiert. Je nach Steifigkeitsverhältnis der beiden Stoßpartner wird die kinetische Energie beim Aufprall durch elastische und plastische Verformungen im aufprallenden Schiff sowie durch die elastischen und plastischen Verformungen im Bauwerk umgewandelt.

Während sich die Stoßkraft bei Frontalstoß direkt über die Deformationsenergie als der zu absorbierenden Bewegungsenergie berechnen läßt, kann die Stoßkraft bei einem schrägen Stoß an eine Uferwand oder eine Pfeilerflanke über die Impulsbeziehung unter Beachtung der Trägheits- und Wellenwiderstände sowie des Reibungsverhaltens berechnet werden. Diese Impulsbeziehung ist vom Anfahrwinkel α stark abhängig.

In einer ergänzenden Untersuchung wurde das Stoßverhalten eines konventionell gebauten großen Rheinschiffes, 84 m lang und 10,5 m breit, mit Rundspantbug und in Doppelhüllen-Bauweise ermittelt /WAGNER, 1988; MEIER-DÖRNBERG, 1988/. Während bei Frontalstoß des Rundspant-Bugs auf ein starres Hindernis im bilinear angenäherten Stoßverformungsverhalten keine Unterschiede zum Pontonbug festzustellen waren, treten Unterschiede beim Stoß mit der seitlichen Bugausrundung auf. Gerade bei der Anfahrt von in der Regel an der Stirnseite ausgerundeten Brückenpfeilern tritt ein derart exzentrischer Stoß auf (Bild 4).

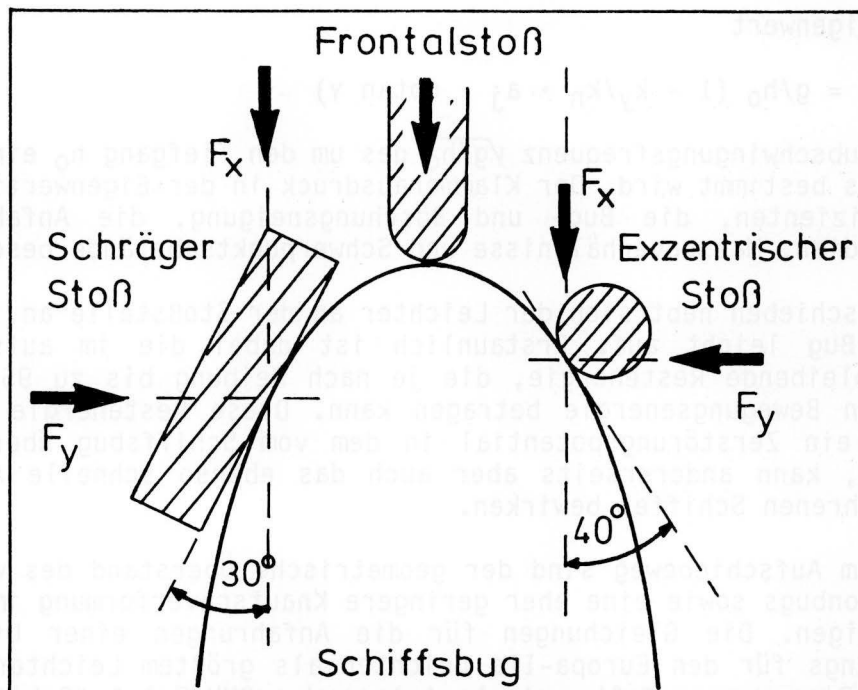


Bild 4 Untersuchte Kontakt-Situationen für Spitzbug-Schiff

Der Schrägstoß des Rundspantbugs gegen eine senkrechte Uferwand (oder auch Pfeilerflanke) weist ein ebenfalls bilinear angenähertes Verformungsverhalten auf, wobei die Grenzkraft zwischen elastischem und plastischem Bereich bei ca. 4 MN liegt.

Mit den damit zur Verfügung stehenden Untersuchungsergebnissen lassen sich nunmehr Stoßlasten für verschiedene Schiffstypen, Anfahrsgeschwindigkeiten, Anfahrrichtungen und Kontaktsituationen am Bauteil realistisch ermitteln.

Entsprechend der Anteile und Beladungsverhältnisse der verkehrenden Schiffe läßt sich eine statistische Stoßbelastung berechnen.

Im Interesse sowohl der Sicherheit als auch der Wirtschaftlichkeit wird die Durchführung einer dynamischen Berechnung für schiffsstoßgefährdete Brücken empfohlen. Dies gilt insbesondere für den Querstoß in die Flanke von Brückenpfeilern und den daraus resultierenden Schub- und Biegebeanspruchungen sowohl im Pfeilerschaft als auch in den Anschlußstellen zur Gründung und zum Überbau.

2.2 Anfahrung des Uferbaus

Mit Vereinfachungen und Linearisierungen der Bewegungsgleichung wurde die Anfahrung eines Ufers durch einen Pontonbug mit einer analytischen Gleichung beschrieben /MEIER-DÖRNBERG, 1984/. Als Uferbau gelten dabei Böschungen wie auch senkrechte Uferwände. Durch diese Linearisierung sowie Annahmen zum Reibungsverhalten läßt sich dieser Aufschiebevorgang des stoßenden vorderen Leichters auf eine einfache Schwingungsdifferentialgleichung für die Schwerpunktsanhebung des Leichters zurückführen:

$$\ddot{y} + \omega^2 \cdot y = 0$$

wobei der Eigenwert

$$\omega^2 = g/h_0 (1 - k_y/k_n \cdot a_j \cdot \cotan \gamma)$$

durch die Hubschwingungsfrequenz $\sqrt{g/h_0}$ des um den Tiefgang h_0 eingetauchten Bootskörpers bestimmt wird. Der Klammerausdruck in der Eigenwertformel enthält Koeffizienten, die Bug- und Böschungsneigung, die Anfahrrichtung, Trägheitsradien, Massenverhältnisse und Schwerpunktsabstände beschreiben.

Mit dem Aufschieben hebt sich der Leichter an der Stoßstelle an, das Schiff taucht am Bug leicht auf. Erstaunlich ist dabei die im aufschiebenden Schiff verbleibende Restenergie, die je nach Reibung bis zu 95 % der ursprünglichen Bewegungsenergie betragen kann. Diese Restenergie beinhaltet einerseits ein Zerstörungspotential in dem vom Schiffsbug überstrichenen Uferbereich, kann andererseits aber auch das ebenso schnelle Abschwingen des aufgefahrenen Schiffes bewirken.

Neben diesem Aufschiebeweg sind der geometrische Überstand des weitauskragenden Pontonbugs sowie eine eher geringere Knautschverformung im Schiff zu berücksichtigen. Die Gleichungen für die Anfahrungen einer Uferböschung wurden anfangs für den Europa-IIa Leichter als größtem Leichtertyp ausgewertet, in Diagramme gefaßt und als Anlage dem BMV-Erlaß "Schiffsstoß auf Bauwerke" /BMV, 1986/ beigefügt. Nach diesem Erlaß ist bei Bauwerken an Wasserstraßen ein lichter Raum in Breite und Höhe, der als "Gefahren"-Lichtraum bezeichnet wurde, von Einbauten freizuhalten (Bild 5). Zur Berücksichtigung unterschiedlicher Schiffstypen wurde durch die BAW in den vergangenen Jahren der Anfahrvorgang auf Uferbauten auch für weitere Schiffe idealisiert, so daß nunmehr Diagramme für 7 verschiedene Schiffstypen zur Verfügung stehen. Um die für den Bugüberstand kritischen Verhältnisse mit einzubeziehen, wurden sämtliche Fahrzeuge mit schubfähigem Bug (Pontonbug bzw. Schubschulter) idealisiert.

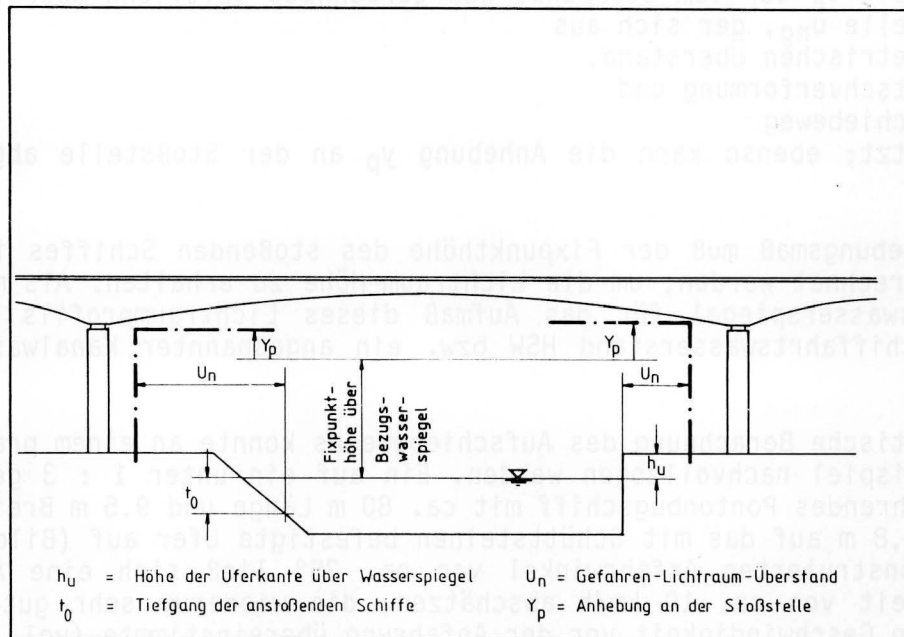


Bild 5 Systemskizze Lichraumprofil

Anfahrsgeschwindigkeiten, Anfahrriichtung und Beladungszustand, die für die Ermittlung der Lichraummaße angenommen werden müssen, entsprechen ihrem Wesen nach intuitiven Festlegungen.

Wie in Bild 6 für ein Pontonbugschiff mit 80 m Länge und 9,5 m Breite dargestellt, variiert in Abhängigkeit des Anfahrwinkels α und der Anfahrge-

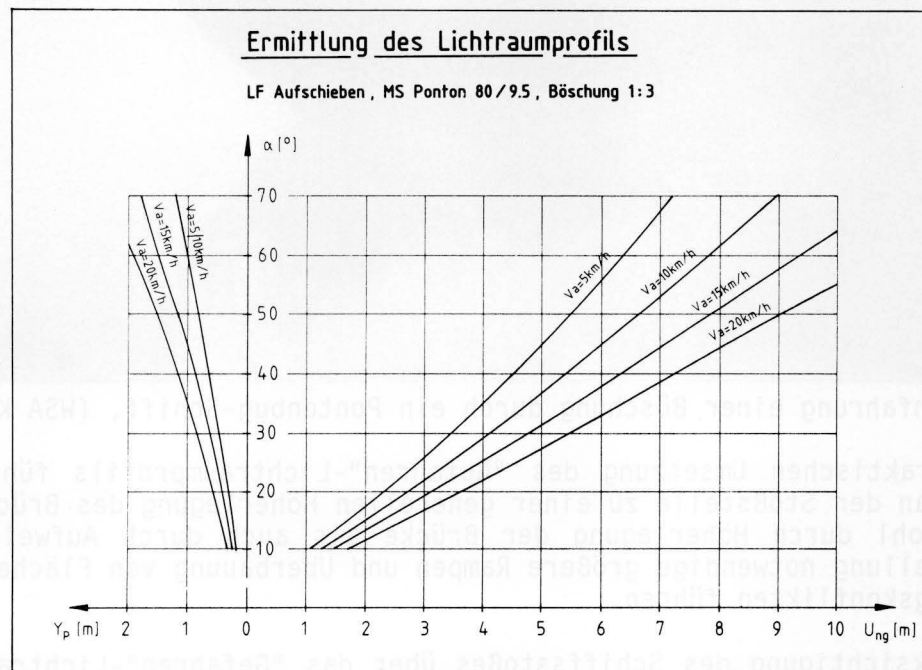


Bild 6 Diagramm zur Ermittlung des Lichraumprofils

geschwindigkeit v_a der vom Stoßpunkt aus gerechnete seitliche Überstand über die Stoßstelle u_{ng} , der sich aus

- dem geometrischen Überstand,
- der Knautschverformung und
- dem Aufschiebeweg

zusammensetzt; ebenso kann die Anhebung y_p an der Stoßstelle abgegriffen werden.

Dieses Anhebungsmaß muß der Fixpunkthöhe des stoßenden Schiffes im Bugbereich zugerechnet werden, um die Lichtraum-Höhe zu erhalten. Als maßgebender Bezugswasserspiegel für das Aufmaß dieses Lichtraumprofils gilt der Höchste Schifffahrtswasserstand HSW bzw. ein angespannter Kanalwasserspiegel.

Die theoretische Berechnung des Aufschiebeweges konnte an einem praktischen (Un)Fallbeispiel nachvollzogen werden. Ein auf ein unter 1 : 3 geböschtes Ufer auffahrendes Pontonbugschiff mit ca. 80 m Länge und 9,5 m Breite schob sich ca. 4,8 m auf das mit Schüttsteinen befestigte Ufer auf (Bild 7). Aus einem rekonstruierten Anfahrwinkel von ca. 35° ließ sich eine Anfahrgeschwindigkeit von ca. 10 km/h abschätzen, die wiederum sehr gut mit der verzögerten Geschwindigkeit vor der Anfahrt übereinstimmte (vgl. Bild 6).



Bild 7 Anfahrt einer Böschung durch ein Pontonbug-Schiff, (WSA Kiel)

In der praktischen Umsetzung des "Gefahren"-Lichtraumprofils führt diese Anhebung an der Stoßstelle zu einer generellen Höherlegung des Brückenüberbaus. Sowohl durch Höherlegung der Brücke als auch durch Aufweitung der Pfeilerstellung notwendige größere Rampen und Überbauung von Flächen können zu Nutzungskonflikten führen.

Die Berücksichtigung des Schiffsstoßes über das "Gefahren"-Lichtraumprofil läßt ohne Bezug zu Randbedingungen und mit starren Annahmen vom Prinzip her die Beurteilung einer Gefährdung bzw. des Grads einer Gefährdung nicht zu /KUNZ, 1989/. Jedoch läßt sich für weitere Überlegungen eine Vorauswahl nach geometrischen Kriterien treffen.

3 Last-Konzeption zum Ansatz einer Schiffsstoß-Belastung

Der Mangel an der bisher aufgezeigten Handhabung des Lastfalles Schiffsstoß liegt einerseits im Fehlen einer Methodik zur Beurteilung dieser Gefährdung und andererseits im Fehlen einer quantitativen Bestimmung eines Kollisions-Schiffsstoßes nach risikoorientierten Gesichtspunkten. Das Risiko eines Kollisions-Stoßes als katastrophale Anfahrung (Versagen durch Kollaps-Stoß) ist für das Bauwerk zu minimieren, um Gefahren für menschliches Leben und materielle Schäden einzugrenzen. Diese Eingrenzung in Form eines zahlenmäßig kleinen Risikos stellt eine relative Sicherheit dar, die sich in technischen Systemen verwirklichen läßt, in denen es eine absolute Sicherheit im Sinne der Freiheit von jeglichen Risiken nicht gibt /DIN 31004, 1984/.

Das Risiko R wird dabei durch eine Wahrscheinlichkeitsaussage beschrieben werden, die

- die zu erwartende Häufigkeit W des Eintritts eines zum Schaden führenden Unfalles und
- das beim Ereigniseintritt des Unfalles zu erwartende Schadensausmaß S berücksichtigt /DIN 31004,1984/, wobei sich das Risiko als Verknüpfung von

$$R = W \times S. \quad (3.1)$$

quantifizieren läßt.

Diese Risikoformel wird sowohl für die Bestimmung einer Eintrittswahrscheinlichkeit eines schweren Schiffsstoßes mit Kollapsgefahr für das angestoßene Bauwerk als auch zum Hinweis für die Festlegung einer Risikogrenze sinngemäß angewendet.

Die Last-Konzeption zum Ansatz der Schiffsstoß-Belastung zielt nachfolgend auf die Risikobewertung von Flußpfeilern der Brückenbauwerke. Von der Konzeption ähnlich sind Anfahrungen des Brückenüberbaus (Höhenproblem), die einer nachfolgenden Betrachtung vorbehalten bleiben.

3.1 Modellansatz zur Wahrscheinlichkeit eines Schiffsstoßes

Unfälle mit Schiffen auf Binnenwasserstraßen haben im Verlauf der letzten Jahre immer mehr abgenommen und liegen derzeit beim Stand von ca. 1 150 Unfällen pro Jahr bei ca. 270 000 Schiffsbewegungen (Bild 8) /StatBu/.

Diese Unfälle teilen sich auf in:

- Schiff-Schiff-Kollisionen (ca. 25 %),
- Auflaufen und Grundberührungen, (ca. 38 %),
- Kollisionen in Schleusen und mit Schleusenanlagen (ca. 7 %),
- Kollisionen mit Bauwerken, festen Anlagen und mit Schifffahrtszeichen (ca. 16 %) und
- sonstige Unfälle mit ca. 14 %, vgl. auch LOHRBERG, KEITEL, 1990.

Während unter "normalen" Bedingungen ein konfliktfreier Verkehrsablauf stattfinden kann, hängt die Wahrscheinlichkeit eines Unfalles von Störfaktoren ab, die in der Verkehrsdichte, der Schiffscharakteristik, der Wasserstraße und der Fahrtbeeinträchtigung liegen können.

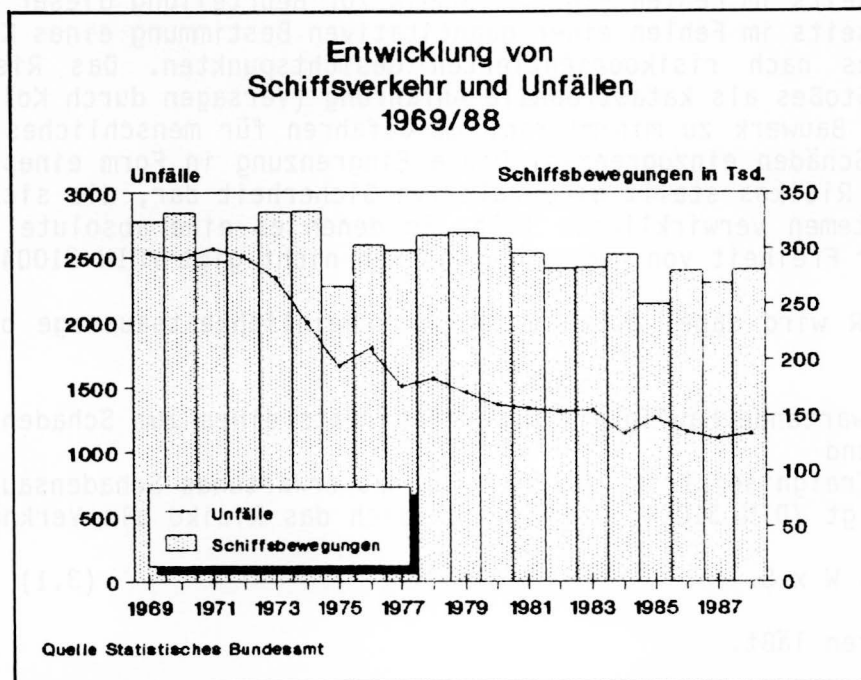


Bild 8 Entwicklung von Schiffsbewegungen und Unfällen

Bei der Entstehung eines Unfalles muß in der Regel von einem Zusammenwirken von menschlichen, technischen, betrieblichen und ergonomischen Einflüssen ausgegangen werden. Diese weisen einen sowohl zeitabhängigen als auch zufälligen Charakter auf /WOISIN, 1970; KRISTIANSSEN, 1983/.

Als Komponenten beinhaltet daher ein Unfall

- den Verkehr als Initiator,
- die Ursache wie z.B. menschliches Fehlverhalten, technisches Versagen,
- die Randbedingungen als aktive Faktoren wie Witterung und Strömung und als passive Faktoren wie Wasserstraße (Trassierung) und Bauwerk (Pfeilerstellung),
- den Unfallkontrahenten in Form z.B. eines Schiffes oder Bauwerkes,
- die Folgen in Form von Schäden oder Behinderungen.

Liegt nun für ein verkehrendes Schiff eine unfallauslösende Bedingung vor, so folgt das Schiff ab diesem Punkt einer Unfallbahn, die entweder einen unschädlichen Verlauf nimmt oder zur Kollision mit einem anderen Schiff, einem Bauwerk oder einem Teil der Wasserstraße führt (Bild 9).

Zur Beschreibung des Unfallgeschehens wird ein vorerst einfaches Rechenmodell benutzt, das für einen begrenzten Wasserstraßenabschnitt mit einem zahlenmäßig bestimmbar Verkehrsafkommen gilt. Die Wahrscheinlichkeit für Unfälle einer bestimmten Art kann auf diesem Wasserstraßenbereich für ein Verkehrsafkommen von N Schiffen zu

$$W_U = N \cdot W_0(t) \cdot W_A(s) \quad (3.2)$$

abgeschätzt werden. $W_0(t)$ bezeichnet dabei für den untersuchten Wasserstraßenabschnitt die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten der unfallauslösenden Bedingung in der Zeit t und wird als Unfallwahrscheinlichkeit bezeichnet. $W_A(s)$ steht für die Wahrscheinlichkeit einer bestimmten Unfallbahn und damit für die Kollision mit Bauwerken, Schiffen oder Teilen der Wasserstraße.

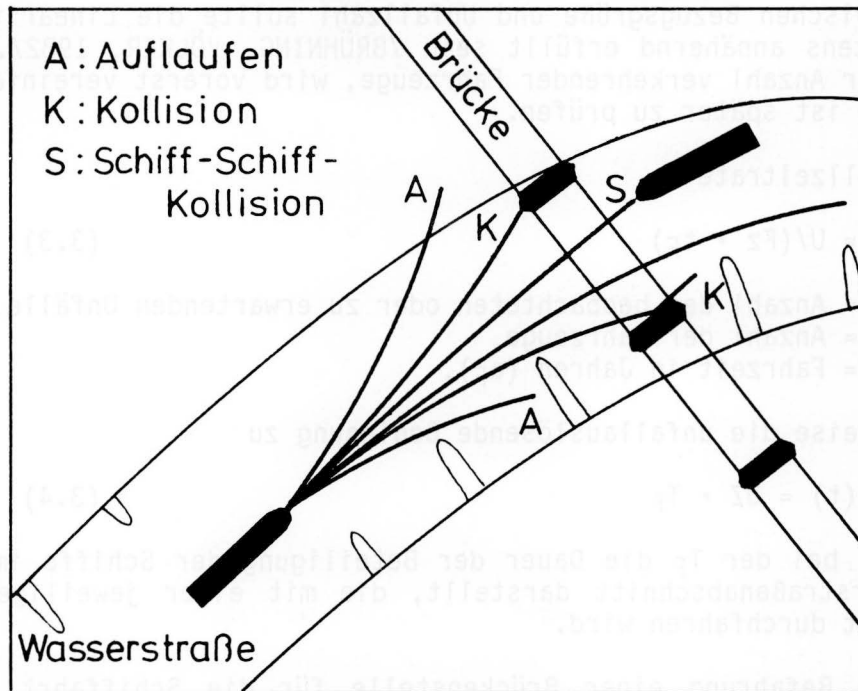


Bild 9 Ablauf eines Unfallereignisses (Modell)

Sowohl die Wahrscheinlichkeit für einen Unfall als auch die Wahrscheinlichkeit für eine Unfallbahn sind derzeit noch unbestimmt. Quantitative Ergebnisse müssen von einer Auswertung von Unfällen abhängig gemacht werden, aus deren Informationen entsprechende Modellansätze gewonnen werden können. Diese können eine Beschreibung des Unfallgeschehens durch Randverteilungen der beim Unfall beobachteten Bedingungen oder Grundlage einer physikalischen Beschreibung sein. Als Erweiterung sind Simulationsmodelle denkbar, die Ursache und Wirkungen von Unfallabläufen durchführen /LEUTZBACH, KOEHLER, LEUTWEIN, 1973; JORDAN, 1982/.

3.1.1 Abschätzung der Unfallwahrscheinlichkeit

Die Wahrscheinlichkeit für einen Schiffsunfall hängt - wie erwähnt - von zahlreichen Faktoren ab, die eine Ursache-Wirkungs-Kette bilden. Ein erster Ansatz für die Bestimmung der Unfallwahrscheinlichkeit kann aus der Entwicklung der Unfälle und Unfallkenngrößen in der Vergangenheit bestimmt werden. Unter der Bedingung, daß Einflüsse in vergleichbaren Zeiträumen unverändert bleiben oder daß Auswirkungen abgeschätzt werden können, läßt sich auch eine Prognose für die Entwicklung in der Zukunft aufstellen.

Als Unfallkenngrößen werden Verhältniswerte bezeichnet, die die relative Unfallhäufigkeit beschreiben /BRÜHNING, VÖLKER, 1982/. Dabei werden Unfallzahlen auf eine "Exposure"-Größe bezogen, die das Ausmaß beschreibt, in dem

eine Untersuchungseinheit der Gefahr eines Unfallereignisses ausgesetzt ist /ForschGesStrw, 1986/. Unfallkenngrößen erlauben die Beschreibung und den Vergleich von Ausschnitten des Unfallgeschehens.

Die Betrachtung von Unfallkenngrößen dient der Elimination von Einflüssen einer maßgebenden Variablen und damit scheinbarer Zusammenhänge. Beispiel hierfür ist die Abhängigkeit bestimmter Unfallereignisse von der Stärke des Verkehrs. Zwischen Bezugsgröße und Unfallzahl sollte die Linearitätsbedingung wenigstens annähernd erfüllt sein /BRÜHNING, VÖLKER, 1982/. Linearität, z.B. zur Anzahl verkehrender Fahrzeuge, wird vorerst vereinfachend angenommen und ist später zu prüfen.

Mit der Unfallzeitrate

$$UZ = U / (Fz \cdot t_F) \quad (3.3)$$

und U = Anzahl der beobachteten oder zu erwartenden Unfälle,
 Fz = Anzahl der Fahrzeuge,
 t_F = Fahrzeit in Jahren (a_F),

wird ansatzweise die unfallauslösende Bedingung zu

$$W_0(t) = UZ \cdot T_F \quad (3.4)$$

beschrieben, bei der T_F die Dauer der Beteiligung der Schiffe im betrachteten Wasserstraßenabschnitt darstellt, die mit einer jeweiligen Fahrgeschwindigkeit durchfahren wird.

Da sich die Befahrung einer Brückenstelle für die Schifffahrt nicht als punktuellere Ereignis, sondern eher als Streckenbefahrung vollzieht, erscheint die Beschreibungsgröße "Zeitraite" gerechtfertigt /vgl. auch KRAPPINGER, 1978/. Sie entspricht auch eher der Sicht der Verkehrsbeteiligten als der Sicht des Verkehrswegsystems und berücksichtigt damit unterschiedliches Verhalten der Schiffe.

Bei genauerer Betrachtung der Unfallereignisse läßt sich zum Beispiel eine unterschiedliche Unfallbeteiligung einzelner Fahrzeug-Kategorien am Unfallgeschehen feststellen. Dies kann durch deren technischen Ausrüstungsstandard oder auch durch schwierigere Manövrierbarkeit beeinflusst sein. Detailliertere Untersuchungen erlauben damit die Bestimmung einer individuellen Unfallkenngröße.

Da die Verhältnisgrößen zur Bestimmung der Unfallkenngröße zum Teil Zufallscharakter besitzen, wird bei der statistischen Behandlung der Risikogröße die Zufälligkeit durch die Angabe eines Konfidenzbereiches berücksichtigt. Innerhalb dieses Konfidenzbereiches zu γ % liegt der wahre Erwartungswert für die Unfallkenngröße mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von $1 - \gamma = \alpha$ %. Gebräuchlich ist im Bereich der Unfallforschung der 95 % Konfidenzbereich.

Die Betrachtung eines Konfidenzbereiches liefert damit für die Risikogröße sogenannte untere und obere Schwellenwerte, die aus der statistischen Gesetzmäßigkeit umso weiter vom Stichprobenmittel entfernt sind, je geringer der Stichprobenumfang ist.

3.1.2 Abschätzung der Unfallbahn

Unter Eintritt der unfallauslösenden Bedingung wird die Wahrscheinlichkeit für eine bestimmte Unfallbahn $W_A(s)$ und damit der möglichen Kollision mit der Brücke durch zufällig verteilte Variablen bestimmt. Diese sind z. B. die Position des Schiffes, seine Geschwindigkeit, seine Fahrtrichtung, Strömungs- und Windeinflüsse zum Zeitpunkt des Unfallbeginns.

Wiederum unter der Annahme von unveränderlichen Einflüssen in vergleichbaren Zeiträumen wird die Wahrscheinlichkeit für eine bestimmte Unfallbahn $W_A(s)$ vorerst als empirischer Anteilfaktor für die Kollision mit einem auf der möglichen Unfallbahn befindlichen Gegenstand abgeschätzt. Damit ergibt sich ein Anteil W_A z. B. von Unfällen mit Bauwerken an der Gesamtheit aller Unfälle.

3.2 Modellansatz zur Wahrscheinlichkeit der Unfallschwere

Neben der unterschiedlichen Größe der beteiligten Schiffe und deren unterschiedlichen Beladungszuständen (Masse m) variieren Stoßgeschwindigkeit v_a und Stoßwinkel α bei einer möglichen Kollision. Diese Stoßparameter hängen von Bremsmanövern, Richtungsänderungen und gegebenenfalls Strömungswiderständen ab, verändern sich entlang einer Unfallbahn s und führen dazu, daß im Kollisionsfall unterschiedliche Stoßenergien und damit unterschiedliche Stoßkräfte mobilisiert werden. Letztere sind ebenso vom Auftreffpunkt entlang der Schiffshaut abhängig.

Aus der Kenntnis des Unfallverlaufs (Unfallbahn) und bei Anwendung der stoßmechanischen Erkenntnisse läßt sich die Höhe der Stoßlast für den jeweiligen Unfallverlauf berechnen und der aufnehmbaren Traglast des Bauwerksteils gegenüberstellen. Dabei führt nicht jede Anfahrung des Bauwerkes zwangsläufig zum Versagen.

Zur Abschätzung eines wahrscheinlichen Schiffsstoß-Unfalles bestimmter Schwere wird daher das Unfall-Modell um eine Funktion erweitert, die den Schweregrad des Schiffstoßes berücksichtigt; verknüpft mit der Unfall-Wahrscheinlichkeit ergibt sich die Wahrscheinlichkeit des Kollisions-Stoßes:

$$W_{Ko} = W_0(t) \cdot W_S \quad (3.5)$$

mit $W_S = f(m, v_a, \alpha, \dots)$ als Unfallschwerefunktion.

Diese Unfallschwerefunktion wird vorerst aus empirischen Daten pauschal als Unfallschwerefaktor abgeleitet, bis genauere Erkenntnisse über den Unfallhergang ausgewertet sind.

Hierzu wird aus der Analyse von Schiffsunfällen die unterschiedliche Ausprägung der Unfallschwere quantifiziert. Bei mehr als der Hälfte aller Unfälle ist kein oder nur ein vergleichsweise geringer Schaden zu verzeichnen, der dann in der Regel nur am Schiff auftritt. Nur ein sehr kleiner Teil der Unfälle hat einen beträchtlichen Schaden an den Kollisionspartnern zur Folge.

3.3 Datengrundlagen

Für die Durchführung einer Wahrscheinlichkeitsberechnung sind Daten über

1. Schiffsunfälle auf Binnenwasserstraßen,
2. Verkehrsstärken und Verkehrsstruktur auf Binnenwasserstraßen,
3. Unfallschwere der Schiffsunfälle,
4. Streckenverläufe und Bauwerke zu erheben.

Aufgrund der relativ seltenen Unfall-Ereignisse wird ein Betrachtungszeitraum über mehrere Jahre zugrundegelegt, um durch hinreichend große Anzahlen den Einfluß zufallsbedingter Verzerrungen zu begrenzen.

Die Daten lassen sich je nach Untersuchungszweck der amtlichen Statistik /StatBu/ oder direkt aus Aufzeichnungen von Dienststellen der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung entnehmen.

3.3.1 Unfalldaten

Grundlage für die Auswertung von Unfällen sind alle mit dem Unfallmeldeblatt registrierten Unfälle. Neben technischen Daten sind den Aufzeichnungen Angaben zum Unfallablauf, zu Unfallmerkmalen und Unfallrandbedingungen zu entnehmen.

Die Häufigkeit aller Unfälle wird dabei ein Anhaltswert für die unfallauslösenden Faktoren sein, die Häufigkeit der Unfälle mit Bauwerken im Sinne der Vereinfachung nach 3.1.2 den Anhaltswert für die Kollision mit Bauwerken, insbesondere Brücken, darstellen (Bild 10).

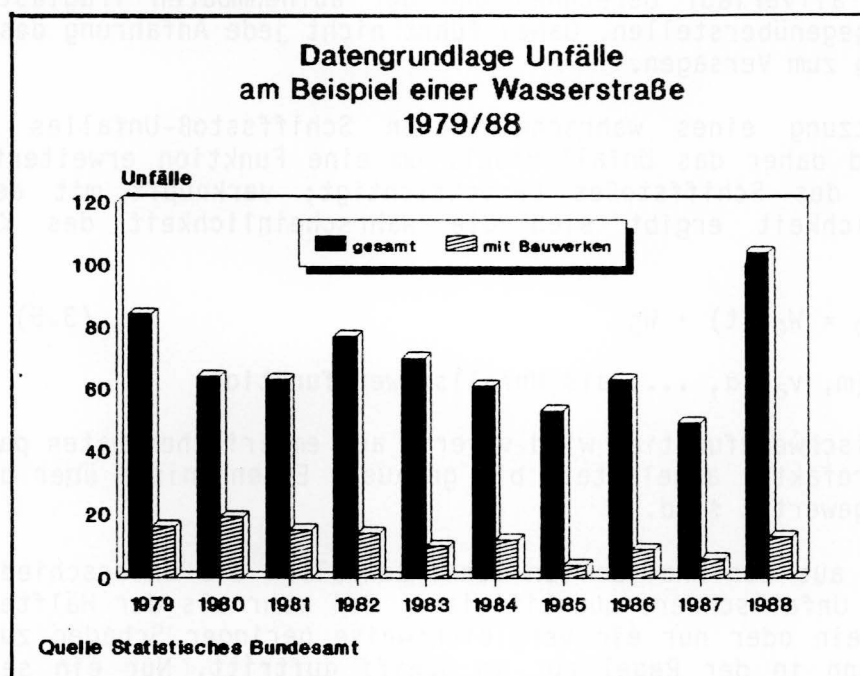


Bild 10 Beispiel: Entwicklung von Unfällen und Unfällen mit Bauwerken

Für genauere Untersuchungen müssen die Unfallmeldeblätter nach den gewünschten Kriterien ausgewertet werden.

3.3.2 Verkehrsstärke- und Verkehrsstruktur-Daten

Zur Bestimmung der Stoßbelastung durch eine statistische Größe sowie zur Berechnung der Unfallkenngröße werden Angaben über Verkehrsstärke und Verkehrsstruktur benötigt. Unter Verkehrsstärke wird die Anzahl der Fahrzeugdurchgänge je Zeiteinheit verstanden, die bei der hier betrachteten Unfallanzahl sinnvollerweise auf ein Jahr bezogen wird. Dabei ist aber nicht nur der Durchgangsverkehr, sondern auch der Regionalverkehr zwischen Häfen entlang der betrachteten Strecke miteinzubeziehen. Für Einzelabschnitte der Wasserstraße müssen detailliertere Auswertungen von Schleusenbetriebstagebüchern vorgenommen werden.

Genauere Zählungen über Schiffsdurchgänge liegen an Wasserstraßen mit Abgabenerhebungspflicht vor. Hier zielt allerdings die Zählung auf die leeren (abgabefreien) und beladenen (abgabepflichtigen) Schiffsgefäße ab; sie werden nach Schiffen "mit eigener Triebkraft" und "ohne eigene Triebkraft" unterschieden. Zur Berechnung der Fahrzeugströme ist daher der Anteil der Schub- und Koppelverbände festzustellen, der über die Zahl der Schiffe "ohne eigene Triebkraft" eine Verkehrsbilanz ermöglicht (Bild 11).

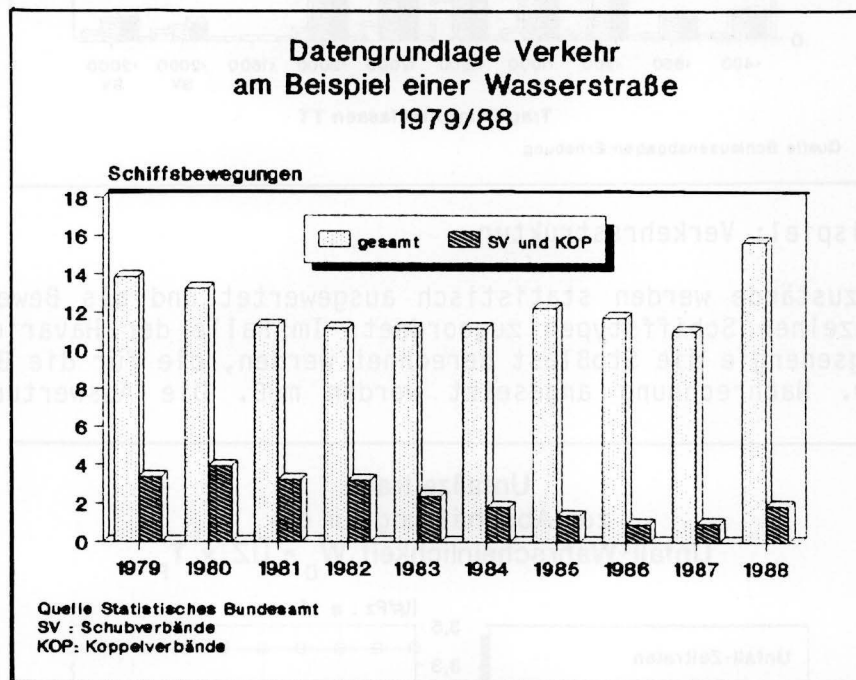


Bild 11 Beispiel: Entwicklung der Fahrzeugdurchgänge

Unter Verkehrsstruktur wird der jeweilige Anteil der Fahrzeuge im Berg- und Talverkehr, im leeren und beladenen Zustand sowie die durchschnittliche Ladung verstanden (Bild 12). Dazu gehören Grundlagendaten über Längen, Breiten, Tiefgänge, Tragfähigkeitsvermögen, Fixpunkthöhen, etc., die für nach Tragfähigkeitsvermögen eingeteilte Schiffsgrößen (TT-Klassen) zusammengestellt sind /BMV, 1977/ oder ermittelt werden. Hiernach werden Berechnungen der Unfallwahrscheinlichkeit u. a. auch bei begrenzten Fahrwasserbedingungen, der Unfallschwere sowie der möglichen Stoßlast aufgebaut.

Die Geschwindigkeiten der Schiffe werden sowohl für die Berechnung des Stoßimpulses als auch für die Ermittlung der Beteiligungsdauer der Schiffe innerhalb eines Wasserstraßenabschnittes benötigt. Sie hängen von Fahrtrichtung, Beladungszustand und vom Schiffstyp ab. Für erste Abschätzungen

sind Richtwerte aus VBW, 1985 zu entnehmen; für eine genauere Betrachtung empfehlen sich Auswertungen von Schleusenbetriebstagebüchern bzw. Erhebungen vor Ort /LEUTZBACH, 1982/.

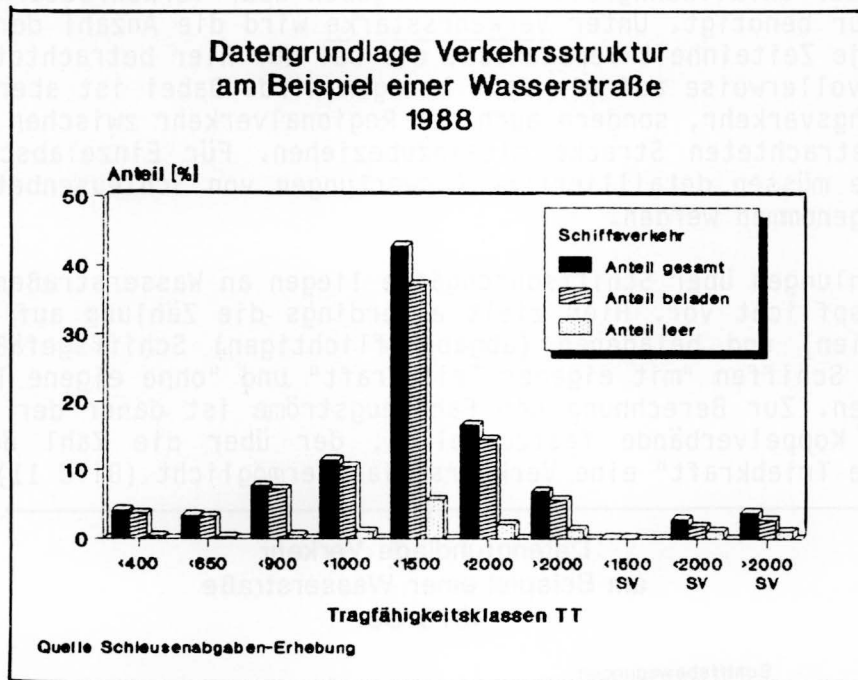


Bild 12 Beispiel: Verkehrsstruktur

Diese Fahrtzustände werden statistisch ausgewertet und als Bewegungsenergie den einzelnen Schiffstypen zugeordnet. Im Falle der Havarie kann aus der Bewegungsenergie die Stoßlast berechnet werden, die für die Bauwerksbemessung bzw. Nachrechnung angesetzt werden muß. Die Auswertung liefert

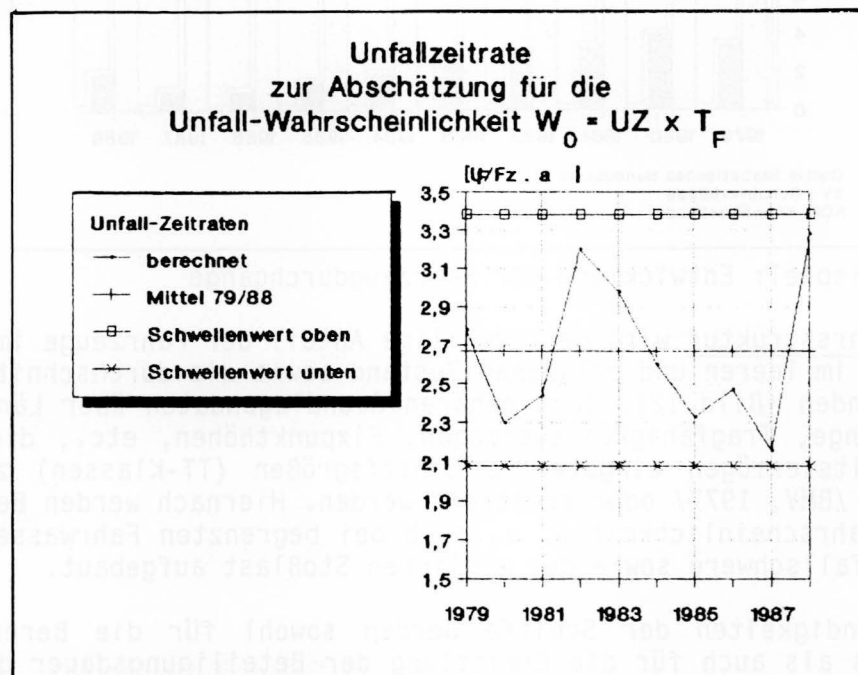


Bild 13 Beispiel: Entwicklung der Unfallzeitrate

ebenso die zur Abschätzung der Unfallwahrscheinlichkeit angesetzte Unfallzeitrates, die im Beispiel einen mittleren Wert von etwa 2,7 Unfällen pro Fahrzeug und Jahr-Fahrzeit annimmt (Bild 13).

3.3.3 Unfallschwere-Daten

Zur Beurteilung des Schweregrades der Schiffsunfälle, insbesondere bei Anfahrungsunfällen von Bauwerken, können für die Bestimmung des Unfallschwere-Faktors die Einstufungen der "Unfallfolgen" des polizeilichen Unfallmeldeblattes herangezogen werden. Für die vorliegend interessierende Frage nach der Höhe der Katastrophen-Stoßlast wird der Anteil der qualitativ beschriebenen Schadensstufe "Schiff gesunken" angesetzt.

Um für die Festlegung der Unfallschwere einen ausreichenden Stichprobenumfang zu erhalten, wurden die Schiffsunfälle der Jahresreihe 1969/88 aus der amtlichen Statistik ausgewertet (Bild 14).

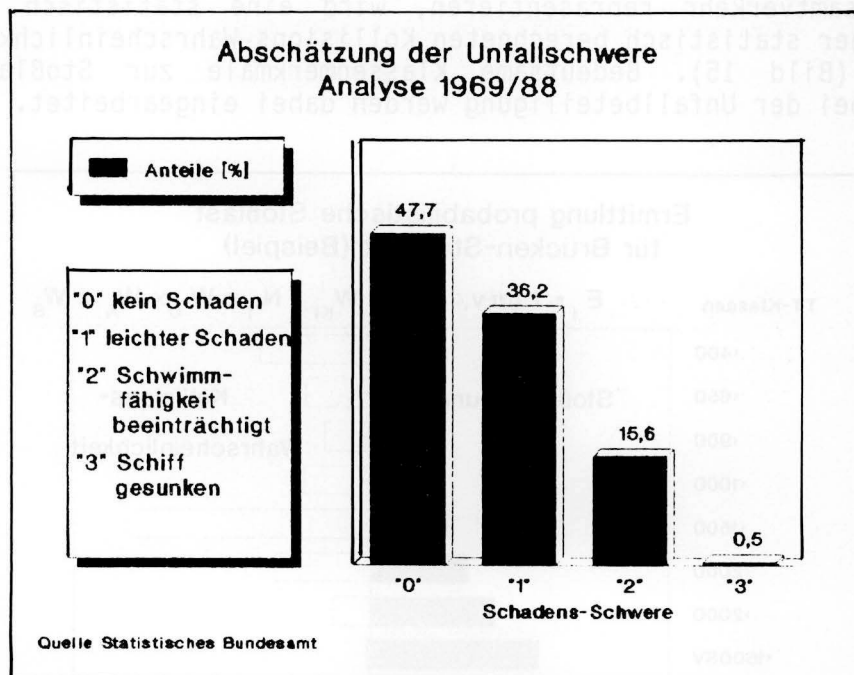


Bild 14 Statistische Auswertung der Unfallschwere

Dabei ist festzustellen, daß über die betrachteten 20 Jahre bei ca. 50 % aller Unfälle kein nennenswerter Schaden an den beteiligten Schiffen entstanden ist. Während sich bei den "Unfällen insgesamt" im Verlauf der Jahre jedoch ein leichter Trend zu geringerer Schadensschwere feststellen läßt, weist der Trend bei "Unfällen mit Bauwerken" eine leichte Zunahme schwerer Schäden auf.

Der Anteil gesunkener Fahrzeuge betrug im Mittel für die an allen Unfällen beteiligten Schiffe 0,5 %; für die an Bauwerksunfällen beteiligten Schiffe 0,9 %. Mithin scheint ein Anteil von schwersten Schiffsunfällen im Sinne eines Katastrophenunfalles bei 1 % aller Fälle als Ansatz gerechtfertigt.

Zu einem ähnlichen Ansatz gelangen übrigens FUJII, YAMANOUCI, MIZUKI, 1974, bei der Auswertung von Seeschiffsunfällen in japanischen Gewässern.

3.4 Ermittlung einer probabilistischen Stoßlast

Als probabilistische Stoßlast tritt bei Kollision eines Schiffes mit Bauwerken eine wahrscheinliche Stoßlast, die auf der Basis statistischer Grundlagendaten nach der Stoßmechanik berechnet wird, mit der Eintrittswahrscheinlichkeit des Unfalles auf. Diese Unfall-Wahrscheinlichkeit wird für den Brückenbereich bestimmt und stellt eine standortbezogene Größe dar. Im Falle der Katastrophen-Stoßbelastung wird die Unfall-Wahrscheinlichkeit entsprechend der Unfallschwere-Wahrscheinlichkeit reduziert, so daß sich theoretische Einzelwahrscheinlichkeiten in der Größenordnung von 10^{-4} ergeben. Es wird angenommen, daß diese errechneten extrem großen und seltenen Ereignisse derselben Grundgesamtheit entstammen wie die zugrundegelegten Unfallereignisse.

Durch die Einteilung der Schiffe nach Schiffsgrößenklassen, die ihren Anteil am Gesamtverkehr repräsentieren, wird eine statistisch berechnete Stoßlast einer statistisch berechneten Kollisions-Wahrscheinlichkeit $w_{ki}(t)$ zugeordnet (Bild 15). Bedeutsame Klassenmerkmale zur Stoßlast-Bestimmung sowie bei der Unfallbeteiligung werden dabei eingearbeitet.

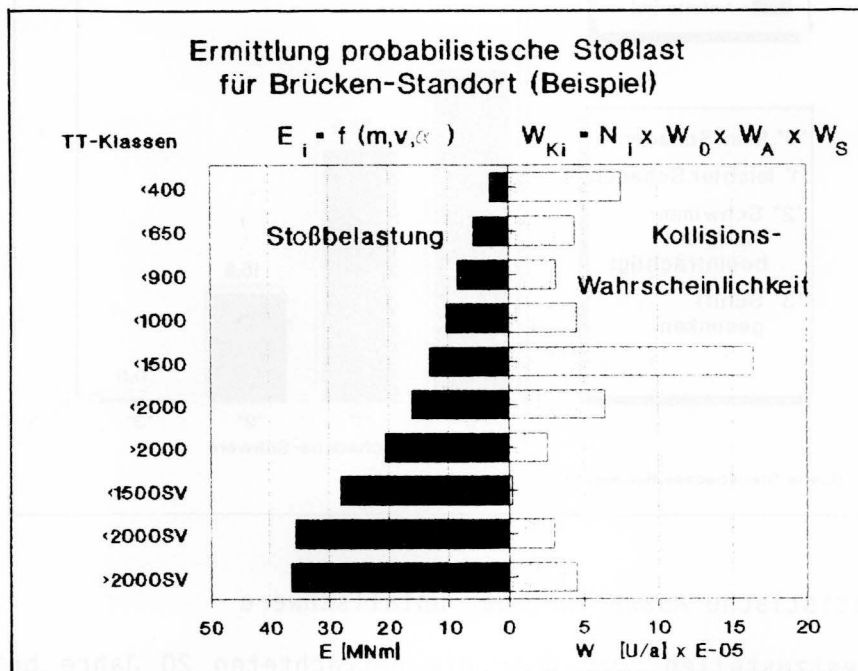


Bild 15 Beispiel: Kollisions-Wahrscheinlichkeit, berechnet für die jeweilige Stoßenergie

Durch Aufsummierung der für die einzelnen Schiffsgrößenklassen m berechneten relativen Häufigkeiten $w_{ki}(t)$ ergibt sich die Kollisions-Wahrscheinlichkeit. Konfidenzbereiche, hervorgerufen durch die Anzahl der Stichproben sowie den Erhebungsfehler der Grundlagendaten sind zu berücksichtigen.

3.5 Verteilungsfunktion der Schiffsstoß-Last

Durch die Zuordnung der Kollisions-Wahrscheinlichkeiten $w_{ki}(t)$ von Schiffsklassen der Flottenstruktur zu Stoßbelastungen, liegen Zufallsvariable vor, die vorteilhaft durch eine Verteilungsfunktion beschrieben werden. Durch geordnete Aufsummierung der $w_{ki}(t)$ nach der Größe der Stoßbelastung liegt mit

$$F_{KX}(x) = W(X < x) \quad (3.6)$$

die Verteilungsfunktion vor, die die Wahrscheinlichkeit angibt, daß ein bestimmter Lastwert x erreicht, aber nicht überschritten wird. Die Überschreitungswahrscheinlichkeit der Stoßlast ist demnach

$$1 - F_{KX}(x) = P(X > x) = W_K \quad (3.7)$$

und

$$F_{KX}(x) = (1 - W_K) \quad (3.8).$$

Mit der auf die Einheit ein Jahr bezogenen Wahrscheinlichkeit W_K ergibt sich die Rückkehrperiode zwischen den Kollisions-Ereignissen zu

$$t_n = 1 / W_K \quad (3.9)$$

die im Falle einer Traglast-Überschreitung beim Bauteil Versagens-Ereignisse sind.

Die Rückkehrperiode t_n ist nur eine durchschnittliche Zeit bis zum Überschreiten eines gewissen Lastniveaus, wohingegen die tatsächliche Zeit zwischen den Ereignissen eine Zufallsvariable ist.

Die Verknüpfung von (3.8) mit (3.9) ergibt

$$t_n(x) = 1 / (1 - F_{KX}(x)) \quad (3.10)$$

und damit die über die Rückkehrperioden aufgetragene Verteilung der Kollisions-Stoßbelastung mit Kollaps-Folge (Bild 16). Aufgetragen ist dabei nur der Ausschnitt der schweren Kollisionereignisse, der aus der Vereinfachung der Unfallschwere-Wahrscheinlichkeit mit Hilfe eines Schwere-Faktors nur betrachtet werden konnte.

Nach Festlegung der zulässigen Rückkehrperiode in Abhängigkeit eines Grenzkrisikos (vgl. Abschnitt 4) läßt sich aufgrund der oben aufgeführten Zuordnung zu Schiffsklassen aus der Bemessungs-Stoßenergie ein sogenanntes Typschiff identifizieren, das für detailliertere Berechnungen weiterverwendet wird (z. B. Impulsbetrachtung für Schrägstoß).

4 Entwicklung von Risikogrenzen

Da es in technischen Systemen eine absolute Sicherheit im Sinne einer Freiheit von jeglichen Risiken nicht geben kann, muß das Risiko auf ein vertretbar geringes Maß reduziert werden. Das größte noch vertretbare Risiko eines bestimmten technischen Systems wird dabei als Grenzkrisiko bezeichnet,

wobei Risiken, die kleiner als das Grenzkrisiko sind, in den Bereich der Sicherheit fallen /DIN 31004, 1984/. Die quantitative Bestimmung des Grenzkrisikos wird damit zum Ziel eines technischen Konzeptes.

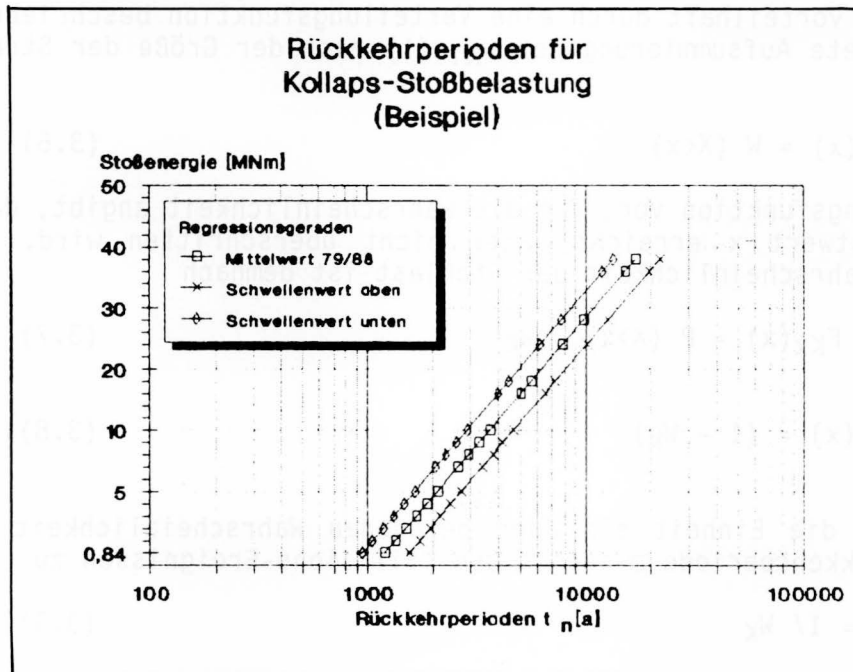


Bild 16 Beispiel: Rückkehrperiode der Stoßbelastung

Im Gegensatz zu festgelegten Bemessungswerten, etwa Ersatzlasten in Richtlinien, die als sicherheitstechnische Festlegungen im weitesten Sinne zu verstehen sind, aber nur qualitativ einer bestimmten Sicherheit zugeordnet werden können, stehen wahrscheinlichkeitstheoretische Aussagen, wie zum Beispiel eine berechnete Wahrscheinlichkeit für den unerwünschten Katastrophen-Schiffsstoß.

Diese Ereignis-Wahrscheinlichkeit ist jedoch noch kein direktes Maß der Sicherheit eines Systems (z. B. der Brücke), das während seiner geplanten Nutzungsdauer zufallsbedingten Belastungen hinsichtlich Ereignis-Zeit und -Größe ausgesetzt ist. Im Extremfall des Versagens würde die Zeit zwischen den Ereignissen die Lebensdauer des Systems darstellen.

Im Vergleich der Zeiten t_n als statistische Rückkehrperiode mit der Nutzungsdauer T_N des betrachteten Systems ist von Interesse, mit welcher Wahrscheinlichkeit das unerwünschte Ereignis innerhalb der geplanten Nutzungsdauer eintritt; dies umso mehr, da es sich bei t_n um eine mittlere Zeit zwischen Ereignissen handelt, die mit einer geringen, jedoch endlichen Wahrscheinlichkeit in mehreren aufeinanderfolgenden Jahren auftreten kann.

Diese Zeitabhängigkeit der Ereignisse läßt sich mit Hilfe des Konzeptes der Rückkehrperiode beschreiben /SCHÜELLER, 1981/, bei der die Erfassung der "Lebensdauer" in Form der Nutzungsdauer als Zeit T_N erfolgt.

Diese Eintritts-Wahrscheinlichkeit zum Zeitpunkt $t < T$ läßt sich in Erweiterung der Glg. (3.10) und mit Einführung eines kontinuierlichen Zeitparameters t zu

$$F_T (t < T) = 1 - (1 - W_K)^T = 1 - (1 - 1/t_n)^T \quad (3.11)$$

berechnen, wobei die Wahrscheinlichkeit, daß eine bestimmte Bauwerksanfahrung mit der Last $x > X$ während der Nutzungsdauer T_N eintritt,

$$P (x > X) = 1 - (F_{KX} (x))^{T_N} \quad (3.12)$$

ist.

Die Funktion (3.11) läßt sich bei sehr kleinen Ereignis-Wahrscheinlichkeiten durch die Exponentialfunktion annähern und erhält die Form

$$F_T (t < T) = 1 - e^{-T_N/t_n} \quad (3.13)$$

wobei der Ausdruck

$$L_T (t > T) = e^{-T_N/t_n} \quad (3.14)$$

als komplementäre Funktion die zeitabhängige Zuverlässigkeitsfunktion, auch als Überlebenswahrscheinlichkeit bezeichnet, ist.

Wird ein System auf eine Rückkehrperiode $t_n = T_N$ entsprechend der vorgesehenen Nutzungsdauer bemessen, so beträgt die Wahrscheinlichkeit für das Eintreten des unerwünschten Ereignisses innerhalb dieser Nutzungsdauer

$$F_T (t < T) = 1 - (1 - 1/t_n)^{T_N} \approx 1 - e^{-1} = 0,63 \quad (3.15)$$

entsprechend 63 %.

Dies ist für die Bemessung eines Bauwerks auf Versagen eine unakzeptable Wahrscheinlichkeit und führt dazu, Bauwerke für eine Rückkehrperiode auszuliegen, die einem Vielfachen der Nutzungsdauer entspricht.

4.1 Vergleichbare Risikogrenzen

Risikobetrachtungen von technischen Systemen liegen oft unterschiedliche Berechnungsmodelle zugrunde, die einen Vergleich zwischen verschiedenen Systemen erschweren. Sinnvoll sind daher vergleichende Betrachtungen innerhalb einer Systemgruppe, die einer Schiffsbelastung unterliegen.

Als Ansatz einer Schiffsstoß-Belastung auf ein Kühlwasser-Einlaufbauwerk für ein Kernkraftwerk bemißt TAUBERT, 1974, nach dem häufigsten Wert der Unfallwahrscheinlichkeit in einer abgeschätzten Verteilungsfunktion und erreicht damit eine Rückkehrperiode der Stoßlast, die mit einer Wahrscheinlichkeit von 78 % innerhalb der Nutzungsdauer auftritt.

FRANSEN/LANGSØ, 1980, geben im Zusammenhang mit der Risikostudie für die Great Belt Bridge in Dänemark eine Rückkehrperiode für einen schiffsstoßbedingten Brückenkollaps mit $t_n = 10\,000$ Jahren an. Im Vergleich zur technischen Nutzungsdauer der Brücke von $T_N = 100$ Jahren kann damit die Wahrscheinlichkeit für das Eintreten innerhalb dieser Nutzungsdauer zu 1 % abgeschätzt werden.

Nach DIAMANTIDIS, 1988, wird für Offshore-Konstruktionen die Eintrittswahrscheinlichkeit für das Versagen durch Schiffsstoß bei einer techni-

schen Nutzungsdauer von etwa 30 Jahren mit 0,3 % angesetzt, was einer Rückkehrperiode der Versagenslast von $t_n = 10\ 000$ Jahren entspricht.

Die im skandinavischen Raum geltenden "Common Nordic Regulations", eine Norm über Lastannahmen im Brückenbau /KNOTT, LARSEN, ROWE, 1988/ geben als Richtwert für die Katastrophenlast aus Schiffsstoß, die aus der Größe eines Bemessungsschiffes berechnet wird, eine Eintrittswahrscheinlichkeit von $F_T(t) = 0,01$ bei einer kalkulierten Nutzungsdauer von 50 Jahren an. Nach der Zuverlässigkeitsfunktion ergibt sich eine Rückkehrperiode $t_n = 5000$ Jahre. Diese Eintrittswahrscheinlichkeit wurde auch im derzeitigen ISO-Entwurf "Accidental Actions due to Human Activities" als Grenzzisiko aufgenommen /ISO, 1989/.

Diese Grenzzrisiken stellen damit einen ersten Anhaltswert für das akzeptable Risiko dar, können streng genommen aber nur unter gleichem Risikohintergrund (z. B. gleiche Anzahl gefährdeter Personen und Sachwerte) angesetzt werden. Mit einem derartigen Grenzzisiko (z. B. $F_t(t) = 0,01$) ließe sich nun eine entsprechende Stoßbelastung der Verteilungsfunktion (vgl. Bild 16 als Beispiel) entnehmen und zur Bemessung bzw. Nachrechnung ansetzen.

4.2 Individuelle Risikogrenzen

Festlegung von Risikogrenzen bieten einzig auf der Basis der Eintrittswahrscheinlichkeit des unerwünschten Ereignisses eine Vergleichsgrundlage, wobei der mit dieser Eintrittswahrscheinlichkeit verbundene Schaden stark unterschiedlich sein kann.

Zur Quantifizierung von Schäden können Risiko-Kategorien des betrachteten Systems gebildet werden, die sich aus

- dem Risiko des Brücken-Baulastträgers für Schadensbeseitigung und Wiederaufbau,
- dem Risiko der Brückenbenutzer hinsichtlich Unfallfolgen und Beeinträchtigungen,
- dem Risiko der Wasserstraßenbetreiber hinsichtlich Schadensbeseitigung,
- dem Risiko der Wasserstraßenbenutzer hinsichtlich Unfallfolgen und Beeinträchtigungen,
- dem Risiko einer Umweltbeeinträchtigung durch Freisetzung von Gefahrstoffen, etc.

zusammensetzen können.

Für diese einzelnen Risiko-Kategorien ließen sich wiederum jeweilige Risikogrenzen aus einem Vergleich mit Risiken innerhalb dieser Kategorie festlegen, wozu sich andere Verkehrswegesysteme oder generell andere technische Systeme anbieten würden /HAUPTMANN, 1987/.

Mit Ausnahme der Verfeinerung von Grenzzuständen liegt hiermit ebenfalls eine sicherheitstechnische Festlegung vor, die durch Angaben von technischen Werten und Maßnahmen die Einhaltung eines Grenzzisikos sicherstellen soll.

Eine Methode zur direkten Erfassung von Sicherheit bieten demgegenüber Wirtschaftlichkeitsüberlegungen, bei denen der Nutzen als veränderter Schaden den Kosten zur Gewährleistung der Sicherheit gegenübergestellt wird. Durch die Betrachtung verschiedener Eintrittswahrscheinlichkeiten

lassen sich Kosten-Nutzen-Kurven systemanalytisch optimieren /KRAPPINGER, 1971; KNOTT, LARSEN, ROWE, 1988/.

Diese risikoanalytische Betrachtung ist bei einer Erfassung des Unfallgeschehens, der Unfallabläufe sowie der Unfallkosten möglich.

Derartige Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen bedürfen eines auf das System abgestimmten Datenumfanges hinsichtlich Kosten, die derzeit für den Bereich der Wasserstraße zusammengetragen werden. Vergleichend liegen dazu im Straßenwesen /EMDE, 1985/ sowie für die Seeschifffahrt /PERRAS, 1972/ Kostenansätze bzw. Methoden vor. Als Alternative zur monetären Bewertung von Menschenleben bietet sich eine Problemlösung nach dem "Prinzip der geringsten Gesamtmortalität" an /KRAPPINGER, SHARMA, 1974/.

5 Diskussion und Ausblick

Die vorgestellte Last-Konzeption für den Last-Ansatz von Schiffsstoß, dargestellt am Beispiel von Flußpfeilern an Brücken, ermöglicht als Grundgerüst die Stoßlast-Bestimmung auf Bauwerke für Risiken aus dem Schiffsverkehr. Dabei wird aus einer globalen Unfall-Betrachtung eine Unfall-Wahrscheinlichkeit in Form einer Unfall-Zeitraße als mittleres Maß für das Unfallrisiko gewonnen. Ebenso wird die für die Versagens-Wahrscheinlichkeit eines angefahrenen Brückenpfeilers maßgebende Wahrscheinlichkeit der Kollaps-Stoßlast aus einer pauschalen Unfallschwere-Auswertung bestimmt.

Den Unfalldaten, die mangels Stichproben-Umfang mit einem weiten Konfidenzbereich behaftet sind, stehen ausreichend Daten über die Verkehrsstärke und Verkehrsstruktur gegenüber. So ist mit dem derzeitigen Stand des Wissens eine Risikoabschätzung innerhalb unterer und oberer Schwellenwerte möglich.

Bei Festlegung oder Ermittlung von Grenzrisiken bietet die Last-Konzeption zudem eine Risiko-Beurteilung für Bauwerke im Entwurf, für bestehende Bauwerke oder auch für temporäre Bau- und Sicherungsbehelfe, die entsprechend ihrer kürzeren Nutzungsdauer nach dem Konzept der Rückkehrperiode auf einem gleichwertigen Sicherheitsniveau beurteilt werden können.

Die Bewertung der Modellgenauigkeit unter Ansatz von Erwartungswerten (Mittelwerten) für den Teilabschnitt einer staugeregelten Wasserstraße zeigt, daß eine Nacheichung der Unfallereignisse nur innerhalb dieser weiten Grenzen des Konfidenzbereiches gelingt. Ebenfalls ist in diesen weiten Grenzen die für den Ansatz der Unfallzeitraße wenigstens annähernd einzuhaltende Linearitätsbedingung erfüllt. Genauer betrachtet ist jedoch eine lineare Abhängigkeit der Unfallereignisse von der Verkehrsstärke nicht zwingend ableitbar (Bild 17).

Überfordert wäre das globale Modell ebenso bei der genauen Beurteilung von Unfall-Brennpunkten, die sich nur unter einer bestimmten Zusammensetzung von Randbedingungen (Verkehr, Strömung, Witterung, Bauwerk) ergeben. Innerhalb der Konfidenzgrenzen läßt sich jedoch eine Bandbreite der Gefährdung angeben.

Die Unfallbewertung mit Unfallraten erlaubt derzeit auch noch keine Optimierung von Brückenstandorten und Pfeilerstellungen, die einem genaueren Modell vorbehalten bleibt.

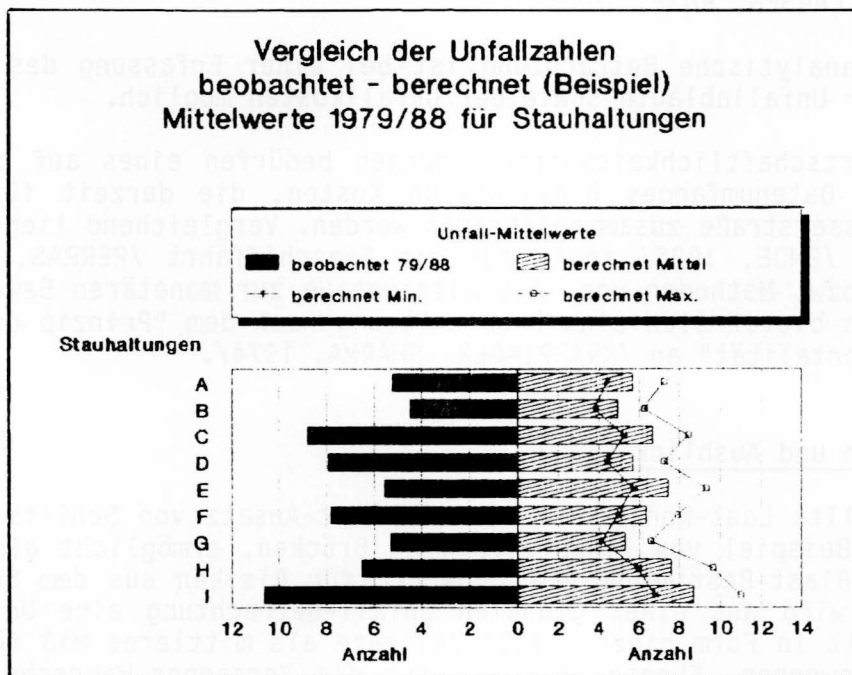


Bild 17 Beispiel: Vergleich der tatsächlichen mit der theoretischen Unfallzahl auf der Basis der Unfallwahrscheinlichkeit

Diese Unschärfe des Modellansatzes, hinzu kommen vorerst pauschale Faktoren für die

- Wahrscheinlichkeit eines Unfalles mit Bauwerken und die
 - Wahrscheinlichkeit der Unfallschwere,
- die einem Mangel an Grundlagendaten zuzuschreiben sind, erfordert eine detailliertere Auswertung von Unfällen, die Informationen liefern zur
- Beschreibung der Unfallwahrscheinlichkeit und Unfallablaufs unter entsprechenden Randbedingungen und zur
 - Beschreibung des Schadensumfanges.

Als Begleitumstände können dabei Einflüsse der Witterung oder der Strömung angesehen werden, die auf unterschiedlichen Wasserstraßen einen unterschiedlichen Einfluß auf das Unfallgeschehen ausüben (Bild 18). Ebenso können Abhängigkeiten eines Unfalls von Art und technischem Ausrüstungsstandard des Schiffes von Interesse sein.

Diese Informationen, in Form von Randverteilungen, können dabei in eine Unfall-Wahrscheinlichkeitsfunktion eingehen, die sich aus mehreren Faktoren zusammensetzt.

Die weiteren Untersuchungen müssen daher in Richtung

- einer Unfalldatenauswertung,
- einer Beschreibung des Unfallablaufes,
- einer Erklärung der Ursache-Wirkungs-Beziehungen gehen, um Unfallmechanismen zu analysieren.

Die Kenntnis der Unfallmechanismen kann helfen, anstatt der deterministischen Unfall-Statistik, deren Prognosen zwangsläufig mit Unsicherheiten behaftet sind, zuverlässigere Bewertungsverfahren aufzubauen.

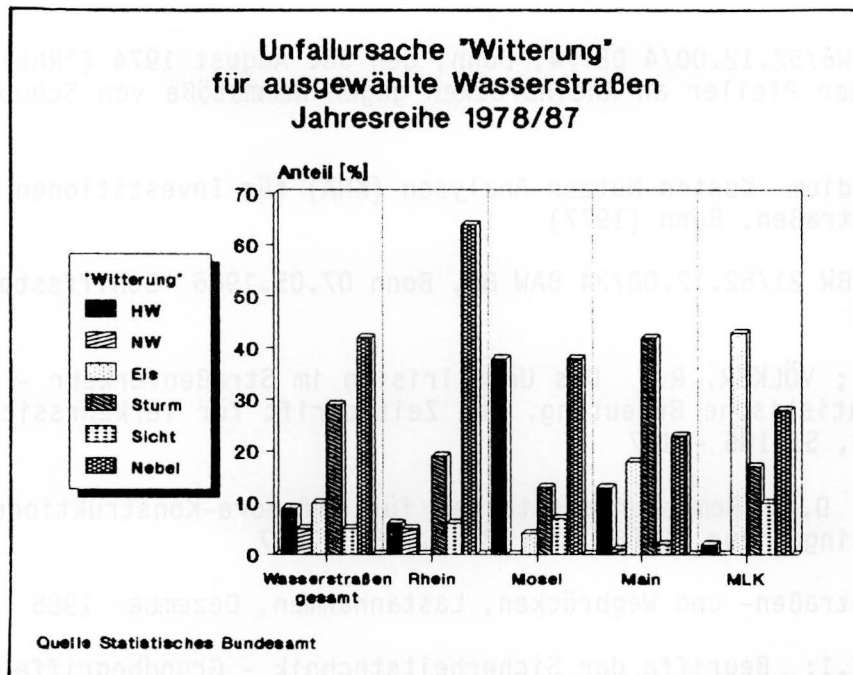


Bild 18 Unfallursachen-Charakteristik für ausgewählte Wasserstraßen

6 Literatur

BMV: Erlaß W6/52.12.00/4 DB 74, Bonn, den 08. August 1974 ("Rheinerlaß")
"Sicherung der Pfeiler an Rheinbrücken gegen Rammstöße von Schubschiffverbänden"

BMV: Kompendium Kosten-Nutzen-Analysen (KNA) für Investitionen an Binnenschiffahrtsstraßen, Bonn (1977)

BMV: Erlaß BW 21/52.12.00/34 BAW 86, Bonn 07.05.1986 "Schiffsstoß auf Bauwerke", 1986

BRÜHNING, E.; VÖLKER, R.: Das Unfallrisiko im Straßenverkehr - Kenngrößen und ihre statistische Bedeutung. In: Zeitschrift für Verkehrssicherheit 28 (1982) Nr. 3, S. 106 - 117

DIAMANTIDIS, D.: Bemessungskriterien für Offshore-Konstruktionen aus Beton. In: Bauingenieur (1988) Nr. 63, S. 181 - 187

DIN 1072: Straßen- und Wegbrücken, Lastannahmen, Dezember 1985

DIN 31 004 T.1: Begriffe der Sicherheitstechnik - Grundbegriffe - Vornorm, November 1984

DS 804: Vorschrift für Eisenbahnbrücken und sonstige Ingenieurbauwerke, 1982, Deutsche Bundesbahn

EMDE et. al.: Kostensätze für die volkswirtschaftliche Bewertung von Straßenverkehrsunfällen - Preisstand 1985. In: Straße und Autobahn (1985) Nr. 4, S. 159 - 162

ForschGesStrw: Merkblatt für die Auswertung von Straßenverkehrsunfällen, Teil II: Methodik von Unfalluntersuchungen, Entwurf 11/86, Köln, 1986

FRANSEN, A.G.: Accidents involving bridges. In: Ship Collision with Bridges and Offshore Structures. Colloquium Copenhagen, 1983. IABSE Introductory report No. 41, 1983, p. 11 - 26

FRANSEN A.G.; LANGSØ, H.: Ship Collision Problems. In: IABSE Proceeding P 31/80 (1980) p. 81 - 107

FUJII, Y.; YAMANOUCI, H.; MIZUKI, N.: The Probability of Stranding. In: Journal of Navigation (1974) Vol. 27, pg. 239 - 243

HAUPTMANN, U. u.a.: Technische Risiken - Ermittlung und Beurteilung. Berlin: Springer, 1987

HONSBURG, J.: Zusammenfassung "Untersuchung über die Schiffstoßkräfte beim Anprall von Schiffen an Bauwerke" - Unveröffentlicht - Schlagenbad 1985

ISO: International Standard Organisation "Accidental Actions Due to Human Activities". Working Group TC 98/SC 3/WG 4. Draft Proposal 10252, Dec. 1989

JORDAN, K.: Zur Risikoabschätzung für verkehrsbehindernde Fahrwasserbeschränkungen. In: Schiff und Hafen 34 (1982), Heft 9, S. 217 - 219

Kunz: Risikoorientierte Last-Konzeption für Schiffsstoß auf Bauwerke

KNOTT, M.: Ship Collision with Bridges. In: P.I.A.N.C-Bulletin 1987, No 57 p. 58 - 65

KNOTT, M.; LARSEN, O.; ROWE, W.: Vessel Passage at Navigable Waterway Bridge Crossings; Literature Review Report, 1988 - unveröffentlicht -

KRAPPINGER, O.: Zusammenhänge zwischen der Wirtschaftlichkeit und Sicherheit von Schiffen. In: Schiffstechnik 18 (1971) S. 21 - 32

KRAPPINGER, O.: Abschätzung des Risikos, daß Tanker mit gefährlicher Ladung im Jadedefahrwasser mit anderen Schiffen kollidieren oder auf Grund laufen. HSVA Hamburg, Juni 1978, unveröffentlicht

KRAPPINGER, O.; SHARMA, S.D.: Sicherheit in der Schiffstechnik. In: Jahrbuch der Schiffbautechnischen Gesellschaft 68 (1974), S. 329 - 355

KRISTIANSEN, S.: Platform Collision Risk on the Norwegian Continental Shelf. In: Ship Collision with Bridges and Offshore Structures, IABSE Colloquium Copenhagen 1983, Preliminary Report No. 42, p. 163 - 172.

KUNZ, C.: Arbeitsbericht: Überarbeitung der Anlagen zum Erlaß "Schiffsstoß auf Bauwerke", Karlsruhe, Februar 1989, unveröffentlicht

LEUTZBACH, W.: Verkehr auf Binnenwasserstraßen. Schriftenreihe des Instituts für Verkehrswesen der Universität Karlsruhe, Heft 24, 1982

LEUTZBACH, W.; KOEHLER, R.; LEUTWEIN, B.: Erfassung des Verkehrsablaufs auf der Wasserstraße mit Hilfe von Simulationsmodellen
Dt. Berichte zum 23. Int. Schifffahrtkongreß, Ottawa 1973

LOHRBERG, K.; KEITEL, V.: Zur Frage der Risikobewertung des Schiffsstoßes auf Brücken. In: Zeitschrift für Binnenschifffahrt und Wasserstraßen (1990) Nr. 1, S. 16 - 21

MEIER-DÖRNBERG, K.-E.: Schiffskollision, Sicherheitszonen und Lastannahmen für Bauwerke der Binnenwasserstraßen. In: VDI-Berichte Nr. 496, 1983, S. 1 - 9

MEIER-DÖRNBERG, K.-E.: Entwurfsgrundsätze zum Ausbau der Saar, Theoretische und experimentelle Untersuchungen zur Ermittlung statischer Ersatzlasten für den Anprall von Schiffen an Bauwerken; Darmstadt, 1982 - 1984, unveröffentlicht

MEIER-DÖRNBERG, K.-E.: Theoretische und experimentelle Untersuchungen zum Schiffsstoß von Motorgüterschiffen (Spitzbug) auf Bauwerke, Darmstadt, 1988

PERRAS, P.T.: Technisch Ökonomische Probleme der Sicherheit von Schiffen. In: Schiffstechnik (1972), Nr. 19, S. 67 - 87

SCHÜELLER, G.I.: Einführung in die Sicherheit und Zuverlässigkeit von Tragwerken. Berlin: Ernst & Sohn, 1981

SIA 160: Einwirkungen auf Tragwerke, Ausgabe 1989. Schweizer Ingenieur und Architekten-Verein

Kunz: Risikoorientierte Last-Konzeption für Schiffsstoß auf Bauwerke

STAT BU: Statistisches Bundesamt. Fachserie 8 "Verkehr", Reihe 4 "Binnenschifffahrt", Erscheinung: jährlich

TAUBERT, Achim: Belastung von Bauwerken durch Schiffsstoß. Aus: Handbuch für Hafengebäude und Umschlagtechnik, 1974, Band 19, S. 188 - 191

VBW e.V. (Herausgeber): Verein für Binnenschifffahrt und Wasserstraßen e.V., Fahrzeiten der Binnenschiffe, Duisburg, Oktober 1985

WAGNER, R.: Schiffsanfahrung an Brückenpfeilern. Vergleich: Modellversuch - Havarie. In: Zeitschrift für Binnenschifffahrt und Wasserstraßen (1988), Nr. 4

WOISIN, G.: Zur Wahrscheinlichkeitsberechnung und Häufigkeitsanalyse von Kollisionsschäden. In: Schiff und Hafen 22 (1970), 5. Heft, S. 471 - 477

WSA KIEL (HOLTENAU): Archivbild "Böschungsanfahrung am Nord-Ostsee-Kanal", 1987

WSA TRIER: Archivunterlagen "Schiffsunfall mit Moselbrücke Thörnich", 1970, unveröffentlicht