
Nachweis bestehender Brücken auf Schiffsanprall

Berichte der Bundesanstalt für
Straßen- und Verkehrswesen
Brücken- und Ingenieurbau Heft B 218

Nachweis bestehender Brücken auf Schiffsanprall

von

Christian Gasser, Vazul Boros

AIT - Austrian Institute of Technology, Wien

Berichte der Bundesanstalt für
Straßen- und Verkehrswesen
Brücken- und Ingenieurbau Heft B 218

Die Bundesanstalt für Straßen- und Verkehrswesen (BASt) veröffentlicht ihre Arbeits- und Forschungsergebnisse in der Schriftenreihe Berichte der Bundesanstalt für Straßen- und Verkehrswesen. Die Reihe besteht aus folgenden Unterreihen:

A - Allgemeines
B - Brücken- und Ingenieurbau
F - Fahrzeugtechnik
M - Mensch und Sicherheit
S - Straßenbau
V - Verkehrstechnik

Es wird darauf hingewiesen, dass die unter dem Namen der Verfasser veröffentlichten Berichte nicht in jedem Fall die Ansicht des Herausgebers wiedergeben.

Nachdruck und photomechanische Wiedergabe, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der BASt, Stabsstelle Presse und Kommunikation.

Die Hefte der Schriftenreihe Berichte der Bundesanstalt für Straßen- und Verkehrswesen können direkt bei der Carl Ed. Schünemann KG bezogen werden. Seit 2015 stehen sie zusätzlich als kostenfreier Download im elektronischen BASt-Archiv ELBA zur Verfügung: <https://bast.opus.hbz-nrw.de>

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt 15.0638
Nachweis bestehender Brücken auf Schiffsanprall

Fachbetreuung:
Iris Vivien Golla

Referat:
Infrastrukturmanagement

Herausgeber:
Bundesanstalt für Straßen- und Verkehrswesen
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach
Telefon: (0 22 04) 43 - 0

Redaktion:
Stabsstelle Presse und Kommunikation

Gestaltungskonzept:
MedienMélange:Kommunikation

Druck, Verlag und Produktsicherheit:
Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG
Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen
Telefon: (04 21) 3 69 03 - 0 | E-Mail: kontakt@schuenemann-verlag.de
www.schuenemann-verlag.de

ISSN 0943-9293 | ISBN 978-3-95606-933-8 | <https://doi.org/10.60850/bericht-b218>

Bergisch Gladbach, April 2026

Kurzfassung – Abstract

Nachweis bestehender Brücken auf Schiffsanprall

Der im deutschen Binnenschiffsverkehr sehr selten vorkommende Anprall von Schiffen auf Brücken ist in dem für die Nachrechnung von Bestandsbrücken anzuwendenden Regelwerk *Richtlinie für die Nachrechnung von Straßenbrücken im Bestand der Bundesfernstraßen* („Nachrechnungsrichtlinie“) bislang nicht berücksichtigt.

Ziel des vorliegenden Forschungsprojekts war es, diese Lücke zu schließen, indem Präzisierungen zur Nachrechnung der Bestandsbrücken auf den Lastfall Schiffsanprall erarbeitet wurden. Diese Präzisierungen stellen kein eigenständiges Nachweiskonzept dar, sondern sind in Verbindung mit den geltenden Vorschriften des Eurocodes inklusive des Nationalen Anhangs anzuwenden.

Das Ziel von Nachrechnungen von Bestandsbauwerken besteht vor allem darin, ein ihrer Bedeutungsklasse angemessenes Zuverlässigkeitsniveau sicherzustellen. Es gilt zu überprüfen, ob Maßnahmen, wie z.B. nachträgliche Verstärkungen oder Schutzvorrichtungen, zu ergreifen sind. Solche Maßnahmen sind hinsichtlich des Lastfalls Schiffsanprall sehr teuer. Es gilt daher, besonders sicherheitsgefährdete Bauwerke zu identifizieren.

Im vorliegenden Forschungsprojekt wurde zunächst eine umfangreiche Literaturrecherche unternommen. Einen Großteil dieser Fachveröffentlichung nehmen daher Erörterungen der unterschiedlichen derzeit in Deutschland geltenden Vorschriften ein. Ebenso wurden die US-amerikanische Schiffsanprall-Norm sowie wissenschaftliche Literatur analysiert.

Dabei wurde festgestellt, dass der Eurocode vergleichsweise hohe Anpralllasten vorschreibt. Für eine Nachweisführung (bei Bestandsbrücken) sind die Vorschriften allerdings teilweise lückenhaft. Wichtige Präzisierungen, vor allem zur Stoßkraft-Abminderung in Abhängigkeit des Abstandes eines Pfeilers von der Fahrrinne finden sich hingegen im deutschen Nationalen Anhang. In dieser Hinsicht besteht also kein Handlungsbedarf. Weitere wichtige Hinweise zur Fluss-Brücke-Topologie, nämlich zur Ermittlung des grundsätzlichen Gefährdungsraums, sind in einer Richtlinie des (vormaligen) Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) geregelt. Im Sinne einer wirtschaftlichen Bauwerkserhaltung besonders sinnvoll ist eine restnutzungsdauerabhängige Abminderung der Stoßkraft. Dieses Verfahren wurde in einem Merkblatt der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) veröffentlicht. Im vorliegenden Forschungsprojekt wurde gezeigt, dass dieses Verfahren wissenschaftlich fundiert und konsistent hergeleitet wurde und seine Anwendung grundsätzlich sinnvoll ist. Daher wird eine Übernahme dieses Verfahrens in die Nachrechnungsrichtlinie und somit seine Anwendung auch im Zuständigkeitsbereich der Bundesanstalt für Straßen- und Verkehrswesen (BASt) empfohlen.

Am Ende der vorliegenden Fachveröffentlichung werden konkrete Textvorschläge zur Fortschreibung der Nachrechnungsrichtlinie dargelegt, wobei auf die Eingliederung des Lastfalls Schiffsanprall in das bestehende vierstufige Verfahren Rücksicht genommen wird. Für Stufe 4 wird eine Formulierung vorgeschlagen, die den Anwendenden einen gewissen Freiraum zur Anwendung wissenschaftlicher Verfahren lässt. Als sinnvoll kann hierbei unter bestimmten Umständen die objektspezifische Ermittlung von Anpralllasten auf probabilistischer Basis angesehen werden.

Verification of existing bridges for vessel impact

The impact of vessels on bridges, which occur very rarely in German inland waterway traffic, has not yet been taken into account in the set of rules to be applied for the recalculation of existing bridges in the *Richtlinie für die Nachrechnung von Straßenbrücken im Bestand der Bundesfernstraßen* ("*Nachrechnungsrichtlinie*").

The aim of this research project was to close this gap by developing more precise specifications for the recalculation of existing bridges for the load case of vessel impact. These clarifications do not represent an independent verification concept but are to be applied in conjunction with the applicable provisions of the Eurocode, including the National Annex.

The aim of recalculations of existing structures is primarily to ensure a level of reliability appropriate to their significance class. It is necessary to check whether measures, such as subsequent reinforcements or protective devices, need to be taken. Such measures are very expensive with regard to vessel impacts. It is therefore important to identify the types of structures and geographical locations that are particularly at risk.

In this research project, an extensive literature search was initially undertaken. A large part of this research report is therefore taken up by discussions of the various regulations currently in force in Germany. The US vessel impact standard and scientific literature were also analysed.

It was found that the Eurocode prescribes comparatively high impact loads. However, the regulations for verification for (existing) bridges are partially incomplete. On the other hand, the German National Annex contains important clarifications, especially regarding the reduction of impact forces depending on the distance of a pier from the shipping lane. There is therefore no need for action in this respect. Further important information on the river-bridge topology, namely the determination of the basically endangered section, is regulated in a guideline issued by the (former) ministry BMVBS. In terms of economical structural maintenance, it is particularly useful to reduce the impact force depending on the remaining lifetime. This procedure was published in an instruction of the *Bundesanstalt für Wasserbau* (BAW). The present research project has shown that this method was derived in a scientifically sound and consistent manner and that its application is fundamentally reasonable. It is therefore recommended that this method be adopted in the "*Nachrechnungsrichtlinie*" and thus also applied in the area of responsibility of the *Bundesanstalt für Straßen- und Verkehrswesen* (BASt).

At the end of this research report, specific text proposals are made for updating the "*Nachrechnungsrichtlinie*", taking into account the integration of the vessel impact load case into the existing four-stage procedure. For stage 4, a formulation is proposed that gives the user a certain amount of freedom to apply scientific procedures. Under certain circumstances, the object-specific determination of impact loads on a probabilistic basis can be considered useful.

Summary

Verification of existing bridges for vessel impact

1. Scope

The impact of ships on bridges, which occurs very rarely in German inland waterway transport, has not yet been taken into account in the 'Guideline for the recalculation of existing road bridges on federal trunk roads' (*Nachrechnungsrichtlinie*), which is used for the recalculation of existing bridges.

The aim was to determine the types of structures and geographical locations that are particularly at risk in terms of safety and to ensure an economical selection of the bridge structures to be recalculated and subsequently reinforced. To this end, the risk analysis considerations in the code of practice "Merkblatt der BAW" (*Bundesanstalt für Wasserbau*) were to be compared with internationally recognised approaches and calculation methods. The aim of the project was to close a gap in the regulations for federal roads by creating a concept for the recalculation of existing bridges with regard to the impact of ships.

The concept was to be formulated as a concrete proposal for updating the *Nachrechnungsrichtlinie*. This should enable the impact of ships on existing bridges to be modelled in such a way that proportionality is maintained and a realistic assessment of the risk is nevertheless ensured.

2. Methodology of investigation

Literature study: survey of the status quo, comparison and evaluation

The existing German regulations for the load case of ship impact were used as a starting point. These are:

- Eurocode with National Annex: (DIN EN 1991-1-7) and (DIN EN 1991-1-7/NA)
- „Richtlinien für die Ermittlung des Gefährdungsraumes an Bundeswasserstraßen, Ausgabe 2010“ (*BMVBS*, 2010)
- and: „BAW Merkblatt: Nachweis bestehender Brücken auf Schiffsanprall“ (MNaBS), Ausgabe von 2010 mit Anpassung 2013“, welches derzeit nur für den Zuständigkeitsbereich der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) gilt.

There was also a detailed discussion of the US-American ship impact standard 'Guide Specifications and Commentary for Vessel Collision Design of Highway Bridges'.

Scientific literature on mechanical and probabilistic aspects of ship collisions was also consulted, in particular:

- Proske, D. (2003). Beitrag zur Risikobeurteilung von alten Brücken unter Schiffsanprall. TU Dresden.
- Kunz, C. (2013). Bewertung von bestehenden Brücken hinsichtlich Schiffsanprall. *Bautechnik*, 90(5), 280–285.
- Kunz, C. (2019). Ermittlung von Schiffsstoß-lasten für die Schutzböschungen vor der Rader Hochbrücke (A7) NOK-km 68,1. BAW.

A comparison was also made with the handling of the earthquake load case for existing buildings, as this raises very similar issues to the ship impact load case. In both cases, these are very rare events - and therefore 'exceptional events' - which can nevertheless have devastating consequences. In both cases, analysing the probability of occurrence and other probabilistic aspects therefore plays a major role. Due to these similarities, a comparison with earthquake engineering makes sense, especially as this is a well-researched sub-field of civil engineering.

A comparison and evaluation of the compiled literature was carried out.

Conclusions and recommendations

In close consultation with BAST, recommendations were developed that are suitable for supplementing the Nachrechnungsrichtlinie. Particular attention was paid to

- Compatibility with existing standards (Eurocode)
- Germany-wide standardisation of the concepts for ship impact
- Creation or retention of verification concepts that are mechanically comprehensible and consistent from a probabilistic point of view.
- Achieving an appropriate (standardised) reliability level for road bridges with regard to ship impact.
- Creation of a concept that is suitable for utilising existing financial and other resources as efficiently as possible.
- Simple handling by the users (usually engineering offices)

3. Results

In der umfangreichen Literaturstudie wurde bezüglich des geltenden Eurocodes (DIN EN 1991-1-7) und des Nationalen Anhangs (DIN EN 1991-1-7/NA) Folgendes festgestellt:

In the extensive literature study, the following was determined with regard to the applicable Eurocode (DIN EN 1991-1-7) and the National Annex (DIN EN 1991-1-7/NA):

- Compared to the US standard, the prescribed impact loads are considerably higher, in general.
- The table values prescribed in the Eurocode are design values derived from complex impact experiments. These values are characteristic for the respective shipping class; they were derived in a mechanically consistent manner and were later confirmed by numerical simulations. The same applies to the equations of the 'advanced impact tests' in (DIN EN 1991-1-7).
- A risk analysis including a probabilistic survey of possible impact scenarios - as is usual in the USA - is only 'hinted at' in the Eurocode. Concrete, directly applicable regulations are missing. However, this should not be seen as a disadvantage or weakness of the Eurocode. The specification of mechanically consistently determined, characteristic loads simplifies the verification process. In Germany in particular, with its more homogeneous fleet structures and clearly defined (narrow) shipping lanes compared to the USA, the simple concept of the Eurocode is preferable.
- The most important instrument for taking into account the specific river-bridge topology in terms of risk, namely the impact force reduction depending on the distance of a pier from the fairway, can already be found in the National Annex. There is therefore no need for action in this respect.
- Information on the appropriate consideration of existing bridges (with reduced remaining service life) is completely missing in (DIN EN 1991-1-7) and in (DIN EN 1991-1-7/NA).

As the Eurocode also lacks specific information on determining the hazard area (in relation to the river cross-section), relevant specifications have been published in a guideline of BMVBS (BMVBS, 2010).

In the „BAW Merkblatt“ - which does not automatically apply to the area of responsibility of the BAST - further important information on the verification of bridges for ship impact was added, especially for existing bridges. In terms of economic structural maintenance, a reduction of the impact force depending on the remaining service life is particularly useful, see Figure 1. This procedure was published in the „BAW Merkblatt“. The present research project has shown that this method has been derived in a scientifically sound and consistent manner and that its application is fundamentally sensible. It is therefore recommended that this method be adopted in the *Nachrechnungsrichtlinie* and thus also applied within the BAST's area of responsibility.

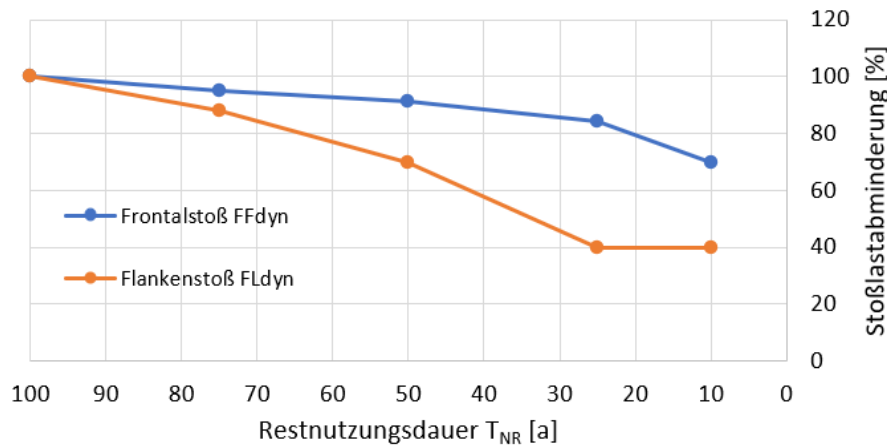


Figure 1: Reduction of the impact force: $F = [\%] * F (TN = 100 \text{ a})$, as a function of the remaining service life, (FF: frontal impact; FL: lateral impact)

In general, it can be stated that the following criteria should be taken into account for an economic and consistent assessment of existing bridges:

- Remaining service life
- exact (measured) resistance values
- the actual (predicted) volume of shipping traffic, if applicable, and probabilistic determination of the impact (probability of exceedance $p = 10^{-4}/\text{year}$)
- River geometry, river-bridge topology
- If necessary, case-by-case assessment of proportionality (fulfilment factor)

4. Conclusions for practice

In the technical publication on this research project, specific text proposals are made for updating the *Nachrechnungsrichtlinie*, taking into account the integration of the ship impact load case into the existing four-stage procedure.

In particular, the adoption of the residual service life-dependent reduction of the impact force, which was published in the “Merkblatt der BAW”, is recommended. The present research project has shown that this procedure was derived in a scientifically sound and consistent manner and that its application is fundamentally sensible.

The instructions for determining the risk area, which can currently be found in a BMVBS guideline, can be included as an introductory, general subsection in the *Nachrechnungsrichtlinie*.

For stage 4, a formulation is proposed that gives the user a certain degree of freedom to apply scientific methods. Under certain circumstances, the object-specific determination of impact loads on a probabilistic basis can be considered useful.

Inhalt

1	Einleitung	11
1.1	Ausgangslage	11
1.2	Ziele und Nutzen	11
2	Der Lastfall Schiffsanprall	12
2.1	Besonderheiten	12
2.2	Geschichtliches	13
2.3	Aufbau des Berichts	14
3	In Deutschland geltende Vorschriften	16
3.1	Eurocode 1991-1-7	16
3.1.1	Allgemeine Vorschriften und Anmerkungen	16
3.1.2	Anprallkräfte	16
3.1.3	Angriffsfläche der Kraft	19
3.1.4	Weitergehende Anpralluntersuchungen (Abschnitt C.4.3)	20
3.1.5	Hinweise zur Risikoanalyse	22
3.2	BAW Merkblatt: Nachweis bestehender Brücken auf Schiffsanprall	23
3.2.1	Vorbemerkungen	23
3.2.2	Ermittlung der Stoßlast	24
3.2.3	Nachweise	25
3.2.4	Materialkennwerte/Sicherheitsbeiwerte	26
3.2.5	Bewertungen	26
3.2.6	Interpretation und Kommentare	27
3.2.7	Das BAW-Merkblatt und die Nachrechnungsrichtlinie	28
3.3	Richtlinien für die Ermittlung des Gefährdungsraumes an Bundeswasserstraßen	29
3.3.1	Inhalt der Richtlinie	30
3.3.2	Interpretation und Kommentare	31
4	Weitere Literatur	32
4.1	AAHSTO: Guide Specifications and Commentary for Vessel Collision Design of Highway Bridges	32

4.1.1	Einleitung	32
4.1.2	Hintergrund	32
4.1.3	Geltungsbereich	33
4.1.4	Entwurfsgrundsätze	34
4.1.5	Nachweisführung	35
4.1.6	Neue Brücken	35
4.1.7	Bestehende Brücken	35
4.1.8	Bedeutungsklassen	36
4.1.9	Das Bemessungsschiff	36
4.1.10	Bemessungswert der Anprallgeschwindigkeit	36
4.1.11	Die drei Nachweismethoden (Method I–III)	36
4.1.12	Schlussbemerkungen	38
4.2	„Beitrag zur Risikobeurteilung von alten Brücken unter Schiffsanprall“	39
4.2.1	Einleitung	39
4.2.2	Statistiken	39
4.2.3	Mechanische Grundlagen (Stoßkraftfunktion)	44
4.2.4	Widerstandseite Brücke	45
4.2.5	Berechnungsverfahren	46
4.2.6	„Akzeptables Risiko“	48
4.2.7	Schlussbemerkungen	51
4.3	„Bewertung von bestehenden Brücken hinsichtlich Schiffsanprall“	53
4.3.1	Einführung	53
4.3.2	Schiffsanprall für außergewöhnliche Einwirkungen	53
4.3.3	Schiffsanprall für bestehende Brücken	58
4.3.4	Schlussbemerkungen	68
4.4	„Ermittlung von Schiffsstoßlasten für die Schutzböschungen vor der Rader Hochbrücke (A7)“	70
4.4.1	Einleitung	70
4.4.2	Wasserstraße und Bauwerk	70
4.4.3	Die Einwirkung Schiffsanprall	72
4.4.4	Zusammenfassung	74
4.4.5	Schlussbemerkungen	74
4.5	Vergleich mit Erdbebeningenieurwesen	75
4.5.1	Einleitung	75
4.5.2	Ermittlung des seismischen Risikos	75
4.5.3	Überprüfung bestehender Gebäude bezüglich Erdbeben (SIA, Schweiz)	77

5	Allgemeine Schlussfolgerungen und Empfehlungen	80
5.1	Erkenntnisse aus der Literaturrecherche	80
5.2	Implementierung in die Nachrechnungsrichtlinie	82
5.2.1	Stufe 1	82
5.2.2	Stufe 2	82
5.2.3	Stufe 3	83
5.2.4	Stufe 4	83
5.2.5	Weitere mögliche Anknüpfungspunkte in der Nachrechnungsrichtlinie	84
6	Konkrete Textvorschläge	86
10.1.6	Lastfall Schiffsanprall	86
10.1.6.1	Allgemeines	86
10.1.6.2	Gefährdungsraum	86
10.1.6.3	Abminderung der Stoßlasten in Abhängigkeit der Restnutzungsdauer	88
10.1.6.4	Stufe 1	89
10.1.6.5	Stufe 2	89
10.1.6.6	Stufe 3	89
10.1.6.7	Stufe 4	89
	Literatur	90
	Bilder	95
	Tabellen	96

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage

Gemäß §4 FStrG hat der Straßenbaulastträger dafür einzustehen, dass Straßen und Bauwerke jederzeit der Sicherheit und Ordnung genügen. Daher hat er rechtzeitig Maßnahmen zur Erhaltung der Standsicherheit, Verkehrssicherheit und Dauerhaftigkeit einzuleiten.

Die im deutschen Binnenschiffsverkehr sehr selten vorkommenden Kollisionen von Schiffen mit Brücken sind in dem für die Nachrechnung von Bestandsbrücken anzuwendenden Regelwerk „Richtlinie für die Nachrechnung von Straßenbrücken im Bestand der Bundesfernstraßen“ (BMVBS, 2011) bislang nicht berücksichtigt.

Die Wasserstraßenverwaltung hat mit dem Erlass WS 13/5257.3/1 vom 31.05.2010 das Merkblatt der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) „Nachweis bestehender Brücken auf Schiffsanprall“ (BAW-Merkblatt, 2010) bekannt gegeben und für ihren Zuständigkeitsbereich eingeführt. Hier werden die im Eurocode (DIN EN 1991-1-7, 2010) benannten allgemeinen Vorgehensweisen für den Schiffsanprall auf Brücken detaillierter ausformuliert.

1.2 Ziele und Nutzen

Mit dem gegenständlichen Vorhaben sollten durch eine Analyse der international bestehenden Verfahren zur Ermittlung der Schiffstoßlasten, Regelungen für den Lastfall Schiffsanprall entwickelt werden, die nachfolgend in der Nachrechnungsrichtlinie (BMVBS, 2011) Berücksichtigung finden können.

Ziel war es, die Ermittlung besonders sicherheitsgefährdeter geographischer Lagen und Bauwerke zu erleichtern und eine wirtschaftliche Auswahl der zu verstärkenden Brücken zu gewährleisten. Hierfür sollten die risikoanalytischen Überlegungen im Merkblatt der BAW mit international gängigen Ansätzen und Berechnungsverfahren verglichen werden. Projektziel war es, mit der Erstellung eines Konzeptes zur Nachrechnung der Bestandsbrücken hinsichtlich des Anpralls von Schiffen eine Lücke im Regelwerk der Bundesfernstraßen zu schließen.

Das Konzept sollte als konkreter Vorschlag für die Fortschreibung der Nachrechnungsrichtlinie formuliert werden. Hierdurch sollte der Anprall von Schiffen an Bestandsbrücken so abgebildet werden können, dass die Verhältnismäßigkeit gewahrt bleibt und trotzdem eine realistische Abschätzung der Gefährdung sichergestellt ist.

2 Der Lastfall Schiffsanprall

2.1 Besonderheiten

Der Schiffsanprall ist ein sehr komplizierter Lastfall. Die Gründe dafür sind:

Dynamik. Es handelt sich nicht um einen statischen, sondern um einen dynamischen Lastfall. Die Bestimmung der einwirkenden Energie ist noch sehr einfach, denn diese entspricht bei einem Frontalstoß einfach der kinetischen Energie des Schiffs: $E = \frac{1}{2}mv^2$. Viel schwieriger ist jedoch die Ermittlung der Anprallkraft bzw. einer äquivalenten statischen Kraft. Die Anprallkraft wirkt nämlich dynamisch auf das Anprallobjekt (die Brücke) ein. Das heißt, der Verlauf der Kraft ist eine Funktion der Zeit. Der genaue Verlauf und vor allem das Maximum dieser Kraft sind äußerst individuell und hängen insbesondere von der Geometrie und von der Steifigkeits- und Massenverteilung des Schiffsrumpfs ab. Gleichwohl ist wohl auch das Maximum der Anprallkraft allein wenig aussagekräftig. Ein Kraftmaximum, das nur eine Zehntelsekunde einwirkt, wird für einen massiven Pfeiler kaum schädigungswirksam sein. Ein – wie auch immer definierter – Mittelwert des Kraftverlaufs wäre wohl aussagekräftiger. Auch die Lage und die Größe der Fläche, auf die die Anprallkraft einwirkt, ist von großer Bedeutung. Bei nicht frontalen Anprallen spielen Anprallwinkel und Rauigkeit des Brückenpfeilers (Reibung) eine Rolle.

Probabilistik. Der Schiffsanprall ist ein sehr seltener Lastfall. Die meisten Brücken werden während ihrer Nutzungszeit keinen nennenswerten Schiffsanprall erleben, jedenfalls keinen solcher Intensität, dass dieser den maßgebenden Lastfall darstellen würde. Aufgrund seiner Seltenheit ist die Abschätzung von Auftretenswahrscheinlichkeiten sowie weiterer wichtiger Parameter rund um den Lastfall Schiffsanprall sehr schwierig. Es stehen nämlich zu wenige in der Vergangenheit beobachtete Ereignisse zur Verfügung, um spezifische Aussagen zu einzelnen Brücken oder auch Schifffahrtsstraßen zu treffen; die Datengrundlage ist für empirische Methoden der Gefahrenabschätzung meist sehr dürftig.

Oft werden analytische Methoden herangezogen, um den Einfluss bestimmter Gegebenheiten abzuschätzen. Diese bauen meist auf empirischen Grundüberlegungen auf. Beispielsweise kann man für einen großen Fluss oder ein ganzes Land oft tatsächlich eine einigermaßen fundierte empirische Aussage zur Auftretenswahrscheinlichkeit von Schiffsanprallen treffen, da es in der Vergangenheit eine repräsentative Anzahl an Ereignissen gab. Die Aussage kann dann für bestimmte Flussabschnitte oder Brücken verfeinert werden, indem Anpassungsfaktoren angewendet werden, um konkrete und lokale Besonderheiten zu berücksichtigen (v.a. die Flussgeometrie in Kombination mit dem Lichtraumprofil der Brücke). Zu bedenken ist aber, dass die meisten Schiffsanpralle letztendlich auf menschliche Fehler zurückzuführen sind, d.h., dass die Abschätzung von Eintrittswahrscheinlichkeiten immer problematisch ist.

Bauwerksverhalten. Abseits der Schwierigkeit, die Auftretenswahrscheinlichkeit und die Intensität der Einwirkung adäquat abzuschätzen, stellt sich die Frage nach der Widerstandsseite. Auch in dieser Hinsicht stellt die Untersuchung eines Schiffsanpralls auf eine Brücke kein leichtes Unterfangen dar. Insbesondere gilt zu bedenken, dass ein maßgebendes Anprallereignis in der Regel auch bei der Brücke plastisches Verhalten hervorrufen

wird. Weitere Schwierigkeiten ergeben sich bei der Frage, welche Lastsituationen untersucht und welche Nachweise im Einzelnen geführt werden müssen.

2.2 Geschichtliches

Schiffsanpralle auf Brücken, insbesondere auf deren Pfeiler, sind in der Geschichte immer wieder vorgekommen. Die Untersuchung der dabei entstehenden Kräfte sowie spezielle Normungsvorschriften zum Schiffsanprall gibt es allerdings erst seit einigen Jahrzehnten. Minorsky hat 1959 erste theoretische Untersuchungen zu Schiffskollisionen durchgeführt (Minorsky, 1959), wobei die Kollision zweier Schiffe miteinander im Zentrum der Untersuchung stand. Aufwändige Experimente zum Anprall von Schiffsrümpfen auf sehr steife Objekte wurden 1976 von Gehard Woisin durchgeführt (Woisin, 1976).

Beim Lastfall Schiffsanprall sind mehrere Parameter von Bedeutung. Die größte Bedeutung hat aber die auf das Bauwerk einwirkende Kraft. Die Ergebnisse von Woisins Anprallversuche veranlassten Holger Svensson eine einfache, allgemeine Gleichung zur Bestimmung der äquivalenten statischen Anprallkraft abzuleiten (Saul & Svensson, 1981):

$$P = 0,88 \sqrt{DWT} \pm 50\% \quad . \quad (2.1)$$

Dabei steht DWT für *deadweight tonnage* und bezeichnet die Gesamt-Tragkraft eines Schiffs. Es umfasst das Gewicht der Ladung sowie das Gewicht aller notwendigen Ausrüstungen, Treibstoffe, Wasser und anderer Verbrauchsmaterialien, die für die Fahrt des Schiffes benötigt werden. Die (relativ große) Streubreite von 50% ist darauf zurückzuführen, dass die tatsächliche Anprallkraft zum einen von der Geschwindigkeit des Schiffs und zum zweiten von der Bauart des Rumpfes abhängt.

Insbesondere die Geschwindigkeit des Schiffs wurde bei späteren Schätzformeln als zusätzlicher Parameter aufgenommen. So wird etwa in der amerikanischen Norm (AASHTO, 2009) die äquivalente statischen Anprallkraft eines (See-)Schiffs wie folgt berechnet:

$$P = 0,122 \sqrt{DWT} \cdot v \quad . \quad (2.2)$$

Die Gleichung wurde hier in SI-Einheiten angegeben. Somit ist die Geschwindigkeit v in m/s einzugeben und die Kraft P resultiert in MN.

Im Jahr 1980 kollidierte ein Frachtschiff während eines Sturms mit einem Brückenpfeiler der *Sunshine Skyway Bridge* in Florida. Dabei stürzten 366 Meter der Brücke ins Meer und 35 Personen kamen ums Leben. Dieses Unglück war der Ausgangspunkt einer intensiveren wissenschaftlichen Auseinandersetzung mit dem Thema Schiffsanprall in den USA, die 1991 schließlich zum bereits erwähnten *Guide Specification and Commentary for Vessel Collision Design of Highway Bridges* (AASHTO, 1991) führte. Im Jahr 2009 folgte die 2. Ausgabe dieser Norm (AASHTO, 2009); mittlerweile wurden die Vorschriften zum Schiffsanprall in die allgemeine Brückenbaunorm *AASHTO-LRFD Bridge Design Specifications* (AASHTO, 2010) eingegliedert. Die amerikanischen Vorschriften schreiben vor, dass der Schiffsanprall im Allgemeinen mittels aufwendiger probabilistischer Methoden berücksichtigt wird. Je nach vorhandenem Schiffsverkehr ist ein „Bemessungsschiff“ zu bestimmen sowie eine Reihe an möglichen Fahrwegen, falls das Schiff vom Kurs abkommt. Schließlich soll die Versagenswahrscheinlichkeit der untersuchten Brücke abgeschätzt werden. Der Nachweis für die aktuelle Situation bzw. den untersuchten Entwurf kann nur erbracht werden, wenn ein angemessenes Risikoniveau eingehalten wird.

In Deutschland war der Schiffsanprall auf Brückenpfeiler über lange Zeit normativ nicht einheitlich und übergreifend geregelt (Grob & Hajdin, 1995) (Kunz, 2006b). Nach früheren Ausgaben der DIN 1072, zuletzt Ausgabe von 1985 (*DIN 1072*, 1985), sollten die Angaben von der zuständigen Behörde erfragt werden. Lediglich für die Wasserstraße Rhein gab es einen Erlass des Bundesverkehrsministeriums von 1974 (*BMV*, 1974), der Schiffsstoßlasten regelte; diese Regelungen fanden ihren Niederschlag in der Dienstvorschrift DS 804 der Bahn für die Anwendung auf Rheinbrücken (*DS 804*, 1982). Mit DIN 1055-9, Einwirkungen auf Bauwerke, Außergewöhnliche Einwirkungen (*DIN 1055-9*, 2003), bzw. nunmehr DIN EN 1991-1-7 (*DIN EN 1991-1-7*, 2010), wurden erstmals Lastannahmen und Vorgehensweisen für den Schiffsanprall auf Brücken allgemeingültiger geregelt.

Während die Festlegung der Bemessungs- bzw. Nennwerte für andere außergewöhnliche Einwirkungen in (*DIN 1055-9*, 2003) in Anlehnung an (*DIN 1055-100*, 2001), Anhang B, überwiegend „historisch“ und „empirisch“ erfolgte, d.h. frühere Regelungen beibehalten oder Regelungen aus (*DIN V ENV 1991-2-7*, 2000) übernommen wurden, entstammen die Bemessungswerte für Schiffsanprall aus einer Modellbildung unter Anwendung probabilistischer Methoden. Dies erfolgte vielleicht auch deshalb so, weil bisher keine einheitlichen Werte vorlagen und Risikobetrachtungen im Schiffsverkehr langjährige Tradition haben (Kunz, 2006b).

In der heutigen Zeit tritt immer mehr die Frage in den Vordergrund, wie mit bestehenden Brücken umgegangen werden soll – insbesondere mit solchen, die nach heute überholten Normen bemessen worden sind. Der Wunsch nach Erhalt der vorhandenen Bausubstanz, ohne massive Eingriffe, ist groß. Gute Gründe der Wirtschaftlichkeit, des Klimaschutzes und des Denkmalschutzes sprechen dafür. Solche Überlegungen werden etwa in den USA standardmäßig angestellt und führen oft zu einer Risikoanalyse. Gerade bei großen Brücken, die von Seeschiffen befahrene Wasserstraßen queren, wird oft die (kleine) Wahrscheinlichkeit eines Anpralls berechnet und gegen die (großen) Kosten von Gegenmaßnahmen abgewogen.

2.3 Aufbau des Berichts

Dieser Bericht ist so aufgebaut, dass zuerst die in Deutschland geltenden Normen analysiert werden (Abschnitt 3). Dies ist zum einen das einschlägige Eurocode-Dokument samt Nationalem Anhang (Unterabschnitt 3.1). Zum anderen hat die Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) ein Merkblatt zum Nachweis bestehender Brücken auf Schiffsanprall herausgegeben, das im Zuständigkeitsbereich der BAW angewendet wird (Unterabschnitt 3.2). Ergänzende Hinweise zum Gefährdungsraum, bezogen auf den Flussquerschnitt, findet man in einer Richtlinie des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung BMVBS (Unterabschnitt 3.3).

Im Abschnitt 4 werden weitere wichtige Literaturquellen wiedergegeben bzw. erörtert: Die US-amerikanische Normung zum Schiffsanprall (Unterabschnitt 4.1), die Dissertation von Dirk Proske zum Thema Schiffsanprall (Unterabschnitt 4.2); in Unterabschnitt 4.3 erfolgt eine detaillierte Darstellung des Fachaufsatzes zur Abminderung der Stoßlast in Abhängigkeit der Restnutzungsdauer von Brücken. Dieser Fachaufsatz, welcher die Hintergründe des in Unterabschnitt 3.2 vorgestellten BAW-Merkblatts beschreibt, wird genau analysiert und zentrale Elemente davon werden in die Empfehlungen zur Fortschreibung der Nachrechnungsrichtlinie aufgenommen.

Ein Gutachten der BAW zur standortspezifischen probabilistischen Ermittlung der Stoßlasten von (See-)Schiffen bei einer Brücke über den Nord-Ostsee-Kanal wird in Unterabschnitt 4.4 vorgestellt. In Unterabschnitt 4.5 wird die Handhabung des Lastfalls Erdbeben bei bestehenden Gebäuden dargestellt, da dabei sehr ähnliche Fragestellungen wie beim Lastfall Schiffsanprall aufkommen.

Zweckmäßigerweise wird nicht nur Literatur (bzw. Auszüge daraus) wiedergegeben, sondern sie wird auch gleichzeitig kommentiert, durch aktuelle Hinweise und Verweise ergänzt und es wird dargelegt, inwiefern die Literatur für das vorliegende Projekt relevant ist.

Im Abschnitt 5 werden die Erkenntnisse aus der umfangreichen Literaturrecherche zusammengefasst und im Abschnitt 6 werden konkrete Textvorschläge zur Fortschreibung der Nachrechnungsrichtlinie gebracht.

3 In Deutschland geltende Vorschriften

3.1 Eurocode 1991-1-7

In diesem Abschnitt werden sämtliche Passagen des Eurocode 1 - Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-7: Allgemeine Einwirkungen - Außergewöhnliche Einwirkungen (*DIN EN 1991-1-7*, 2010) sowie des zugehörigen Nationalen Anhangs (*DIN EN 1991-1-7/NA*, 2019) wiedergegeben, die für den Lastfall Schiffsanprall (auf Binnenwasserstraßen) von Bedeutung sind. Die Reihenfolge orientiert sich nach inhaltlich-logischen Gesichtspunkten.

3.1.1 Allgemeine Vorschriften und Anmerkungen

Die außergewöhnlichen Einwirkungen aus Schiffskollisionen sind unter Berücksichtigung u.a. folgender Punkte zu bestimmen:

- Typ der Wasserstraße;
- Wasserstands- und Fließbedingungen;
- Schiffstiefgänge, Schiffstypen und deren Anprallverhalten;
- Tragwerkstyp und dessen Energiedissipationsverhalten.

Die Schiffstypen auf Binnengewässern sollten für Schiffsanprall nach dem CEMT-Klassifizierungssystem klassifiziert werden; dieses ist in Tabelle C.3 in (*DIN EN 1991-1-7*, 2010) wiedergegeben.

Schiffsanpralle auf massive Bauwerke auf Binnenwasserstraßen sind in der Regel als Stoß anzusehen, bei dem die kinetische Energie durch elastische oder plastische Verformungen des Schiffes selbst dissipiert wird.

Zwar wird dies im Eurocode nicht explizit erwähnt, aber es geht klar hervor, dass ein Schiffsanprall „mit voller Kraft“ nur auf einen Brückenpfeiler erfolgen kann. Damit ist gemeint, dass die nachfolgenden Gleichungen und Tabellen zur Bestimmung der auf die Brücke einwirkenden Kräfte nur auf Pfeiler anzusetzen sind. Für einen Anprall auf den Brückenüberbau werden nämlich eigene, sehr allgemein gehaltene Anprallkräfte vorgeschrieben. Diese Kräfte sind wesentlich geringer als Anprallkräfte an die Pfeiler; es wird wohl davon ausgegangen, dass der Brückenüberbau vom Schiffsrumpf auch bei hohem Wasserstand nicht getroffen werden könne. Ein Anprall auf den Brückenüberbau erfolge allenfalls nur durch „weiche“ Aufbauten, das Deckhaus, Maste oder Kräne.

3.1.2 Anprallkräfte

Wie bereits in Abschnitt 2.1 dargelegt wurde, ist die Bestimmung von Anprallkräften sehr schwierig, da diese (im Gegensatz zur kinetischen Energie) nicht nur von der Masse und Geschwindigkeit des Schiffes abhängen, sondern zudem vom Verformungsverhalten des Schiffsrumpfes. Die Durchführung einer „schiffsdynamischen“ Berechnung, also einer Crashsimulation, wobei der Schiffsrumpf mit Finiten-Elementen abgebildet wird, ist in der Praxis kaum praktikabel.

Wird keine schiffsdynamische Berechnung durchgeführt, liefert Tabelle C.3 in (DIN EN 1991-1-7, 2010) Anhaltswerte für diese dynamischen Kräfte aus Schiffsanprall in Abhängigkeit von der CEMT-Klasse. Für die weitverbreitete CEMT-Klasse V wird für den Frontalstoß eine Kraft von 10.000 kN vorgegeben. Es sei darauf hingewiesen, dass die dort angegebenen die Kräfte F_{dx} und F_{dy} bereits die Wirkung der hydrodynamischen Masse enthalten. Unter dem Begriff „hydrodynamische Masse“ wird die Masse des Wassers verstanden, das das Schiff umgibt und mit ihm mitbewegt wird.

Der Schiffstoß sollte durch zwei nicht gleichzeitig wirkende Kräfte bestimmt werden, siehe Bild 1:

- eine frontal wirkende Kraft F_{dx} (in Fahrrichtung, gewöhnlich quer zur Längsachse der Brücke)
- eine lateral wirkende Kraft mit der Komponente F_{dy} senkrecht zu F_{dx} und der Reibungskomponente F_R in Richtung von F_{dx} .

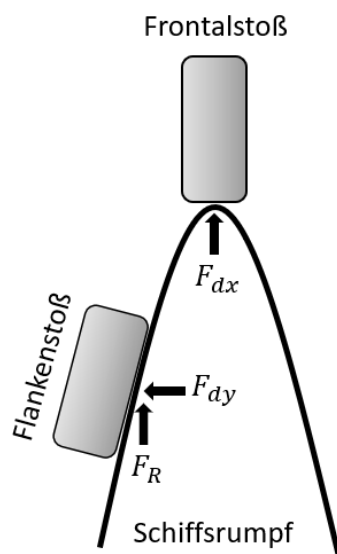


Bild 1: Unterschiedliche Kontaktsituationen beim Schiffsanprall

Die Reibungskraft F_R , die gleichzeitig mit der Anprallkraft F_{dy} wirkt, sollte folgendermaßen bestimmt werden:

$$F_R = \mu F_{dy} \quad . \quad (3.1)$$

Dabei ist

μ der Reibungsbeiwert. Der empfohlene Wert ist $\mu = 0,4$.

Die Autoren der vorliegenden Fachveröffentlichung merken zur Tabelle C.3 in (*DIN EN 1991-1-7*, 2010) zwei wesentliche Aspekte an:

- Die Anhaltswerte für die Kräfte sind in Abhängigkeit der CEMT-Klasse zu bestimmen, also im weiteren Sinn in Abhängigkeit von der Gesamtmasse des Schiffs. Tatsächlich ist die auf eine Brücke einwirkende dynamische Kraft auch stark von der Fahrgeschwindigkeit bzw. der Anprallgeschwindigkeit abhängig, die in Tabelle C.3 in (*DIN EN 1991-1-7*, 2010) allerdings nicht als Einflussparameter aufgenommen wurde. Es gibt auch keine Angabe darüber, welche Fahrgeschwindigkeit(en) den Anhaltswerten für die Kräfte zugrunde liegen. Der Nationale Anhang bemerkt zu den Kräften in Tabelle C.3 in (*DIN EN 1991-1-7*, 2010) Folgendes: „Die dynamischen Stoßkraft-Werte sind probabilistisch hinterlegt und berücksichtigen typische Situationen in deutschen Wasserstraßen und gelten für feste und bewegliche Brücken.“ Claus Kunz gibt in einem Brief der BAW vom März 2006 (Kunz, 2006a) weitere Hintergrundinformationen. Demnach entstammten die Tabellenwerte im Eurocode bzw. die identischen Werte in DIN 1055-9, Tabelle 6, einer Vielzahl von Einzelbegutachtungen der BAW für den Schiffsstoß auf Brückenbauwerke an verschiedenen deutschen Wasserstraßen und repräsentieren die Mehrzahl neuerer Brückenbauten. Die Anpralllasten wurden probabilistisch ermittelt, d.h., dass vorherrschende Verteilungen für Fahrlinie, Schiffsgröße, Geschwindigkeiten und andere Faktoren berücksichtigt wurden. Die angegebenen Werte nur für Bereiche, die keine Unfallschwerpunkte sind.
- Es wird darauf hingewiesen, dass die in Tabelle C.3 in (*DIN EN 1991-1-7*, 2010) angegebenen Kräfte für Schiffsanpralle auf *Binnenwasserstraßen* gelten. Für Schiffsanpralle auf *Seewasserstraßen* - die in diesem Bericht nicht explizit behandelt werden - gibt es in (*DIN EN 1991-1-7*, 2010) eine separate Tabelle (Tabelle C.4.2 im Eurocode). Auffallend ist, dass entsprechende Anhaltswerte für Anprallkräfte für Seewasserstraßen um ein Vielfaches größer sind als für Binnenwasserstraßen. Dies ist wohl darauf zurückzuführen, dass Seeschiffe viel steifer und robuster sind als Binnenschiffe und deshalb bei gleicher kinetischer Energie wesentlich größere Anprallkräfte bewirken. Die Tabelle für die Seewasserstraßen enthält im Gegensatz zu jener für die Binnenwasserstraßen eine Angabe einer zugrundeliegenden Geschwindigkeit von 5,0 m/s.

Dynamischer Vergrößerungsfaktor

Der Eurocode empfiehlt, bei Fehlen dynamischer Berechnungen *für das getroffene Bauwerk*, die dynamischen Anhaltswerte in Tabelle C.3 mit einem geeigneten dynamischen Vergrößerungsfaktor zu versehen. Die Werte in Tabelle C.3 würden nämlich „die dynamische Wirkung des Anprallobjekts, aber nicht die des Tragwerks“ enthalten. Als Anhaltswert für den dynamischen Vergrößerungsfaktor wird 1,3 für den Frontalstoß und 1,7 für den Flankenstoß empfohlen.

Reduktionsfaktoren

Der Eurocode legt fest, dass im Hafengebiet die Kräfte in Tabelle C.3 mit dem Faktor 0,5 reduziert werden dürfen.

Der Nationale Anhang enthält außerdem einen Reduktionsbeiwert für die Stoßlast-Werte nach Tabelle C.3 in (*DIN EN 1991-1-7*, 2010) zur Berücksichtigung des Abstandes Fahrinnenrand zu Pfeiler, siehe Bild NA.6 in (*DIN EN 1991-1-7/NA*, 2019)

Zudem beschreibt der Nationale Anhang, dass bei Brücken über Binnengewässern für Pfeiler und Widerlager, die grundsätzlich durch Schiffsanprall betroffen sein können, unter bestimmten geometrischen Randbedingungen reduzierte Bemessungsansätze zulässig sind: Abhängig davon, ob das Bauteil in Ufernähe (z. B. an einer Böschung oder an einer Ufermauer) oder weiter im Bereich der Vorländer liegt, und abhängig vom maßgebenden Abstand zur relevanten Wasserlinie bzw. zur Uferkante, dürfen die in der Norm angegebenen Anprallkräfte aus der Tabelle C.3 mit abgestuften Reduktionsfaktoren angesetzt werden.

Berücksichtigung der Versagensfolgen

Laut Eurocode dürfen die in Tabelle C.3 angegebenen dynamischen Anhaltswerte abhängig von den Versagensfolgen eines Schiffsanpralls angepasst werden. Es wird empfohlen, diese dynamischen Werte bei hohen Versagensfolgen zu vergrößern und bei niedrigen zu reduzieren.

Laut Nationalem Anhang ist allerdings eine Vergrößerung der dynamischen Anprallkräfte bei hohen zu erwartenden Versagensfolgen nicht vorzunehmen.

In Bezug auf die Schadensfolgen gilt es zu bedenken, dass es in Bezug auf den Lastfall Schiffsanprall auf deutschen Wasserstraßen auf Brücken des Bundesfernstraßennetzes keine allzu großen Unterschiede geben wird. Die Schadensfolgen bei einem Einsturz sind stets hoch. Es ist stets mit dem Verlust von Menschenleben und erheblichen Einschränkungen der Streckenverfügbarkeit zu rechnen. Im Vergleich dazu ist eine Unterscheidung der Schadensfolgen etwa beim Lastfall Erdbeben angemessen. Ein Schadensereignis kann sowohl ein Krankenhaus als auch ein Getreidelager treffen, die Schadensfolgen sind aber sehr unterschiedlich.

Brückenüberbau

Hinsichtlich des Anpralls an den Brückenüberbau gelten gänzlich andere Überlegungen, da der Brückenüberbau praktisch nur den Aufbauten der Schiffe getroffen werden kann – und nicht vom Rumpf. Der Eurocode empfiehlt eine äquivalenten statischen Kraft anzusetzen, wobei der Anhaltswert 1 MN ist.

Manfred Curbach schlug vor, bei Bedarf konstruktive Schutzmaßnahmen für den Überbau vorzusehen, siehe (Curbach, 1996). In Frage kommen hierbei z.B. auf die Brückenpfeiler aufgesetzte Betonscheiben, die erst bei hohen horizontal wirkenden Lasten aktiv werden.

3.1.3 Angriffsfläche der Kraft

Der Eurocode legt fest, dass die Anpralllasten abhängig vom Tiefgang des beladenen oder leeren Schiffs in einer bestimmten Höhe über dem höchsten schiffbaren Wasserstand angesetzt werden sollten. Die Angriffshöhe und die Angriffsfläche $b \times h$ der Anprallkraft sollten festgelegt werden. [...] Liegen keine genaueren Angaben vor, dürfe die Kraft in Höhe von 1,50 m über dem maßgebenden Wasserstand angesetzt werden. Die Anprallfläche $b \times h$ dürfen mit $b = b_{Pfeiler}$ und $h = 0,5$ m für Frontalstoß und mit $b = 1,0$ m und $h = 0,5$ m für den Seitenstoß angenommen werden.

Der Nationale Anhang definiert den maßgebenden Wasserstand in der Regel als den höchsten Schifffahrtswasserstand.

Der Nationale Anhang legt fest, dass Stoßlasten für Flanken- und Reibungsstoß jeweils als horizontale, wandernde Einzellasten zu berücksichtigen sind.

3.1.4 Weitergehende Anpralluntersuchungen (Abschnitt C.4.3)

Im Unterschied zur amerikanischen Norm (AASHTO, 2009), siehe Abschnitt 4.1, liefert der Eurocode (DIN EN 1991-1-7, 2010) keine Hinweise, in welchen Fällen „weitergehende Anpralluntersuchungen für Schiffe auf Binnenwasserstraßen“ erfolgen sollen bzw. ob diese allgemein weniger konservativere Ergebnisse liefern. Dennoch werden im Abschnitt C.4.3 von (DIN EN 1991-1-7, 2010) Gleichungen zur Berechnung der dynamischen Anprallkraft angegeben, die alternativ zu den Werten in Tabelle C.3 in (DIN EN 1991-1-7, 2010) verwendet werden können. Die Gleichungen sind aus der kinetischen Energie des Schiffs abgeleitet, d.h. es ist auch die Berücksichtigung einer spezifischen Anprallgeschwindigkeit möglich. Hierbei wird eine Bemessungsgeschwindigkeit von 3 m/s, vergrößert um die Strömungsgeschwindigkeit, vorgeschlagen. Für die Masse wird die Verwendung des Mittelwertes der Masse für die maßgebende Schiffsklasse nach Tabelle C.3 empfohlen.

Bei elastischen Verformungen (bei $E_{def} \leq 0,21$ MNm) darf die dynamische Anprallkraft mit Gleichung (3.1) berechnet werden:

$$F_{dyn,el} = 10,95 \cdot \sqrt{E_{def}} \quad \text{in MN.} \quad (3.1)$$

Bei plastischen Verformungen (bei $E_{def} > 0,21$ MNm) darf die dynamische Anprallkraft mit Gleichung (3.2) berechnet werden:

$$F_{dyn,pl} = 5,0 \cdot \sqrt{1 + 0,128 \cdot E_{def}} \quad \text{in MN.} \quad (3.2)$$

Die Verformungsenergie E_{def} [MNm] entspricht beim Frontalstoß der am Anprallort verfügbaren kinetischen Energie

$$E_{kin} = \frac{M_{eff}}{2} v^2 = \frac{c \cdot M}{2} \cdot v^2 \quad , \quad (3.3)$$

während im Fall von Flankenstoß mit einem Winkel $\alpha < 45^\circ$ ein Anprall mit Gleitreibung angenommen werden und die Verformungsenergie mit

$$E_{def} = E_{kin}(1 - \cos \alpha) \quad (3.4)$$

angesetzt werden darf.

Der Faktor für die hydrodynamische Masse c sollte für den Frontalstoß zu 1,1 und für den Flankenstoß zu 1,4 gewählt werden.

Bild 2 zeigt die gemäß den Gleichungen (3.1) bis (3.3) berechnete dynamische Anprallkraft als Funktion der Masse und der (Aufprall-)Geschwindigkeit. Bei $F_{dyn} = 5$ MN ist ein Knick zu erkennen, der den Übergang zwischen elastischem zum plastischen Bereich anzeigt. Das oben angegebene Energie-Kriterium für den elastischen Stoß von $E_{def} \leq 0,21$ MNm kann ebenso auf die Kraft bezogen werden. Demnach gilt beim elastischen Stoß $F_{dyn} < 5$ MN. Die Äquivalenz beider Kriterien ist leicht zu erkennen, wenn man das Kriterium $E_{def} = 0,21$ MNm in Gleichung 3.1 einsetzt:

$$F_{dyn,el} = 10,95 \cdot \sqrt{0,21} = 5,0 \quad \text{in MN.} \quad (3.5)$$

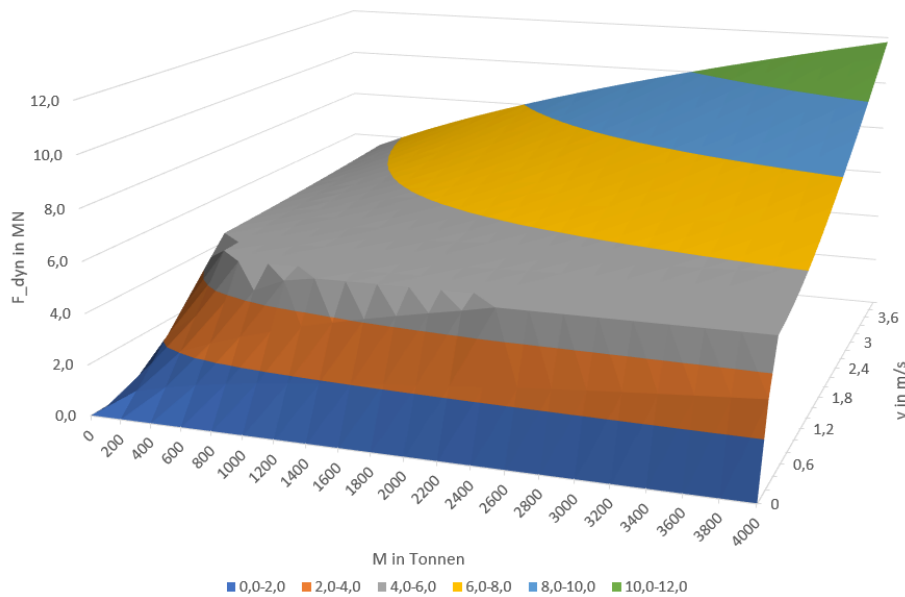


Bild 2: Dynamische Anprallkraft gemäß den Gleichungen in den „Weitergehenden Anpralluntersuchungen für Schiffe auf Binnenwasserstraßen“ in (DIN EN 1991-1-7, 2010). Für $F_{dyn} < 5$ MN wird ein elastischer Stoß und für $F_{dyn} > 5$ MN ein plastischer Stoß angenommen. Für die beiden Stoßarten gibt es jeweils eine eigene Gleichung zur Abschätzung der Anprallkraft.

Aufschlussreich ist der Vergleich der Anhaltswerte für die dynamischen Kräfte aus frontalem Schiffsanprall gemäß Tabelle C.3 in (DIN EN 1991-1-7, 2010) mit in den Gleichungen 3.1 bis 3.3 berechneten dynamischen Anprallkräften. Dieser Vergleich ist in Bild 3 dargestellt. Zur Erstellung des Diagramms wurden folgende Annahmen getroffen: Bei den „Tabellenwerten“ sind die Schiffsmassen in Bandbreiten pro Klasse angegeben. Es wurde jeweils der Mittelwert herangezogen. Bei den Werten gemäß den Gleichungen wurde die Geschwindigkeit gemäß der Empfehlung im Eurocode zu 3 m/s und der Faktor für die hydrodynamische Masse zu 1,1 gewählt.

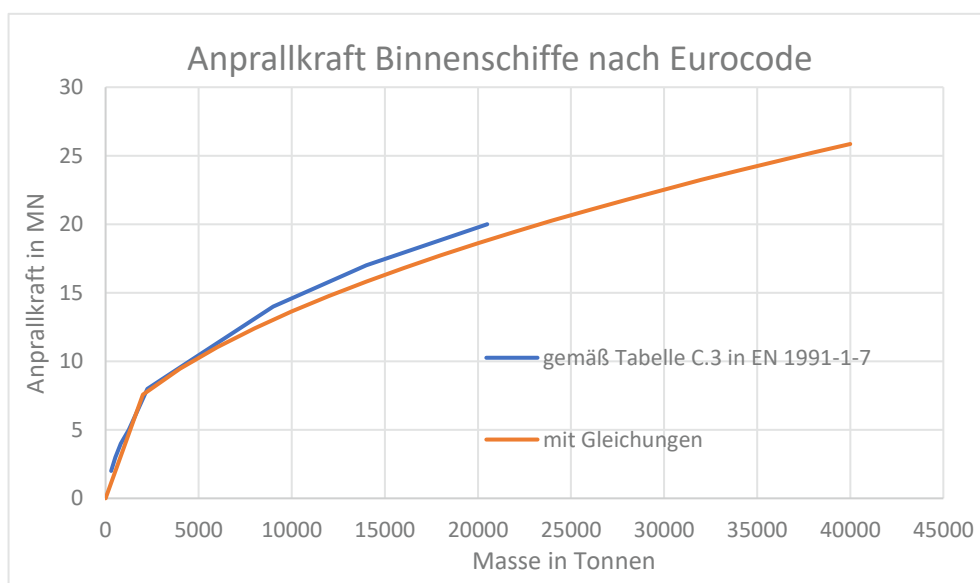


Bild 3: Dynamische Anprallkräfte für Binnenwasserstraßen gemäß (DIN EN 1991-1-7, 2010): Vergleich der Tabellenwerte mit den Werten gemäß den Gleichungen der „weitergehenden Anpralluntersuchungen“

Es ist erkennbar, dass die Anprallkräfte aus der Tabelle fast identisch sind mit jenen, die aus den Gleichungen folgen. Mithilfe der Gleichungen können dennoch genauere Berechnungen durchgeführt werden, da Anprallgeschwindigkeit, Masse des Schiffs und der Faktor für die hydrodynamische Masse frei gewählt werden können. Somit kann auch eine tatsächlich vorhandene Flotte an Schiffen und Fahrgeschwindigkeiten herangezogen werden, vgl. Abschnitt 4.4, in welchem eine probabilistische Ermittlung der einwirkenden Kräfte auf Basis der verkehrenden (See-)Schiffe gezeigt wird. In diesem Sinn erlauben die Gleichungen eine genauere und aktuellere Ermittlung der Anprallkraft.

Für den Fall, dass eine **dynamische Bauwerksanalyse** durchgeführt wird, können dem Eurocode zwei Zeitverläufe für die Anprallkräfte entnommen werden: Ein halbsinusförmiger Zeitverlauf für den elastischen Stoß (bei $F_{dyn} < 5 \text{ MN}$) und ein trapezförmigem Zeitverlauf für den plastischen Stoß (bei $F_{dyn} > 5 \text{ MN}$). Es werden Vorgaben für die Belastungsdauer und andere Details angegeben, sodass ein genaues Kraft-Zeit-Diagramm ermittelt werden kann.

Der Nationale Anhang spezifiziert in Bezug auf die „Weitergehenden Anpralluntersuchungen“ nach Abschnitt C.4.3, dass „die in Tabelle C.3 angegebenen Massen informativen Charakter haben. Sofern für das Projekt nicht näher spezifiziert, darf der Wert eines Drittels zwischen dem unteren und oberen Wert der angegebenen Bandbreite für Ermittlungen der Stoßkraft-Zeitfunktion nach Abschnitt C.4.3 angenommen werden.“

Hinsichtlich der Schiffsanprall-Geschwindigkeiten empfiehlt der Nationale Anhang die in Tabelle NA.7 angegebenen Werte.

Die Berechnung der Anprallkräfte nach den Gleichungen (3.1) bis (3.4) wurde auch in die *ISO 10252 Bases for design of structures – Actions (ISO 10252, 2020)* übernommen. Bemerkenswert ist, dass (*ISO 10252, 2020*) sehr niedrige Mittelwerte für die Aufprallgeschwindigkeiten von Binnenschiffen vorgibt: 1,5 m/s für beladene Schiffe und 2,0 m/s für unbeladene Schiffe. Im Hafenbereich können die Werte auf 1,0 m/s und 1,5 m/s reduziert werden.

3.1.5 Hinweise zur Risikoanalyse

Der (informative) Anhang B von (*DIN EN 1991-1-7, 2010*) enthält Hinweise zur Risikoanalyse, darunter auch einige Hinweise zur Anwendung auf den Schiffsanprall.

Beispielsweise wird eine allgemeine Gleichung zur Berechnung der Versagenswahrscheinlichkeit P_f angegeben:

$$P_f(T) = N \int P\{F_{dyn}(x) > R\} dx \quad . \quad (3.6)$$

Dabei ist

$N = n\lambda T(1 - p_a)$ die Gesamtanzahl von Ereignissen im Bezugszeitraum;

n die Anzahl der Schiffe in der Zeiteinheit (Verkehrsdichte);

λ die Wahrscheinlichkeit für Versagen je Reiseweinheit;

T der Bezugszeitraum (gewöhnlich 1 Jahr);

F_{dyn} die Anpralllast auf das Tragwerk, aus der Anprallberechnung;

R die Tragfähigkeit des Tragwerks.

Außerdem gibt es in Anhang B ein Bild zur Annahme der Verteilung „der Anfangsposition“ des Schiffes.

Insgesamt sind die in (*DIN EN 1991-1-7*, 2010) angegebenen Hinweise zur Risikoanalyse sehr dürftig und allgemein gehalten. Anders als in der amerikanischen Norm (*AASHTO*, 2009), siehe Abschnitt 4.1, wird dem Anwender kein detailliert ausgearbeitetes Konzept dargeboten, um einen risikobasierten Nachweis einer Brücke auf Schiffsanprall zu führen.

3.2 BAW Merkblatt: Nachweis bestehender Brücken auf Schiffsanprall

Das „BAW Merkblatt: Nachweis bestehender Brücken auf Schiffsanprall“ (MNaBS), Ausgabe von 2010 mit Anpassung 2013“ (*BAW-Merkblatt*, 2010), enthält Hinweise zu konkreten Nachweisen von Brücken auf Schiffsanprall. Insbesondere werden Aspekte betrachtet, die im Eurocode nicht oder nur unzureichend geregelt sind, vor allem betreffend den Umgang mit bestehenden Brücken, die Art der zu erbringenden Nachweise und die Notwendigkeit einer Maßnahmenenergreifung.

Im Folgenden wird der Inhalt des Merkblatts zumeist wörtlich wiedergegeben (auf Anführungszeichen wird verzichtet). Anschließend, im Abschnitt 3.2.6, folgt Einschätzung der Autoren der vorliegenden Fachveröffentlichung zu (*BAW-Merkblatt*, 2010). Im Abschnitt 3.2.7 wird ein Ausblick auf eine mögliche Integration des BAW-Merkblatts in die Nachrechnungsrichtlinie gegeben.

3.2.1 Vorbemerkungen

Der Anprall von Schiffen an Brücken, deren Pfeiler oder deren Überbau, ist ein relativ seltenes Ereignis, für das im gesamten Bereich der Bundeswasserstraßen in den vergangenen drei Jahrzehnten eine kontinuierliche Abnahme zu verzeichnen ist, während die tonnenkilometrische Leistung des Verkehrsträgers Binnenschifffahrt, in der sich die Schiffsgröße, die Fahrzeugfrequenz und die Fahrweglängen wiederfinden, kontinuierlich zunimmt.

Schiffsanprall auf Brückenpfeiler war im Gegensatz zu Anprall von Kfz und Anprall von Schienenfahrzeugen über lange Zeit normativ nicht einheitlich und übergreifend geregelt. Nach früheren Ausgaben der DIN 1072, zuletzt die Ausgabe 1985 (*DIN 1072*, 1985), sollten die Angaben von der zuständigen Behörde erfragt werden. Lediglich für die Wasserstraße Rhein gab es einen Erlass des Bundesverkehrsministeriums von 1968, der Schiffsstoßlasten regelte; diese Regelungen fanden ihren Niederschlag in der Dienstvorschrift DS 804 der Bahn für die Anwendung auf Rheinbrücken.

Mit DIN 1055-9, Einwirkungen auf Bauwerke, Außergewöhnliche Einwirkungen (*DIN 1055-9*, 2003), jetzt DIN EN 1991-1-7 (*DIN EN 1991-1-7*, 2010), wurden erstmals Lastannahmen und Vorgehensweisen für den Schiffsanprall auf Brücken allgemeingültiger geregelt. Während Brückenbauwerke in Wasserstraßen gegenüber Schiffsanprall regelmäßig direkt exponiert sind und deshalb einer verallgemeinerten Regelung bedürfen, können auch andere Bauwerke (z.B. Wasserentnahme-Bauwerke, Ufer-Bebauungen) durch Schiffsanprall gefährdet sein. Hierfür können aus (*DIN EN 1991-1-7*, 2010), die Vorgehensweise und die Erläuterungen zur Stoßmechanik entnommen werden, es bedarf aber ggf. weiterer Betrachtungen.

(DIN EN 1991-1-7, 2010) enthält unter Abschnitt 4.6 Regelungen für die Ermittlung von Stoßlasten auf Brücken, die neu hergestellt werden. Hierbei wird eine Nutzungsdauer von $T_N = 100$ Jahre für das neue Bauwerk unterstellt. Im Weiteren sind die für neue Bauwerke üblichen Sicherheiten impliziert, die sich auf die Bestimmung verallgemeinerter Lastwerte und begleitender Regelungen bezieht. Die in der Norm beschriebene Vorgehensweise für „Neubauten“ beinhaltet dabei Umstände, bei der die „Interaktion“ zwischen Wasserstraße und Brücke, d.h. wie Schiffe letztlich die Brücke passieren oder auch welche nautischen Bedingungen sich einstellen, noch nicht ausreichend bekannt ist und die Zielsetzung, eine für die Nutzungsdauer der Brücke möglichst ausreichende Lastgröße zu berücksichtigen. Sollen bestehende Brücken untersucht werden, so sind eingehendere Untersuchungen erforderlich, die gemäß (DIN EN 1991-1-7, 2010) bei der Ermittlung der Stoßlast die Bauwerksgeometrie sowie das örtliche Verkehrs- und Unfallgeschehen berücksichtigen, bei der Nachweisführung am Bauwerk aber auch dessen Aufbau und Historie berücksichtigen.

3.2.2 Ermittlung der Stoßlast

Ermittlung der Einwirkung

Die Stoßlast für bestehende Brücken ist gemäß den Grundzügen von (DIN EN 1991-1-7, 2010) mit den maßgebenden Randbedingungen des Wasserstraßenverkehrs und der Bauwerks-Nutzung auf probabilistischer Grundlage zu ermitteln (DIN 1055-9, 2003), (Kunz, 2006b), (DIN EN 1991-1-7, 2010).

Die gefährdeten Bauwerke bzw. Bauwerksteile können entsprechend den Überlegungen/Ermittlungen zum Gefährdungsraum ermittelt werden. Grundsätzlich sind bei Wasserstraßen Bauwerksteile, die ganzjährig von Schiffen erreicht werden können, anprallgefährdet. Am Ufer oder im Vorlandbereich befindliche Bauwerksteile sind dann gefährdet, wenn sich ein havarierendes Schiff auf den Uferbau aufschieben kann. Werden Vorländer bei höchstem schiffbaren Wasserstand (HSW) durch eine Wassertiefe von mindestens 1,0 m benetzt, so besteht eine Gefährdung durch zumindest leere Schiffe, ggf. auch teilbeladene Schiffe. Die Festlegung des Gefährdungsraums erfolgt nach Erlass WS 13/5257.3/1 vom 15.03.2010 (BMVBS, 2010).

Vereinfacht dürfen in einem ersten Schritt die Tabellenwerte aus (DIN EN 1991-1-7, 2010), Tabelle C.3, verwendet werden, wenn damit die Sicherheit des bestehenden Bauwerks nachgewiesen werden kann („1. Iterationsstufe“). Hierbei ist jedoch die Restnutzungsdauer der Brücke zu berücksichtigen, weil in der verbleibenden Zeit nicht mehr die jährliche Einzel-Zuverlässigkeit wie bei einem Neubau erzielt werden muss. Für Brücken ist von einer prinzipiellen, pauschalen Nutzungsdauer von $T_N = 100$ Jahren auszugehen. Die mit $T_N = 100$ Jahren ermittelten Stoßlasten, also z.B. die Werte nach (DIN EN 1991-1-7, 2010), Tabelle C.3, sind dazu mit einer Abminderung gemäß Bild 4 zu versehen. Hintergrund dieser Betrachtung ist, dass das für eine Nutzungsdauer konzipierte Bauwerk nach dieser Zeit „abgeschrieben“ ist und einer generellen Neu-Bewertung bedarf. Bei denkmalgeschützten Brücken kann eine fiktive Restnutzungsdauer mit dem Baulastträger festgelegt werden, vgl. auch (DIN EN 1991-1-7/NA, 2019), NDP zu 3.1(2), Anmerkung 4: „In diesem Nationalen Anhang sind Werte für außergewöhnliche Einwirkungen als dynamische Lasten oder als statische Ersatzlasten angegeben. Abweichungen von diesen Werten dürfen bei entsprechendem begründetem Nachweis mit dem Bauherrn und der zuständigen Behörde vereinbart werden.“

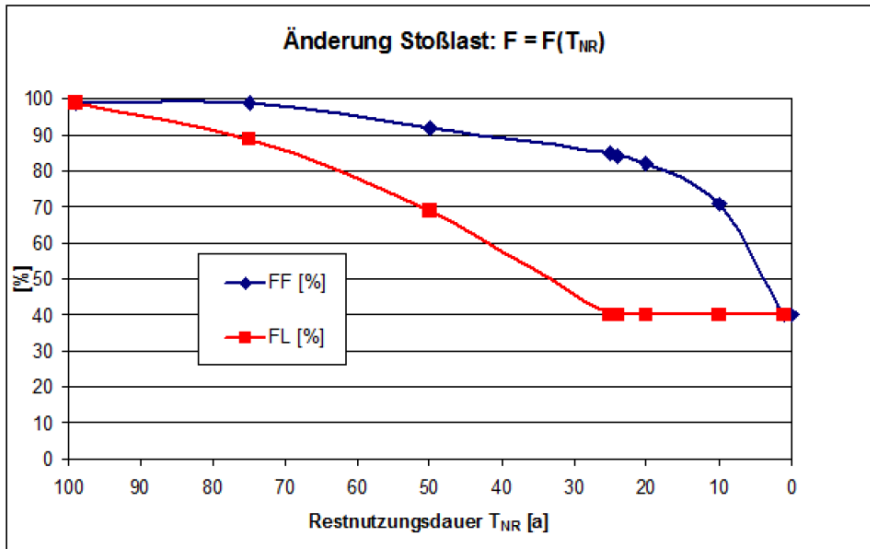


Bild 4: Abminderung der Stoßkraft: $F = [\%] * F(T_N = 100 \text{ a})$, in Abhängigkeit der Restnutzungsdauer, (FF: Frontalstoß; FL: Flankenstoß), aus (BAW-Merkblatt, 2010)

[...]

3.2.3 Nachweise

Die Nachweisführung sollte möglichst mit realistischen Bauwerksangaben (Geometrien, statisches System, Materialien, ...) durchgeführt werden. Je nach Untersuchungstiefe sind weitere Informationen einzuholen. Da die dynamische Wirkung der Einwirkung auf das Bauwerk - auch aus Gründen wirtschaftlicher Nachweise - erfasst werden sollte, ist – auch wenn anschließende Nachweise quasi-statisch geführt werden – in der Regel eine dynamische Berechnung zur Bestimmung der Dynamischen Lastfaktoren DLF erforderlich. Nur wenn mit den in (DIN EN 1991-1-7, 2010), angegebenen DLF die Standsicherheit nachgewiesen werden kann und wenn der Kraftfluss im Bauwerk (Lager!) zufriedenstellend eingeschätzt werden kann, darf eine quasi-statische Betrachtung erfolgen.

Bei sämtlichen Nachweisen, auch bei denen mit quasi-statischen Kräften, darf und kann der dynamische Effekt durch die Berücksichtigung der Energiedissipation berücksichtigt werden.

Pfeiler

Pfeiler als Unterbauten von Brücken sind hinsichtlich ihrer Standsicherheit und Tragfähigkeit zu untersuchen.

Als Nachweise der Standsicherheit gelten der Nachweis der Lagesicherheit mit den Einzelnachweisen Kippen (Lastexzentrizität), Gleiten und Aufschwimmen.

Als Nachweis der Tragfähigkeit sind Stahlbeton-Pfeiler auf Biegung mit Längskraft, Querkraft und Torsion nach der bauartspezifischen Norm (Eurocode EN 1992-1-1, 2004) zu untersuchen.

Unbewehrte oder schwach bewehrte Beton-Pfeiler sind im Rahmen der Nachweise zur Tragfähigkeit auf Kippen (Lastexzentrizität), Gleiten, Querkrafttragfähigkeit und Torsion zu untersuchen. Bei der Querkrafttragfähigkeit ist nach (Eurocode EN 1992-1-1, 2004), Glg.

(6.4) bzw. Abschnitt 12.6.3, vorzugehen, wobei angenommen werden darf, dass die Zugfestigkeit bei Stoßvorgängen mindestens der bei ruhender Belastung entspricht.

Mauerwerkspfeiler sind in Anlehnung an die Vorgehensweise bei unbewehrten/schwach bewehrten Pfeilern nach der bauartspezifischen Norm (*DIN EN 1996-1-1*, 2013) zu untersuchen.

Die Verformungen der Pfeiler sind auf Verträglichkeit zu untersuchen.

Gründung

Nachweise im Gründungsbereich umfassen den Grundbruch-Nachweis (vereinzelt vereinfacht Sohlpressung) und den Gleit-Nachweis. Früher ausgeführte Pfahlrost-Konstruktionen können von der Gründung her als Flachgründung mit Trennfuge zwischen Pfeiler und Pfahlrost wirken, was zu berücksichtigen ist.

Überbau

Der Nachweis von Überbauten bestehender Brücke darf gemäß (*DIN EN 1991-1-7*, 2010) nach risikoanalytischen Überlegungen, wozu auch eine Nutzen-Kosten-Betrachtung gehört, entschieden werden. Derartige Betrachtungen haben wegen geringer Ereignis-Häufigkeiten und geringer Schäden bislang dazu geführt, dass eine Verstärkung von Überbauten bestehender Straßen- und Wegebrücken i.d.R. nicht wirtschaftlich ist, auch wenn die Stoßkraft oder alternativ die Stoßenergie durch den Überbau nicht aufgenommen werden kann. Bei Fußgängerbrücken bzw. bei Brücken, die der Überführung von Gefahrgutleitungen („Rohr-Brücken“) dienen, sind jedoch nähere Betrachtungen anzustellen, vgl. auch (*DIN EN 1991-1-7/NA*, 2019), NCI zu 4.6.2(4).

Gleichwertig der nach (*DIN EN 1991-1-7*, 2010) vereinfachend anzusetzenden statischen Ersatzlast $F = 1 \text{ MN}$ an den Überbau ist die Anprallenergie von $E_{def} = 10 \text{ kNm}$.

3.2.4 Materialkennwerte/Sicherheitsbeiwerte

Materialkennwerte sind, sofern in-situ-Untersuchungen nicht vorliegen, in Abhängigkeit der Bauzeit nach (Bargmann, 2008) oder nach (*DBV-Merkblatt*, 2016) anzusetzen.

Bei Brücken-Bauwerken ist eine Gleichzeitigkeit von Schiffsstoßlasten mit Verkehrslasten auf der Brücke nicht anzusetzen.

Für die Nachweise sind als (Teil-)Sicherheitsbeiwerte anzusetzen:

- Sicherheitsbeiwert der Einwirkung: $\gamma_{G,A} = \gamma_{Q,A} = \gamma_A = 1,0$
- Sicherheitsbeiwert Material: $\gamma_{M,A}$ nach bauartspezifischen Normen
- Reibbeiwert: $\mu = 1,0$ (sowohl für Beton/Beton als auch Beton/Boden bzw. Beton/Pfahlkopffrost)
- Sicherheitsbeiwerte für Gleiten und Grundbruch: $\gamma_{Gleit,A} = \gamma_{Gbruch,A} = 1,0$
- Sicherheitsbeiwert für Kippen: $\gamma_{Kipp,A} = 1,1$, wobei die Bauteilpressung nachzuweisen ist.

3.2.5 Bewertungen

Eine Bewertung der jeweiligen Nachweise sollte letztlich durch die Gegenüberstellung des Erfüllungsfaktors a_{vorh} zu a_{zul} getroffen werden, vgl. (*Bundesamt Für Straßen*, 2005). Er

gibt an, in welchem Maß ein bestehendes Tragwerk die rechnerischen Anforderungen erfüllt.

$$a_{vorh} = R_d/E_d$$

und kann auch direkt aus dem Vergleich der Stoßlasten F bestimmt werden:

$$a_{vorh} = F_{Rd}/F_{Ed}$$

In Abhängigkeit des Erfüllungsfaktors sind als Maßnahmen zu ergreifen:

$a_{vorh} \geq a_{zul} = 0,80$	keine Maßnahme erforderlich
$a_{min} = 0,40 \leq a_{vorh} \leq a_{zul} = 0,80$	Maßnahmen auf Angemessenheit/Wirtschaftlichkeit prüfen
$a_{vorh} < 0,40 = a_{min}$	Maßnahmen erforderlich.

Sollte sich daraus dann das Erfordernis von Maßnahmen ergeben, kann neben baulichen Maßnahmen zur Verstärkung des betroffenen Bauteils die Errichtung externer, separater Schutzbauwerke in die Überlegungen einbezogen werden.

3.2.6 Interpretation und Kommentare

Das Merkblatt (*BAW-Merkblatt*, 2010) gibt Hinweise dazu, in welchen Fällen der Lastfall Schiffsanprall zu berücksichtigen ist, welche Nachweise bei (bestehenden) Brücken zu führen sind und ob konkrete Maßnahmen zur Erhöhung der Sicherheit zu ergreifen sind. Besonders hervorzuheben ist, dass durch diese Veröffentlichung Lücken geschlossen werden, die der Eurocode in Bezug auf den Schiffsanprall offenlässt, insbesondere hinsichtlich von:

Bewertung bestehender Brücken

Bei neuen Brücken wird von einer prinzipiellen, pauschalen Nutzungszeit von 100 Jahren ausgegangen. Bei bestehenden Brücken mit nachweislich reduzierter Restnutzungszeit sind Anpassungen bei der Nachweisführung angebracht. Die Abminderung der Stoßkraft in Abhängigkeit von der Restnutzungsdauer ist hierfür ein geeignetes Mittel. Erklärungen zu den Hintergründen dieser Abminderung wurden in der Publikation (Kunz, 2013) geliefert, welche hier im Abschnitt 4.3 präsentiert und erörtert wird.

Nachweise

Das Merkblatt (*BAW-Merkblatt*, 2010) gibt klare Anweisungen, welche Nachweise zu führen sind für Pfeiler, Gründungen und Überbau.

Bewertungen

Zudem enthält das Merkblatt wichtige Empfehlungen dazu, wie die Ergebnisse der Nachweisführungen bewertet werden sollen. Damit ist gemeint, inwiefern diese Ergebnisse Anlass für Maßnahmen zur Steigerung der Sicherheit sein sollen. Dazu wird das Konzept des „Erfüllungsfaktors“ empfohlen. Dieses stammt aus der Schweiz und hat sich bisher vor allem bei Überprüfung der Notwendigkeit von Erdbebenschutzmaßnahmen durchgesetzt (siehe Abschnitt 4.5). Er gibt an, in welchem Maß ein bestehendes Tragwerk die aktuellen rechnerischen Anforderungen erfüllt. Im Sinne einer Überprüfung der Angemessenheit/Wirtschaftlichkeit von Maßnahmen bei bestehenden Tragwerken erwies sich das Konzept des Erfüllungsfaktors als sehr zweckmäßig. Genauso wie beim Erdbeben handelt es sich beim Schiffsanprall um eine Gefahr, die selten auftritt, aber katastrophale Folgen

haben kann. Für beide Gefahren trifft zudem zu, dass die Normen erst seit wenigen Jahrzehnten eine Berücksichtigung des entsprechenden Lastfalls vorschreiben. Zum Teil wurden die zu berücksichtigenden Lasten mit der Zeit geändert. Folglich gibt es zahlreiche ältere Tragwerke, die den Anforderungen der aktuellen Normen nicht vollständig genügen, sowohl in Bezug auf Erdbeben als auch auf Schiffsanprall. Es ist daher grundsätzlich sinnvoll, bei bestehenden Brücken für den Schiffsanprall analoge Bewertungsmaßstäbe anzusetzen wie für Erdbeben.

3.2.7 Das BAW-Merkblatt und die Nachrechnungsrichtlinie

In diesem Unterabschnitt werden Parallelen von (*BAW-Merkblatt*, 2010) zur Nachrechnungsrichtlinie (NRR) dargestellt und es wird (vorab) eruiert, auf welche Weise die Vorschriften von (*BAW-Merkblatt*, 2010) in die NRR integriert werden könnten. Dabei wird insbesondere das vierstufige Nachweisverfahren in der NRR (BMVBS, 2011) berücksichtigt.

Die einleitenden „Vorbemerkungen“ von (*BAW-Merkblatt*, 2010), Abschnitt 3.2.1, enden wie folgt: „Sollen bestehende Brücken untersucht werden, so sind eingehendere Untersuchungen erforderlich, die gemäß (*DIN EN 1991-1-7*, 2010) bei der Ermittlung der Stoßlast die Bauwerksgeometrie sowie das örtliche Verkehrs- und Unfallgeschehen berücksichtigen, bei der Nachweisführung am Bauwerk aber auch dessen Aufbau und Historie berücksichtigen.“

Die in diesen Vorbemerkungen geäußerten Ziele decken sich im Wesentlichen mit dem grundsätzlichen Ziel der Nachrechnungsrichtlinie, wonach eine realistischere Erfassung der tatsächlichen Situation und genauere Untersuchungen dazu führen sollen, dass auch für Bestandsbrücken Nachweise erbracht werden können, die mit herkömmlichen Methoden (rein gemäß Eurocode) nicht erbracht werden könnten.

Insbesondere soll „das örtliche Verkehrs- und Unfallgeschehen berücksichtigt werden“. Nach der Meinung der Autoren dieser Fachveröffentlichung ist es grundsätzlich sinnvoll, bei einer Brücke zu untersuchen, ob es in der Vergangenheit gefährliche Situationen im Schiffsverkehr gegeben hat. Eine Anpassung der Vorschriften wäre allerdings eher dann angebracht, falls eine Häufung gefährlicher Situationen bzw. kleinerer Anpralle verzeichnet wurde. Umgekehrt ist auch bei einer seit Jahrzehnten bestehenden Brücke der Beobachtungszeitraum eher kurz, um von einer deutlich verminderten Gefährdungslage auszugehen zu können.

Dass „bei der Nachweisführung am Bauwerk aber auch dessen Aufbau und Historie berücksichtigt“ werden soll, ist eine Forderung, die bereits in der Nachrechnungsrichtlinie berücksichtigt wird. Stufe 3 der NRR umfasst nämlich die Implementierung von Messergebnissen.

Zur Ermittlung der Einwirkungen hält das (*BAW-Merkblatt*, 2010) fest: „Vereinfacht dürfen in einem ersten Schritt die Tabellenwerte aus (*DIN EN 1991-1-7*, 2010), Tabelle C.3, verwendet werden...“. Die Ermittlung der Einwirkungen gemäß Tabelle C.3 in (*DIN EN 1991-1-7*, 2010) stellt also ein Standardvorgehen für neue Brücken mit der prinzipiellen Nutzungsdauer von 100 Jahren dar und entspricht somit der Stufe 1 der NRR. Sinnvollerweise wird im (*BAW-Merkblatt*, 2010) eine Abminderung der Stoßkraft in Abhängigkeit der Restnutzungsdauer eingeführt, siehe Bild 4 dieses Dokuments. Erklärungen zu den Hintergründen dieser Abminderung findet man in (Kunz, 2013), siehe Abschnitt 4.3. Die Abminderung anzusetzender Einwirkungen in Abhängigkeit von der Restnutzungsdauer sollte in Stufe 2 der NRR eingegliedert werden.

Das Konzept des Erfüllungsfaktors, das im Abschnitt „Bewertungen“, siehe Abschnitt 3.2.5 eingeführt wird, findet man derzeit auch in der NRR. In der NRR wird allerdings der Kehrwert des „Erfüllungsfaktors“ berechnet und wird „Auslastungsgrad“ genannt, siehe Abschnitt 5.2.5. Der Auslastungsgrad dient im Rahmen der NRR zur übersichtlichen Darstellung der Einhaltung von verschiedenen rechnerischen Anforderungen für verschiedene Bauteile und Querschnitte. Im Unterschied zu (BMVBS, 2010) ist in der NRR keine einheitliche Vorgehensweise vorgeschrieben, wie die Auslastungsgrade bewertet werden sollen und wie mit den Ergebnissen umzugehen ist.

3.3 Richtlinien für die Ermittlung des Gefährdungsräum an Bundeswasserstraßen

Detaillierte Angaben zum Gefährdungsräum findet man in den „Richtlinien für die Ermittlung des Gefährdungsräum an Bundeswasserstraßen, Ausgabe 2010“ (BMVBS, 2010). Im Folgenden wird der Text dieser Richtlinie wörtlich wiedergegeben (auf Anführungszeichen wird verzichtet).

3.3.1 Inhalt der Richtlinie

Der Gefährdungsräum einer Wasserstraße umfasst den Raum, den fehlmanövrierte, im Allgemeinen leere, Wasserfahrzeuge sowie nach oben überstehende Aufbauten oder Einrichtungen (z.B. ausgefahrene Kranausleger) im Sinne von außergewöhnlichen Einwirkungen gemäß (DIN 1055-9, 2003) erreichen können. Bauteile, die innerhalb dieses Raumes liegen, sind potenziell durch Schiffsanfahrungen gefährdet.

Bei Kreuzungsbauwerken spannt sich der Gefährdungsräum über den Bezugswasserspiegel:

- seitlich um das Maß u , siehe Bild 5, senkrecht zur Tangente an die Wasserstraße, Bezugspunkt ist bei senkrechten Uferbefestigungen die Vorderseite der Uferkante und bei geböschten Ufern der Schnittpunkt des Bezugswasserspiegels mit der Böschung,
- in der Höhe um die 1,5-fache Durchfahrtshöhe h_0 , wobei h_0 den kleineren Wert der Brückendurchfahrtshöhe nach der Klassifizierung der europäischen Binnenwasserstraßen, Resolution Nr. 30 der UN/ECE, darstellt.

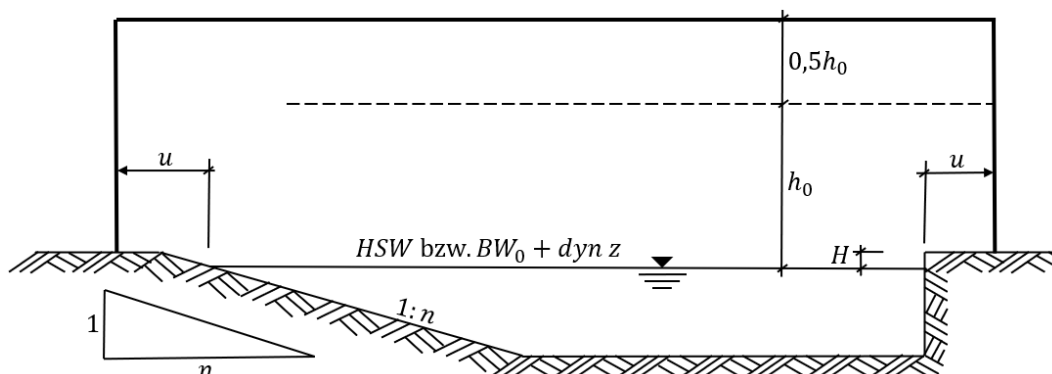


Bild 5: Schematische Darstellung des Gefährdungsräum, nach (BMVBS, 2010)

Für den Bezugswasserspiegel gilt:

- bei freifließenden und staugeregelten Flüssen der Höchste Schifffahrtswasserstand *HSW*,
- bei Kanälen der obere Betriebswasserstand *BW₀*- zuzüglich kurzfristiger Wasserspiegelschwankungen *d_{yn}* z.

Für **Wasserstraßen der Klassen IV und höher** wird das seitliche Maß *u* nach folgender Gleichung ermittelt:

$$u \text{ [m]} = u_0 \text{ [m]} + \lambda \cdot v \text{ [km/h]} \cdot \sin \alpha \quad (3.7)$$

Für Senkrechtufer gilt:

u₀ nach Tabelle 1, $\lambda = 0,08$

Für 1: *n* geböschte Ufer ($n \geq 1$) gilt:

$$u_0 = u_{0,n} - n \cdot 0,6 \text{ m} \quad (3.8)$$

u₀ nach Tabelle 1, $\lambda = 0,08 \cdot n$

α	Senkrechtufer <i>u₀</i> [m]				Böschung 1: <i>n</i>
	<i>H</i> = 0,0 m	<i>H</i> = 0,50 m	<i>H</i> = 1,0 m	<i>H</i> = 1,50 m	<i>u_{0,n}</i>
10°	1,40 m	1,20 m	1,00 m	0,70 m	1,70 m
15°	2,15 m	1,80 m	1,50 m	1,15 m	2,60 m
20°	3,00 m	2,60 m	2,20 m	1,75 m	3,50 m
25°	3,70 m	3,30 m	2,90 m	2,25 m	4,10 m
30°	4,20 m	3,90 m	3,60 m	2,90 m	4,70 m

Tabelle 1: Grundwert *u₀* [m] für Senkrechtufer und Hilfswert *u_{0,n}* [m] für geböschte Ufer in Abhängigkeit vom Anfahrwinkel α [°]

Zwischenwerte können interpoliert werden, das Rechenergebnis ist auf eine volle Dezimalstelle aufzurunden. Bei Vorlandbereichen von Flüssen, welche bei HSW überflutet werden, kann sich der seitliche Gefährdungsraum bis zu der Stelle, bei welcher bei HSW eine Wassertiefe von 1,0 m vorliegt, erstrecken.

Als Anfahrsgeschwindigkeit *v* [km/h] ist folgender Mittelwert entsprechend der Wasserstraßenklasse anzusetzen:

- Wasserstraßenklasse VI: $v = 15 \text{ km/h}$
- Wasserstraßenklasse V: $v = 12 \text{ km/h}$
- Wasserstraßenklasse IV: $v = 10 \text{ km/h}$
- Wasserstraßenklasse III und niedriger: $v = 8 \text{ km/h}$

Wenn auf Grund örtlicher Verhältnisse nur geringere Geschwindigkeiten möglich sind, darf die tatsächliche Geschwindigkeit (als Mittelwert) angesetzt werden.

Für den Anfahrwinkel α [°] (Winkel zwischen Schiffslängsachse und Tangente an die Wasserstraße) gilt in der Regel für gerade und nahezu gerade Wasserstraßenabschnitte $\alpha = 15^\circ$.

Bei Kurvenradien $300 \text{ m} \leq R < 1500 \text{ m}$ ist für die Betrachtung der Kurvenaußenseite der Anfahrwinkel zwischen $\alpha = 30^\circ$ ($R \approx 300 \text{ m}$) und $\alpha = 15^\circ$ (für $R \approx 1500 \text{ m}$) zu interpolieren.

Für eine Betrachtung der Kurveninnenseite bei Radien $R < 1500 \text{ m}$ kann der Anfahrwinkel entsprechend reduziert werden, wobei ein Mindestwert von 10° anzusetzen ist.

Für **Wasserstraßen der Klassen III und niedriger** gelten pauschal folgende Werte:

- $u = 1,00 \text{ m}$ bei Senkrechtufern
- $u = 1,50 \text{ m}$ bei geböschten Ufern.

Sofern örtliche Erkenntnisse zu größeren Maßen führen, sind diese zu Grunde zu legen.

3.3.2 Interpretation und Kommentare

Die Autoren der vorliegenden Fachveröffentlichung möchten bezüglich der „Richtlinien für die Ermittlung des Gefährdungsraumes an Bundeswasserstraßen“ (BMVBS, 2010) Folgendes anmerken.

Die in den „Richtlinien für die Ermittlung des Gefährdungsraumes an Bundeswasserstraßen, Ausgabe 2010“ (BMVBS, 2010) enthaltenen Angaben zum Gefährdungsraum schließen eine weitere Lücke in den Vorschriften des Eurocodes. Zusammen mit dem Reduktionsbeiwert zur Berücksichtigung des Abstandes vom Fahrinnenrand zum Pfeiler im Nationalen Anhang (DIN EN 1991-1-7/NA, 2019) ergibt sich dadurch eine vollständige Anweisung dafür, wie die geometrischen Verhältnisse eines Flussquerschnitts am Standort der zu untersuchenden Brücke zu berücksichtigen sind.

Es ist für die Autoren der vorliegenden Fachveröffentlichung nicht ganz nachvollziehbar, warum im selben Dokument auch Vorgaben zur „Anfahringsgeschwindigkeit v “ für vier Wasserstraßenklassen (CEMT, 1992) gemacht werden. Die Geschwindigkeitsvorgaben für die Wasserstraßenklassen III, IV und V für dynamische Nachweise sind identisch mit jenen im Nationalen Anhang (DIN EN 1991-1-7/NA, 2019), siehe Tabelle NA.7 im Nationalen Anhang. Für Wasserstraßenklasse VI werden 15 km/h empfohlen, im Nationalen Anhang hingegen 13 km/h . Für die Wasserstraßenklassen unter III sind (ebenso wie für III) 8 km/h anzusetzen, laut Nationalem Anhang hingegen 6 bzw. 7 km/h .

Gleichwohl die Angaben zum Gefährdungsraum, die man derzeit in den „Richtlinien für die Ermittlung des Gefährdungsraumes an Bundeswasserstraßen, Ausgabe 2010“ (BMVBS, 2010) grundsätzlich bereits für alle Brücken in Deutschland anwendbar sind, könnten in die NRR integriert werden. Dadurch stünde dem Anwender eine klare Angabe „aus einer Hand“ zur Verfügung, unter welchen Bedingungen der Schiffsanprall überhaupt in einer Nachrechnung berücksichtigt werden muss.

4 Weitere Literatur

4.1 AAHSTO: Guide Specifications and Commentary for Vessel Collision Design of Highway Bridges

4.1.1 Einleitung

Der Einsturz der Sunshine Skyway Bridge 1980 mit 35 Toten war Ausgangspunkt für intensive Auseinandersetzungen mit Schiffsanprall in den USA. Diese mündeten 1991 in eine entsprechende Norm, die *Guide Specification and Commentary for Vessel Collision Design of Highway Bridges* (AASHTO, 1991). Im Jahr 2007 erschien die zweite Ausgabe der *Guide Specifications* (AASHTO, 2009), die in der kommentierten Ausgabe wohl das umfassendste und nachvollziehbarste Regelwerk zum Thema Schiffsanprall darstellte. Mittlerweile wurden die Vorschriften zum Schiffsanprall in den USA in die allgemeine Brückenbaunorm *LRFD Bridge Design Specifications* (AASHTO, 2010) integriert.

Die Amerikanische Norm unterscheidet sich von den in Deutschland geltenden Vorschriften vor allem in den folgenden Aspekten:

In der Amerikanische Norm gibt es drei alternative Methoden, d.h. genau definierte Vorgehensweisen zur Untersuchung des Schiffsanpralls. Dabei gilt im Wesentlichen: Bei kleinen, „unkritischen“ Brücken ist der Untersuchungsaufwand relativ klein (und das Ergebnis der Berechnungen eher konservativ); für große, „kritische“ Brücken sind sehr aufwendige Untersuchungen durchzuführen.

Abgesehen von Methode I (der einfachsten Methode, für kleine Brücken) schreiben die *Guide Specifications* (AASHTO, 2009) probabilistische Untersuchungen vor. Dabei sind die Wahrscheinlichkeiten mehrerer Einflussparameter zu ermitteln, sodass in der Folge die Einhaltung einer Ziel-Versagenswahrscheinlichkeit überprüft werden kann. Bei Überschreitung ist ggf. die Überarbeitung des Entwurfs bzw. die Erarbeitung von Schutzmaßnahmen notwendig. Die Durchführung der probabilistischen Untersuchungen ist sehr aufwendig. Allerdings gibt die amerikanische Norm klare Handlungsanweisungen zur Berechnung der Einzel-Wahrscheinlichkeiten und schließlich zu deren Integration zu einer Versagenswahrscheinlichkeit der Brücke durch Schiffsanprall.

Die „Hinweise zur Risikoanalyse“ im Eurocode (*DIN EN 1991-1-7*, 2010), siehe Abschnitt 3.1.5, hingegen sind nicht unmittelbar anwendbar. Der Anwender müsste sich den Großteil der notwendigen Informationen aus anderen Quellen beschaffen bzw. eigenständig Annahmen treffen.

4.1.2 Hintergrund

In (AASHTO, 2009) wird auf die Hintergründe des Lastfalls Schiffsanprall und seiner Berücksichtigung in Normen eingegangen:

- In den 42 Jahren zwischen 1960-2002 gab es weltweit 31 größere Brückeneinstürze aufgrund eines Schiffsanpralls, wobei insgesamt 342 Menschen ums Leben kamen.
- 17 dieser Einstürze passierten in den USA. Darunter der Einsturz der Sunshine Skyway Bridge im Jahr 1980, wobei 400 m der Hauptspannweite durch die Kollision mit einem unbeladenen Frachter mit 35.000 DWT (deadweight tonnage) einstürzten und 35 Menschen starben.
- Darüber hinaus entstanden bei zahlreichen Schiffskollisionen kleinere und größere Sachschäden. In den 10 Jahren zwischen 1992 und 2001 gab es in den USA 2692 Unfälle an Brücken. Nur bei 61 davon überstieg der Schaden an der Brücke \$ 500.000.
- 90% der Unfälle sind auf menschliches Versagen zurückzuführen. Bei nur 5% sind mechanische Probleme die Ursache und bei 5% unzureichende Informationen.
- Begünstigt werden Schiffsanpralle durch enge Kurven und Schmalstellen in der Fahrrinne. Die lichten Weiten vieler Brücken sind für heute verkehrende Schiffe zu gering. Außerdem führt die Notwendigkeit, Zeitpläne einzuhalten, oft dazu, dass Kapitäne auch bei widrigen Wetterverhältnissen die Fahrt fortzusetzen. Schlechte Sicht, heftiger Regen und starker Wind waren wohl die Ursachen für die Kollision an der Skyway Bridge 1980.
- Das Risikoakzeptanzlevel ist von Natur aus subjektiv.
- Schäden an Brücken – und sogar Versagen sekundärer Bauteile – ist gemäß diesem Regelwerk erlaubt.
- Für neue und bestehende Brücken soll ein angemessener (*reasonable*) Widerstand gegen Schiffsanprall sichergestellt werden. Berücksichtigung von: Größe und Art der Schiffe, Wassertiefe, Fahrgeschwindigkeit, Strukturantwort, Anprallrisiko, Nutzungseinstufung der Brücke.
- Die Einführung des Regelwerks bewirkte Veränderungen bei den Entwürfen von Brücken über Wasserwege. Die Berücksichtigung des Risikos eines Schiffsanpralls und der Kosten für entsprechende Schutzmaßnahmen ergaben in der Gesamtkostenbetrachtung fast immer, dass weitgespannte Brücken günstiger sind als traditionelle Brücken mit kürzeren Spannweiten.
- Die Berücksichtigung von Schutzmaßnahmen bereits bei der Neubauplanung ist günstiger als nachträgliche Baumaßnahmen. Die Kosten der Nachrüstung betragen typischerweise 25-100% der „Kosten der bestehenden Brücke“.

4.1.3 Geltungsbereich

Die Norm (AASHTO, 2009) gilt für die Bemessung neuer Brücken und die Nachrechnung bestehender Brücken. Hinsichtlich des anprallenden Objekts erstreckt sich die Norm auf „Handelswasserfahrzeuge“ mit Stahlrumpf über 1000 DWT. Mit dem Begriff „Wasserfahrzeuge“ (*vessels*) ist gemeint, dass neben *ships* auch *barges* (Leichter, also Schubverbände) gemeint sind. Explizit ausgenommen sind hingegen Schiffe unter 1000 DWT, Schiffe aus Holz oder Glasfaser, Kriegsschiffe, Freizeitschiffe und Schiffe für Sonderzwecke. Die Beschränkung auf Handelsschiffe aus Stahl rührt daher, dass die Vorschriften für diese Art von Schiffen entwickelt wurden.

Besonders bezeichnend ist der Hinweis auf den Geltungsbereich in Bezug auf die Wasserstraßen: „*The specifications apply to all bridge types which cross a navigable shallow draft inland waterway with barge traffic, and deep draft waterways with large merchant traffic.*“ Die Norm ist offenbar nicht auf Binnenwasserstraßen begrenzt, sondern umfasst auch „tiefe Wasserstraßen“ für große Handelsschiffe, also hochseetaugliche Schiffe. Dieser Hinweis ist insofern von großer Bedeutung, als der Eurocode klar unterscheidet zwischen Binnenwasserstraßen und Seewasserstraßen und die Unterschiede bei den jeweils anzusetzenden Anpralllasten (bei gleicher Schiffsmasse) sehr groß sind.

Hierzu sei angemerkt, dass es im Netz der deutschen Bundesfernstraßen nur sehr wenige Situationen gibt, wo hochseetaugliche Schiffe in Konflikt mit Brücken kommen könnten. Potentielle Ausnahmen könnten die Fehmarnsundbrücke und die Rügendammbrücke sowie vor allem die Brücken über den Nord-Ostsee-Kanal darstellen. Bei einem Schifffahrtskanal ist eine Präsenz eines Brückenpfeilers im Wasser freilich nicht sinnvoll. Der Lastfall Schiffsanprall kann aber dennoch von Relevanz sein, nämlich bei ufernahen Pfeilern, die vom auskragenden Bug eines Schiffs erreicht werden könnten (siehe Abschnitt 4.4), sowie zu geringen Durchfahrtshöhen (Anprall eines Schiffsteils an den Überbau). Die vielbefahrene Elbmündung wird im unteren Bereich durch Tunnel gequert. Unter den Brücken in Hamburg ist in Bezug auf Seeschiffe zum aktuellen Zeitpunkt besonders die Köhlbrandbrücke relevant, bei der es bereits vereinzelt Bedenken bezüglich der Durchfahrtshöhe gab.

Andererseits sind insbesondere „Freizeitschiffe“ von der US-Norm ausgenommen. Auf deutschen Wasserstraßen bilden aber gerade Flusskreuzfahrtschiffe einen wesentlichen Teil des Binnenschiffsverkehrs.

In den Kommentaren von (AASHTO, 2009) wird darauf hingewiesen, dass die Bestimmung von Schiffsanpralllasten und notwendigen Widerständen nicht rein nach (natur-)wissenschaftlichen Prinzipien erfolgen kann. Erstens seien die Ursachen für Schiffsanpralle nicht gänzlich bekannt und unter Experten herrsche keine vollständige Einigkeit darüber, wie vorhandenes Wissen auf Anpralllasten für die Bemessungen übertragen werden soll. Zweitens bedürfte es einer Vereinfachung der extrem komplizierten Materien: Anprallwahrscheinlichkeit, einwirkende Kräfte und Antwort/Widerstand der Brücke. Drittens erforderten die Vorgabe von Anpralllasten und einzuhaltender Sicherheiten eine Abwägung zwischen akzeptablem Risiko und akzeptablen Kosten. Daher seien Urteilungsvermögen, technische Erfahrung, und politische Weitsicht genauso notwendig wie wissenschaftliche Erkenntnisse. Die Empfehlungen zur Festlegung des Schiffsanpralls basierten auf den „besten wissenschaftlichen Erkenntnissen“ im Jahr 2007 und seien durch Erfahrungen angepasst und „gemäßigt“ worden. Die Kommentare seien nicht nur zur besseren Nachvollziehbarkeit der Regeln durch den Nutzer zur Verfügung gestellt worden, sondern sollten auch als Grundlage für zukünftige Verbesserungen der Norm dienen. Sinnvolle Bereiche für weiterführende Forschungen seien die Wechselwirkung zwischen Bauwerk und Schiff, die Anpralllasten, die Brückenreaktion und die Risikoakzeptanzkriterien.

4.1.4 Entwurfsgrundsätze

- Brücken können so bemessen werden, dass sie dem Lastfall Schiffsanprall entweder im elastischen oder im plastischen Bereich widerstehen.
- Duktilität und Redundanz sind wichtige Konzepte hinsichtlich der Vermeidung des Einsturzes des Brückentragwerks.

4.1.5 Nachweisführung

- Der Schiffsanprall wird mit Lastfaktor 1,0 berücksichtigt, und mit Eigengewicht, der Hälfte der Nutzlast, des Wasserdrucks, des Strömungsdrucks und der Reibung kombiniert.
- Methode II soll für alle Brücken herangezogen werden außer in bestimmten Situationen, bei welchen Methode I oder III zur Anwendung kommt.
- Methode II beruht auf einer wahrscheinlichkeitsbasierten Risikoanalyse zur Bestimmung angemessener Bemessungslasten für den Schiffsanprall. Dabei wird die jährliche Häufigkeit eines Brückeneinsturzes abgeschätzt aufgrund der Geometrie von Pfeilern und Spannweiten, der Tragfähigkeit der Pfeiler und des Brückendecks, der Eigenschaften der Wasserstraße und der Eigenschaften des Schiffsverkehrs. Das abgeschätzte Einsturzrisiko wird standardmäßigen Akzeptanzkriterien gegenübergestellt. Gegebenenfalls sind Anpassungen am Entwurf vorzunehmen. Bei Methode II handelt es sich also grundsätzlich um eine iterative Methode.

4.1.6 Neue Brücken

Speziell zur Untersuchung neu errichteter Brücken enthält (AASHTO, 2009) folgende Eckpunkte:

- Methode I: einfachste Methode; semi-deterministisches Verfahren
- Methode II: standardmäßig anzuwendende Methode; detaillierte Risikoanalyse
- Methode III: Kostenwirksamkeit der Risikoreduktion gemäß klassischer Kosten-Nutzen-Analyse
- Es ist standardmäßig Methode II anzuwenden, nur unter besonderen Umständen ist Methode I oder Methode III anzuwenden.
- Methode I: bei seichten Fahrwässern mit reinem Verkehr von Frachtkähnen (*barges*).
- Methode III: bei sehr breiten Wasserstraßen mit vielen kollisionsgefährdeten Pfeilern und nachzurüstenden Brücken.

4.1.7 Bestehende Brücken

Speziell zur Untersuchung bestehender Brücken enthält (AASHTO, 2009) folgende Eckpunkte:

- Es ist **Methode II** anzuwenden.
- Identifikation und Reihung hochgefährdeter Brücken basierend auf geschätzter jährlicher Einsturzhäufigkeit.
- Priorisierung besonders vulnerabler Strukturen für mögliche Sanierung, Nachrüstung, Installation eines Anprallschutzes für Pfeiler oder Neubau.
- AASHTO erkennt an, dass möglicherweise ein erheblicher Anteil der älteren Brücken über befahrbare Gewässer nicht den Kriterien für neue Brücken genügt. Es geht darum, besonders gefährdete Brücken zu identifizieren und verfügbare Mittel bestmöglich einzusetzen.

- AASHTO erkennt an, dass die Nachrüstung aller Brücken auf das für neue Brücken geforderte Sicherheitsniveau möglicherweise mit untragbaren Kosten verbunden wäre.

4.1.8 Bedeutungsklassen

Brücken werden in eine der folgenden Bedeutungsklassen eingeteilt, um das akzeptable Risiko und folglich das Bemessungsschiff festzulegen:

1. Kritische/wesentliche Brücken
 2. Gewöhnliche Brücken
- Kritische/wesentliche Brücken sind jene, deren Funktionstüchtigkeit auch nach Anprall eines Bemessungsschiffes gewährleistet sein muss und deren Eintrittswahrscheinlichkeit kleiner ist als bei gewöhnlichen Brücken.
 - Kritische/wesentliche Brücken sind solche, die ein besonders hohes Verkehrsaufkommen aufweisen und/oder für die Erreichbarkeit essenzieller Einrichtungen wie Krankenhäuser oder Feuerwehrezentralen notwendig sind.

4.1.9 Das Bemessungsschiff

Es gibt drei alternative Methoden zur Ermittlung des Bemessungsschiffes:

Method I: Semi-deterministisches und konservativstes Verfahren.

Method II: Wahrscheinlichkeitsbasierte Risikoanalyse; aufwendiger als Methode I; führt zu einer realistischeren Abschätzung des Anprallrisikos und somit zu einer angemesseneren Anpralllast.

Method III: Kosten-Nutzen-Analyse zur Bestimmung des Bemessungsschiffes und der Anpralllast. Die in Methode III benötigte jährliche Wahrscheinlichkeit eines Brückeneinsturzes soll mittels Methode II berechnet werden. Die Kosten zufolge der Betriebsunterbrechung nach einem Einsturz werden mit einer Kosten-Nutzen-Rechnung ermittelt und den Kosten für Verstärkungs- oder Schutzmaßnahmen gegenübergestellt.

4.1.10 Bemessungswert der Anprallgeschwindigkeit

Der Bemessungswert der Anprallgeschwindigkeit für jedes gefährdete Brückenelement wird ermittelt aus der typischen Fahrgeschwindigkeit des Schiffes, der Entfernung des Brückenelements von der Mittellinie des Fahrwegs und der Gesamtlänge des Schiffes.

4.1.11 Die drei Nachweismethoden (Method I–III)

AASHTO unterscheidet drei unterschiedliche Bemessungs- bzw. Nachweisstrategien, die sich hinsichtlich Komplexität, Datenerfordernis und Genauigkeit deutlich unterscheiden.

Method I – Vereinfachte deterministische Bemessung

Method I stellt einen konservativen, vereinfachten Ansatz dar. Hierbei wird ein festgelegtes Bemessungsschiff angesetzt, dessen Größe sich aus Klassifikationen des Wasserwegs ergibt. Die Anprallkraft wird unmittelbar aus tabellierten oder vereinfachten Formeln bestimmt.

Die Vorgehensweise umfasst:

1. Auswahl eines Bemessungsschiffes (z. B. größte regelmäßig verkehrende Einheit),
2. Ansatz einer definierten Anprallgeschwindigkeit,
3. Berechnung der Anprallenergie,
4. Umrechnung in eine äquivalente statische Kraft,
5. Nachweis der Tragfähigkeit des betroffenen Brückenelements.

Eine explizite probabilistische Betrachtung der Anprallwahrscheinlichkeit erfolgt nicht. Method I eignet sich insbesondere für einfache Binnenwasserstraßen mit homogener Verkehrsstruktur und geringer Variabilität der Schiffsgrößen.

Method II – Risikobasierte probabilistische Bemessung (Standardverfahren)

Method II bildet das Kernstück der AASHTO-Systematik. Sie basiert auf einer quantitativen Abschätzung der jährlichen Einsturzwahrscheinlichkeit eines Brückenpfeilers oder -überbaus infolge Schiffsanprall.

Die jährliche Einsturzwahrscheinlichkeit P_C wird als Produkt mehrerer Einflussgrößen formuliert:

$$P_C = N \cdot P_A \cdot P_G \cdot P_F \cdot P_S \quad (4.1)$$

mit

- N = jährliche Anzahl relevanter Schiffsbewegungen,
- P_A = Wahrscheinlichkeit einer Kursabweichung (Aberrancy Probability),
- P_G = geometrische Anprallwahrscheinlichkeit,
- P_F = Versagenswahrscheinlichkeit des Brückenelements bei Anprall,
- P_S = Reduktionsfaktor infolge vorhandener Schutzmaßnahmen.

Das berechnete Risiko wird mit akzeptablen Grenzwerten verglichen, die abhängig von der Bedeutungskategorie der Brücke festgelegt sind. Für kritische Brücken sind deutlich geringere tolerierbare Einsturzwahrscheinlichkeiten zulässig als für gewöhnliche Bauwerke.

Method II erlaubt eine projektspezifische, differenzierte Betrachtung und stellt daher das bevorzugte Verfahren bei Neubauten sowie bei komplexen Wasserwegen dar.

Method III – Wirtschaftlichkeitsbasierte Optimierung

Method III erweitert den risikobasierten Ansatz um eine ökonomische Bewertung. Ziel ist die Ermittlung eines optimalen Sicherheitsniveaus unter Berücksichtigung von Kosten und Nutzen.

Die erwarteten jährlichen Schadenskosten C_E werden bestimmt als:

$$C_E = P_C \cdot C_F \quad (4.2)$$

mit

- P_C = jährliche Einsturzwahrscheinlichkeit,
- C_F = monetär bewerteter Schadensumfang (Wiederherstellung, Verkehrsunterbrechung, Umleitungsaufwand etc.).

Zusätzliche Schutzmaßnahmen sind wirtschaftlich sinnvoll, wenn die Reduktion der erwarteten Schadenskosten größer ist als die Investitions- und Unterhaltungskosten der Maßnahme.

Method III wird insbesondere bei sehr großen Bauwerken oder bei Bestandsbrücken angewendet, bei denen erhebliche Nachrüstkosten zu erwarten sind.

4.1.12 Schlussbemerkungen

Die mechanischen Grundlagen, auf denen die amerikanische Norm *AASHTO Guide specifications and Commentary for Vessel Collision Design of Highway Bridges* (AASHTO, 2009) aufbaut, sind zumeist dieselben wie beim Eurocode. Großteils sind diese Grundlagen durch Forschungsarbeiten in Deutschland entstanden. Unterschiedliche Annahmen führten allerdings dazu, dass die Tabellenwerte zur einfachen Ermittlung der Anprallkräfte in den *Guide Specifications* (AASHTO, 2009) im Allgemeinen erheblich niedriger sind als im Eurocode.

Es gibt in Europa kein „Pendant“ zu den *Guide Specifications*. Bei den *Guide Specifications* handelt es sich um eine genaue, umfassende Anleitung der Vorgehensweise zur Handhabung des Lastfalls Schiffsanprall in einem einzigen Dokument. Demgegenüber besitzt die Eurocode-Reihe eine hierarchische Struktur, wobei vom Allgemeinen zum Spezifischen übergeleitet wird. So gelten die „Grundlagen der Tragwerksplanung“ in (*DIN EN 1990*, 2021) sowie die „Einwirkungen auf Tragwerke“ in (*DIN EN 1991-1-1*, 2010) grundsätzlich für alle Bauwerksarten und Baumaterialien. Spezielle Vorschriften zu einzelnen Bauwerksarten (z.B. Brücken) bzw. Baumaterialien sind nachgeordneten Normen der Eurocode-Reihe zu entnehmen. Zusätzlich sind Nationale Anhänge mit ihren besonderen Festlegungen zu berücksichtigen.

Die *AASHTO Guide Specifications* bauen viel stärker auf probabilistischen Methoden auf. Da Methode II das Standardverfahren darstellt, das insbesondere bei bestehenden Brücken heranzuziehen ist, muss bei der Mehrzahl der amerikanischen Brücken ein vollprobabilistisches Verfahren durchgeführt werden, um den Lastfall Schiffsanprall zu untersuchen. Die *AASHTO Guide Specifications* stellen eine Schritt-für-Schritt-Anleitung dar, wie Daten zum Schiffsverkehr und den topografischen Gegebenheiten zu verarbeiten sind, um einen probabilistischen bzw. risikobasierten Nachweis zu führen. Um den Aufwand für dieses Vorgehen einigermaßen in Grenzen zu halten, werden einige sehr stark vereinfachende Annahmen getroffen.

In diesem Zusammenhang sollte darauf hingewiesen werden, dass der starke Fokus auf probabilistische Methoden in den USA in Bezug auf Schiffsanprall wohl auf Unterschieden im Schiffsverkehr beruht. In den USA verkehren Hochseeschiffe in mehreren Hafengebieten und zum Teil auch auf Flüssen. Dies trifft vor allem auf den Mississippi zu, der aufgrund seiner Breite meist nur durch Brücken mit mehreren Flusspfeilern überquert werden kann. Folglich ist eine aus dem Schiffsverkehr abgeleitete Verteilungsfunktion der Anprallkräfte für eine Brücke in den USA viel breiter als für eine Brücke in Deutschland. Die Vorgabe von allgemeingültigen, charakteristischen Werten für Anprallkräfte würde in den USA wohl oft dazu führen, dass dem tatsächlichen Einwirkungskollektiv nicht genügend Rechnung getragen würde. Es mag daher sinnvoll sein, die verkehrenden Schiffe in Klassen zu gruppieren, verschiedene Kursabweichungen und Anprallszenarien zu untersuchen und

schließlich eine Integration der gesammelten Daten zu einer Gesamt-Versagenswahrscheinlichkeit durchzuführen.

Demgegenüber ist der Schiffsverkehr auf deutschen Wasserstraßen viel homogener. Eine Festlegung von Nennwerten oder charakteristischen Werten fällt dementsprechend leichter. Eine Brücken-spezifische probabilistische Erfassung der Anpralllasten erscheint daher allenfalls in Ausnahmefällen angebracht. Mit Ausnahmefällen könnten Situationen gemeint sein, in denen Hochseeschiffe Brückenteile erfassen können (siehe Abschnitt 4.4) oder Fälle, bei denen gemäß konventioneller Berechnungsmethoden eine Ertüchtigung erforderlich, diese aber kaum durchführbar bzw. finanzierbar ist. Es ist fraglich, ob es sinnvoll ist, solche Sonderfälle im Detail durch Vorschriften zu regeln. Eher sinnvoll erscheinen Prüfungen im Einzelfall und das Treffen von entsprechenden Vereinbarungen mit den zuständigen Behörden (vgl. Stufe 4 der Nachrechnungsrichtlinie).

4.2 „Beitrag zur Risikobeurteilung von alten Brücken unter Schiffsanprall“

4.2.1 Einleitung

Die Dissertation von Dirk Proske (Proske, 2003) mit dem Titel „Beitrag zur Risikobeurteilung von alten Brücken unter Schiffsanprall“ behandelt den Lastfall Schiffsanprall umfassend und ist reich an Hintergrundinformationen – nicht zuletzt über die Situation in Deutschland. In den einleitenden Kapiteln werden Unfallstatistiken präsentiert, sodass die Leser einen Überblick über die Tragweite des Risikos eines Schiffsanpralls an Brücken erhalten. Es folgen die mechanische Beschreibung des Stoßes sowie der (damals, im Jahr 2003) geltenden Vorschriften in Deutschland und anderen Ländern. Das dritte Kapitel ist der Widerstandsseite, also der Brücke, gewidmet, wobei zwei bestimmte Brücken im Detail untersucht werden. Es handelt sich dabei um sehr alte Brücken (Bauzeit vor 1900), wie sie heute kaum noch im Bundesfernstraßennetz vorkommen: eine Sandsteinbogenbrücke und eine Stahlfachwerkbrücke. Das vierte Kapitel handelt von Berechnungsverfahren, wobei detaillierte Finite-Element-Analysen zum Einsatz kamen. Außerdem wurden probabilistische Berechnungen durchgeführt. Dabei werden viele Berechnungsparameter - v.a. Einwirkungs- und Widerstandsgrößen, die mit großen Unsicherheiten behaftet sind - nicht in Form von deterministischen Werten berücksichtigt, sondern in Form von Verteilungsfunktionen. Auf diese Weise ist es möglich, Wahrscheinlichkeiten für eine Reihe von Grenzzuständen bzw. Versagensarten abzuschätzen. Im Anschluss an die Berechnungsergebnisse wird die Frage nach dem „akzeptablen Risiko“ behandelt, wobei Vergleiche mit anderen Gefahren gezogen werden sowie juristische und gesellschaftspolitische Aspekte beleuchtet werden.

Die Zusammenfassung dieser Dissertation erfolgt hier in der Weise, dass jene Aspekte herausgegriffen und kommentiert werden, die für die vorliegende Aufgabenstellung besonders relevant sind. Außerdem wurden einige Daten, z.B. zur Unfallstatistik, aktualisiert, und es wird somit zweckmäßigerweise der Stand von heute (2024) dargelegt.

4.2.2 Statistiken

Proske nennt zum Binnenwasserstraßennetz in Deutschland folgende Zahlen:

- Länge: ca. 7.000 km

- Anzahl Brücken über schiffbare Gewässer: 1490, davon 1310 Straßenbrücken, davon ca. 70% grundsätzlich anprallgefährdet
- 5-10% der anprallgefährdeten Brücken sind „alt“, d.h. vor 1900 errichtet, und somit nicht auf Schiffsanprall bemessen

Für die Länge des Netzes der Bundeswasserstraßen gibt die Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (*GDWS - Bundeswasserstraßen, 2024*) heute eine ähnliche Zahl an (ca. 7.300 Kilometer). Laut (*GDWS - Bundeswasserstraßen, 2024*) entfallen von diesen circa 75 Prozent der Strecke auf Flüsse und 25 Prozent auf Kanäle. Zu den Bundeswasserstraßen zählen auch circa 23.000 Quadratkilometer Seewasserstraßen.

Es ist davon auszugehen, dass auch die von Proske genannten Zahlen der (grundsätzlich anprallgefährdeten) Straßenbrücken weitgehend immer noch aktuell sind. Es gilt allerdings zu beachten, dass nicht alle Straßenbrücken zum Bundesfernstraßennetz gehören.

Bezüglich der Altersstruktur der Brücken im Bundesfernstraßennetz wird im vorliegenden Bericht zweckmäßigerweise eine aktuelle Statistik gebracht, siehe Bild 6. Demnach fällt nach heutigem Stand nur mehr ein verschwindend geringer Teil der Brücken, in die von Proske definierte Kategorie „alt“, womit Brücken gemeint sind, die vor 1900 errichtet wurden. Es sei aber darauf hingewiesen, dass auch bei den allermeisten später gebauten Brücken kein Nachweis auf Schiffsanprall nach dem aktuellen Stand der Normen erfolgt ist, gleichwohl dieser Lastfall bei den meisten Brücken in irgendeiner Weise berücksichtigt worden sein wird.

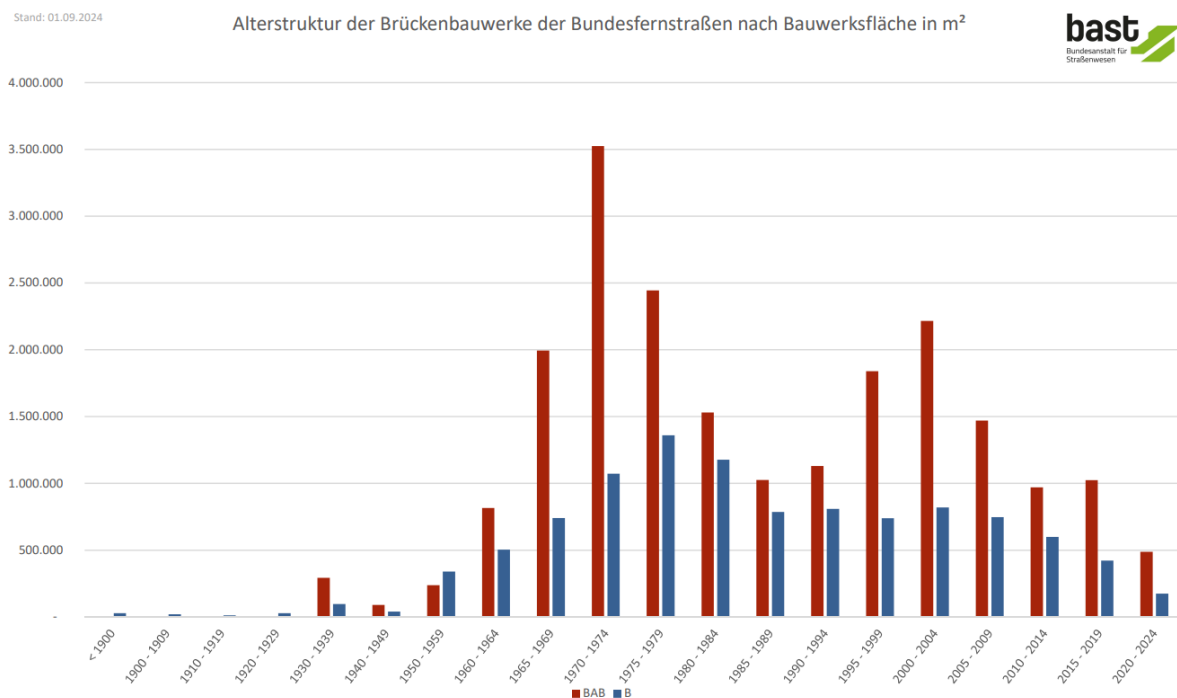


Bild 6: Altersstruktur der Brückenbauwerke der Bundesfernstraßen nach Bauwerksfläche in m² (BASt)

Proske nennt folgende allgemeine Hinweise zur Einwirkung Schiffsanprall:

- Der Schiffsanprall zählt zu den Einwirkungen, die rechnerisch nachgewiesen werden müssen.

- Da Anpralle ein sehr seltenes Ereignis sind, werden diese Prozesse als Poisson-Prozesse abgebildet.
- Bei Stoßprozessen ist der Bezug auf ein Jahr im Sinn einer Extremwertverteilung nicht möglich, da das Ereignis viel zu selten eintritt. Vielmehr stellt man eine Verteilung für den Betrag der Einwirkung, im vorliegenden Fall also für die Anprallkraft, auf, wenn das Ereignis Anprall stattfindet. Fraktilwerte dieser Verteilung können bereits als Beträge mit einer zugehörigen Wiederkehrperiode dargestellt werden. Da aber nicht jedes Jahr ein Anprall stattfindet, wird noch ein zweiter Term notwendig: dieser Term ist die Anprallwahrscheinlichkeit $P(A)$.

Die Bestimmung der Bemessungsanpralllast richtet sich nach der entsprechenden (akzeptablen) mittleren Wiederkehrperiode m_t . Nach (*DIN 1055-9, 2003*) beträgt die Wiederkehrperiode für Außergewöhnliche Einwirkungen 10.000 Jahre. Bei gegebener Wahrscheinlichkeit eines Anpralls $P(A)$ ist die Brücke so zu bemessen (bzw. Schutzmaßnahmen so auszulegen), dass gilt:

$$m_t = \frac{1}{1 - P(A) \cdot P(F|A)} = 10.000 \text{ Jahre} \quad (4.3)$$

Dabei ist $P(F|A)$ die bedingte Wahrscheinlichkeit, dass ein gegebenes Anprallereignis zu einem (definierten) Versagen führt.

Statistiken zu Ereignissen in der Vergangenheit geben eine anschauliche Übersicht über die Tragweite und Relevanz des untersuchten betrachteten Ereignisses. Proske liefert eine Reihe von Diagrammen und textlichen Beschreibungen zu vergangenen Schiffsanprallen in Deutschland und weltweit. Tabelle 2 zeigt eine vermutlich vollständige Liste der weltweiten Schiffsunfälle an Brücken mit Todesopfern seit dem Jahr 1960. Die Daten stammen aus der Dissertation von Proske; nur die Daten ab 2003 wurde nachträglich ergänzt. Es fällt auf, dass für die letzten 20 Jahre nur vier Ereignisse mit Todesopfern ermittelt werden konnten, wobei insgesamt 23 Personen ums Leben kamen.

Es fällt auf, dass die Anzahl der Todesopfer pro Jahrzehnt weltweit im Schnitt einige Dutzend beträgt. Der Unfall, der sich 1983 in der Sowjetunion ereignet hat, sticht mit 176 Todesopfern hervor. Bei diesem Unglück gab es allerdings keine Toten durch den Einsturz der Brücke (diese hielt dem Anprall stand), sondern sämtliche Todesfälle waren auf dem Schiff zu beklagen.

Name der Brücke	Jahr	Anzahl der Todesopfer
Severn River Railway Bridge, UK	1960	5
Lake Ponchartain, USA	1964	6
Sidney Lanier Bridge, USA	1972	10
Lake Ponchartain Bridge, USA	1974	3
Tasman Bridge, Australien	1975	15
Pass Manchac Bridge, USA	1976	1
Tjorn Bridge, Schweden	1980	8

Sunshine Skyway Bridge, USA	1980	35
Lorraine Pipeline Brücke, Frankreich	1982	7
Sentosa Aerial Tramway, China	1983	7
Ulyanovsk Eisenbahnbrücke, Sowjetunion	1983	176
Claiborn Avenue (Judge Seeber) Bridge, USA	1993	1
CSX/Amtrak Railroad Bridge, USA	1993	47
Port Isabel, USA	2001	8
Webber-Falls, USA	2002	12 oder 14
Highway 325 Brücke über den Xijiang, China	2007	8
Jintang Brücke, China	2008	4
Guangzhou, China	2024	5
Baltimore, USA	2024	6

Tabelle 2: Schiffsunfälle an Brücken mit Todesopfern, Daten bis 2002 aus (Proske, 2003), danach eigene Recherche

Für Deutschland ist kein Fall eines Anpralls eines Schiffs an eine Brücke mit Todesfolge bekannt. Gleichwohl kommt es recht häufig zu Unfällen mit Schäden an Brücken. Proske gibt für die Anzahl letzterer einen jährlichen Mittelwert von 20 an (für Deutschland allein, Referenzzeitraum 1991-1998).

Bei einer geschätzten Anzahl von 950 grundsätzlich anprallgefährdeten Brücken ergibt sich somit eine Zahl von $20/950 = 0,021$ als jährliche Anprallhäufigkeit bzw. Anprallrate mit Schadenfolge an der Brücke.

Tabelle 3 zeigt als Vergleich dazu verschiedene errechnete Anprallhäufigkeiten pro Brücke und Jahr bzw. pro Brücke und Schiffspassage. Man erkennt, dass der von Proske ermittelte Wert von 0,021 nicht unrealistisch ist. Allerdings variieren die Werte stark. Es ist davon auszugehen, dass nicht nur das Schifffahrtsaufkommen und (ungünstige) geografischen Gegebenheiten eine Rolle spielen, sondern auch unterschiedliche Arten der Datenauswertung die große Variation beeinflussen.

Fluss	Anpralle pro Jahr pro Brücke	Anpralle pro Brücke pro Schiffspassage
Themse (UK)	0,2300	$10,7 \cdot 10^{-6}$
Seine (F)	0,0556	$15,7 \cdot 10^{-6}$
Drogden Channel (UK)	1,7561	$59,7 \cdot 10^{-6}$

Main (D)	0,0088	$0,7 \cdot 10^{-6}$
Main (D)	0,0160	$61,0 \cdot 10^{-6}$
Lohr (Main) (D)	0,0351	$21,0 \cdot 10^{-6}$
Mosel (D)	0,0370	$0,7 \cdot 10^{-6}$
Donau (Vilshofen) (D)	0,1580	
Deutschland, nach (Stede, 2000)	0,0210	
Deutschland, nach (Lohrberg & Keitel, 1990)	0,0095	$0,5 \cdot 10^{-6}$
Dresden	0,0380	

Tabelle 3: Anprallhäufigkeit pro Brücke auf verschiedenen Flüssen; Daten aus (Proske, 2003)

Gleichwohl für den Zeitraum seit 2003 weltweit nur vier Anpralle mit Todesfolgen ermittelt werden (23 Tote insgesamt, also weniger als ein Toter weltweit pro Jahr), ereigneten sich in Deutschland im selben Zeitraum drei schwere Unfälle mit großem Sachschaden:

- 13.03.2008 Protzenweiherbrücke, Regensburg:

Ein niederländisches Schiff riss mit seinem Schiffskran eine Gasleitung unter der Brücke auf, die sofort in Flammen stand. Durch die enorme Hitze schmolzen die Stahlträger der Brücke. Die Brücke musste abgerissen werden. Es gab aber keine Verletzten.

- 03.12.2015 Friesenbrücke; Weener:

Am 03.12.2015 rammte ein rund hundert Meter langer Frachter das bewegliche Mittelfeld der Friesenbrücke über die Ems bei Weener in Niedersachsen. Durch die Kollision wurde die Friesenbrücke um einige Meter verschoben, einige Teile der Eisenbahnbrücke wurden abgerissen. Menschen wurden nicht verletzt.

Die über 300 Meter lange Friesenbrücke zählt nach Angaben der Stadt Weener zu den längsten Eisenbahnklappbrücken Deutschlands. Sie ist Teil der Bahnlinie Leer-Groningen. Wenn größere Schiffe die Brücke passieren, wird das Mittelteil der Stahlkonstruktion hochgeklappt. Die Klappbrücke war nicht geöffnet, als sich das rund hundert Meter lange Schiff näherte. Der Frachter war in die noch geschlossene Brücke gekracht und hatte auch die Fundamente der Brücke verschoben.

Die Zerstörung der längsten deutschen Klappbrücke über die Ems bei Weener ist aus Sicht der Staatsanwaltschaft auf das Fehlverhalten eines Lotsen und eines Kapitäns zurückzuführen. Ein technischer Defekt an dem Schiff oder der Brücke sei auszuschließen.

Die Staatsanwaltschaft wirft dem Kapitän vor, entgegen den Vorschriften dem Lotsen das Steuer überlassen zu haben. Zudem soll er pflichtwidrig weder einen Ausguck noch eine Radarbeobachtung eingesetzt haben. Der Lotse wiederum hätte das Schiff nicht führen dürfen. Auch habe er beim Brückenwärter die Ankunft des Schiffes zwar angekündigt, aber nicht auf die erforderliche Durchfahrtserlaubnis gewartet.

Die Kosten für einen Neubau wurden auf rund 70 Millionen Euro geschätzt.

- 25.02.2024 Bahnbrücke über die Hunte in Elsfleth:

Mitten in der Nacht rammt ein über die Hunte aus Oldenburg kommendes, 110 Meter langes Binnenschiff die Eisenbahnbrücke in Elsfleth. Zwar wurde niemand verletzt und am unbeladenen Schiff entstand nur geringer Schaden. Der Sachschaden an der Brücke ist jedoch erheblich. Unter anderem wurden die Gleise verbogen sowie die Lager zerstört und die Unterkonstruktion verschoben. Der Schiffsverkehr auf der Hunte musste unterbrochen werden. Die schlimmste Folge dieses Unglücks ist die Unterbrechung des Schienenverkehrs, der mehrere naheliegende Güterhäfen beliefert. Als Ursache des Unglücks wurde die Fehleinschätzung des Pegelstandes durch den Kapitän angegeben.

4.2.3 Mechanische Grundlagen (Stoßkraftfunktion)

Die übersichtliche Darstellung zu den mechanischen Grundlagen in Proskes Dissertation ist nachfolgend auszugsweise wiedergegeben.

„Neben der Häufigkeit eines Anpralls stellt die Stoßkraft die entscheidende Größe für die Gefährdung der Brücke durch ein solches Ereignis dar. Grundlagen für die Bereitstellung eines Formelapparates zur Berechnung der Anprallkraft werden im Folgenden gegeben. Beim Anprall eines Schiffes gegen eine Brücke handelt es sich um einen Stoßvorgang. Es wird davon ausgegangen, dass zwei Körper mit gegebener Relativgeschwindigkeit aufeinandertreffen. Im vorliegenden Fall hat nur das Schiff eine Geschwindigkeit, die Brücke kann im üblichen Sinne als stehend angesehen werden. Beide Körper zeigen in Abhängigkeit von ihren Festigkeitseigenschaften bei einem Anprall eine Verformung. Es gelten die beiden Gleichgewichtsbedingungen:

$$M_1 \ddot{u}_1 + K_1(u_1 - u_2) = 0 \quad (4.4)$$

$$M_2 \ddot{u}_2 + K_2(u_2) - R_1(u_1 - u_2) = 0 \quad (4.5)$$

unter Verwendung der bekannten Anfangs- und Randbedingungen. M_2 sei die Masse der Brücke, M_1 die Masse des Schiffes, K_2 die Steifigkeit der Brücke, K_1 die Steifigkeit des Schiffes und u_2 und u_1 die Verformungen der Brücke und des Schiffes.

Bei einem Schiffsanprall sei jedoch vereinfachend angenommen, dass das Verformungsverhalten der Brücke im Vergleich zum Schiff vernachlässigbar sei. Damit können die Gleichungen entkoppelt werden zu

$$M_1 \ddot{u}_1 + K_1(u_1) = 0 \quad (4.6)$$

$$F_2(t) = K_1[u_1(t)] \quad (4.7)$$

$$M_2 \ddot{u}_2 + K_2(u_2) = F_2(t) \quad (4.8)$$

Einen derartigen Stoß bezeichnet man als weichen Stoß.

Die Kraft-Zeit-Funktion lautet allgemein:

$$F_2 = f(M_1, v, t) \quad (4.9)$$

und kann in ein FE-Modell gemäß

$$F_2 = M_2 \cdot \ddot{x} + D_2 \cdot \dot{x} + K_2 x \quad (4.10)$$

eingebaut werden.

Die physikalischen Größen wie Geschwindigkeit und Massen sind jedoch nur ein Teil der Größen, die für die Ermittlung der beobachteten Anprallkräfte notwendig sind. Für die Abschätzung der anprallenden Masse ist zu beachten, dass es sich bei der anprallenden

Masse nicht nur um die reine Masse des Schiffes, sondern auch um eine sogenannte hydraulisch aktive Masse handelt. Die Obergrenze der Masse der Schiffe wird durch die Befahrbarkeit der Flüsse begrenzt. Kritisch dafür ist die Größe der Schleusen. Die Masse der Schiffe ist allerdings eine veränderliche Größe. Sie hängt vom Zustand der Beladung und von der Tragfähigkeit des Schiffes ab.“

4.2.4 Widerstandseite Brücke

Proske schreibt: „Eine Aussage über das Verhalten von Brücken unter Anprall erfordert neben der ausführlichen Diskussion der Einwirkungsseite auch eine gleichwertige Betrachtung der Widerstandsseite. Eine Generalisierung der Widerstandsseite vergleichbar mit der erfolgreichen Abstraktion der Einwirkung unter Berücksichtigung der Flottenstruktur ist durch die Vielfalt von Brücken bisher nicht gelungen.“

Diese Einschätzung kann nur geteilt werden und es ist weiter zu bemerken, dass eine Generalisierung der Widerstandsseite vergleichbar mit der Abstraktion der Einwirkung auch weiterhin nicht absehbar ist. Das heißt also, dass „die Brücke“ auch weiterhin individuell berechnet und nachgewiesen werden muss.

Bauwerkserkundungen

Wie bereits beschreiben, werden in der Dissertation von Proske zwei „alte“ Brücken genau untersucht und berechnet. Insbesondere werden intensive Bauwerkserkundungen durchgeführt. Diese Untersuchungen sind im Hinblick auf die Stufe 3 der Nachrechnungsrichtlinie interessant. Die genaue Ermittlung des Ist-Zustandes einer Brücke und insbesondere die Messung von tatsächlichen Widerstandswerten erlaubt nämlich, ein realistischeres Rechenmodell zu erstellen und Sicherheitsmargen zu reduzieren.

Bei der Steinbogenbrücke „Mainbrücke Lohr“ wurden spezielle Erkundungen vorgenommen, mit dem Ziel der Bereitstellung detaillierter Angaben über die Geometrie, den Aufbau und die verwendeten Materialien für die anschließende, rechnerische Untersuchung der Brücken. Insbesondere wurden viele Bohrkernentnommen. Bohrkernentnommen liefern Aufschluss über den verwendeten Naturstein bzw. Beton. Bei Naturstein ist vor allem die Druckfestigkeit von Interesse. Die Entnahme von ganzen, ungestörten Proben (z.B. ganzen Mauerwerkssteinen) wäre natürlich am besten für die Prüfungen. Aber dies ist oft nicht möglich. Proske schreibt: „Auf Grund der vorab teilweise bekannten wechselhaften Geschichte und der unvollständigen Unterlagen war eine Sichtung der Brücken unumgänglich. Die frühzeitige Erkennung von Differenzen zwischen den Bestandsunterlagen und dem realen Bauwerk ist notwendig, um Fehler bei der Modellierung der Brücke zu vermeiden.“

Und weiter: „Auch wenn die Materialentnahme durch Bohrungen lt. (Stiglat, 1984) und (Berndt & Schöne, 1990) für die Abschätzung von Mauerwerksfestigkeiten Unsicherheiten in sich birgt, überwiegt der Vorteil der einfachen technologischen Gewinnung diesen Nachteil. Die Bohrungen dienen neben der Materialbeschaffung auch zur Prüfung des Aufbaus der Brücke und der Fundamente. Die visuelle Störung des Bauwerkes ist im Verhältnis zur Menge an gewonnenem Material außerordentlich gering. Mit den zahlreichen Bohrkernen ist eine statistische Auswertung der Materialgrößen möglich, die die Unsicherheit bei der Beschreibung der Materialgrößen berücksichtigt, die wiederum später die Grundlage für die probabilistische Berechnung ist. Insofern ist zumindest teilweise damit der o.g. Kritik Genüge getan. Neben den Materialproben und dem möglichen Blick in das Bauwerk erlaubt der Bohrvorgang selbst Rückschlüsse auf Mauerwerkeigenschaften. Ein

wichtiger Indikator für den vor dem Bohrvorgang vorhandenen Porenraum im Mauerwerk stellt der Verlust an Kühlwasser dar. Ebenso können die Bohrprotokolle mit den an den Bohrkernen gesichteten Materialien verglichen werden. (Stiglat, 1984) empfiehlt, Bohrkern nicht kleiner 200 mm für die Ermittlung der Belastbarkeit von Natursteinmauerwerkswänden zu verwenden. Dieser Empfehlung konnte auf Grund technologischer Rahmenbedingungen nur teilweise gefolgt werden. Die Horizontalbohrungen erfolgten mit einem Durchmesser von 200 mm und die Vertikalbohrungen mit einem Durchmesser von ca. 130 mm.“

Die Bohrkern lieferten als subjektiven Parameter vor allem die Druckfestigkeit. Anhand der Bohrkern erfolgte aber auch eine subjektive Bewertung („Dichter Beton“/ „Mitteldichter Beton“/ „Poröser Beton“; Varietät 1/2/3). Proske gibt auch eine Wertung an, welcher Stichprobenumfang welchen statistischen Aussagewert hat, wobei er zwischen „unbrauchbar“, „abschätzend“, „brauchbar“ und „geeignet“ unterscheidet.

Darüber hinaus wurden chemische, spektrographische und mikroskopische Untersuchungen durchgeführt. Daraus wurden u.a. folgenden Schlussfolgerungen gezogen:

- a) dass kein Verpressen dieser Mauerwerkpfeiler stattgefunden hat und
- b) dass es nur eine Grundgesamtheit des Mörtels gibt.

Die Bauwerkserkundung der Mainbrücke Segnitz war weniger umfangreich und umfasste nur drei horizontale Bohrungen. Auf die Wiedergabe von Details wird hier verzichtet.

Da Proske nicht nur deterministische, sondern auch (voll-)probabilistische Berechnungen der beiden Brücken unternommen hat, reichte es nicht aus, nur Mittelwerte oder charakteristische Werte der Materialparameter zu bestimmen, sondern es waren Wahrscheinlichkeitsverteilungen zu ermitteln. Als Verteilungsfunktionen wurden Normal- und Lognormalverteilungen gewählt.

4.2.5 Berechnungsverfahren

Die Berechnungen erfolgten durch Finite-Elemente-Berechnung mit Ansys. Bei der Berechnung des strukturmechanischen Verhaltens wurden teilweise auch Nichtlinearitäten des Materials bzw. der Struktur mitberücksichtigt. Insbesondere zur einigermaßen realitätsnahen Modellierung des Mauerwerks mussten komplizierte Materialmodelle verwendet werden.

Dynamische Berechnungen

Ein Anprall kann prinzipiell unter Verwendung einer statisch wirkenden Kraft und eines dynamischen Lasterhöhungsfaktors untersucht werden. Dabei werden aber gewisse Vorkenntnisse über das dynamische Verhalten des Bauwerkes eingefordert, um den Lasterhöhungsfaktor geeignet zu wählen. Der aktuellen Eurocode (*DIN EN 1991-1-7, 2010*) angegebene Anhaltswert für den dynamischen Lasterhöhungsfaktor ist 1,3 für den Frontalstoß und 1,7 für den Flankenstoß. Eine dynamische Berechnung eines Anpralls verspricht durch die Berechnung im Zeitbereich und die explizite Berücksichtigung der Massenträgheit eine höhere Genauigkeit. In aller Regel wird dabei lediglich die Brücke modelliert, während die Wirkung des anprallenden Schiffs lediglich durch eine zeitlich veränderliche Kraft oder Druckspannung modelliert wird. Die Modellierung eines Schiffsrumpfes und die Durchführung einer Crashsimulation ist – nach Meinung der Autoren der vorliegenden Fachveröffentlichung – eher nur für Forschungszwecke praktikabel.

Das dynamische Verhalten der Brücke – wie es von Proske berechnet wurde – kann allgemein wie folgt beschrieben werden:

$$M \cdot \ddot{x}(t) + C \cdot \dot{x}(t) + K \cdot x(t) = F(t) \quad (4.11)$$

$F(t)$ ist die aufgebrachte Anprallkraft

Einige wichtige Eckpunkte der Berechnungen werden in folgenden Punkten zusammengefasst:

- Die Berechnung über den Zeitbereich erfolgte mittels des Newmark-Verfahrens.
- Bei der Alten Mainbrücke Lohr wurde ein Bereich von 32x12 m des anstehenden Felsens mitmodelliert.
- Der Boden wurde sehr voluminös modelliert, um Störungen der dynamischen Rechnung durch Reflektionen am Rand des Modells gering zu halten.
- Es wurde überwiegend eine Elementkantenlänge von ca. 0,5 m verwendet.
- Bei einem FE-Modell erfolgt immer eine Idealisierung eines realen Objektes im Hinblick auf bestimmte interessante Bereiche. Im vorliegenden Fall wurde angenommen, dass das Versagen der Brücke im Pfeiler stattfindet. Deshalb wurde besonderes Augenmerk auf die Modellierung des Pfeilers gerichtet.
- Die deterministischen Rechnungen bestätigten diese Annahme. Ca. 80-90 % der Frontalanprallkraft wurden über das Pfeilerfundament und ca. 10-20 % der Frontalanprallkraft über die beiden Bögen abgetragen.

Die Beurteilung, ob ausreichend Tragwiderstand vorhanden ist, wurde vor allem durch Vergleich der im Zeitverlauf auftretenden Maximalspannungen mit den entsprechenden Zugfestigkeiten vorgenommen. Zugspannungen von 4 N/mm² ließen darauf schließen, dass es bei (einigen) untersuchten Belastungsszenarios zumindest zu Rissen in den Pfeilern kommen würde.

Probabilistische Berechnungsverfahren

Wie aufwendig und kompliziert vollprobabilistische Berechnungen im Bauwesen sind, kann man in der Dissertation von Dirk Proske sehen. Die Autoren der vorliegenden Fachveröffentlichung möchten betonen, dass eine probabilistische Erfassung nicht nur zahlreicher Widerstandsparameter, sondern auch vieler Parameter der dynamischen (!) Einwirkung auch heute noch, also 20 Jahre später, ein selten unternommenes (und noch seltener sauber und konsistent ausgeführtes) Unterfangen ist.

Kurz zusammengefasst sind folgende Schritte nötig ¹:

- Es sind für alle Parameter der Einwirkung und der Widerstände, die man für „unsicher“ (epistemische Unsicherheit) oder „variabel“ (aleatorische Unsicherheit) sowie „einflussreich genug“ hält, Wahrscheinlichkeitsverteilungen zu ermitteln. Hierzu sei angemerkt, dass es sich dabei (z.B. Mittelwert, Standardabweichung,

¹ Die Erklärung einer vollprobabilistischen Berechnung im Bereich der Strukturmechanik/-dynamik erfolgt hier nur überblicksmäßig. Zum vollen Verständnis der Methode wird der interessierte Leser auf entsprechende Fachliteratur verwiesen. Eine klare, detaillierte (und immer noch nicht veraltete) Darstellung bietet Proskes Dissertation selbst (Proske, 2003). Eine kürzere und aktuellere Darstellung am Beispiel des dem Schiffsanprall nicht unähnlichen Lastfalls Erdbeben findet man in (Gasser, 2018).

die Verteilungsfunktion selbst) in der Regel auch nur um Annahmen bzw. Schätzungen handelt (Gasser, 2018).

- Es ist ein geeignetes (Finite-Elemente-)Modell zu erstellen und Grenzzustände des Versagens zu definieren (Boros, 2012; Gasser et al., 2019). Das Modell muss parametrisiert sein, d.h. es muss die Möglichkeit bestehen, die Werte als probabilistisch angenommenen Parameter automatisch gemäß den festgelegten Wahrscheinlichkeitsverteilungen zu variieren. Ebenso müssen die Ergebnisse dieser Rechendurchläufe automatisch verarbeitet werden können.
- Zum einen können bei komplizierten Finite-Elemente-Modellen die Grenzzustände des Versagens nicht analytisch angegeben werden, sondern sind in Finite-Elemente-Modellen „implizit“ enthalten, d.h., erst das Berechnungsergebnis (nach erfolgter Zeitverlaufsrechnung) zeigt an, ob Versagen eingetreten ist oder nicht. Zum anderen ist eine reine Monte-Carlo-Simulation aufgrund des seltenen Eintretens des Versagens und der daher benötigten vielen Rechendurchläufe auch mit modernen Rechnern in der Regel zu aufwändig (Gasser & Bucher, 2018). Es bedarf also einer mathematisch sehr komplizierten Kombination von Rechendurchläufen des Finite-Elemente-Modells und speziellen Algorithmen zur Untersuchung des Grenzzustandes (FORM/SORM-Methode), die üblicherweise auf Antwortflächen oder Metamodellen aufbauen.

Auf diese Weise gelingt eine Abschätzung der Wahrscheinlichkeit des Eintretens eines definierten Versagensmechanismus in einem bestimmten Zeitraum - gemäß zugrundeliegendem Modell und Parameterverteilungen.

4.2.6 „Akzeptables Risiko“

Prose untersucht eine Reihe von Versagensfällen für Frontalstoß und Flankenstoß. Die Wahrscheinlichkeit des Einsturzes bei einem Schiffsanprall muss mit der Wahrscheinlichkeit, dass ein Schiffsanprall stattfindet, multipliziert werden, um auf eine „operative“ Versagenswahrscheinlichkeit pro Zeiteinheit (z.B. pro Jahr) zu kommen. Prinzipiell ist bei der Berechnung jede maßgebliche, stark streuende Variable in Form einer realitätsnah geschätzten Wahrscheinlichkeitsverteilung zu berücksichtigen. Verschiedene Annahmen zu den Einwirkungen, Widerständen und Versagensszenarien können dabei zu sehr unterschiedlichen Ergebnissen führen. Es werden auch die Auswirkungen verschiedener konstruktiver Verstärkungsmaßnahmen auf die Versagenswahrscheinlichkeit untersucht. Grundsätzlich sollten Baunormen so gestaltet sein, dass die Bemessung zweier Brücken derselben Bedeutungskategorie und Schadensfolgeklasse zu ähnlichen Versagenswahrscheinlichkeiten führt.

Nach der Ermittlung der Versagenswahrscheinlichkeit stellt sich die Frage nach den Konsequenzen des Versagens. Dies führt auf den Begriff des Risikos:

$$R = P \cdot K \quad , \quad (4.12)$$

wobei:

R ... das Risiko,

P ... die Versagenswahrscheinlichkeit, typischerweise angegeben in „pro Jahr“,

K ... die Konsequenz, vor allem die Anzahl der Todesopfer bei einem Einsturz, aber auch finanzielle Aspekte darstellt.

Das Risiko verschiedener Gefahren kann übersichtlich in einem F-N-Diagramm (*Frequency-Numbers*) dargestellt werden, siehe Bild 7. Eine solche Darstellung erlaubt einen Vergleich verschiedener Gefahren und lassen auf den ersten Blick erkennen, „welche Katastrophen die gefährlichsten sind“. In seiner Dissertation schätzt Prose ab, wie viele Menschen beim Einsturz der beiden von ihm untersuchten Brücken ums Leben kommen würden. Auf diese Weise kann die Gefahr Schiffsanprall bei diesen beiden Brücken in ein F-N-Diagramm zusammen mit anderen Gefahren eingetragen und miteinander verglichen werden. Ein Aspekt, der unbedingt anzugeben ist – und die zudem direkte Vergleiche zwischen den Gefahren erschwert –, ist die Bezugsgröße. Damit ist vor allem die geografische Referenz gemeint, z.B. ob die Erdbebengefahr eine Stadt oder ein ganzes Land betrifft. Im Fall des Schiffsanpralls wird in der Regel auf eine bestimmte, einzelne Brücke Bezug genommen.

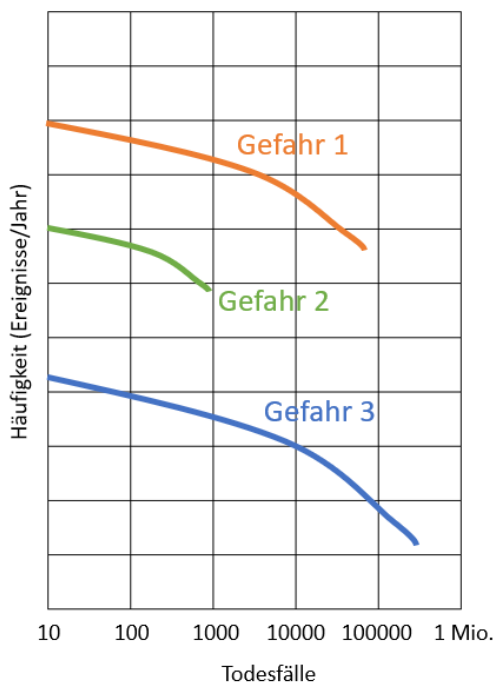


Bild 7: Konzept eines F-N-Diagramms

Die Frage, welches Risiko für ein bestimmtes Szenario oder eine konkrete technische Konstruktion akzeptabel ist, kann kaum nach objektiven Maßstäben geklärt werden. Es kommt dabei naturgemäß die Frage auf, wieviel Sicherheit kostet bzw. kosten darf. Es gilt zum Beispiel zu ermitteln, wieviel es kostet, ein Menschenleben zu retten oder die Auftretenswahrscheinlichkeit eines Schadensfalls um eine Zehnerpotenz zu reduzieren.

Prose widmet sich sehr eingehend diesen Fragen und gibt einen guten Überblick über den damaligen Literaturstand zu diesem Thema. Insbesondere beschreibt er, wie Lebensrettungskosten ermittelt werden können und geht auf Ansätze ein, welche Kosten zur Erreichung dieses Ziels akzeptabel sind. Nachdem die wirtschaftliche Leistungsfähigkeit verschiedener Staaten sehr unterschiedlich sind und Ausgaben zur Erhöhung von Bauwerkssicherheit naturgemäß in anderen Bereichen fehlen, sind akzeptable Lebensrettungskosten nicht universell, sondern von Land zu Land unterschiedlich.

So subjektiv, schwierig und heikel die Quantifizierung der genannten Größen sein mag, desto berechtigter erscheint die Forderung, dass die Mittel zur Reduzierung verschiedener Gefahren möglichst effektiv eingesetzt werden sollten. Es ist nicht vernünftig, immense

Summen für eine wenig wirksame Abwehr einer Gefahr aufzuwenden, die wenige Menschen betrifft, und andererseits bei der Abwehr einer Gefahr zu sparen, die viele Menschen betrifft und leichter zu bekämpfen wäre. In diesem Zusammenhang ist vor allem das restnutzungsdauerorientierte Konzept interessant. Dieses Bewertungskonzept für bestehende Brücken wurde in Abschnitt 3.2 vorgestellt. In Abschnitt 4.3 wird näher darauf eingegangen werden.

Sehr interessant ist in diesem Zusammenhang eine Tabelle zu Zielversagenswahrscheinlichkeiten (pro Jahr), die Proske einer Veröffentlichung des *Comité Euro-International du Beton (CEB)* entnommen hat (CEB, 1976) und auch hier in Tabelle 4 wiedergegeben wird.

Durchschnittliche Anzahl der gefährdeten Personen	Wirtschaftliche Folgen		
	gering	mittel	groß
Gering (< 0,1)	10 ⁻³	10 ⁻⁴	10 ⁻⁵
Mittel	10 ⁻⁴	10 ⁻⁵	10 ⁻⁶
Groß (> 10)	10 ⁻⁵	10 ⁻⁶	10 ⁻⁷

Tabelle 4: Zielversagenswahrscheinlichkeiten pro Jahr nach (CEB, 1976)

Jedoch soll gelten (CEB, 1976):

$$zul. P_f = \frac{10^{-5} \cdot \text{Nutzungsdauer}}{\text{Anzahl der gefährdeten Personen}} \quad (4.13)$$

Für die beiden untersuchten Brücken ergeben sich demnach Zielwerte von $5,0 \cdot 10^{-6}$ bzw. $2,3 \cdot 10^{-6}$. Proske resümiert, dass „alle hier angeführten Daten eine Zielversagenswahrscheinlichkeit im Bereich von 10^{-6} pro Jahr zu bestätigen scheinen“.

An dieser Stelle sollte darauf hingewiesen werden, dass die in (DIN EN 1991-1-7, 2010) und in (AASHTO, 2009) vorgeschriebene Wahrscheinlichkeit von 10^{-4} pro Jahr (siehe Abschnitt 4.1) nicht grundsätzlich im Widerspruch zu der hier genannten, viel kleineren Wahrscheinlichkeit von 10^{-6} pro Jahr steht. Letztere bezieht sich nämlich auf die Versagenswahrscheinlichkeit pro Jahr – welche mittels einer vollprobabilistischen Berechnung nachgewiesen werden müsste. Die in Abschnitt 4.1 erwähnte Wahrscheinlichkeit von 10^{-4} pro Jahr (oder 1-mal alle 10.000 Jahre) bezieht sich allein auf die Ermittlung der anzusetzenden (außergewöhnlichen) *Einwirkung*. Die Tatsache, dass bei der Ermittlung der Tragwerkswiderstände „Sicherheiten“ einfließen werden (etwa in Form von charakteristischen Materialfestigkeiten), bewirkt, dass Versagenswahrscheinlichkeiten erzielt werden (müssen), die durchaus niedriger sind als 10^{-4} pro Jahr.

Proske untersucht schließlich auch die Wirksamkeit von Maßnahmen gegen den Schiffsanprall, indem er untersucht, wie sie die Versagenswahrscheinlichkeit verringern. Durch Verknüpfung mit der Anzahl der betroffenen – und nun durch die Maßnahme – (besser)

geschützten Personen² ist es möglich, die von den Maßnahmen bewirkte Risikoreduktion in Geldwerten auszudrücken und diese den Herstellungskosten gegenüberzustellen. So ist es auch möglich, die für eine bestimmte Maßnahme „zulässigen“ Kosten zu berechnen, d.h., zu berechnen, wieviel eine Schutzmaßnahme kosten darf, damit sie sich im Sinn der Risikoreduktion rentiert. Konkret stellt sich bei den beiden von Proske untersuchten Brücken heraus, dass **passive Schutzeinrichtungen, also den Pfeilern vorgelagerte Poller, das weitaus beste Kosten-Nutzen-Verhältnis** haben.

4.2.7 Schlussbemerkungen

Die Dissertation von Dirk Proske beeindruckt durch die Tiefe der Durchdringung des Themas Schiffsanprall auf wissenschaftlich sehr hohem Niveau. Gleichwohl war es notwendig, stark in die Breite zu gehen, um alle Aspekte abzudecken, die für die Problematik eine Rolle spielen: Neben mechanischen und bautechnischen Fragestellungen waren dies Bereiche der Statistik, der Zuverlässigkeitstheorie, der Sicherheitsphilosophie, der öffentlichen Finanzen und des Rechts.

Gleichzeitig verdeutlicht die Dissertation, wie aufwendig und kompliziert eine probabilistische, risikobasierte Untersuchung des Lastfalls Schiffsanprall bei einer Brücke ist – sofern sie konsistent und halbwegs realitätsnah sein soll. Bereits für eine semi-probabilistische Analyse mit charakteristischen Einwirkungen und Widerständen erfordert die Datensammlung und Modellaufbereitung einen beträchtlichen Arbeitsaufwand. Eine vollprobabilistische Analyse mithilfe der Monte-Carlo-Simulation (und Abwandlungen davon) ist dem Anwender bereits kaum zumutbar. Die Einbindung menschlicher Verluste sowie finanzieller Aspekte, also eine Risikoanalyse bzw. Kosten-Nutzen-Analyse, bedeutet einen abermaligen Mehraufwand, setzt allerdings nicht unbedingt eine vollprobabilistische mechanische Analyse voraus.

Wenngleich der Weg zum Ziel in der Praxis schwierig umzusetzen ist, ist das Ziel selbst klar. So schreibt Proske: „Das Risiko aus dem Versagen von Bauwerken ist integriert in eine das Leben jedes Einzelnen und die ganze Gesellschaft umfassende Summe von Gefahren. **Die Verteilung der vorhandenen begrenzten Mittel auf alle wirtschaftlichen Bereiche zur Herstellung eines homogenen Sicherheitsniveaus ist das Ziel aller Risikountersuchungen.**“

Zu den Problemen bei der Ermittlung von Zufallsvariablen schreibt Proske: „Oft müssen statistische Angaben über Eingangsgrößen geschätzt werden. Gerade auf Grund der umfangreichen Kritik an den Verfahren der Induktiven Statistik wurde im Rahmen dieser Arbeit ein hoher Aufwand zur Ermittlung der statistischen Parameter betrieben. Nimmt man an, dass die ermittelten statistischen Parameter selbst nur wieder streuende Größen sind, so wird die ermittelte operative Versagenswahrscheinlichkeit auch eine Zufallsgröße sein. Dieses Verfahren ist bekannt (Pendola et al., 1999), wurde auf Grund der Problematik der Festlegung einer akzeptablen Versagenswahrscheinlichkeit und der hohen Versuchsanzahlen aber hier nicht verwendet.“

² Proske untersucht nur den Verlust von Menschenleben durch den Einsturz der Brücke infolge Schiffsanprall. Weitere finanzielle und ideelle Werte werden nicht berücksichtigt. Bezeichnenderweise ist es bei der Kosten-Nutzen-Analyse (Methode III) in (AASHTO, 2009) genau umgekehrt: Es sind die Kosten der Wiederherstellung und der Ausfälle abzuschätzen; der Verlust von Menschenleben wird hingegen nicht explizit berücksichtigt.

Zur kaum einschätzbaren menschlichen Komponente schreibt Proske: „Der letzte Punkt bei der Kritik der operativen Versagenswahrscheinlichkeit wiegt sicherlich am schwersten: Ist die Annahme zufälliger Änderungen der Material- und Widerstandsseiten berechtigt, so entsteht doch die überwiegende Anzahl von Bauschäden nicht durch die Wahl eines akzeptierten Risikos oder durch statistische Unsicherheiten, sondern durch menschliches Fehlverhalten.“

Zur Diskrepanz von Theorie und Wirklichkeit schreibt Proske weiter: „An der überwiegen- den Anzahl aller Versagensfälle ist menschliches Fehlverhalten beteiligt. Meistens gibt es mehrere Ursachen für ein Versagen. Diese Tatsache gilt auch für andere Unglücke. Menschliches Fehlverhalten ist eine latente Erscheinung und führt nicht zwangsläufig zu Unglücken oder Schäden. Gerade weil man weiß, dass menschliches Fehlverhalten auftritt, entwickelte man in nahezu allen technischen Bereichen Kontrollmechanismen. Die be- rechnete operative Versagenswahrscheinlichkeit ohne Berücksichtigung von menschlichen Fehlern sollte kleiner als die tatsächliche Versagenswahrscheinlichkeit sein. Bei ca. 35.000 Straßenbrücken auf dem Bundesfernstraßennetz der Bundesrepublik Deutschland müsste bei einer jährlichen Versagenswahrscheinlichkeit von 10^{-5} alle drei Jahre eine Brücke ein- stürzen. Das ist wohl kaum der Fall! Entscheidende Punkte für die hohe Sicherheit von Bauwerken sind das Versagen mit Vorankündigung und die regelmäßige Durchführung von Kontrollen und Sanierungsmaßnahmen.“

Bezogen auf die beiden untersuchten Brücken schreibt Proske: „Im Fall der Mainbrücke Segnitz steht auf Grund der hohen operativen Versagenswahrscheinlichkeit sowohl ohne Berücksichtigung als auch mit Berücksichtigung der Entwicklungen der Anprallhäufigkeit in den letzten Jahren ein Handlungsbedarf in Form von Sicherheitsmaßnahmen außer Frage. Im Falle der Alten Mainbrücke Lohr lassen die ermittelten Werte nicht ohne weiteres eine endgültige Aussage zu. Auf Grund der Probleme bei der Wertung der ermittelten operati- ven Versagenswahrscheinlichkeit wurde diese in ein Risiko gemäß den normativ bereitge- stellten Möglichkeiten überführt. Auch damit kann letztendlich keine eindeutige Aussage über die Akzeptanz der Sicherheit bzw. der Gefährdung für die Öffentlichkeit erbracht werden. Abschließend wurden für die Gesellschaft akzeptable Kosten zur Ertüchtigung der Brücken berechnet.“

Und speziell zu Stahlfachwerkbrücken: „Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass alte Stahlfachwerkbrücken mit Natursteinpfeilern in schiffbaren Gewässern in Deutsch- land in Abhängigkeit von den jeweiligen baulichen Besonderheiten einer Gefährdung durch Schiffsanprall unterliegen, die zumindest, soweit noch nicht erfolgt, rechnerisch un- tersucht werden sollte. Es erfolgte eine quantitative Angabe dieser Gefährdung für ein derartiges Bauwerk ebenso wie die Angabe der erforderlichen finanziellen Ausgaben zur Ertüchtigung des Bauwerkes.“

Und speziell zu Mauerwerksbogenbrücken: „Mauerwerksbogenbrücken dürften i.A. durch ihr hohes Gewicht kaum oder nur in geringem Maße einer Einsturzgefährdung durch Schiffsanprall ausgesetzt sein. Bei der Alten Mainbrücke Lohr zeichnet sich eine Gefähr- dung ab, die an der Grenze akzeptabler Werte liegt bzw. diese leicht übersteigt.“

4.3 „Bewertung von bestehenden Brücken hinsichtlich Schiffsanprall“

4.3.1 Einführung

Claus Kunz beschreibt in (Kunz, 2013) eine Methode, um die Schiffstoßlast für bestehende Brücken als restnutzungsdauerabhängige Einwirkung zu berechnen. Diese Methode wird in diesem in „Bautechnik“ erschienenen Bericht zum Teil auch hergeleitet und es werden Hintergründe beschrieben. Diese Methode, als „restnutzungsdauerorientiertes Konzept“ bezeichnet, steht in Übereinstimmung mit (DIN EN 1990, 2021), die ein zuverlässigkeitsbasiertes Bemessungskonzept beinhaltet. Das Konzept wurde im BAW-Merkblatt „Nachweis bestehender Brücken auf Schiffsanprall (MNaBS)“ (BAW-Merkblatt, 2010) veröffentlicht. Die Autoren der vorliegenden Fachveröffentlichung empfehlen, dieses Konzept auch in die Nachrechnungsrichtlinie zu übernehmen, siehe auch Abschnitte 5 und 6. Daher erfolgt hier eine detaillierte, zu größeren Teilen auch wörtliche Wiedergabe des Berichts (Kunz, 2013).

Kunz schreibt einleitend: „Das Konzept berücksichtigt die aktuellen Prinzipien der Instandhaltung und erlaubt die sichere und wirtschaftliche Bewertung bestehender Brücken hinsichtlich Schiffsstoß über die verbleibende Restnutzungsdauer. Grundlage der Stoßlastbestimmung ist die Verknüpfung eines Last- mit einem Kollisionsmodell, wie für die Bestimmung von Schiffsstoßlasten für neue Brücken. **Die Berechnung der restnutzungsdauerabhängigen dynamischen Stoßlasten übernimmt dabei die Gesamtzuverlässigkeit, wie für die Nutzungsdauer neuer Brücken, jedoch übertragen auf die Restnutzungsdauer, weil ein Versagen in der Standzeit der Brücke nicht aufgetreten war.** Mit diesen Stoßlasten, die mit zunehmender Standzeit der Brücke methodengemäß geringer ausfallen, lassen sich unwirtschaftliche nachträgliche Verstärkungen verhindern.“

„Nachfolgend wird eine für **Unterkonstruktionen** von bestehenden Brücken entwickelte Methode von über die Restnutzungsdauer angepassten dynamischen Anprallkräften beschrieben, die für bestehende Brücken eine sichere und wirtschaftliche Bewertung erlaubt. **Das Ergebnis ist generalisiert und lässt sich mit den tabellierten Schiffsstoßlasten (Anmerkung: in (DIN EN 1991-1-7, 2010)) für neue Brücken anwenden.**“

4.3.2 Schiffsanprall für außergewöhnliche Einwirkungen

Theoretischer Hintergrund für Schiffsanprall

In dem Bericht wird zunächst dargestellt, wie ein Lastmodell und ein Kollisionsmodell für den Schiffsanprall auf probabilistischer Basis hergeleitet werden können. Probabilistische Überlegungen sind nötig, um eine Risikoabschätzung vorzunehmen. Risikobetrachtungen werden angestellt, wenn es unmöglich oder gänzlich unwirtschaftlich ist, ein Bauwerk so auszulegen, dass es allen erdenklichen, noch so unwahrscheinlichen Einwirkungen standhalten kann. Besonders die amerikanische Normung basiert auf Abwägungen des Risikos, wie in Abschnitt 4.1 dargelegt wurde.

Das Lastmodell und das Kollisionsmodell werden schließlich miteinander verknüpft. Dadurch gelingt es, Einwirkungskräfte für den Schiffsanprall herzuleiten, die eine bestimmte Eintrittswahrscheinlichkeit haben. Wesentliche Elemente dieser Methode wurden in (DIN 1055-9, 2003) übernommen. Auch im aktuellen Eurocode (DIN EN 1991-1-7,

2010) finden sich diese Elemente wieder bzw. erlaubt der Eurocode, die beschriebenen probabilistischen Methoden anzuwenden.

Eine konsistente Herleitung der Anpralllasten anhand von mechanisch-probabilistisch korrekten und sinnvollen Modellen wie in (Kunz, 2013) ist zudem die Voraussetzung für die ebenfalls in (Kunz, 2013) beschriebene „restnutzungsdauerabhängige“ Abminderung der Stoßlasten auf konsistenter Basis.

Claus Kunz schreibt zur geschichtlichen Entwicklung und zu den Hintergründen der Anprallkräfte: „Lange Zeit wurden Kräfte aus außergewöhnlichen Einwirkungen, die ungünstig deterministisch hergeleitet wurden, kaum umgesetzt, weil bei der Größe der Kräfte immer Aspekte des Risikomanagements und der Wirtschaftlichkeit berücksichtigt wurden. In der Folge entwickelte sich eine probabilistische Methode für die Berücksichtigung von Schiffskollisionen in der deutschen Binnenschifffahrt (Kunz, 1990). Die Anprallenergie bzw. Stoßkraft ist prinzipiell Streuungen von natürlichen und verkehrlichen Einflüssen unterworfen, weshalb deren Effekte zielführend durch Verteilungen beschrieben werden. Für Schiffsstoß wurde ein probabilistisches Lastmodell mit einem probabilistischen Kollisionsmodell verknüpft, um eine Verteilung der wahrscheinlichen Stoßlasten zu erhalten. Der Bemessungswert der Stoßlast wird dabei über genormte oder akzeptable Zuverlässigkeitskriterien bestimmt.“

Lastmodell

Das in (Kunz, 2013) beschriebene Lastmodell ist jenes, welches in den Eurocode (*DIN EN 1991-1-7*, 2010) übernommen wurde, siehe Abschnitt 3.1.4, und wird hier nicht nochmals beschrieben.

Kollisionsmodell

Die Wahrscheinlichkeit einer Kollision wird mit einem Kollisionsmodell berechnet, das die Geometrie der Wasserstraße und des potenziell gefährdeten Bauwerks, den Fahrkurs sowie das Stopp-Verhalten der Schiffe, jeweils auch über ihre Verteilungen, berücksichtigt. Das Kollisionsmodell wird beschrieben mit (Kunz, 2013)

$$\lambda = \sum N_i * \int \left(\frac{d\lambda x}{ds} \right) * W_1(s) * W_2(s) ds \quad (4.14)$$

worin:

λ **die jährliche Kollisionsrate**

$\sum N_i$ die jährliche Anzahl passierender Schiffe, ggf. nach Klassen unterteilt,

$\left(\frac{d\lambda x}{ds} \right)$ die streckenbezogene Unfallrate,

$W_1(s)$ = die bedingte Wahrscheinlichkeit für einen Kollisionskurs. Anmerkung: Dieser Parameter wird vor allem durch die Entfernung des Pfeilers bestimmt

$W_2(s)$ = die bedingte Wahrscheinlichkeit, dass eine Kollision nicht vermieden werden kann (Stopp-Verhalten der Schiffe)

Anmerkung: Eine genaue, standortbezogene Ermittlung der jährlichen Kollisionsrate wäre bei der Nachrechnungsrichtlinie sinnvollerweise in Stufe 4 einzuordnen. Denkbar sind zudem zukünftige Entwicklungen auf dem Gebiet der Navigationstechnik, die sich erheblich auf die jährliche Kollisionsrate auswirken und eine Neueinschätzung erforderlich machen.

Verknüpfung des Last- mit dem Kollisionsmodell

Seltene Ereignisse wie etwa der Anprall eines Schiffes an eine Brücke werden zweckmäßig durch eine POISSON-Verteilung beschrieben. Nachdem dadurch die Zeitabstände zwischen Unfallereignissen negativ-exponential verteilt sind, gelten (Kunz, 2013)

$$f_X(t|\lambda) = \lambda * \exp[-\lambda * t] \quad (4.15)$$

$$F_T(t|\lambda) = 1 - \exp[-\lambda * t] \quad . \quad (4.16)$$

Die Wahrscheinlichkeit der Anprallkraft während eines Zeitintervalls wird durch die Verteilungsfunktion der Zeitabstände zwischen zwei Ereignissen beschrieben. Mit $F_p(F)$ als der Verteilungsfunktion der Anprallkraft folgt (Kunz, 2013)

$$F_T(t) = 1 - \exp \left[-1\{1 - F_p(F)\} \int_0^t \lambda(t) dt \right] \quad (4.17)$$

$$F_T(t|\lambda) = 1 - \exp \left[-\frac{t}{t_R} \right] \quad , \quad (4.18)$$

wobei

$$t_R = (\lambda * \{1 - F_p(F)\})^{-1} \quad (4.19)$$

das Wiederkehrintervall einer bestimmten, festzulegenden Anprallkraft ist, siehe (Kunz, 2006b). Eine Transformation liefert

$$\lambda * t_R = \frac{1}{1 - F_p(F)} \quad . \quad (4.20)$$

Der Term auf der linken Seite, $\lambda * t_R$, ermöglicht eine einseitig dimensionslose Funktion des Produkts aus der jährlichen Kollisionsrate λ und dem Wiederkehrintervall t_R in Abhängigkeit von der Stoßlast. Umgekehrt kann auf diese Weise bei gegebener jährlicher Kollisionsrate jene Stoßlast ermittelt werden, die mit einem reduzierten Wiederkehrintervall korrespondiert. Das reduzierte Wiederkehrintervall kann sinnvoll mit einer reduzierten Nutzungsdauer assoziiert werden, wie später gezeigt wird.

In (Kunz, 2013) wird dieses Vorgehen detailliert geschildert, wobei allerdings nicht sämtliche zugrundeliegenden Hintergründe und Gleichungen dargelegt werden. Zur Überprüfung der Richtigkeit und Konsistenz der Berechnungen in (Kunz, 2013), haben die Autoren der vorliegenden Fachveröffentlichung versucht, die Darstellungen mittels eigener Berechnungen möglichst lückenlos nachzuvollziehen. Als Ausgangspunkt dieser Berechnungen kann Gleichung 4.20 betrachtet werden.

Die jährliche Kollisionsrate λ wurde offenbar empirisch bestimmt und verallgemeinert. Kunz schreibt dazu: „Die Analyse eines schiffsstoßgefährdeten Brückenpfeilers einer typischen Brücke über eine Wasserstraße ergab eine mittlere rechnerische Kollisionsrate λ mit $\lambda_{FF} = 0,0115$ [1/a] für Frontalstoß und $\lambda_{FL} = 0,00276$ [1/a] für Flankenstoß.“

Auch zur Bestimmung der Verteilung der Stoßlasten $F_p(F)$ wurden offenbar früher ermittelte, „typische“ Daten herangezogen. Kunz schreibt: „Im Einzelnen wurden Eingangsdaten verwendet, die seinerzeit zur Bestimmung typischer dynamischer Schiffsstoßlasten für (DIN 1055-9, 2003) verwendet wurden.“ In (Kunz, 2013) werden die entsprechenden Stoßlasten als Wahrscheinlichkeitsdichten grafisch dargestellt. Diese Grafik wird hier in Bild 8 nachgebildet.

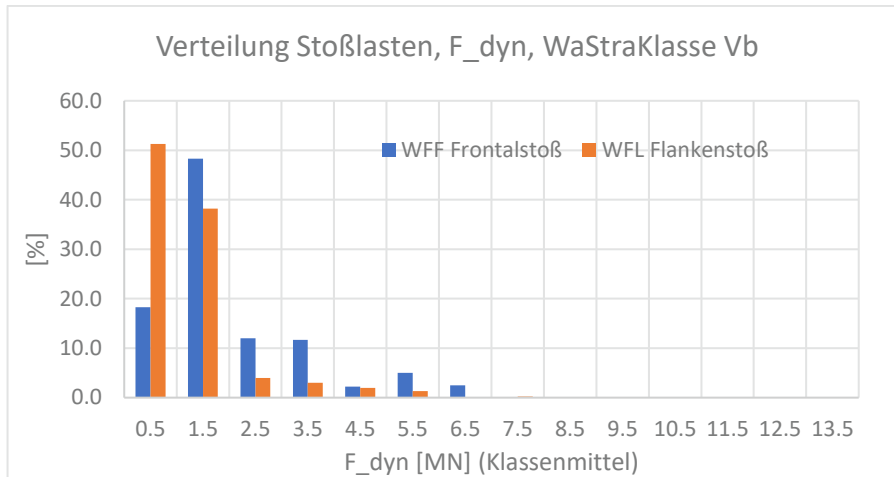


Bild 8: Wahrscheinlichkeitsdichte für Schiffsstoßlasten für Wasserstraßenklasse Vb, Frontalstoß (W_{FF}) und Flankenstoß (W_{FL}), nach Bild 4 in (Kunz, 2013)

Kunz schreibt dazu: „Bild [...] zeigt die typische Stoßlastverteilung für Wasserstraßenklasse Vb, die als Wasserstraßenklasse in etwa 70% der deutschen Binnenwasserstraßen repräsentiert.“

Das weitere Vorgehen in (Kunz, 2013) ist etwas unklar. An die hier in Bild 8 abgebildeten Werte wurden wohl analytische Funktionen angepasst. Anschließend wurden die Dichtefunktionen in (kumulative) Verteilungsfunktionen übergeführt. Diese können dann in die Gleichung 4.20 eingefügt werden, sodass sich die bereits erwähnten einseitig dimensionslosen Stoßlast-Verteilungsfunktionen ergeben. In (Kunz, 2013) sind die Stoßlast-Verteilungsfunktionen für Frontalstoß und Flankenstoß in Bild 2 dargestellt. Die Autoren der vorliegenden Fachveröffentlichung haben versucht, die zugrundeliegenden Berechnungen bestmöglich nachzuvollziehen, indem sie eigene, analytische Verteilungsfunktionen (log-normal) an die Werte in Bild 8 angepasst und diese in Gleichung 4.20 eingesetzt haben. Das Ergebnis ist hier in Bild 9 dargestellt. Der Vergleich mit den entsprechenden Abbildungen in (Kunz, 2013) – deren zugrundeliegenden Gleichungen nicht bekannt sind – zeigt eine recht gute Übereinstimmung.

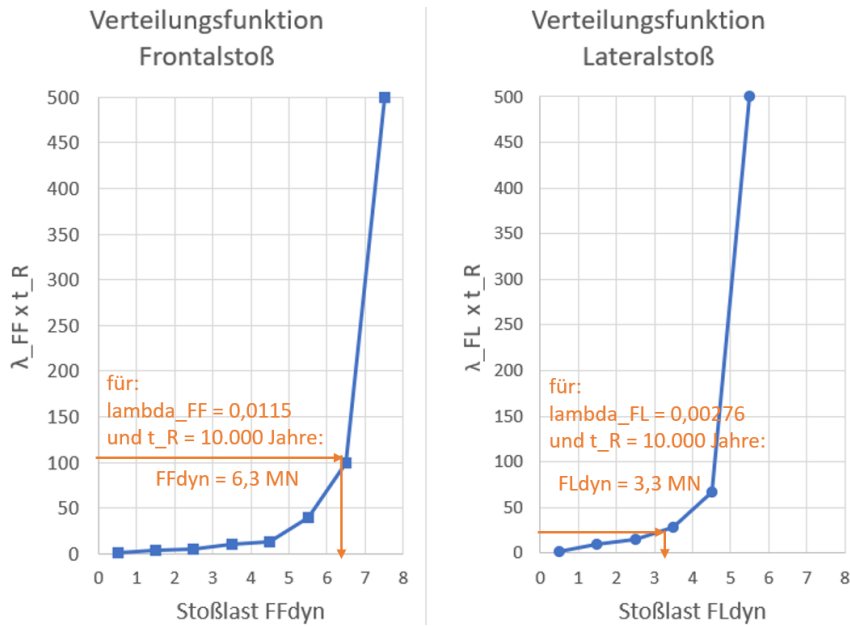


Bild 9: Stoßlast-Verteilungs-Funktionen für a) Frontalstoß „FF“ und b) Flankenstoß „FL“, nach eigener Berechnung, die aber an „Bild 2“ in (Kunz, 2013) angelehnt ist.

Kunz schreibt, dass die so aus Kollisionsrate λ und Wiederkehrintervall t_R ermittelbare charakteristische Stoßlast in der Regel auch die Bemessungsstoßkraft sei. Schlüssigerweise ist dies darauf zurückzuführen, dass bei außergewöhnlichen Einwirkungen ein Teilsicherheitsbeiwert gleich 1,0 anzusetzen ist.

Das heißt also:

- Bei gegebener – am besten: objektspezifischer - Kollisionsrate λ
- und gegebener Verteilung der Stoßlasten, etwa gemäß Bild 8
- und mit einem Wiederkehrintervall von 10.000 Jahren

kann mittels Gleichung 4.20 bzw. Bild 9 jene Stoßkraft (frontal und lateral) ermittelt werden, „mit welcher alle 10.000 Jahre einmal zu rechnen ist“.

Es ergeben sich somit folgende Werte:

- für Frontalstoß: $FF_{dyn} = 6,3$ MN
- für Flankenstoß: $FL_{dyn} = 3,3$ MN

Ein Vergleich mit den Tabellenwerten im Eurocode für die Wasserstraßenklasse Vb, siehe Tabelle C.3 in (DIN EN 1991-1-7, 2010), zeigt, dass die darin angegebenen Stoßlasten mit 10 MN bzw. 4 MN höher sind. Die genauen Beweggründe für die Wahl der Stoßlasten im Eurocode sind nicht überliefert. Es ist davon auszugehen, dass es gute Gründe gab, die Werte aufzurunden oder höher anzusetzen. Man bedenke nur, dass die Ermittlung von Kollisionsrate λ und ebenso von Verteilungen der Stoßlasten bei der Erstellung der Eurocode-Vorschriften wohl nur exemplarisch erfolgen konnte. Demgegenüber bestand die Notwendigkeit, dass die Norm europaweit und somit mutmaßlich auch bei ungünstigeren Umständen anwendbar sein muss.

Regelwerke

Kunz schreibt zur Entstehung der Regelwerke: „Anfänglich zahlreiche Einzeluntersuchungen sowie daran anschließende Vergleichsstudien, innerhalb derer für zahlreiche Brücken dynamische Stoßlasten auf probabilistischer Basis durch die Bundesanstalt für Wasserbau berechnet wurden, mündeten in eine Analyse der ermittelten Stoßlasten. Die europäische Klassifizierung der Binnenwasserstraßen mit jeweils in den Klassen ähnlichen Flottenstrukturen bot eine pragmatische Möglichkeit der Gruppierung dieser analysierten Stoßlasten zu typisierten Einwirkungen, siehe [...] Tabelle C.3 in (DIN EN 1991-1-7, 2010). (DIN EN 1991-1-7/NA, 2019), wie auch zuvor (DIN 1055-9, 2003), definiert wiederum die mittlere statistische Rückkehrperiode t_R für außergewöhnliche Ereignisse mit einer Überschreitungswahrscheinlichkeit von $p_{\ddot{U}} = 10^{-4}/a$, die einer Rückkehrperiode von $t_R = 10\,000$ Jahren entspricht.“

4.3.3 Schiffsanprall für bestehende Brücken

Die in Bild 9 dargestellten Verteilungen der Anprallkräfte dienen nicht nur dazu, Bemessungslasten für Neubauten (mit Rückkehrperiode 10.000 Jahren) zu bestimmen, sondern geben ebenso direkte Auskunft über konsistent ermittelte Anpralllasten für kürzere Rückkehrperioden – und somit für reduzierte Restnutzungszeiten.

Sicherheitskonzept des Eurocodes

Ausgehend von einer kurzen Erläuterung des Sicherheitskonzepts der Eurocodes erfolgt in (Kunz, 2013) eine Überleitung zum Restnutzungsdauerkonzept.

Die Grundlage der Eurocodes für die Bemessung von Tragwerken und Bauwerksteilen sei ein bauartübergreifendes Sicherheitskonzept gemäß (DIN EN 1991-1-7, 2010; DIN EN 1991-1-7/NA, 2019). Hintergrund hierfür sei ein Nutzungsdauerorientiertes Sicherheitskonzept, bei dem die Sicherheit des Bauwerks bzw. eines Bauteils durch **eine auf die gesamte Nutzungsdauer T_N bezogene Zielzuverlässigkeit β** gewährleistet werde. Die Sicherheit sei gekennzeichnet durch Unsicherheiten der eingesetzten Modelle (z. B. Modell für die Bestimmung der Einwirkung, für das statische System, für die Bestimmung des Widerstands, ...) und durch streuende Basisvariablen für Einwirkungen und Widerstände als zeitlich veränderliche Einflüsse.

Kunz schreibt: „(DIN EN 1990, 2021) gibt prinzipiell Empfehlungen für die normale Zielzuverlässigkeit β und die geplante Nutzungsdauer T_N ; für Brücken als Infrastrukturbauwerke z. B. $T_N = 100$ Jahre. In Verbindung mit den einschlägigen Regelwerken (DIN EN 1991-1-7, 2010; DIN EN 1991-1-7/NA, 2019), die für außergewöhnliche Einwirkungen eine Überschreitungswahrscheinlichkeit $p_{\ddot{U}} = 10^{-4}$ pro Jahr angeben, folgt für Brücken hinsichtlich außergewöhnlicher Einwirkungen aus Anprall eine Gesamtzuverlässigkeit von $r = 0,01$ während ihrer Nutzungsdauer.“

Restnutzungsdauerkonzept

Das Sicherheitskonzept nach (DIN EN 1990, 2021), lässt für die Bewertung einer bestehenden Struktur die Betrachtung der Restnutzungsdauer vom Bewertungszeitpunkt bis zum Ablauf der geplanten Nutzungsdauer zu.

Auch (ISO 13822, 2010) sieht eine Reduzierung der Ziel-Zuverlässigkeit bei bestehenden Bauwerken vor: „The target reliability level can also be established taking into account the required performance level for the structure, the reference period and possible failure

consequences. Lower target reliability levels for existing structures may be used if they can be justified on the basis of socio-economic criteria.“

Kunz schreibt: Unter der Annahme, dass bis zum Bewertungszeitpunkt kein Versagen in der Vergangenheit aufgetreten ist, was offensichtlich wäre, **dürfe die erforderliche Zuverlässigkeit** unter Berücksichtigung der Variationen der maßgebenden Einwirkungen und Widerstände **auf die Restnutzungsdauer übertragen werden**. Diese Zuverlässigkeit entspreche dabei derjenigen für neue Brücken und für eine geplante Nutzungsdauer von $T_N = 100$ Jahren, die aber nunmehr auf die Restjahre angesetzt werde. Die Vorgehensweise entspreche dem Instandhaltungskonzept gemäß (*DIN 31051: Grundlagen Der Instandhaltung*, 2019), wonach Bauwerke während ihrer Nutzungsdauer bis zu einer kritischen oder Grenzzuverlässigkeit altern dürften, eben das Ende der technischen Nutzungsdauer, ohne dass sie wesentlich instandgesetzt werden müssten. In konsequenter Anwendung des Sicherheitskonzeptes gemäß (*DIN EN 1990*, 2021) **führe diese Vorgehensweise zu einem geringeren charakteristischen Wert für zeitlich veränderliche Einwirkungen, also z. B. veränderliche und außergewöhnliche Einwirkungen**. Falls dann doch in der Restnutzungszeit ein Versagen eintreten würde, wäre das ursprünglich beim Neubau geforderte Zuverlässigkeitsniveau nicht verletzt. Das Ergebnis, selbst im Falle eines Versagens, wäre sozial adäquat.

Konkret wird für die **restnutzungsdauerabhängige Reduzierung der Stoßlasten** in (Kunz, 2013) ein Verfahren verwendet, welches auf den in Bild 9 gezeigten (repräsentativen) Verteilungen beruht und diese verallgemeinert. Die Vorgehensweise ist hier in Tabelle 5 ersichtlich. Die erste Spalte zeigt die Restnutzungszeit T_{NR} , die zweite Spalte zeigt das Wiederkehrintervall t_R zwischen zwei zu vermeidenden unerwünschten Ereignissen.

Ausgangspunkt der weiteren Vorgehensweise ist die Idee, dass die „Gesamtzuverlässigkeit während der Nutzungsdauer“ r konstant bleiben soll. Das heißt, dass bei abnehmender Restnutzungsdauer T_{NR} auch das Wiederkehrintervall t_R abnimmt, denn:

$$r = \frac{T_{NR}}{t_R} \quad . \quad (4.21)$$

Dann werden für einige verschiedene, reduzierte Werte von t_R entsprechende Kräfte aus den Verteilungsfunktionen in Bild 9 ermittelt (die Kollisionsrate λ wird als konstant angenommen). Somit folgen für reduzierte Restnutzungsdauern konsistent ermittelte, reduzierte Anpralllasten. Die anhand dieser exemplarischen Stoßlast-Verteilungen ermittelten Reduktionen werden anschließend verallgemeinert, indem die Lasten für reduzierte Restnutzungsdauern als prozentuale Anteile der für Neubauten geltenden Lasten ausgedrückt werden.

Kunz begründet die Zulässigkeit dieser Vorgehensweise so: „Diese Schiffsstoßkraftverteilungen verhalten sich für die unterschiedlichen Wasserstraßenklassen ähnlich, sodass auch die von der verbleibenden Restnutzungsdauer abhängigen Stoßkräfte ähnlich verlaufen.“

Diese generelle, restnutzungsdauerabhängige Abminderung ist in Bild 10 dargestellt und in dieser Form auch in (*BAW-Merkblatt*, 2010) zu finden. Für die praktische Anwendung bei der Bewertung einer bestehenden Brücke hinsichtlich Schiffsanprall wird die wasserstraßenabhängige Stoßlast für den Neubau aus (*DIN EN 1991-1-7*, 2010) bzw. (*DIN EN 1991-1-7/NA*, 2019) entnommen und mit dem restnutzungsdauerabhängigen Prozentwert gemäß (*BAW-Merkblatt*, 2010), siehe auch Bild 10, kombiniert. „Aus Sicherheitsüberlegungen wurde eine untere Anpassungsgrenze in Höhe von 40% festgelegt, die mit einigen

wenigen Restjahren für Frontalstoß und mit etwa 25 restlichen Jahren für Flankenstoß korrespondiert“ (Kunz, 2013).

Die Autoren der vorliegenden Fachveröffentlichung empfehlen zudem, nur Anpassungsfaktoren bis zu einer Restnutzungsdauer von 10 Jahren vorzuschreiben. Vorschriften für noch kürzere Restnutzungsdauern sind nicht sinnvoll.

T_{NR} [a]	t_R [a]	$\lambda_{FF} * t_R$ [-]	FF_{dyn} [MN]	[%]	$\lambda_{FL} * t_R$ [-]	FL_{dyn} [MN]	[%]
100	10000	115	6,3	100	27,6	3,3	100
75	7500	86	6,0	95	20,7	2,9	88
50	5000	58	5,75	91	13,8	2,3	70
25	2500	29	5,3	84	6,9	1,2	36
10	1000	12	4,4	70	2,8	0,63	19
1	100	1,2	0,5	8	0,3	0,17	5

Tabelle 5: Dynamische Frontal- und Flankenstoßlasten in Abhängigkeit von der Restnutzungsdauer, nach Tabelle 2 in (Kunz, 2013)

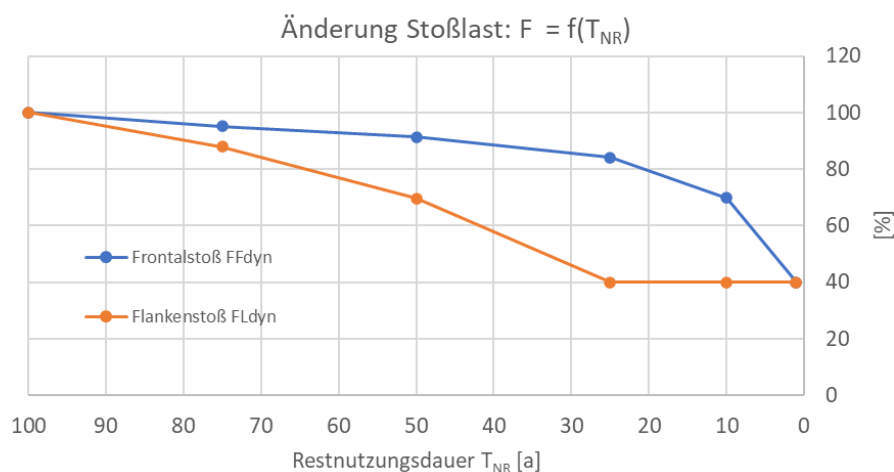


Bild 10: Anpassung der Schiffsstoßlast $F = f(T_{NR})$, nach (BAW-Merkblatt, 2010)

Kunz schreibt zum praktisch relevanten Problem von unbekanntem Restnutzungsdauern: „Für alte Brücken, bei denen in den zur Bauzeit maßgebenden Regelwerken eine Nutzungsdauer nicht angegeben war und bei denen sich zum Zeitpunkt der Bewertung aus einer Analyse auch eine explizite Restnutzungsdauer nicht errechnen lässt, z. B. aus Ermüdung, könnte im Nachhinein eine ursprüngliche geplante Nutzungsdauer von $T_N = 100$ Jahren unterstellt werden.“

Vergleich mit Tabellenwerten im Eurocode und mit JCSS

Wie in Abschnitt 4.3.2 erwähnt, kann die Herkunft der Verteilungen der in Bild 8 abgebildeten Stoßlasten nicht gänzlich rückverfolgt werden. Zudem sind die (analytischen) Verteilungsfunktionen, die an dieses Histogramm angepasst wurden, nicht überliefert. Daher werden in diesem Unterabschnitt Vergleichsrechnungen durchgeführt, um die in (Kunz, 2013) hergeleiteten Abminderungsfaktoren näherungsweise zu validieren. Diese Vergleichsrechnungen beruhen auf folgenden Vorgaben:

- 1) Den Vorgaben in (*DIN EN 1991-1-7, 2010*) sowie (*DIN EN 1991-1-7/NA, 2019*) zur Bestimmung der Anpralllasten bei Wasserstraßenklasse Vb.

Die Anpralllasten wurden mittels Gleichung (3.1) für den elastischen Bereich bzw. mittels Gleichung (3.2) für den plastischen Bereich ermittelt. Die Schiffsmasse wurde zu 4500 t gewählt, was dem Mittelwert der Massen bei Wasserstraßenklasse Vb (3000-6000) entspricht. Die Anprallgeschwindigkeit beträgt gemäß (*DIN EN 1991-1-7/NA, 2019*) 12 km/h, also 3,33 m/s. Die Standardabweichungen wurden zu 9000 Tonnen bzw. 0,32 m/s gewählt, sodass der Variationskoeffizient mit den Empfehlungen des JCSS Probabilistic Model Codes übereinstimmt.

- 2) Den Vorgaben in (*JCSS Probabilistic Model Code. Part 2: Load Models. 2.18: Impact Load, 2001*) zu Anpralllasten der Schiffsklasse „medium“. Der Mittelwert der Masse m beträgt dabei 4000 Tonnen, die Standardabweichung 8000 Tonnen. Der Mittelwert der Geschwindigkeit v beträgt 3 m/s, die Standardabweichung 1 m/s. Für die *equivalent stiffness* k beträgt der Mittelwert 15 MN/m und die Standardabweichung 3 m/s. Die Anprallkraft wird dann ermittelt mit: $F = v \cdot \sqrt{k \cdot m}$

Es wird jeweils eine Lognormal-Verteilung gemäß den Empfehlungen des JCSS Probabilistic Model Codes angenommen. Es werden nur die Verteilungen für den Frontalstoß ermittelt. Um die Verteilungsfunktion für den Frontalstoß zu ermitteln, wird die Stichprobenauswahltechnik des „Orthogonal Array Sampling“ angewandt. Die Verteilungsfunktionen für Schiffsmasse und Anprallgeschwindigkeit werden in je 1000 Abschnitte diskretisiert und anschließend in jeder möglichen Zusammenstellung kombiniert. Es werden somit 1.000.000 mögliche Realisierungen der Anprallkraft errechnet.

Bild 11 zeigt die resultierenden Verteilungsfunktionen. Die rote Kurve „(Kunz, 2013)“ ist die Verteilungsfunktion, die an die Frontalstoß-Dichtefunktion in Bild 8 angepasst wurde. Die Verteilungsfunktion gemäß den Eurocode-Vorgaben weist einen markanten Knick bei 5 MN auf, also am Übergang vom elastischen zum plastischen Bereich. Die Verteilungsfunktion gemäß den JCSS-Vorgaben hat keinen Knick, da der JCSS nicht zwischen elastischem und plastischem Bereich unterscheidet. Zusätzlich wurde eine angepasste Variante der Berechnung gemäß Eurocode durchgeführt. Das Ziel war hierbei, eine Verteilungsfunktion zu finden, bei der sich für 100 Jahre Restnutzungsdauer eine Anprallkraft von 10 MN ergibt, da dies der Empfehlung des Eurocodes für die Schiffsklasse Vb entspricht, vgl. Tabelle C.3 in (*DIN EN 1991-1-7, 2010*). Die Parameter der Verteilungen für die Basisvariablen Schiffsmasse und Anprallgeschwindigkeit wurden iterativ so lange angepasst, bis eine Verteilungsfunktion gefunden wurde, die dieser Anforderung ausreichend genau entsprach. Sowohl der Mittelwert als auch die Standardabweichung der Schiffsmasse wurden hierbei zu 3000 t angenommen, die Anprallgeschwindigkeit wurde mit einem Mittelwert von 1,5 m/s bei einer Standardabweichung von 0,5 m/s angesetzt. Es soll hier nochmals betont werden, dass dies nicht basierend auf Statistiken erfolgte. Das Ziel ist vielmehr einen Vergleichswert zu haben, wie bei einer geringeren der Restnutzungsdauer als 100 Jahre die Stoßlast reduziert werden kann, sofern der Anfangswert bei 10 MN, wie im Eurocode empfohlen, liegt.

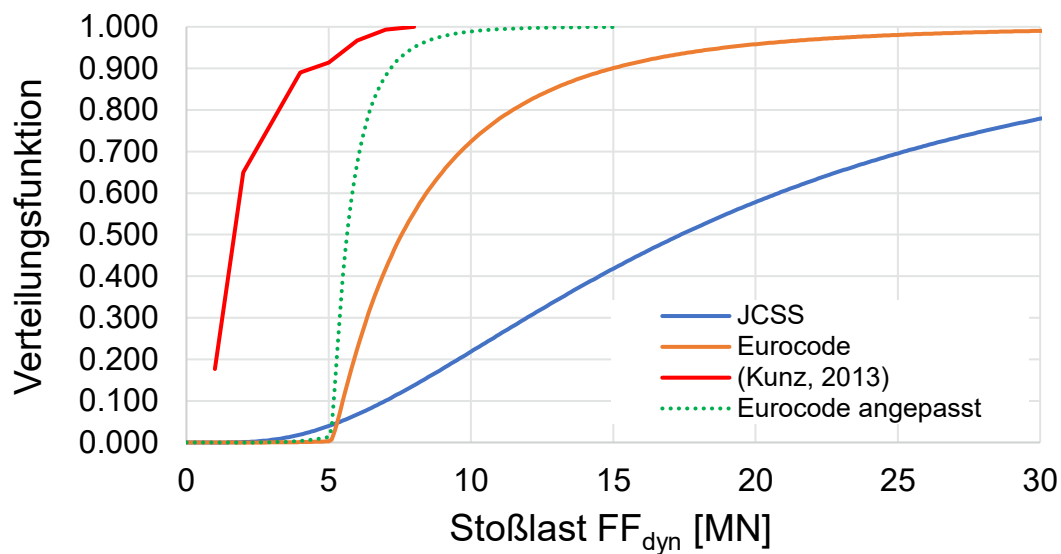


Bild 11: Verteilungsfunktionen der Anpralllasten nach JCSS, Eurocode und (Kunz, 2013)

Insgesamt sind die Stoßlasten gemäß Eurocode bzw. JCSS erheblich größer als die in (Kunz, 2013) ermittelten Stoßlasten. Auch die Verteilungsfunktion „Eurocode angepasst“ zeigt höhere Stoßlasten, wenngleich der Verlauf sehr ähnlich ist mit dem Verlauf in (Kunz, 2013). Dies hat wohl folgende Ursachen. Die Stoßlastverteilung (für Wasserstraßenklasse Vb) in (Kunz, 2013) wurden wohl zum Teil empirisch, durch (exemplarische) Schiffszählung, ermittelt und ist somit spezifischer. Der JCSS wiederum gibt eine eigene Gleichung zur Ermittlung der Anprallkraft vor und unterscheidet nicht zwischen elastischem und plastischem Bereich. Dadurch ergibt sich ein grundsätzlich anderer Verlauf der Stoßlastverteilung.

Bild 12 zeigt die Verteilungsfunktionen der Stoßlast in Form der dimensionslosen Darstellung der Verknüpfung von Lastmodell und Kollisionsmodell auf der vertikalen Achse. Die Darstellung entspricht Bild 9, ergänzt um Verteilungsfunktionen nach Eurocode und JCSS. Wiederum sind die gemäß Eurocode und JCSS ermittelten Stoßlasten viel höher als jene nach (Kunz, 2013), bzw. sind die Wiederkehrintervalle für gleiche Stoßlasten viel kürzer.

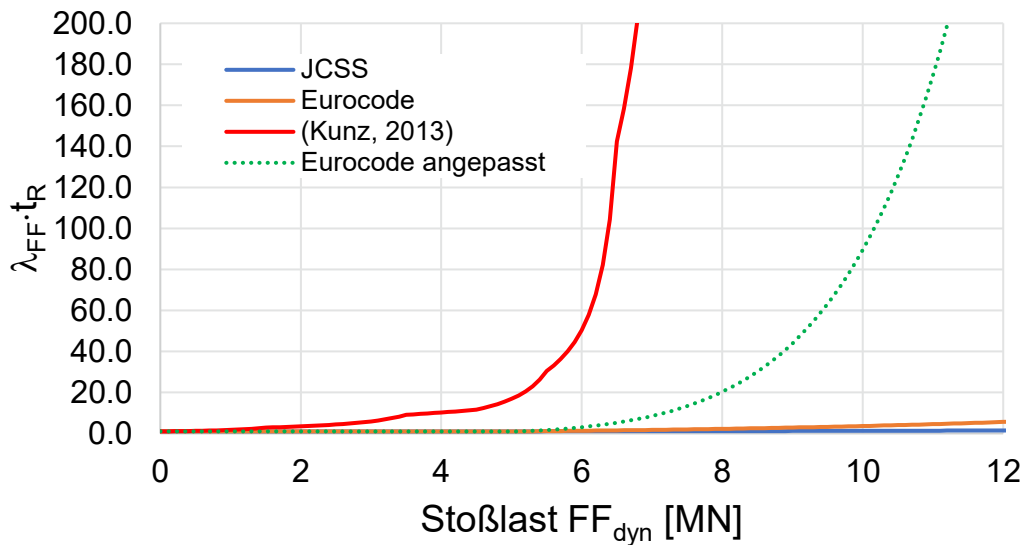


Bild 12: Verteilungsfunktionen der Anpralllasten (Verknüpfung Lastmodell und Kollisionsmodell) nach JCSS, Eurocode und (Kunz, 2013)

Bild 13 zeigt die restnutzungsdauerabhängige Anpassung der Anpralllasten, vgl. Bild 10. Bemerkenswert ist, dass die gemäß JCSS und Eurocode sowie (Kunz, 2013) ermittelten Werte keine so großen Unterschiede mehr aufweisen, wie dies in den Darstellungen in Bild 11 und Bild 12 der Fall war. Man erkennt auch, dass die Anpassungsfaktoren nach (Kunz, 2013) – im Vergleich zu den Ergebnissen, die man bei Verwendung der Angaben im Eurocode erhält – auf der konservativen Seite liegen.

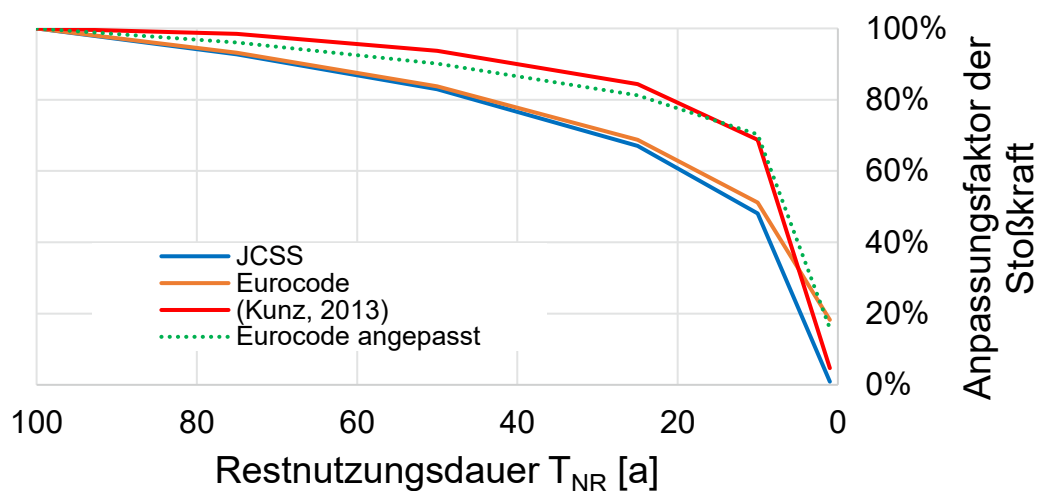


Bild 13: Anpassung der Anpralllasten nach Eurocode und (Kunz, 2013)

Äquivalenter Zuverlässigkeitsindex und Mindestzuverlässigkeit

In diesem Unterabschnitt wird der Frage nachgegangen, ob es grundsätzlich zulässig ist, die erforderliche Zuverlässigkeit auf die Restnutzungsdauer zu übertragen. Eine anschauliche Erklärung dazu gibt Claus Kunz in einem anderen Bericht für die Zeitschrift „Bautechnik“ (Kunz, 2015). Außerdem werden hier internationale Forschungsergebnisse analysiert, um zu ergründen, ob eine (jährliche) Mindestzuverlässigkeit einzuhalten ist und wie groß die Abminderung sein darf.

In (Kunz, 2015) schreibt Claus Kunz: „Das Restnutzungsdauerkonzept sieht für ein bestehendes Bauwerk die Übertragung der planungsmäßigen Gesamt-Versagenswahrscheinlichkeit beim Neubau auf die restliche Zeit $T_{RN} = (T_N - t)$ zu, wenn zu einem Zeitpunkt t kein Versagen eingetreten ist. Bei im Vergleich zum Neubau gleicher Gesamt-Versagenswahrscheinlichkeit erhöht sich dadurch die jährliche Versagenswahrscheinlichkeit zu“ (Kunz, 2015)

$$p_{f,TRN,1} = \frac{-\ln[-(\Phi(-\beta_{TN}) - 1)]}{T_{RN}} \quad (4.22)$$

mit

Φ = Standardnormalverteilung

β = Zuverlässigkeitsindex

T_N = planmäßige (Bemessungs-)Nutzungsdauer

T_{RN} = Restnutzungsdauer

Es kann ein äquivalenter Zuverlässigkeitsindex $\text{äqu. } \beta_{TRN}$ berechnet werden, indem die jährliche Versagenswahrscheinlichkeit für die Restnutzungsdauer auf 100 Jahre bezogen wird (Kunz, 2015):

$$\begin{aligned} \text{äqu. } \beta_{TRN} &= -\Phi^{-1}(100 * p_{f,TRN,1}) \\ &= -\Phi^{-1}\left(T_N * \frac{-\ln[-(\Phi(-\beta_{TN}) - 1)]}{T_{RN}}\right) \quad (4.23) \end{aligned}$$

Der erforderliche Zuverlässigkeitsindex β_{TRN} für die statische Bewertung eines Bauwerks mit einer Restlaufzeit $T_{RN} < 100a$ ist hier in Bild 14 dargestellt. „Das Grundprinzip für die Bewertung ist, dass die Zuverlässigkeit für die verbleibende Nutzungsdauer T_{RN} so eingerechnet wird, dass die ursprüngliche Gesamt-Versagenswahrscheinlichkeit $F_T(t)$, wie ursprünglich für den Neubau geplant, erhalten bleibt. Damit dürfte die sozial-adäquate Sicherheit aufrecht erhalten sein. (Kunz, 2015)“

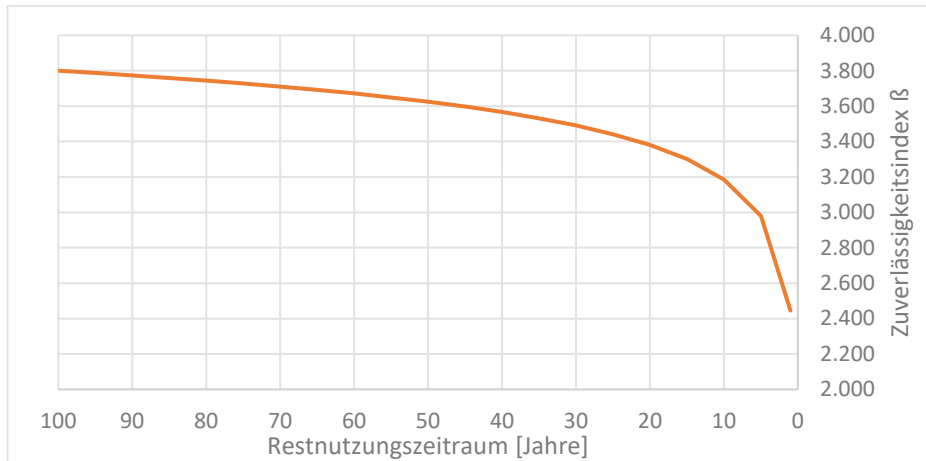


Bild 14: Äquivalenter Zuverlässigkeitsindex äqu. β_{TRN} für bestehende Bauwerke

Die grundsätzliche Zulässigkeit der Reduktion von Ziel-Zuverlässigkeiten bei bestehenden Bauwerken in Abhängigkeit ihrer Restnutzungsdauer wird von verschiedenen Autoren ebenso bejaht wie ihre allgemeine Sinnhaftigkeit (Bigaj-van Vliet & Vrouwenvelder, 2013; Sykora et al., 2017; Vrouwenvelder & Scholten, 2010). Einige Autoren sind der Frage nachgegangen, wie groß die Reduktion der Ziel-Zuverlässigkeit ausfallen darf bzw. soll. Eine übersichtliche Darstellung dieser Untersuchungen und Überlegungen bietet das *fib Bulletin 80: „Partial factor methods for existing concrete structures“* (Allaix et al., 2016). Daher soll dieses Bulletin als Maßstab für die in (Kunz, 2013) vorgeschlagenen Reduktionsfaktoren dienen.

Zur Beurteilung ist es sinnvoll, die Anpassung der Schiffsstoßlast aus Bild 10 und den äquivalenten Zuverlässigkeitsindex aus Bild 14 gemeinsam zu betrachten, siehe Bild 15. Die prozentuellen Reduktionen der Stoßlasten sind auf konsistente Weise hergeleitet worden (siehe oben), nämlich durch probabilistische Ermittlung der Anpralllasten gemäß jener Wiederkehrperiode, die zur Restnutzungsdauer äquivalent ist. Daher kann davon ausgegangen werden, dass die resultierenden äquivalenten Zuverlässigkeitsindizes ermittelt werden können, indem die jeweilige Restnutzungsdauer in Gleichung (4.23) eingesetzt wird. Dieses Vorgehen ist in Bild 15 dargestellt. Der äquivalente Zuverlässigkeitsindex wurde für drei Restnutzungsdauern ermittelt:

- für 100 Jahre, da dies der allgemeinen Nutzungsdauer von Neubaubrücken entspricht
- für 25 Jahre, da für den Flankenstoß bei einer Restnutzungszeit von 25 Jahren die größte Abminderung der Stoßlast erreicht ist (diese wurde auf 40% begrenzt)
- für 10 Jahre, da für den Frontalstoß bei einer Restnutzungszeit von 10 Jahren die größte Abminderung der Stoßlast erreicht ist (bei Restnutzungszeit mindestens 10 Jahre)

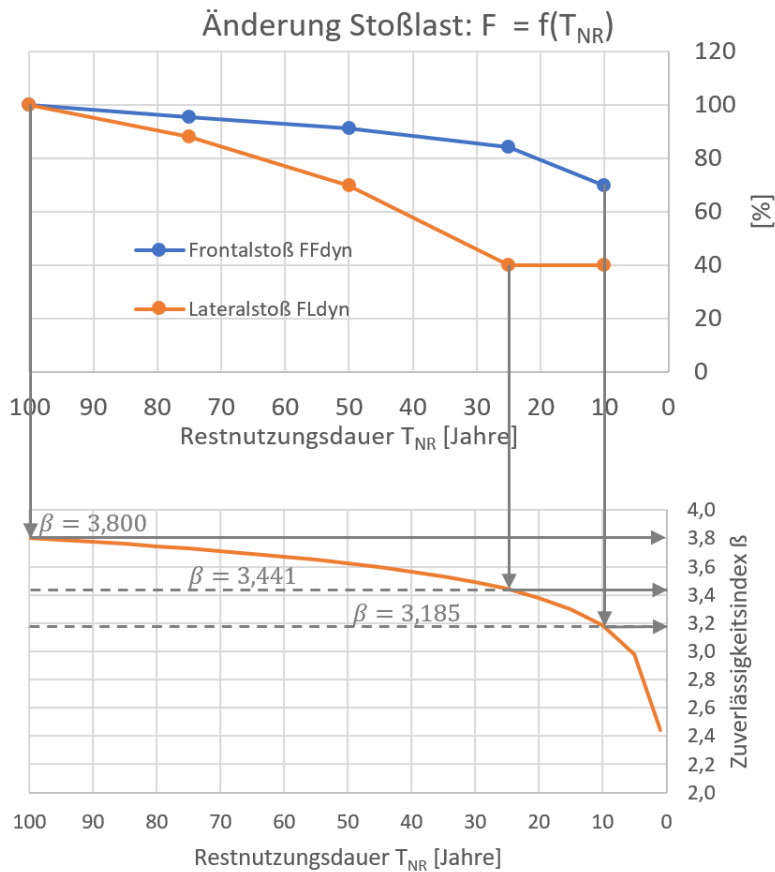


Bild 15: Anpassungen der Schiffsstoßlast und ihre Auswirkung auf den (äquivalenten) Zuverlässigkeitsindex

Es wird davon ausgegangen, dass die Zielzuverlässigkeit für Neubauten $\beta = 3,8$ ist. Dies entspricht dem Wert für Schadensfolgeklasse CC2 in (DIN EN 1990, 2021). Somit ergeben sich folgende Werte für β bzw. folgende Abminderungen bezüglich des Zuverlässigkeitsindex für einen Neubau, siehe Tabelle 6.

Restnutzungsdauer	Zuverlässigkeitsindex β	Reduktion im Vergleich zu Neubau
100 Jahre	3,8	-
25 Jahre	3,441	0,359
10 Jahre	3,185	0,615

Tabelle 6: Zuverlässigkeitsindizes für reduzierte Restnutzungsdauern

Diese Zuverlässigkeitsindizes, die den maximalen Reduktionen der Stoßlasten entsprechen, die sich gemäß dem vorgeschlagenen restnutzungsdauerabhängigen Verfahren ergeben, werden im Folgenden mit den Werten verglichen, die in (Allaix et al., 2016) empfohlen werden.

In (Allaix et al., 2016) wird zunächst versucht, den optimalen Zuverlässigkeitsindex in Abhängigkeit der Restnutzungsdauer mittels einer ökonomischen Optimierung zu ermitteln. Dazu werden Kosten abgeschätzt, die sich einerseits auf Verstärkungsmaßnahmen und

andererseits Ausfälle, Verletzte, Tote, Umweltauswirkungen und „psychologische Effekte“ (z.B. Vertrauensverlust) beziehen. Dabei werden verschiedene einschlägige Studien konsultiert, z.B. (Allen, 1991; R. D. J. M. Steenbergen et al., 2015; R. Steenbergen & Vrouwenvelder, 2010; Sykora et al., 2017), und man kommt zu dem allgemeinen Schluss: *“Various studies have shown that economic arguments lead to a significant reduction in the reliability level of existing structures.”*

In (Allaix et al., 2016) wird empfohlen, dass das Bauwerk zunächst anhand des Zuverlässigkeitsindex β_0 bewertet und dann gegebenenfalls auf den Wert β_{up} nachgerüstet werden solle. Für die minimale Zielzuverlässigkeit β_0 , unterhalb derer das Bauwerk verstärkt werden sollte, könne in den üblichen Fällen für den Grenzzustand der Tragfähigkeit eine Reduzierung der Zuverlässigkeitsindizes in Bezug auf die für neue Bauwerke akzeptierte Bemessungslebensdauer um etwa $\Delta\beta = 1,5$ angewendet werden. Hinsichtlich der Nachrüstung ergibt sich aus der ökonomischen Optimierung ein Zuverlässigkeitsindex, der gegenüber dem Neubau um etwa $\Delta\beta = 0,5$ niedriger liegt. Die in (Allaix et al., 2016) empfohlenen Reduktionswerte sind für alle Schadensfolgeklassen gleich, Tabelle 7 zeigt eine Übersicht. Die Ausgangswerte in Tabelle 7 stammen aus (DIN EN 1990, 2021) und beziehen sich auf die Gesamtlebensdauer von 50 bzw. 100 Jahren.

Schadensfolgeklasse	β_{up}	β_0
CC1	$3,3 - 0,5 = 2,8$	$3,3 - 1,5 = 1,8$
CC2	$3,8 - 0,5 = 3,3$	$3,8 - 1,5 = 2,3$
CC3	$4,3 - 0,5 = 3,8$	$4,3 - 1,5 = 2,8$

Tabelle 7: Zuverlässigkeitsindex für Bestandsbauwerke bezogen auf Grenzzustand der Tragfähigkeit, Abminderungen durch ökonomische Optimierung ermittelt, Werte aus (Allaix et al., 2016) entnommen.

Der Vergleich von Tabelle 6 mit Tabelle 7 zeigt, dass die hier vorgeschlagene restnutzungsdauerabhängige Reduktion der Stoßlasten durchweg zu geringeren Reduktionen der Zuverlässigkeit führt als die ökonomische Optimierung in (Allaix et al., 2016).

Neben der „ökonomischen“ Optimierung – welche gleichwohl auch Personenschäden berücksichtigt – wird in (Allaix et al., 2016) auch das „individuelle Risiko“ betrachtet. Die Wahrscheinlichkeit, bei einem Alltagsunfall zu sterben, betrage in entwickelten Ländern 10^{-4} pro Jahr (ISO 2394:2015-03, 2015). Es sei gesellschaftlich sicherlich nicht akzeptabel, dass die Wahrscheinlichkeit, bei einem Bauwerkseinsturz zu sterben, höher ist als erstere. Ein Wert zwischen 10^{-5} und 10^{-6} ist gemäß (Melchers, 2001) angemessen. (ISO 2394:2015-03, 2015) empfiehlt 10^{-6} . Die Schweizer Norm zur Beurteilung bestehender Bauwerke (SIA Norm 269, 2011) definiert das zulässige Niveau des individuellen Risikos mit 10^{-5} pro Jahr.

In (Allaix et al., 2016) erfolgt eine Berechnung der Ziel-Zuverlässigkeiten unter der Maßgabe des individuellen Risikos. Auf die Wiedergabe der einzelnen Berechnungsschritte wird hier verzichtet, aber die Ergebnisse sind in Tabelle 8 dargestellt. Für alle drei Schadensfolgeklassen ist die Ziel-Zuverlässigkeit angegeben, die sich aus dem Kriterium des individuellen Risikos ergibt (β_{IR}). In der dritten Spalte sind die für Neubauten geltenden Ziel-Zuverlässigkeiten gemäß (DIN EN 1990, 2021) aufgelistet. Der Referenzzeitraum ist jeweils ein Jahr. Die vierte Spalte zeigt die Differenzen der beiden vorigen Spalten. In der fünften Spalte sind diese Zuverlässigkeitsdifferenzen in Form von Wahrscheinlichkeiten

ausgedrückt. So gilt etwa für CC3, dass eine Ziel-Zuverlässigkeit von 3,9 eine 483 Mal höhere Eintrittswahrscheinlichkeit bedeutet als eine Ziel-Zuverlässigkeit von 5,2.

Schadens- folgeklasse	Ziel-Zu- verlässigkeit β_{IR}	β für Neubauten gemäß (DIN EN 1990, 2021)	Differenz aus- gedrückt in β	Differenz der Eintrittswahr- scheinlichkeit (Faktor)
CC3	$\beta_{IR} \geq 3,9$	$\beta = 5,2$	- 1,3	483
CC2	$\beta_{IR} \geq 3,6$	$\beta = 4,7$	- 1,1	122
CC1	$\beta_{IR} \geq 3,1$	$\beta = 4,2$	- 1,1	73

Tabelle 8: Jährliche Ziel-Zuverlässigkeiten unter Maßgabe des „individuellen Risikos“ gemäß (Allaix et al., 2016), mit Anpassungen

Nach Maßgabe des „individuellen Risikos“ dürfte eine Abminderung von β in Höhe von 1,3 bzw. 1,1 – je nach Schadensfolgeklasse – gegenüber der jeweiligen Ziel-Zuverlässigkeit gemäß (DIN EN 1990, 2021) vorgenommen werden. Die Ziel-Zuverlässigkeiten gemäß (DIN EN 1990, 2021) gelten für neue Bauwerke und an ihnen sind die Sicherheitsfaktoren des Eurocodes kalibriert. Sie stellen also jene (nominalen) Werte dar, die ein korrekt bemessenes Bauwerk einhalten sollte.

Für die Beurteilung des restnutzungsdauerabhängigen Verfahrens zur Abminderung der Anprallkräfte kann Folgendes festgehalten werden: Dieses Verfahren (siehe Bild 10 und Bild 15) sieht durchweg geringere Reduktionen der Ziel-Zuverlässigkeiten vor. Dies ist besonders anschaulich dann zu erkennen, wenn man die in Tabelle 8 gezeigten Zuverlässigkeits-Differenzen als Differenzen der Eintrittswahrscheinlichkeiten ausdrückt. Hier zeigt sich anschaulich, dass gemäß des Kriteriums des individuellen Risikos sehr große Unterschiede zu den Ziel-Zuverlässigkeiten gemäß (DIN EN 1990, 2021) zulässig wären. Die Eintrittswahrscheinlichkeiten liegen um die Faktoren 483, 122 bzw. 73 höher. Demgegenüber ergibt sich aus dem vorgeschlagenen „restnutzungsdauerabhängigen Verfahren“ eine Erhöhung der Eintrittswahrscheinlichkeit von maximal einem Faktor 10. Die Limitierung auf eine Restnutzungsdauer von 10 Jahren (= zehnmal geringer als die Nutzungsdauer bei Neubau von 100 Jahren) führt dazu, dass eine Reduktion der Anprallkräfte nicht weiter als auf jenes Niveau möglich ist, welches gemäß den vorgegebenen statistischen Verteilungen eine zehnmal kürzere Widerkehrperiode und somit eine zehnmal höhere Eintrittswahrscheinlichkeit hat als bei einem Neubau. Das restnutzungsdauerabhängige Verfahren ist also auch unter der Maßgabe des in (Allaix et al., 2016) beschriebenen „individuellen Risikos“ vertretbar.

4.3.4 Schlussbemerkungen

In (Kunz, 2013) wird eine restnutzungsdauerorientierte Vorgehensweise zur Bestimmung einer angepassten Schiffsstoßlast erläutert und zum Teil auch hergeleitet. Diese Vorgehensweise wurde ins (BAW-Merkblatt, 2010) aufgenommen und wird bei Bestandsbrücken im Zuständigkeitsbereich der BAW angewendet. Sie erlaubt eine Priorisierung schiffsstoßgefährdeter bestehender Brücken über Wasserstraßen, wobei sich aufwendige und ineffiziente Verstärkungen vermeiden lassen. Die Autoren der vorliegenden Fachveröffentlichung empfehlen die Übernahme dieser Vorgehensweise in die Nachrechnungsrichtlinie.

Die Sinnhaftigkeit von angepassten Schiffstoßlasten in Abhängigkeit von der Restnutzungsdauer kann durch mehrere Argumente begründet werden. Bei begrenzten finanziellen Ressourcen ist es grundsätzlich sinnvoller, Verstärkungsmaßnahmen an Bauwerken vorzunehmen, die noch länger genutzt werden als an solchen, die nur mehr eine kurze Nutzungszeit haben. Kunz schreibt dazu (Kunz, 2013): „Eine Priorisierung von sicherheitsgefährdeten Tragwerken an sich, auch mit weitergehenden risikoanalytischen Methoden, ist seit langem fester Bestandteil der modernen Sicherheitsphilosophie, die in einem Gesamtsystem „Bauwerksbestand“ bei begrenzten Ressourcen eine optimale Entscheidung treffen möchte und damit insgesamt zu einem Mehr an Gesamtsicherheit verhilft als eine lokale und ungerichtete Bauwerksbewertung erwarten lässt [...].“

Die Nachrüstung von bestehenden Bauwerken auf ein bestimmtes Zuverlässigkeitsniveau ist im Allgemeinen teurer als entsprechende Maßnahmen bei einem Neubau einzuplanen und vorzunehmen (Diamantidis & Sýkora, 2019). Vrouwenvelder und Scholten (Vrouwenvelder & Scholten, 2010) schreiben dazu: *“Increasing safety levels usually involves relatively more costs for an existing structure than for structures that are still in the design phase. The safety provisions embodied in the safety standards have also to be set off against the cost of providing them, and on this basis these improvements are more difficult to justify for existing structures. For this reason and under certain circumstances, a lower safety level is acceptable.”*

Darüber hinaus ist aus praktischen Gründen eine weitgehend einheitliche Vorgangsweise bei allen Straßenbrücken über schiffbare Flüsse in Deutschland anzustreben, unabhängig davon, in wessen Zuständigkeitsbereich sie sich befinden.

Die restnutzungsdauerabhängige Abminderung und die in (BAW-Merkblatt, 2010) dafür vorgeschriebene und in (Kunz, 2013) erläuterte Vorgehensweise sind grundsätzlich plausibel, konsistent und sinnvoll.

Konzeptionelle Probleme bereitet das prinzipielle Verschwinden der Stoßlast bei zu Null gehender Restnutzungsdauer. Kunz schlägt eine Untergrenze von 40% vor. Man sollte sich aber im Klaren sein, dass eine Reduktion der Stoßlast auf 40% des Wertes, welcher in (DIN EN 1991-1-7, 2010) bzw. (DIN EN 1991-1-7/NA, 2019) vorgeschrieben ist, praktisch nur beim Flankenstoß möglich ist. Für den in der Regel maßgebenden Frontalstoß wird praktisch maximal eine Reduktion auf 70% vorgenommen. Diese gilt für eine Restnutzungsdauer von 10 Jahren. Eine Berücksichtigung von noch kürzeren Restnutzungsdauern ist nicht sinnvoll.

Anhand diverser eigener Vergleichsrechnungen konnten die Autoren der vorliegenden Fachveröffentlichung zeigen, dass die resultierenden Abminderungsfaktoren bezüglich bestimmter Kriterien auf der sicheren Seite liegen. Insbesondere erfolgte auch ein Vergleich mit internationalen Studien und Empfehlungen zu Ziel-Zuverlässigkeiten für bestehende Bauwerke. Es konnte gezeigt werden, dass die vorgeschlagene restnutzungsdauerabhängige Stoßlast-Abminderung diesen Empfehlungen genügt.

Der Vollständigkeit halber sei darauf hingewiesen, dass es auch Ansätze in der Zuverlässigkeitsforschung sowie Regelwerke – etwa die neue (SIA Norm 269/8, 2017) – gibt, die unabhängig von Restnutzungsdauer, Ertüchtigungskosten und/oder bestehendem Erfüllungsgrad grundsätzlich stets eine Ertüchtigung auf die geforderte Zielzuverlässigkeit (wie bei einem Neubau) verlangen. Damit wird eine konstante jährliche Zielzuverlässigkeit eingefordert.

4.4 „Ermittlung von Schiffsstoßlasten für die Schutzböschungen vor der Rader Hochbrücke (A7)“

4.4.1 Einleitung

Der Nord-Ostsee-Kanal ist eine der wenigen deutschen Wasserstraßen, die auch von Seeschiffen befahren werden kann. Das in diesem Abschnitt vorgestellte Gutachten (Kunz, 2019) mit dem Titel „Ermittlung von Schiffsstoßlasten für die Schutzböschungen vor der Rader Hochbrücke (A7) NOK-km 68,1“ wurde von Claus Kunz 2019 für das Bundesamt für Wasserbau (BAW) verfasst und verfolgt das Ziel, den Lastfall Schiffsanprall bei der neu zu errichtenden Rader Hochbrücke zu untersuchen.

Für die Rader Hochbrücke ist ein Ersatzneubau geplant. Die bestehende Rader Hochbrücke ist seit etwa den 1990er Jahren durch den Pfeilern vorgelagerte Schutzböschungen gegen Schiffsanprall gesichert. Ziel des in diesem Abschnitt vorgestellten Gutachtens (Kunz, 2019) war es, diese Art der Sicherung für den Neubau zu überprüfen bzw. anzupassen. Im Auftrag der DEGES (Deutsche Einheit Fernstraßenplanungs- und Bau GmbH) ermittelte die BAW (Bundesanstalt für Wasserbau) im Rahmen einer Einzelfall-Betrachtung die Schiffsanpralllasten auf der Grundlage (Methodik) der (DIN EN 1991-1-7, 2010) ortsbezogen. Dabei wurden Flottenstruktur, Schiffsdurchgänge, Geschwindigkeiten, Unfallaufkommen und nautische Verhältnisse analysiert und die Anpralllasten für die Schutzböschung mittels eines Last- und Kollisionsmodells ermittelt. Eine Betrachtung hinsichtlich der geometrischen Sicherheit bei havarierenden Schiffen wurde nach den verfügbaren Unterlagen vorgenommen.

Da es sich um eine künstliche Wasserstraße handelt, deren Breite gerade dafür ausreichen soll, dass Schiffe der vorgesehenen Größe durchfahren können, wäre es nicht sinnvoll, Pfeiler im Flussbett zu errichten. Die zehn Brücken, auf denen insgesamt acht Straßen- und vier Eisenbahnstrecken den Kanal überqueren, überspannen den Kanal dementsprechend ohne Flusspfeiler. Gleichwohl verfügen einige Brücken über Pfeiler, die nahe am Ufer errichtet sind und daher vom Bug eines Schiffes oder vom Impuls eines Anpralls eines Schiffes an eine vorgelagerte Böschung getroffen werden können. Bis zu einem gewissen Grad ist auch eine „Aufschiebung“ eines schnell fahrenden Schiffes auf eine eher flache Böschung möglich. Alle Brücken haben die gleiche Durchfahrtshöhe von 42 Metern.

Dieses Gutachten stellt in Bezug auf deutsche Wasserstraßen in zweierlei Hinsicht einen Sonderfall dar:

- Verkehr von Seeschiffen
- individuelle probabilistische Ermittlung von Kollisionsrate und Anpralllast aufgrund der Flottenstruktur

und wird deshalb hier vorgestellt.

4.4.2 Wasserstraße und Bauwerk

Nord-Ostsee-Kanal

Im Gutachten wurde die Flottenstruktur für den Nord-Ostsee-Kanal, Ostroute, zum Stand 2006 den Berechnungen zugrunde gelegt. Danach verteilen sich die Schiffstypen wie in Tabelle 9 dargestellt.

Schiffstyp	Anzahl	Anteil [%]
Bulk	256	1,6
Container	3249	20,6
General Cargo	8362	53
Passagier	416	2,6
RoRo	1128	7,2
Gastanker	95	0,6
Öltanker	1897	12
Sonstige	377	2,4
Summe	15770	100

Tabelle 9: Flottenstruktur auf der Nord-Ostsee-Kanal-Ostroute, entnommen aus (Kunz, 2019)

Die Grundlage für die weiteren Hochrechnungen bildete jedoch die Verteilung der Schiffsgrößen, siehe Tabelle 10.

V [DWT]	Du. V [DWT]	Anzahl 2006 / Ri.	2006: Anteil in %	2006: Σ -Anteil in %
< 2500	1250	2423	15,4	15,4
< 5000	3750	6266	39,8	55,2
< 7500	6250	2493	15,75	70,95
< 10000	8750	2094	13,25	84,2
< 12500	11250	1104	7,03	91,23
< 15000	13750	546	3,43	94,66
< 17500	16250	254	1,63	96,29
< 20000	18750	281	1,83	98,12
< 22500	21250	56	0,35	98,47
< 25000	23750	56	0,35	98,82
< 27500	26250	28	0,15	98,97
< 30000	28750	26	0,15	99,12

< 32500	31250	47	0,3	99,42
< 35000	33750	31	0,2	99,62
< 37500	36750	20	0,1	99,72
< 40000	38750	18	0,1	99,82
< 42500	41250	16	0,1	99,92
< 45000	43750	12	0,08	100
Summe		15570	100	

Tabelle 10: Nord-Ostsee-Kanal: Schiffsgrößenverteilung für 2006; DWT = ton dead weight, entnommen aus (Kunz, 2019)

Demnach weist das Durchschnittsschiff eine Größe von 6252 DWT auf.

Rader Hochbrücke

Seit etwa 1990 ist an der bestehenden Rader Hochbrücke zur Sicherung gegen Schiffsanprall der nicht auf Schiffsanprall bemessenen Pfeiler eine Schutzböschung aus geschütteten Steinen vorhanden. Die neue Brücke soll den Nord-Ostsee-Kanal mit einer Stützweite von 224 m überbrücken.

4.4.3 Die Einwirkung Schiffsanprall

In (Kunz, 2019) wird allgemein bemerkt: „Die physikalische Ermittlung der Stoßbelastung basiert auf der Deformationsenergie im anprallenden Schiff. Für den Frontalstoß wird als Annahme von der vollständigen Dissipation der Bewegungsenergie ausgegangen, für den Flankenstoß wird die Deformationsenergie auf der Basis der anfänglichen Bewegungsenergie aus einer Stoßimpulsberechnung bei Kollision berechnet. Der Bestimmung der Stoßlasten liegt eine empirisch-analytisch bestimmte Last-Verformungs-Beziehung für Seeschiffe zugrunde (Pedersen & Zhang, 1998), (*DIN EN 1991-1-7*, 2010).“

In (Kunz, 2019) wird die Last-Energie-Beziehung für **Seeschiffe** nach den Gleichungen in Abschnitt C.4.4 „Weitergehende Anpralluntersuchungen für Schiffe auf Seewasserstraßen“ in (*DIN EN 1991-1-7*, 2010) herangezogen. Das getroffene Bauwerk wird demgegenüber als starrer Baukörper angenommen, was baudynamisch zu maximalen Lasten führt (Kunz, 2019).

Für die Bestimmung der Anpralllasten mit probabilistischen Methoden können gemäß (*DIN EN 1991-1-7*, 2010), C4.4(2), probabilistische Modelle der Basisvariablen benutzt werden, die die Verformungsenergie oder das Anprallverhalten des Schiffes bestimmen. Es wird sowohl der Frontalstoß als auch der Flankenstoß untersucht.

„Flottenstruktur und Wasserstraßenverkehr werden durch Verteilungen beschrieben, auf deren Grundlage später eine wahrscheinlichkeitstheoretische Bestimmung der Stoßenergie und damit der Stoßlast erfolgt. Die einzelnen Parameter werden dabei nach der direkten Integrationsmethode verknüpft. Die ermittelten Stoßlasten werden als

Summenfunktion der relativen Häufigkeit aufbereitet, die wiederum im Sinne des klassischen Wahrscheinlichkeitsbegriffes als Wahrscheinlichkeit interpretiert werden.“ (Kunz, 2019)

„Das mögliche Eintreten einer Kollision selbst wurde auf der Grundlage einer Strecken-Unfallrate als Wahrscheinlichkeits-Ereignis modelliert.“

„Der repräsentative Wert dieser außergewöhnlichen Einwirkung „Schiffsstoß“ wird nach einschlägiger Vorgehensweise, vgl. (Pedersen & Zhang, 1998), mit einer Überschreitungswahrscheinlichkeit der Stoßenergie bzw. der Stoßlast von $p = 10^{-4}/a$ bestimmt. Die Wiederkehrperiode t_r als die für den Bemessungswert zugrunde zulegende Zeit zwischen den akzeptablen Bemessungs-Schiffsstoß-Ereignissen bestimmen sich zu $1/(p = 10^{-4}/a) = 10.000$ a. (Pedersen & Zhang, 1998) gehen bei Brückenbauwerken gemäß (DIN EN 1990, 2021) von einer Nutzungsdauer von $T_N = 100$ a aus. Als Prognosejahr für die Hochrechnung wird daher das Jahr $2025 + 100 = 2125$ gewählt.“

Bei der Ermittlung der Stoßlast-Verteilungsfunktion werden nicht nur die erhobenen Verkehrsdaten berücksichtigt, sondern auch eine Prognose der Verkehrsentwicklung über die Nutzungszeit vorgenommen.

Die Ermittlung der „Fehlerrate“ basiert auf Unfalldaten. Die Verknüpfung der Fehlerrate mit einem geometrischen Kollisionsmodell führt auf die Kollisionsrate. Die Vorgangsweise ist hierbei jener der amerikanischen Norm (AASHTO, 2009) sehr ähnlich.

Weitere berücksichtigte Parameter:

- Geschwindigkeitsverteilung
- Wahrscheinlichkeitsverteilung für Anfahrwinkel
- Wahrscheinlichkeitsverteilung für Schwerefaktor. Diese dient zur Berücksichtigung des Umstandes, dass nicht jede Schiffskollision mit der mechanisch möglichen maximalen Stoßwirkung verbunden ist. Ursachen dafür können sein: Bugformen, die weniger steif sind als der den Betrachtungen zugrundeliegende Bug oder etwa eine gegenüber der Fahrgeschwindigkeit erfolgte Reduzierung der Geschwindigkeit. Für den Schwerefaktor wird eine Lognormalverteilung angenommen, wobei gilt:
 - Schwerefaktor = 1,0: wird von 1% aller Fälle erreicht oder überschritten
 - Schwerefaktor = 0,1: wird von 99% aller Fälle erreicht oder überschritten
- Reibungsbeiwert (deterministisch) $\mu = 0,4$

Verteilungen und Integrale werden numerisch berechnet.

Daraus folgen schließlich gemäß dem geforderten Sicherheitsniveau (Überschreitungswahrscheinlichkeit $p = 10^{-4}/a$) die für einen Standsicherheits- und Tragsicherheits-Nachweis prinzipiell anzusetzenden Einwirkungen. Bei diesen handelt es sich um dynamische Stoßlasten; sie sind in Tabelle 11 gelistet.

Bauteil	FFdyn [MN]	FLdyn [MN]
Böschung "130"	37,5	14,5
Böschung "140"	36,4	14

Tabelle 11: Dynamische Stoßlasten für die Böschungen der neuen Rader Hochbrücke, aus (Kunz, 2019)

Da es sich bei den untersuchten Schutzböschungen um massige oder erdhinterfüllte Bauteile handelt, wird ein dynamischer Lastfaktor von nur 1,1 angewandt.

Es wird auch darauf hingewiesen, dass eine genauere dynamische Einwirkungs-Tragwerk-Analyse in der Regel eine wirtschaftlichere Bemessung ermögliche. Diese setze aber die Kenntnis der Stoßlast-Zeit-Funktion voraus. Es werden Hinweise gegeben, wie diese aus der probabilistisch ermittelten Bemessungsstoßenergie und den Gleichungen für Seeschiffe im Eurocode berechnet werden kann.

Einwirkungen auf den Überbau seien gemäß (*DIN EN 1991-1-7*, 2010), 4.6.3., mit einer statischen äquivalenten Anpralllast von $F = 1 \text{ MN}$ zu anzusetzen, da über die Höhenkontrolle an den Eingangsschleusen reguläre Aufbauten nicht stoßen könnten, sondern allenfalls Maste oder zuvor „losgelöste“ Krangeschirre bzw. Ausrüstungsteile des Schiffes.

Nach diesen Berechnungen werden in (Kunz, 2019) Empfehlungen für die Dimensionierung der Schutzböschung für den Brückenneubau gegeben.

4.4.4 Zusammenfassung

Das in diesem Abschnitt präsentierte Gutachten (Kunz, 2019) der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) zu den „Schiffsstoßlasten für die Schutzböschung“ für eine geplante Brücke über den Nord-Ostsee-Kanal stellt eine Besonderheit dar. Der Kanal wird regelmäßig von Schiffen sehr unterschiedlicher Größe befahren, insbesondere auch von Seeschiffen. Man hat sich entschlossen, die Berechnung der Anpralllast auf probabilistischer Basis durchzuführen. Dazu war es notwendig, eine Erhebung der verkehrenden Schiffe und nachfolgend eine Kategorisierung nach Größenklassen (in DWT) vorzunehmen. Es wurde auch der zukünftige Schiffsverkehr prognostiziert. Zudem wurde eine genaue Erhebung aller weiteren wesentlichen deterministischen oder probabilistischen Einflussparameter vorgenommen. Schließlich wurden mit den gegebenen Parametern die anzusetzenden Einwirkungen für Standsicherheits- und Tragfähigkeitsnachweise geführt, mit Maßgabe einer Überschreitungswahrscheinlichkeit der Stoßlast von $p = 10^{-4}/a$.

4.4.5 Schlussbemerkungen

Das präsentierte Gutachten zeigt sehr klar und anschaulich, wie eine probabilistische Ermittlung einer Einwirkung (Stoßlast) aus einer gegebenen Flottenstruktur erfolgen kann, sodass eine bestimmte Überschreitungswahrscheinlichkeit erreicht wird. Im Gegensatz zur Dissertation von Dirk Proske (Proske, 2003) wird nur eine probabilistische Ermittlung der *Einwirkungen* vorgenommen. Die Eigenschaften des getroffenen Objektes, also der Böschung und der Brücke, welche die Widerstandsgrößen darstellen, werden als deterministisch bekannt angenommen. Dies vereinfacht die Berechnung enorm. Dennoch ist allein schon die probabilistische Ermittlung der Einwirkungen sehr aufwendig und kompliziert,

wie man in (Kunz, 2019) erkennen kann. Dies liegt u.a. daran, dass in (Kunz, 2019) mehrere weitere Parameter objektspezifisch und meist auch probabilistisch ermittelt wurden. Die Vorgehensweise orientierte sich zwar an den allgemein gehaltenen Vorschriften des Eurocode (*DIN EN 1991-1-7*, 2010), war aber inhaltlich der Vorgehensweise nach Methode II im AASHTO-Code (*AASHTO*, 2009) sehr ähnlich.

Die Autoren der vorliegenden Fachveröffentlichung schlussfolgern, dass eine individuelle probabilistische Ermittlung der Anpralllasten wie in (Kunz, 2019) im Regelfall zu aufwendig ist. Mit „Regelfall“ sind hierbei insbesondere Flussbrücken gemeint. Der Schiffsverkehr auf Flüssen besteht in Deutschland praktisch ausschließlich aus Binnenschiffen, deren Massenverteilung wesentlich weniger streut als bei Seeschiffen. Die Anwendung genauerer Verfahren wie in (Kunz, 2019), die insbesondere auch objektspezifische und lokale Gegebenheiten, Beobachtungen und Prognosen beinhalten, erscheint eher dann sinnvoll, wenn Situationen untersucht werden sollen, die nicht vollständig von Normen geregelt sind oder wenn Nachweise mit herkömmlichen Verfahren nicht erbracht werden können und dadurch untragbar hohe Kosten für Maßnahmen entstehen würden. Eine solche Vorgehensweise ist entsprechend der Stufe 4 der Nachrechnungsrichtlinie nach Absprache mit der Baubehörde möglich.

4.5 Vergleich mit Erdbebeningenieurwesen

4.5.1 Einleitung

Der Lastfall Schiffsanprall hat viele Gemeinsamkeiten mit dem Lastfall Erdbeben. In beiden Fällen handelt es sich um sehr seltene Ereignisse – und dementsprechend um „außergewöhnliche Einwirkungen“ –, die jedoch verheerende Folgen haben können. In beiden Fällen spielen daher die Untersuchung der Eintrittswahrscheinlichkeit und weiterer probabilistischer Aspekte eine große Rolle. In beiden Fällen gibt es erst seit wenigen Jahrzehnten spezifische Bau Normen. Dementsprechend gibt es einen großen Bestand an älteren Bauwerken, deren Sicherheit gegenüber diesen beiden Einwirkungen nicht dem Stand der neusten Normen entspricht bzw. unklar ist. Aufgrund dieser Gemeinsamkeiten ist ein Vergleich mit dem Erdbebeningenieurwesen sinnvoll, zumal es sich dabei um ein gut erforschtes Teilgebiet der Bauingenieurwissenschaften handelt.

Die Ertüchtigung aller Gebäude und Bauwerke auf die Erdbebensicherheit gemäß den aktuellen Normen ist in vielen Gebieten mit einem großen Bestand an älteren Bauwerken und einer zumindest mäßigen Seismizität aus wirtschaftlichen und logistischen Gründen kaum möglich – zumindest kurz- und mittelfristig nicht. Aus diesem Grund wurden in einigen Ländern spezifische Vorschriften zur Erdbebensicherheit bestehender Gebäude entwickelt. Besonders hervorzuheben ist dabei das „Merkblatt SIA 2018 „Überprüfung bestehender Gebäude bezüglich Erdbeben“ des Schweizer Ingenieur- und Architektenverein (*SIA Merkblatt 2018*, 2004) sowie dessen Nachfolgedokument (*SIA Norm 269/8*, 2017).

4.5.2 Ermittlung des seismischen Risikos

Das seismische Risiko an einem Standort kann mittels seismologischer Untersuchungen sehr genau ermittelt werden. Eine moderne Methode, die auch die inhärenten Unsicherheiten dieses Naturphänomens erfasst, wird *Probabilistic Seismic Hazard Analysis* (PSHA) genannt. Sie geht auf eine Veröffentlichung von Cornell im Jahr 1968 (Cornell, 1968) zurück und umfasst vier Schritte (siehe dazu Bild 16):

Identifizierung der Erdbebenquellen: Die Arten der Quellen können von kleinen Flächenverwerfungen bis hin zu großen tektonischen Feldern reichen. Für jede Quelle werden die Entfernungen Quelle-Standort berechnet.

Berechnung von Wiederkehrperioden: Im Gegensatz zu deterministischen Analysen, wobei versucht wird, für jede Quelle ein maßgebendes oder maximales Erdbeben für jede Quelle zu bestimmen, wird jede Quelle durch eine Erdbeben-Wahrscheinlichkeitsverteilung oder einfach durch eine Wiederkehrperiode in Abhängigkeit der Magnitude charakterisiert.

Bestimmung der Abschwächung: Die Abschwächung der Bodenbewegungen, definiert durch ein geeignetes Intensitätsmaß, z.B. maximale Bodenbeschleunigung (*peak ground acceleration*, PGA), kann in Abhängigkeit der Entfernung bestimmt werden. Dabei werden verschiedene Magnituden betrachtet.

Seismischen Gefährdung: Für einen Standort kann die seismische Gefährdung schließlich in einem Diagramm mit folgenden Achsen angegeben werden: Auf der horizontalen Achse wird ein geeignetes Intensitätsmaß aufgetragen, z.B. maximale Bodenbeschleunigung, PGA. Die vertikale Achse zeigt die Überschreitungswahrscheinlichkeit (z.B. pro Jahr) an.

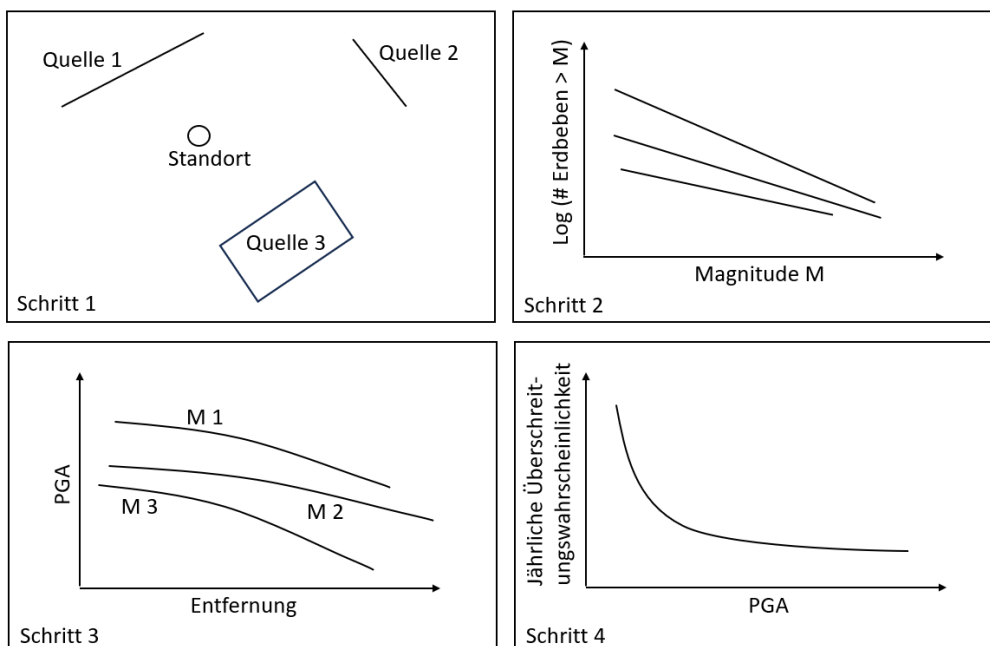


Bild 16: Probabilistic Seismic Hazard Analysis: Ermittlung des seismischen Risikos für einen Standort

Neben seismologischen Untersuchungen können auch historische Daten zu Erdbeben herangezogen werden, um die Gefährdung für einen Standort abzuschätzen.

Speziell für das Bauwesen können dann Antwortspektren entwickelt werden, die die maximale Schwingungsantwort eines Systems in Abhängigkeit von seiner Eigenfrequenz angeben. Den Spektren liegt die Erdbebengefährdung des interessierenden Standorts zugrunde, als Referenzzeitraum (Wiederkehrperiode) werden zumeist 475 Jahre gewählt. Weitere Faktoren können berücksichtigt werden, v.a. spezielle Bodeneigenschaften, die die Bodenbewegungen intensivieren können, aber auch bauwerksseitige (widerstandsseitige) Faktoren, wie Dissipationsvermögen oder Bedeutungskategorie.

Obwohl das Erdbeben ein höchst zufälliges Naturereignis darstellt, kann die Erdbebengefahr dank der modernen Methoden für einen definierten Standort *im probabilistischen Sinn* sehr genau angegeben werden. Somit ist es möglich, in den Baunormen Bemessungseinwirkungen anzugeben, die auf sich auf eine bestimmte Eintrittswahrscheinlichkeit (pro definierter Wiederkehrperiode) beziehen. Auch die Festlegung von Einwirkungsparametern ist bei Erdbeben relativ einfach: Oft genügt ein einziger Wert eines geeigneten Intensitätsmaßes (z.B. spektrale Beschleunigung), um die Erdbebengefährdung für den Standort eines Bauwerks zu definieren.

Im Fall des Schiffsanpralls ist die Ermittlung der Gefährdung für eine bestimmte Brücke wesentlich schwieriger. Eine Ermittlung mit naturwissenschaftlichen Methoden wie bei *Probabilistic Seismic Hazard Analysis* ist nicht möglich. Die bestehenden Vorschriften beruhen stattdessen auf empirischen Beobachtungen, also auf Zählungen von Schiffsanprallen in der Vergangenheit. Wenn man die Anzahl der Unfälle auf einen Zeitraum und ein bestimmtes Gebiet – oder besser: einen konkreten Fluss – bezieht, kann eine Anprallwahrscheinlichkeit berechnet werden. Eine Spezifizierung für bestimmte Gegebenheiten kann schließlich durch Berücksichtigung von Faktoren erfolgen. Diese können entweder implizit in den Vorschriften berücksichtigt werden oder dem Anwender zur Verfügung gestellt werden, um möglichst viele Besonderheiten der zu untersuchenden Brücke berücksichtigen zu können.

Die Anzahl der vorgefallenen Schiffsanpralle, die für diese Zwecke herangezogen werden kann, ist jedoch sehr klein, siehe Abschnitt 4.2.2, insbesondere wenn eine örtliche oder zeitliche Präzisierung (z.B. letzte 10 Jahre oder ein bestimmter Fluss) stattfinden soll, oder, wenn nur schwere Unfälle betrachtet werden. Zudem spielen – im Unterschied zur Erdbebengefährdung – menschliche Faktoren (z.B. Navigierfehler) eine große Rolle. Für den Lastfall „Schiffsanprall“ ist daher viel schwieriger, eine zutreffende Abschätzung der Eintretenswahrscheinlichkeit abzugeben.

4.5.3 Überprüfung bestehender Gebäude bezüglich Erdbeben (SIA, Schweiz)

Das Merkblatt SIA 2018 „Überprüfung bestehender Gebäude bezüglich Erdbeben“ (SIA Merkblatt 2018, 2004) wurde 2004 veröffentlicht. Mit dem Merkblatt sollte ein Instrument geschaffen werden, um zu überprüfen, ob ein bestehendes Gebäude die heutigen Erdbebenbestimmungen in den Schweizer SIA-Tragwerksnormen erfüllt.

Thomas Wenk beschreibt die Grundzüge des Merkblattes in (Wenk, 2008) wie folgt:

„Falls das bestehende Gebäude die heutigen Normen nicht voll erfüllt, besteht laut (SIA Merkblatt 2018, 2004) nicht automatisch die Verpflichtung, Ertüchtigungsmaßnahmen umzusetzen. Anhand der Kosten baulicher Maßnahmen ist im konkreten Einzelfall abzuklären, ob diese in Bezug auf die zu erwartende Risikoreduktion *verhältnismäßig* beziehungsweise *zumutbar* sind. Dazu enthält (SIA Merkblatt 2018, 2004) die erforderlichen Regeln der risikobasierten Beurteilung der Erdbebensicherheit. Im ersten Schritt der Überprüfung, der sogenannten Zustandserfassung, ist der Erfüllungsfaktor α_{eff} das wichtigste Resultat. Er beschreibt mit einer Zahl in welchem Maß die Anforderungen an Neubauten bezüglich Erdbebensicherheit gemäß den geltenden SIA-Tragwerksnormen erfüllt sind. Dazu wird der normengemäße Widerstand beziehungsweise das Verformungsvermögen R_d den normengemäßen Auswirkungen E_d der Bemessungssituation Erdbeben gegenübergestellt:

$$\alpha_{eff} = \frac{R_d}{E_d} \quad . \quad (4.24)$$

Erreicht der Erfüllungsfaktor α_{eff} eines bestehenden Gebäudes einen Wert größer oder gleich eins ($\alpha_{eff} \geq 1,0$ oder 100 %), werden die normengemäßen Anforderungen für Neubauten vollständig erfüllt. Dieser Fall ist weiter kein Problem, und der Ist-Zustand kann als genügend erdbebensicher akzeptiert werden. Bei bestehenden Bauten ist der Erfüllungsfaktor α_{eff} jedoch meist kleiner als eins, das heißt die Anforderungen an Neubauten werden nur zum Teil erfüllt. Die Notwendigkeit von Ertüchtigungsmaßnahmen ist demnach aufgrund risikobasierter Entscheidungskriterien abzuklären [...]. Maßgebend für die Gesamtbeurteilung der Erdbebensicherheit ist der kleinste Wert der Erfüllungsfaktoren α_{eff} von allen betrachteten Bauteilen des Gebäudes.

Für bestehende Gebäude ist grundsätzlich der normengemäße Zustand für Neubauten zu erreichen, das heißt, es sollte ein Erfüllungsfaktor α_{eff} größer als eins erzielt werden. Ursachen die zur Erreichung dieses Zustands erforderlichen Ertüchtigungsmaßnahmen unverhältnismäßige Kosten, sind gemäß (*SIA Merkblatt 2018, 2004*) Maßnahmen so weit zu ergreifen, als sie noch *verhältnismäßig* beziehungsweise *zumutbar* sind. Im Rahmen der Überprüfung eines bestehenden Bauwerks wird aufgrund betrieblicher und wirtschaftlicher Betrachtungen eine *Restnutzungsdauer* als Zeitspanne festgelegt, über die Tragsicherheit und die Gebrauchstauglichkeit sichergestellt sein sollen. Sie liegt bei Gebäuden typischerweise im Bereich von 20 bis 50 Jahren. Am Ende der Restnutzungsdauer wird eine weitere Überprüfung fällig. Bezüglich der Notwendigkeit von Maßnahmen zur Erdbebenertüchtigung werden je nach Größe des Erfüllungsfaktors α_{eff} , der Bauwerksklasse des Gebäudes folgende drei Fälle unterschieden:

- 1) Fällt der Erfüllungsfaktor α_{eff} bei der BWK I oder II unter den unteren Schwellenwert $\alpha_{min} = 0,25$, wird das Individualrisiko als nicht mehr akzeptierbar betrachtet, und es werden Ertüchtigungsmaßnahmen erforderlich, soweit deren Kosten zumutbar bleiben.

Rettungskosten, die höchstens 100 Millionen Franken pro gerettetes Menschenleben betragen, werden als zumutbar betrachtet. Kann auch mit zumutbaren Kosten kein akzeptierbares Individualrisiko erreicht werden, so ist das Risiko mit betrieblichen Maßnahmen zu beschränken.

Bei BWK III ist der untere Schwellenwert mit $\alpha_{min} = 0,40$ höher angesetzt. Eine minimale Funktionstüchtigkeit des Gebäudes im Rahmen der Katastrophenbewältigung soll dadurch sichergestellt werden.

- 2) Liegt der Erfüllungsfaktor α_{eff} zwischen den Schwellenwerten α_{min} und α_{adm} , sind die Personenrisiken durch Ertüchtigungsmaßnahmen zu reduzieren, soweit deren Kosten verhältnismäßig bleiben. Rettungskosten von maximal 10 Millionen Franken pro gerettetes Menschenleben werden als verhältnismäßig betrachtet.
- 3) Übersteigt der Erfüllungsfaktor α_{eff} den oberen Schwellenwert α_{adm} , so kann der bestehende Zustand akzeptiert werden.

Die Verhältnismäßigkeit und die Zumutbarkeit einer Maßnahme zur Erdbebenertüchtigung werden gemäß (*SIA Merkblatt 2018, 2004*) durch eine Gegenüberstellung von Kosten und Nutzen unter Berücksichtigung der Sicherheitsansprüche des Individuums beurteilt. Bei den Kosten werden die Maßnahmenkosten zur Erhöhung der Erdbebensicherheit unter dem Begriff Rettungskosten erfasst. Beim Nutzen wird die Reduktion der Personenrisiken in Form von vermiedenen Todesopfern betrachtet. Als verhältnismäßig gelten Maßnahmen mit Rettungskosten bis 10 Millionen Franken und zumutbar mit Rettungskosten bis 100 Millionen Franken pro gerettetes Menschenleben.

Die Abgrenzung zwischen Verhältnismäßigkeit und Zumutbarkeit erfolgt aufgrund des Individualrisikos, das heißt der Wahrscheinlichkeit, mit der eine einzelne Person, die sich rund um die Uhr im Gebäude aufhält, infolge Erdbebens den Tod erleidet. Das Individualrisiko ist akzeptierbar, wenn es den Wert 10^{-5} pro Jahr nicht überschreitet. Bei einem Erfüllungsfaktor α_{eff} größer als 0,25 ist dies der Fall.

Die Risikoreduktion wird aus der Erhöhung des Erfüllungsfaktors infolge der betrachteten Maßnahme und der Personenbelegung des Gebäudes berechnet. Die Personenbelegung wird als Mittelwert der sich über ein Jahr im Gebäude aufhaltenden Personen bestimmt. Oft ergeben sich mehrere Ertüchtigungsvarianten mit verhältnismäßigen oder zumutbaren Kosten. Für die bauliche Umsetzung sollte diejenige Variante ausgewählt werden, die den höchsten Erfüllungsfaktor erzielt.“

Diese ausführliche Beschreibung von (*SIA Merkblatt 2018, 2004*) durch Thomas Wenk (Wenk, 2008) wurde hier gebracht, um eine mögliche Vorgangsweise bei der Beurteilung bestehender Gebäude bezüglich einer selten auftretenden Einwirkung aufzuzeigen. Ebenso wie der Schiffsanprall wurde das Erdbeben vor mehreren Jahrzehnten nicht explizit als eigener Lastfall nachgewiesen. Bemerkenswert ist das grundsätzlich ähnliche Vorgehen in (*SIA Merkblatt 2018, 2004*) mit dem Vorgehen, das im BAW-Merkblatt zum Nachweis bestehender Brücken auf Schiffsanprall (*BAW-Merkblatt, 2010*) empfohlen wird.

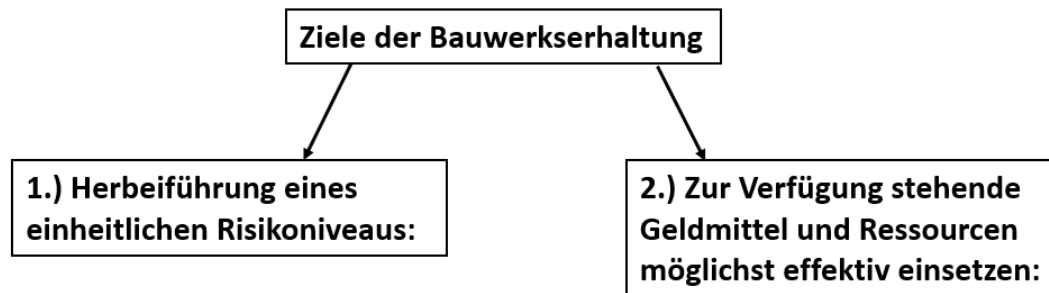
Der Vollständigkeit sei noch angemerkt, dass (*SIA Merkblatt 2018, 2004*) seit Dezember 2017 durch die Norm SIA 269/8 „Erhaltung von Tragwerken – Erdbeben“ (*SIA Norm 269/8, 2017*) ersetzt wurde. Das Kriterium der Zumutbarkeit wurde gestrichen, sodass nun der Mindest Erfüllungsfaktor unabhängig von den Ertüchtigungskosten erreicht werden muss (Wenk, 2019).

5 Allgemeine Schlussfolgerungen und Empfehlungen

5.1 Erkenntnisse aus der Literaturrecherche

- Im Vergleich zum Lastfall Erdbeben ist beim Schiffsanprall die Abschätzung der Anprallhäufigkeit schwierig, da menschliche Fehler eine große Rolle spielen. Es kann nur eine grobe Abschätzung gelingen, die sich auf ein Kollisionsmodell stützt, das durch empirische Daten und diverse Einflussfaktoren an eine konkrete Situation angepasst wird.
- Auch die Bestimmung der Stoßlast ist schwierig. Der genaue Verlauf und vor allem das Maximum dieser dynamischen Kraft hängen von der Geometrie und von der Steifigkeits- und Massenverteilung des Schiffsrumpfs ab. Früher wurden Anprallexperimente in großem Maßstab durchgeführt, um Stoßlasten für Normen zu ermitteln. Heute können Crash-Simulationen mit der Methode der Finiten-Elemente eingesetzt werden.
- Zur Festlegung der Schiffsstoßlasten im Eurocode bzw. der deutschen Vorgängernorm (*DIN 1055-9*, 2003) wurden ein Kollisionsmodell und Lastmodell miteinander verknüpft. Daraus folgt eine probabilistisch ermittelte Verteilung der Stoßlasten. Dies erlaubt zum einen die konsistente Ermittlung jener Stoßlasten, die eine Brücke bzw. ein Brückenpfeiler mit einer Wahrscheinlichkeit von 10^{-4} pro Jahr erfahren. Zudem kann dadurch eine konsistente Abminderung der Stoßlasten berechnet werden, sodass die erforderliche Zuverlässigkeit auf die Restnutzungszeit übertragen wird.
- Eine individuelle Definition des Bemessungsschiffes auf probabilistischer Basis lohnt sich nur in Ausnahmefällen, z.B. wenn die Flottenstruktur sehr inhomogen ist, vgl. (*AASHTO*, 2009). Beispiel: Auf einem Fluss verkehren pro Jahr zwei riesige Schiffe sowie 5000 kleine Schiffe. Außerdem kann eine probabilistische Ermittlung der Einwirkung sinnvoll sein, wenn die erforderlichen Nachweise beim Ansetzen deterministischer Werte für die Anprallkräfte nicht erbracht werden können und die Kosten für Schutzmaßnahmen zu hoch sind.
- Eine vollprobabilistische Bestimmung von Versagenswahrscheinlichkeiten involviert neben der Einwirkungs- auch die Brücke als Widerstandsseite und ist dementsprechend noch schwieriger und aufwendiger und somit nicht praktikabel.

Für bestehende Brücken können die Ziele der Bauwerkserhaltung in Hinblick auf den Lastfall Schiffsanprall gemäß Bild 17 zusammengefasst werden.



Dies ist dann der Fall, wenn der Erwartungswert aus Eintrittswahrscheinlichkeit und Schadensfolgen einer bestimmten Zielsetzung entspricht.

Die Erreichung dieses Zieles ist in der Praxis äußerst schwierig. Ursachen:

- Die in den Normen angegebenen Ziel-Zuverlässigkeiten sind eher als Nennwerte zu verstehen, die zu Vergleich und Kalibrierungen dienen.
- Es gibt keine aus einem Guss entstandene Zuverlässigkeitstheorie oder entsprechende Vorschriften. Diese sind zum großen Teil uneinheitlich und historisch gewachsen
- Probabilistische Bemessungs- und Nachweismethoden sind schwierig anzuwenden
- Schiere Unmöglichkeit, menschliches Versagen zu quantifizieren. Dieses spielt beim Schiffsanprall eine ausschlaggebende Rolle.

Hinsichtlich des Lastfalls Schiffsanprall an (bestehende) Brücken ist dabei vor allem folgender Aspekt hervorzuheben:

Die Anwendung der restnutzungsdauerorientierten Vorgehensweise zur Bestimmung einer angepassten Schiffsstoßlast ist sinnvoll, denn sie hilft, vorhandene Geldmittel und Ressourcen sinnvoll einzusetzen. Denn:

- Der Einsatz von Geld und Ressourcen ist wirkungsvoller, wenn er dazu dient, die Zuverlässigkeit von Bauwerken zu erhöhen, die noch lange Zeit genutzt werden.
- Die Erhöhung der Zuverlässigkeit gegenüber Schiffsanprall ist kostengünstiger, wenn sie bereits in der Planungsphase einer Brücke berücksichtigt wird. Nachträgliche Verstärkungen von bestehenden Brücken kosten in der Regel mehr.

Bild 17: Ziele der Bauwerkserhaltung mit besonderer Berücksichtigung des Lastfalls Schiffsanprall bei Brücken

Die beiden Ziele widersprechen sich nicht. Vielmehr sind sie als zwei verschiedene Herangehensweise an ein übergeordnetes Ziel zu verstehen. Der Einsatz von zur Verfügung stehenden Geldmitteln und Ressourcen ist besonders effektiv, wenn damit ein einheitliches Risikoniveau herbeigeführt wird. Beim zweiten Ziel werden allerdings auch Lebenszyklus-Aspekte betrachtet. Hinsichtlich des Lastfalls Schiffsanprall ist dabei vor allem die Berücksichtigung der Restnutzungsdauer relevant.

In Bezug auf bestehende Brücken sinnvoll ist also die Berücksichtigung von

- der Restnutzungsdauer
- die Flussgeometrie, Fluss-Brücke-Topologie
- den genauen (messtechnisch ermittelten) Widerstandswerten
- ggf. des maßgebenden (prognostizierten) Schiffsverkehrsaufkommens und probabilistische Ermittlung der Einwirkung (Überschreitungswahrscheinlichkeit $p = 10^{-4}/\text{Jahr}$)
- ggf. die fallweise Beurteilung der Verhältnismäßigkeit (Erfüllungsfaktor)

Es wird deutlich darauf hingewiesen, dass mehrere dieser Elemente bereits in (*BAW-Merkblatt*, 2010) enthalten sind. Wichtige Regelungen und Präzisierungen zur Berücksichtigung der konkreten Topologie an einer nachzuweisenden Brücke findet man in den „Richtlinien für die Ermittlung des Gefährdungsräume an Bundeswasserstraßen“ (*BMVBS*, 2010). Der

hinsichtlich der Querschnittsgeometrie von Fluss und Brücke sinnvollste Faktor, nämlich die Abminderung der Stoßlast in Abhängigkeit des Abstandes des Pfeilers vom Schiffsfahrtweg, ist bereits im Nationalen Anhang (*DIN EN 1991-1-7/NA*, 2019) geregelt.

Es sei zudem darauf hingewiesen, dass im Rahmen dieses Forschungsprojekts keine Überprüfung der im Eurocode festgelegten Anpralllasten hinsichtlich ihrer Angemessenheit erfolgte, etwa durch eine mechanische Nachrechnung, beispielsweise mittels Anprallsimulationen.

5.2 Implementierung in die Nachrechnungsrichtlinie

Die Nachrechnungsrichtlinie (BMVBS, 2011) erlaubt eine Nachweisführung nach einem 4-stufigen Verfahren, bei dem die Nachweisführung und ggf. der Untersuchungsaufwand am Bauwerk unter Berücksichtigung der Sicherheitsanforderungen modifiziert werden. Die Modifikationen können sowohl die Einwirkungs- und die Widerstandsseite als auch die rechnerischen Nachweise und Bauwerksuntersuchungen selbst betreffen.

Im Folgenden wird ein Überblick über die vier Stufen der Nachrechnungsrichtlinie gegeben. Es wird auch dargelegt, in welchen Stufen eine Implementierung von Vorschriften betreffend Schiffsanprall erfolgen könnte.

5.2.1 Stufe 1

Die **Stufe 1** umfasst eine ausschließliche Nachweisführung nach den Eurocodes DIN EN 1992 bis 1994 und 1996.

Für Schiffsanprall:

Stufe 1 entspricht dem Nachweis nach dem Eurocode. Allenfalls könnten hier Ergänzungen eingefügt sind, die im Eurocode fehlen und grundsätzlich für alle Brücken gelten (nicht nur für Bestandsbrücken), z.B. spezielle Beiwerte. Ergänzende Angaben zum Gefährdungsraum gelten ebenso allgemein, ist sind deshalb in Stufe 1 oder davor einzuordnen.

5.2.2 Stufe 2

„Die **Stufe 2** berücksichtigt spezielle, die Stufe 1 ergänzende Regelungen der Nachrechnungsrichtlinie.“

Für Schiffsanprall:

Die Nachrechnungsrichtlinie enthält eine Reihe von Vorschriften, die die Widerstandsseite betreffen und die Erbringung von Nachweisen dadurch erleichtern, dass sie konservative Vorgaben durch realitätsnähere Vorgaben ersetzen. Diese widerstandsseitigen Vorschriften betreffen den Lastfall Schiffsanprall in gleicher Weise wie die anderen nachzuweisenden Lastfälle und bedürfen daher keiner Überarbeitung oder Ergänzung. Von einer Erhöhung von Festigkeitswerten infolge stoßartiger Einwirkungen (hohe Dehnungsraten) in Bezug auf den Schiffsanprall wird abgeraten.

In Stufe 2 sollte vor allem der Aspekte der „**Restnutzungsdauer**“ berücksichtigt werden. Regelungen dazu sind bereits in (*BAW-Merkblatt*, 2010) enthalten. Diese sollten in die Nachrechnungsrichtlinie übernommen werden.

In Stufe 2 sollte explizit auf die Möglichkeit der „**weitergehenden Anpralluntersuchungen für Schiffe auf Binnenwasserstraßen**“ nach Abschnitt C.4.3 von (*DIN EN 1991-1-7*, 2010) verwiesen werden, wenngleich diese Art der Nachweisführung gleichermaßen für

Neubauten möglich ist. Die „weitergehenden Anpralluntersuchungen“ erlauben insbesondere die Berücksichtigung von:

- genauer ermittelten **Fahrgeschwindigkeiten** oder sogar der Anprallgeschwindigkeiten. Wenn auf Grund örtlicher Verhältnisse nur geringere Geschwindigkeiten möglich sind, darf die tatsächliche Geschwindigkeit als Mittelwert angesetzt werden. Eine Reduktion der anzusetzenden Geschwindigkeit aufgrund der Entfernung des Pfeilers von der Schifffahrtsrinne darf hierbei allerdings nicht erfolgen, wenn eine solche Reduktion bereits nach Bild NA.6 in (*DIN EN 1991-1-7/NA*, 2019) vorgenommen wird.

Eine allgemeine, bundesweite genauere Ermittlung der Fahrgeschwindigkeiten könnte mithilfe der auf den Schiffen installierten GPS-Respondern vorgenommen werden. Eine solche Präzisierung könnte aber allenfalls im Rahmen eines zukünftigen Forschungsprojekts in Angriff genommen werden. Ein entsprechender Hinweis in der Nachrechnungsrichtlinie ist nicht nötig.

- einer **dynamischen Bauwerksanalyse**. Diese kann mithilfe der in Bild C.3 von (*DIN EN 1991-1-7*, 2010) dargestellten Last-Zeit-Funktionen erfolgen und liefert im Allgemeinen realistischere und auch wirtschaftlichere Ergebnisse (Kunz, 2006b).

5.2.3 Stufe 3

„Die **Stufe 3** berücksichtigt am Bauwerk ermittelte Messergebnisse. Im Regelfall finden die Messungen unter einer Probelastung im Gebrauchslastbereich statt und betreffen Tragwerksverformungen an kritischen Stellen und Dehnungsmessungen an ausgewählten Bauteilen. Durch die Messung erfasst man das tatsächliche Tragverhalten unter Gebrauchslasten und erhält Hinweise für eine realistischere Beschreibung des Bauwerkverhaltens. Die Stufe 3 kann der Validierung des gewählten Tragmodells dienen, ist jedoch wegen des besonderen Aufwands nur im Sonderfall und in Abstimmung mit den Obersten Straßenbaubehörden der Länder anzuwenden.“

Für Schiffsanprall:

Die Berücksichtigung von am Bauwerk ermittelten Messergebnissen in Stufe 3 ist auch in Bezug auf den Lastfall Schiffsanprall sinnvoll, vgl. dazu Auszug aus (BMVBS, 2011) „Konzept der Nachrechnungsrichtlinie“ (4.1.(2)):

- das verwendete Tragsystem und die Kenntnis der verbauten Werkstoffe, sodass die streuenden Einflussgrößen besser eingegrenzt und durch angepasste Teilsicherheitsbeiwerte entsprechend abgebildet werden können
- der aktuelle Bauwerkszustand
- die bisher in der Praxis gesammelten Erfahrungen zu Tragwerksart, Querschnittsform, Bauverfahren etc.

Da die Berücksichtigung von am Bauwerk ermittelten Messergebnissen aber grundsätzlich den Widerstand gegenüber allen Einwirkungen betrifft, ist eine Spezifizierung für den Schiffsanprall nicht nötig.

5.2.4 Stufe 4

„Die **Stufe 4** schließt wissenschaftliche Methoden zum Nachweis ausreichender Tragfähigkeit ein, wie z.B. spezielle geometrisch und physikalisch nichtlineare Verfahren. Der

Nachweis ausreichender Tragsicherheit darf ggf. durch direkte Ermittlung der rechnerischen Versagenswahrscheinlichkeit mit Hilfe probabilistischer Methoden geführt werden. Die Stufe 4 kann mit den Stufen 2 und 3 kombiniert werden, ist jedoch nur im Sonderfall und in Abstimmung mit den Obersten Straßenbaubehörden der Länder anzuwenden.“

Für Schiffsanprall:

Unter die „wissenschaftlichen Methoden“, die grundsätzlich in Stufe 4 angewendet werden könnten, fallen:

- Genauere Ermittlung der Einwirkung. Denkbar wäre dabei eine probabilistische Ermittlung der Einwirkung, also der Anprallkraft, gemäß einer gegebenen oder prognostizierten Flotte an verkehrenden Schiffen und einer vorgegebenen Überschreitungswahrscheinlichkeit (z.B. $p = 10^{-4}/a$), vgl. Abschnitt 4.4. Ergebnis dieser Ermittlung wäre eine spezifische jährliche Kollisionsrate λ , siehe Abschnitt 4.4. Insbesondere könnten darin eingehen die aktuelle oder prognostizierte jährliche Anzahl passierender Schiffe, ggf. nach Klassen unterteilt, sowie eine aktualisierte, standortbezogene Unfallrate. Gerade auf lange Sicht ist es denkbar, dass eine standortbezogene oder generelle Neuermittlung der Unfallrate sinnvoll und möglicherweise notwendig werden wird.
 - In Hinblick auf mögliche Navigationssysteme, die in Zukunft womöglich entwickelt werden (satellitengestützte Navigation, automatisches Ausweichen und Abbremsen in Gefahrensituationen, fahrerlose Schifffahrt) ist es denkbar, dass es zu einem erheblichen Rückgang der Unfallrate kommt.
 - Es wäre denkbar, dass auf einem bestimmten schiffbaren Flussabschnitt der Schiffsverkehr beinahe zum Erliegen kommt. Größere Schiffe verkehren vielleicht nur noch in Ausnahmefällen. Bei den betroffenen Brücken könnte eine probabilistische Ermittlung der Stoßlast-Einwirkung zu wirtschaftlicheren Ergebnissen führen als der Ansatz der Stoßlasten für neue Brücken gemäß Tabelle C.3 in (*DIN EN 1991-1-7*, 2010).
- Nichtlineares Verhalten der Brücke: Dies gilt aber allgemein, daher ist keine Spezifizierung für den Schiffsanprall nötig.
- Die numerische Berechnung mit realitätsnaher Modellierung des Schiffsrumpfes anstatt des bloßen Ansatzes einer Ersatzlast ist wenig praktikabel.
- Probabilistische Methoden zur Abschätzung der Versagenswahrscheinlichkeit wie in „Methode II“ in (*AASHTO*, 2009) oder gar zur Abschätzung des Kosten-Nutzen-Verhältnisses, wie in „Methode III“ in (*AASHTO*, 2009) oder in (*Proske*, 2003) ist ebenfalls kaum praktikabel.

5.2.5 Weitere mögliche Anknüpfungspunkte in der Nachrechnungsrichtlinie

- Die Nachrechnungsrichtlinie (*BMVBS*, 2011) kennt den Begriff des „Auslastungsgrads“. Dazu folgt ein Auszug aus 4.3.1.(3) „Rechnerischer Nachweis“: „Für eine schnellere Bewertung der Nachrechnungsergebnisse kann es sinnvoll sein, den **Auslastungsgrad** für alle maßgebenden Bauteile und Nachweisquerschnitte ,i‘ für die Längs- und Querrichtung des Überbaus, des Unterbaus und der Gründung sowohl für die Grenzzustände der Tragfähigkeit als auch für die Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit zu ermitteln und ggf. grafisch darzustellen. Der Umfang

der Ermittlung der Kennwerte ist vertraglich zu vereinbaren. Der Auslastungsgrad ergibt sich zu

$$\kappa_i = \frac{E_{d,i,LM-Ziel}}{R_{d,i}} \quad . \quad (5.1)$$

Die Gesamtbeanspruchung $E_{d,i,LM-Ziel}$ beinhaltet das nach Abschnitt 10.1.2 definierte Ziellastniveau LM-Ziel.“

Hierzu ist anzumerken, dass der Auslastungsgrad dem Prinzip des Erfüllungsfaktors (siehe Abschnitte 3.2 und 4.5) entspricht. Der Auslastungsgrad ist allerdings so definiert, dass er dem Kehrwert des Erfüllungsfaktors entsprechen würde.

Eine Integration der Nachweisergebnisse für Schiffsanprall in die Ergebnistabellen der Nachrechnungsrichtlinie ist sinnvoll. Man wird jedoch eher wie bei den anderen Lastfällen bei der fallspezifischen Bewertung der Auslastungsgrade bleiben und in der Nachrechnungsrichtlinie nicht allgemeine Vorschriften festlegen, so wie dies im *(BAW-Merkblatt, 2010)* der Fall ist.

- Die Anlage 1 von (BMVBS, 2011) handelt von **verkehrlichen Kompensationsmaßnahmen**. Verkehrliche Kompensationsmaßnahmen sind grundsätzlich auch für den Schiffsverkehr denkbar, falls keine ausreichende Sicherheit in Bezug auf den Schiffsanprall gegeben ist. Früher gab es beispielsweise Brückenwächter an Flussbrücken. Heute wäre z.B. ein temporäres Warn- oder Bremssystem für herannahende Züge an Brücken denkbar, die die Anforderungen an die Anprallsicherheit nicht erfüllen.

6 Konkrete Textvorschläge

In diesem Abschnitt werden konkrete Textbeispiele zur Fortschreibung der Nachrechnungslinie der Fassung 2011 mit 1. Ergänzung 2015 formuliert, um den Lastfall Schiffsanprall zu berücksichtigen. Die derzeitige Gliederung der Nachrechnungsrichtlinie vorausgesetzt wäre eine Eingliederung in Abschnitt 10 *Grundlagen der Tragwerksberechnung* in Unterabschnitt 10.1 *Einwirkungen* möglich. Für den Lastfall Schiffsanprall sollte ein eigener Unterabschnitt 10.1.6 geschaffen werden. Der Vorschlag dazu wird im Folgenden wörtlich und mit passenden Nummerierungen der Unterabschnitte wiedergegeben.

10.1.6 Lastfall Schiffsanprall

10.1.6.1 Allgemeines

Der Schiffsanprall zählt zu den dynamischen sowie zu den außergewöhnlichen Einwirkungen. Die auf eine Brücke einwirkende Kraft wird vor allem durch die Masse, die Fahrgeschwindigkeit und die Bugkonstruktion der Schiffe bestimmt. Aufgrund dieser Besonderheiten kann es sinnvoll sein, bei der Ermittlung des Lastfalls Schiffsanprall probabilistische Elemente einfließen zu lassen.

Eine Gleichzeitigkeit von Schiffsstoßlasten mit Verkehrslasten auf der Brücke ist nicht anzusetzen.

Für die Ermittlung des von einem Schiffsanprall grundsätzlich gefährdeten Raums gelten die Angaben in Abschnitt 10.1.6.2.

10.1.6.2 Gefährdungsraum

Der Gefährdungsraum einer Wasserstraße umfasst den Raum, den fehlmanövrierte, im Allgemeinen leere, Wasserfahrzeuge sowie nach oben überstehende Aufbauten oder Einrichtungen (z.B. ausgefahrene Kranausleger) im Sinn von außergewöhnlichen Einwirkungen gemäß DIN EN 1991-1-7 erreichen können. Bauteile, die innerhalb dieses Raumes liegen, sind potenziell durch Schiffsanprall gefährdet.

Der von einem Schiffsanprall grundsätzlich gefährdete Raum ist gemäß Bild 18 gegeben. Bei Kreuzungsbauwerken spannt sich der Gefährdungsraum über den Bezugswasserspiegel

- seitlich um das Maß u , siehe Bild 18, senkrecht zur Tangente an die Wasserstraße, Bezugspunkt ist bei senkrechten Ufereinfassungen die Vorderseite der Uferkante und bei geböschten Ufern der Schnittpunkt des Bezugswasserspiegels mit der Böschung,
- in der Höhe um die 1,5-fache Durchfahrtshöhe h_0 , wobei h_0 den kleineren Wert der Brückendurchfahrtshöhe nach der Klassifizierung der europäischen Binnenwasserstraßen, Resolution Nr. 30 der UN/ECE, darstellt.

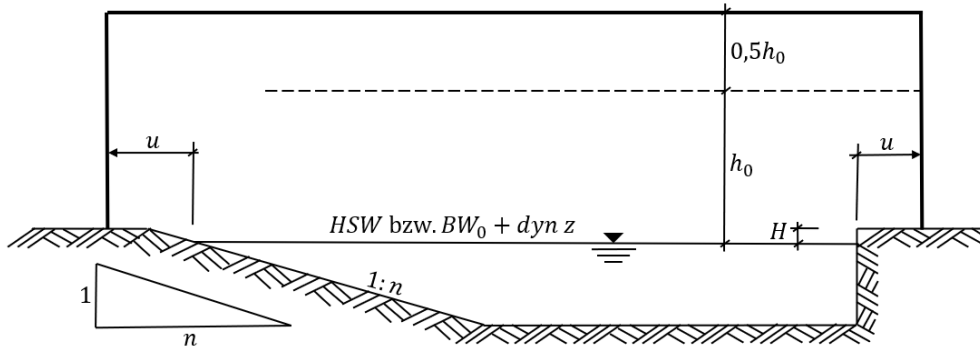


Bild 18: Schematische Darstellung des Gefährdungsräumens

Für den Bezugswasserspiegel gilt:

- bei freifließenden und staugeregelten Flüssen der höchste Schifffahrtswasserstand (HSW),
- bei Kanälen der obere Betriebswasserstand BW_0 zuzüglich kurzfristiger Wasserstandsschwankungen $dyn z$.

Für **Wasserstraßen der Klassen IV und höher** wird das seitliche Maß u nach der folgenden Gleichung ermittelt:

$$u \text{ [m]} = u_0 \text{ [m]} + \lambda \cdot v \left[\frac{\text{km}}{\text{h}} \right] \cdot \sin \alpha$$

Für Senkrechtufer gilt u_0 nach Tabelle 12, $\lambda = 0,08$.

Für 1:n geböschte Ufer ($n \geq 1$) gilt

$$u_0 = u_{0,n} - n \cdot 0,6 \text{ m},$$

$$u_{0,n} \text{ nach Tabelle 12, } \lambda = 0,08 \cdot n.$$

Die Anprall-Geschwindigkeit v [km/h] kann der Tabelle NA.7 in (DIN EN 1991-1-7/NA, 2019) entnommen werden. Wenn auf Grund örtlicher Verhältnisse nur geringere Geschwindigkeiten möglich sind, darf die tatsächliche Geschwindigkeit angesetzt werden.

α	Senkrechtufer u_0				Böschung 1:n
	H = 0,0 m	H=0,50 m	H=1,0 m	H=1,50 m	$u_{0,n}$
10°	1,40 m	1,20 m	1,00 m	0,70 m	1,70 m
15°	2,15 m	1,80 m	1,50 m	1,15 m	2,60 m
20°	3,00 m	2,60 m	2,20 m	1,75 m	3,50 m
25°	3,70 m	3,30 m	2,90 m	2,25 m	4,10 m
30°	4,20 m	3,90 m	3,60 m	2,90 m	4,70 m

Tabelle 12: Grundwert u_0 [m] für Senkrechtufer und Hilfwert $u_{0,n}$ [m] für geböschte Ufer in Abhängigkeit vom Anfahrwinkel α [°]

Zwischenwerte können interpoliert werden, das Rechenergebnis ist auf eine volle Dezimalstelle aufzurunden. Bei Vorlandbereichen von Flüssen, welche bei HSW überflutet werden, kann sich der seitliche Gefährdungsraum bis zu der Stelle erstrecken, bei der bei HSW eine Wassertiefe von 1,0 m vorliegt.

Für den Anfahrwinkel α [°] (Winkel zwischen Schiffslängsachse und Tangente an die Wasserstraße) gilt in der Regel für gerade und nahezu gerade Wasserstraßenabschnitte $\alpha = 15^\circ$.

Bei Kurvenradien $300 \text{ m} \leq R < 1500 \text{ m}$ ist für die Betrachtung der Kurvenaußenseite der Anfahrwinkel zwischen $\alpha = 30^\circ$ ($R \approx 300 \text{ m}$) und $\alpha = 15^\circ$ (für $R \approx 1500 \text{ m}$) zu interpolieren.

Für eine Betrachtung der Kurveninnenseite bei Radien $R < 1500 \text{ m}$ kann der Anfahrwinkel entsprechend reduziert werden, wobei ein Mindestwert von 10° anzusetzen ist.

Für **Wasserstraßen der Klassen III und niedriger** gelten pauschal folgende Werte:

- $u = 1,00 \text{ m}$ bei Senkrechtufern,
- $u = 1,50 \text{ m}$ bei geböschten Ufern.

Sofern örtliche Erkenntnisse zu größeren Maßen führen, sind diese zu Grunde zu legen.

10.1.6.3 Abminderung der Stoßlasten in Abhängigkeit der Restnutzungsdauer

Die erforderliche Zuverlässigkeit kann auf die Restnutzungsdauer übertragen werden. Diese Zuverlässigkeit entspricht dabei derjenigen für neue Brücken mit einer geplanten Nutzungsdauer von $T_N = 100$ Jahren. Diese Zuverlässigkeit wird auf die Restjahre angesetzt. Für den Schiffsanprall darf eine Abminderung der Stoßlasten gemäß Bild 19 erfolgen.

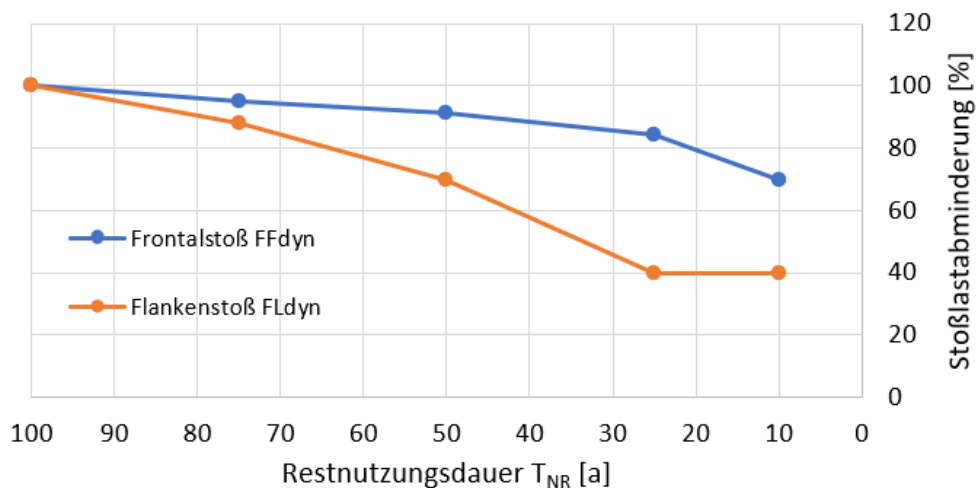


Bild 19: Abminderung der Stoßkraft: $F = [\%] * F (T_N = 100 \text{ a})$, in Abhängigkeit der Restnutzungsdauer, (FF: Frontalstoß; FL: Flankenstoß)

Befindet sich die Brücke oder Teile der Brücke in einem Wasserstraßenbereich, der als Unfallerschwerpunkt gilt, ist die Abminderung nicht zulässig.

10.1.6.4 Stufe 1

Die **Stufe 1** umfasst eine ausschließliche Nachweisführung nach den Eurocodes. Die Lastermittlung für den Anprall von Binnen- und Seeschiffen erfolgt nach DIN EN 1991-1-7 und DIN EN 1991-1-7/NA.

Für die Nachweise sind folgende spezielle Beiwerte anzusetzen:

- Reibbeiwert: $\mu = 1,0$ (sowohl für Beton/Beton als auch Beton/Boden bzw. Beton/Pfahlkopfst)
- Sicherheitsbeiwerte für Gleiten und Grundbruch: $\gamma_{Gleit,A} = \gamma_{Gbruch,A} = 1,0$
- Sicherheitsbeiwert für Kippen: $\gamma_{Kipp,A} = 1,1$, wobei die Bauteilpressung nachzuweisen ist.

10.1.6.5 Stufe 2

Bei bestehenden Brücken darf eine Abminderung der Stoßlasten in Abhängigkeit der Restnutzungsdauer gemäß Abschnitt 10.1.6.3 erfolgen.

Die Abschnitte C.4.3 und C.4.4 von DIN EN 1991-1-7 bieten die Möglichkeit für „**weitergehenden Anpralluntersuchungen**“. Insbesondere erlauben diese:

- Die Berücksichtigung einer genauer ermittelten **Fahrgeschwindigkeit** bzw. Anprallgeschwindigkeit. Wenn aufgrund örtlicher Verhältnisse nur geringere Geschwindigkeiten möglich sind, kann die tatsächliche Geschwindigkeit angesetzt werden.
- eine **dynamischen Bauwerksanalyse**. Diese kann mithilfe der in Bild C.3 von DIN EN 1991-1-7 dargestellten Last-Zeit-Funktionen erfolgen und liefert im Allgemeinen genauere Ergebnisse.

10.1.6.6 Stufe 3

Es gelten die Angaben in Abschnitt 4.2.

10.1.6.7 Stufe 4

Es gelten die Angaben in Abschnitt 4.2.

Es darf eine probabilistische Ermittlung der Einwirkung, also der Anprallkraft, gemäß der vorhandenen bzw. maßgebenden Flotte an verkehrenden Schiffen erfolgen. Es ist jene Anprallkraft zu ermitteln, die eine jährliche Überschreitungswahrscheinlichkeit von 10^{-4} aufweist.

Literatur

AASHTO: Guide Specification and Commentary for Vessel Collision Design of Highway Bridges (Version First Edition). (1991).

AASHTO: Guide Specification and Commentary for Vessel Collision Design of Highway Bridges (Version Second Edition). (2009).

AASHTO LRFD Bridge Design Specifications (Version Fifth Edition). (2010).

Allaix, D. L., Botte, W., Diamantidis, D., Engen, M., Faber, M., Hendriks, M., Mancini, G., Prieto, M., Tanner, P., Thöns, S., Weber, M., Holický, M., Linneberg, P., Schnell, J., & Vrouwenvelder, T. (2016). fib Bulletin 80. Partial factor methods for existing concrete structures (fib. The International Federation for Structural Concrete, R. Caspeele, R. Steenbergen, & M. Sýkora, Eds.). fib. The International Federation for Structural Concrete. <https://doi.org/10.35789/fib.BULL.0080>

Allen, D. (1991). Limit States Criteria for Structural Evaluation of Existing Building. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 18(6).

Bargmann, H. (2008). *Historische Bautabellen*. Werner Verlag.

BAW-Merkblatt: Nachweis bestehender Brücken auf Schiffsanprall (MNaBS) (Version Anpassung 2013). (2010).

Berndt, E., & Schöne, I. (1990). Tragverhalten von Natursteinmauerwerk aus Elbesandstein. Sonderforschungsbereich 315, Universität Karlsruhe, Jahrbuch 1990.

Bigaj-van Vliet, A., & Vrouwenvelder, T. (2013). Reliability in the performance-based concept of fib Model Code 2010. *Structural Concrete*, 14(4), 309–319. <https://doi.org/10.1002/suco.201300053>

BMVBS. (2011). Richtlinie zur Nachrechnung von Straßenbrücken im Bestand. https://www.bast.de/DE/Publikationen/Regelwerke/Ingenieurbau/Entwurf/Nachrechnung/richtlinie-Ausgabe-5_2011.html

Boros, V. (2012). Zur Zuverlässigkeitsanalyse von Massivbrücken für außergewöhnliche Bedrohungsszenarien [doctoralThesis]. <http://elib.uni-stuttgart.de/handle/11682/482>

Comité Euro-international du béton (BEV): International system of unified standard – codes of practice for structures. Volume I: Common unified rules for different types of construction and material (3rd Draft, Master Copy), Bulletin d'information 116 E, Paris. (1976).

Cornell, C. A. (1968). Engineering seismic risk analysis. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 58(5), 1583–1606. <https://doi.org/10.1785/BSSA0580051583>

Curbach, M. (1996). Die Ermittlung der Beanspruchung durch Schiffsanprall am Beispiel der Mainbrücke Retzbach-Zellingen und der Autobahnbrücke in Dresden über die Elbe. 6. Dresdner Brückenbausymposium, Dresden.

DBV-Merkblatt Bauen im Bestand—Beton und Betonstahl—2016-03—Beuth.de. (2016). <https://www.beuth.de/de/technische-regel/dbv-merkblatt-beton-und-betonstahl/255814157>

Diamantidis, D., & Sýkora, M. (2019). Reliability Differentiation and Uniform Risk in Standards: A Critical Review and a Practical Appraisal. <https://doi.org/10.5592/CO/FTCE.2019.11>

DIN 1055-9 (2003-08): Einwirkungen auf Tragwerke—Teil 9: Außergewöhnliche Einwirkungen. (2003).

DIN 1072—1985-12 - Beuth.de. (1985). <https://www.beuth.de/de/norm/din-1072/1258281>

DIN 31051: Grundlagen der Instandhaltung. (2019). Beuth Verlag.

DIN EN 1990:2021-10, Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung; Deutsche Fassung EN_1990:2002_+ A1:2005_+ A1:2005/AC:2010 (DIN EN 1990). (2021). Beuth Verlag GmbH. <https://doi.org/10.31030/3291403>

DIN EN 1991-1-1:2010-12, Eurocode_1: Einwirkungen auf Tragwerke_ - Teil_1-1: Allgemeine Einwirkungen auf Tragwerke_ - Wichten, Eigengewicht und Nutzlasten im Hochbau; Deutsche Fassung EN_1991-1-1:2002_+ AC:2009. (2010). Beuth Verlag GmbH. <https://doi.org/10.31030/1719026>

DIN EN 1991-1-7:2010-12, Eurocode_1: Einwirkungen auf Tragwerke_ - Teil_1-7: Allgemeine Einwirkungen_ - Außergewöhnliche Einwirkungen; Deutsche Fassung EN_1991-1-7:2006_+ AC:2010 (DIN EN 1991-1-7). (2010). Beuth Verlag GmbH. <https://doi.org/10.31030/1723954>

DIN EN 1991-1-7/NA:2019-09, Nationaler Anhang_ - National festgelegte Parameter_ - Eurocode_1: Einwirkungen auf Tragwerke_ - Teil_1-7: Allgemeine Einwirkungen_ - Außergewöhnliche Einwirkungen (DIN EN 1991-1-7). (2019). Beuth Verlag GmbH. <https://doi.org/10.31030/3049440>

DIN EN 1996-1-1:2013-02, Eurocode_6: Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten_ - Teil_1-1: Allgemeine Regeln für bewehrtes und unbewehrtes Mauerwerk; Deutsche Fassung EN_1996-1-1:2005+A1:2012. (2013). Beuth Verlag GmbH. <https://doi.org/10.31030/1880871>

Einwirkungen auf Tragwerke, Teil 100: Grundlagen der Tragwerksplanung. Sicherheitskonzept und Bemessungsregeln, Ausgabe 2001-03. (2001).

Eurocode 1: Grundlagen der Tragwerksplanung und Einwirkungen auf Tragwerke—Teil 2-7: Einwirkungen auf Tragwerke; Außergewöhnliche Einwirkungen; Deutsche Fassung ENV 1991-2-7:1998. (2000).

Eurocode EN 1992-1-1. (2004). Eurocode 2: Design of concrete structures—Part 1-1: General rules and rules for buildings.

Europäische Konferenz Der Verkehrsminister, Klassifizierungsvorschlag Vom 19. Juni 1992, Angenommen Vom Rat Der EU Am 29. Oktober 1993 (1992).

Fujii, Y., & Shiobara, R. (1978). The Estimation of Losses Resulting from Marine Accidents. *Journal of Navigation*, 31(1).

- Gasser, C. (2018). Contributions to reliability assessment of engineering structures with special regard to seismic safety of an arch dam [Doctoral Dissertation, TU Wien]. <http://hdl.handle.net/20.500.12708/2031>
- Gasser, C., & Bucher, C. (2018). An optimized strategy for using asymptotic sampling for reliability analysis. *Structural Safety*, 71, 33–40. <https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2017.11.002>
- Gasser, C., Goldgruber, M., & Bucher, C. (2019). Seismic Fragility Curves of an Arch Dam With Special Regard to Ultimate Limit State. *ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part B: Mechanical Engineering*, 5(4), 041002. <https://doi.org/10.1115/1.4044151>
- GDWS - Bundeswasserstraßen. (2024). https://www.gdws.wsv.bund.de/DE/wasserstrassen/01_bundeswasserstrassen/bundeswasserstrassen-node.html. Abgerufen im November 2024.
- Grob, J., & Hajdin, N. (1995). Schiffsanprall: Beitrag zum Schiffsanprall auf Binnenwasserstrassen und zur Berechnung und Bemessung von durch Schiffsanprall gefährdeten Bauwerken. *Schweizer Ingenieur Und Architekt*, 113.
- ISO 2394:2015-03: Allgemeine Anforderungen an die Zuverlässigkeit von Bauwerken. (2015).
- ISO 10252:2020, Bases for design of structures—Accidental actions (ISO 10252). (2020). <https://www.beuth.de/de/norm/iso-10252/321943570>
- ISO 13822: Bases for design of structures — Assessment of existing structures. (2010).
- JCSS Probabilistic Model Code. Part 2: Load Models. 2.18: Impact Load. (2001). Abgerufen im November 2024.
- Knott, M., & Winters, M. (2018). Ship and Barge Collisions with bridges over navigable waterways. PIANC-World Congress, Panama City.
- Kunz, C. (1990). Risikoorientierte Last-Konzeption für Schiffsstoß auf Bauwerke. *Mitteilungsblatt Der Bundesanstalt Für Wasserbau*, 67.
- Kunz, C. (2006a). BAW-Brief Nr. 1—März 2006: Schiffsanprall auf Brücken nach DIN 1055-9.
- Kunz, C. (2006b). DIN 1055, Teil 9 und probabilistische Verfahren. *Der Prüflingenieur*, Heft 10, 53–63.
- Kunz, C. (2013). Bewertung von bestehenden Brücken hinsichtlich Schiffsanprall. *Bautechnik*, 90(5), 280–285. <https://doi.org/10.1002/bate.201300026>
- Kunz, C. (2015). Ein Konzept für Teilsicherheitsbeiwerte für bestehende Wasserbauwerke. *Bautechnik*, 92(8), 549–556. <https://doi.org/10.1002/bate.201500062>
- Kunz, C. (2019). Ermittlung von Schiffsstoß-lasten für die Schutzbö-schungen vor der Rader Hochbrücke (A7) NOK-km 68,1. BAW.
- Lohrberg, K., & Keitel, V. (1990). Zur Frage der Eintrittswahrscheinlichkeit des Schiffsstoßes auf Brücken. *Zeitschrift Für Binnenschifffahrt Und Wasserstraßen*, 1.

- Meier-Dörnberg, K. E. (1983). Schiffskollisionen, Sicherheitszonen und Lastannahmen für die Bauwerke der Binnenwasserstraßen [VDI-Berichte].
- Melchers, R. (2001). *Structural Reliability Analysis and Prediction* (2nd ed.). Wiley.
- Minorsky, V. U. (1959). An Analysis of Ship Collision with Reference to Protection of Nuclear Power Plants. *Journal of Ship Research*.
- Pedersen, P., Valsgård, S., Olsen, D., & Spangenberg, S. (1993). Ship impacts: Bow collisions. *International Journal of Impact Engineering*, 13(2), 163–187. [https://doi.org/10.1016/0734-743X\(93\)90091-K](https://doi.org/10.1016/0734-743X(93)90091-K)
- Pedersen, P., & Zhang, S. (1998). On Impact mechanics in ship collisions. *Marine Structures - MAR STRUCT*, 11, 429–449. [https://doi.org/10.1016/S0951-8339\(99\)00002-7](https://doi.org/10.1016/S0951-8339(99)00002-7)
- Pendola, M., Hornet, Lemaire, M., & Mohamed, A. (1999). The influence of data sampling uncertainties in reliability analysis. *Application of Statistics and Probability (ICASP 8)*, Band 2, 1095–1100.
- Proske, D. (2003). Beitrag zur Risikobeurteilung von alten Brücken unter Schiffsanprall. TU Dresden.
- Richtlinie 'Anprall von Straßenfahrzeugen auf Bauwerksteile von Kunstbauten', Ergänzung zur Norm SIA 261, Einwirkungen auf Tragwerke, ASTRA. (2005).
- Saul, R., & Svensson, H. (1981). Zum Schutz von Brückenpfeilern gegen Schiffsanprall. *Die Bautechnik*, 10(58).
- Schiffsanprall auf Bauwerke—Richtlinien für die Ermittlung des Gefährdungsraumes an Bundeswasserstraßen. (2010).
- SIA Merkblatt 2018: Überprüfung bestehender Gebäude bezüglich Erdbeben. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverband. (2004).
- SIA Norm 269. Grundlagen der Erhaltung von Tragwerken. (2011).
- SIA Norm 269/8. Erhaltung von Tragwerken - Erdbeben. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverband. (2017).
- Sicherung der Pfeiler an Rheinbrücken gegen Rammstöße von Schubverbänden, Erlass W 6/52.12.00/4 BD 74, Bonn. (1974).
- Stede, J. (2000). Unfälle der gewerblichen Binnenschifffahrt auf Bundeswasserstraßen 1998. Statistisches Bundesamt.
- Steenbergen, R. D. J. M., Sýkora, M., Diamantidis, D., Holický, M., & Vrouwenvelder, T. (2015). Economic and human safety reliability levels for existing structures. *Structural Concrete*, 16(3), 323–332. <https://doi.org/10.1002/suco.201500022>
- Steenbergen, R., & Vrouwenvelder, A. C. W. M. (2010). Safety philosophy for existing structures and partial factors for traffic loads on bridges. *Heron*, 55.
- Stiglat, K. (1984). Zur Tragfähigkeit von Mauerwerk aus Sandstein. *Bautechnik*, 61(2), 51–100.
- 'Sunshine Skyway Bridge Ship Collision Risk Assessment'. Report prepared for Figg and Muller Engineers, Inc., Tallahassee, FL. (1981).

Sykora, M., Diamantidis, D., Holicky, M., & Jung, K. (2017). Target reliability for existing structures considering economic and societal aspects. *Structure and Infrastructure Engineering*, 13(1), 181–194. <https://doi.org/10.1080/15732479.2016.1198394>

Vorschrift für Eisenbahnbrücken und sonstige Ingenieurbauwerke. Deutsche Bundesbahn. (1982).

Vrouwenvelder, T., & Scholten, N. (2010). Assessment Criteria for Existing Structures. *Structural Engineering International*, 20(1), 62–65. <https://doi.org/10.2749/101686610791555595>

Wenk, T. (2008). Erdbebenertüchtigung von Bauwerken. Strategie- und Beispielsammlung aus der Schweiz. Umwelt-Wissen Nr. 0832. Bundesamt für Umwelt.

Wenk, T. (2019). Die neue Norm SIA 269/8 | Espazium. <https://www.espazium.ch/de/aktuelles/die-neue-norm-sia-2698>. Abgerufen im November 2024.

Woisin, G. (1976). Die Kollisionsversuche der GKSS (The Collision Tests of the GKSS). (Vol.17; Jahrbuch Der Schiffbautechnischen Gesellschaft, pp. 465–487).

Woisin, G., & Gerlach, W. (1970). Beurteilung der Kräfte aus Schiffsstößen auf Leuchttürme in See. German Technical Reports for the Eighth International Seamark Conference, Stockholm.

Bilder

Bild 1: Unterschiedliche Kontaktsituationen beim Schiffsanprall

Bild 2: Dynamische Anprallkraft gemäß den Gleichungen in den „Weitergehenden Anpralluntersuchungen für Schiffe auf Binnenwasserstraßen“ in (DIN EN 1991-1-7, 2010). Für $F_{dyn} < 5 \text{ MN}$ wird ein elastischer Stoß und für $F_{dyn} > 5 \text{ MN}$ ein plastischer Stoß angenommen. Für die beiden Stoßarten gibt es jeweils eine eigene Gleichung zur Abschätzung der Anprallkraft

Bild 3: Dynamische Anprallkräfte für Binnenwasserstraßen gemäß (DIN EN 1991-1-7, 2010): Vergleich der Tabellenwerte mit den Werten gemäß den Gleichungen der „weitergehenden Anpralluntersuchungen“

Bild 4: Abminderung der Stoßkraft: $F = [\%] * F (T_N = 100 \text{ a})$, in Abhängigkeit der Restnutzungsdauer, (FF: Frontalstoß; FL: Flankenstoß), aus (BAW-Merkblatt, 2010)

Bild 5: Schematische Darstellung des Gefährdungsraumes, nach (BMVBS, 2010)

Bild 6: Altersstruktur der Brückenbauwerke der Bundesfernstraßen nach Bauwerksfläche in m^2 (BASt)

Bild 7: Konzept eines F-N-Diagramms

Bild 8: Wahrscheinlichkeitsdichte für Schiffsstoßlasten für Wasserstraßenklasse Vb, Frontalstoß (W_{FF}) und Flankenstoß (W_{FL}), nach Bild 4 in (Kunz, 2013)

Bild 9: Stoßlast-Verteilungs-Funktionen für a) Frontalstoß „FF“ und b) Flankenstoß „FL“, nach eigener Berechnung, die aber an „Bild 2“ in (Kunz, 2013) angelehnt ist

Bild 10: Anpassung der Schiffsstoßlast $F = f(T_{NR})$, nach (BAW-Merkblatt, 2010)

Bild 11: Verteilungsfunktionen der Anpralllasten nach JCSS, Eurocode und (Kunz, 2013)

Bild 12: Verteilungsfunktionen der Anpralllasten (Verknüpfung Lastmodell und Kollisionsmodell) nach JCSS, Eurocode und (Kunz, 2013)

Bild 13: Anpassung der Anpralllasten nach Eurocode und (Kunz, 2013)

Bild 14: Äquivalenter Zuverlässigkeitsindex $\ddot{a}qu. \beta_{TRN}$ für bestehende Bauwerke

Bild 15: Anpassungen der Schiffsstoßlast und ihre Auswirkung auf den (äquivalenten) Zuverlässigkeitsindex

Bild 16: Probabilistic Seismic Hazard Analysis: Ermittlung des seismischen Risikos für einen Standort

Bild 17: Ziele der Bauwerkserhaltung mit besonderer Berücksichtigung des Lastfalls Schiffsanprall bei Brücken

Bild 18: Schematische Darstellung des Gefährdungsraumes

Bild 19: Abminderung der Stoßkraft: $F = [\%] * F (T_N = 100 \text{ a})$, in Abhängigkeit der Restnutzungsdauer, (FF: Frontalstoß; FL: Flankenstoß)

Tabellen

Tabelle 1: Grundwert u_0 [m] für Senkrechtufer und Hilfswert $u_{0,n}$ [m] für geböschte Ufer in Abhängigkeit vom Anfahrwinkel α [°]

Tabelle 2: Schiffsunfälle an Brücken mit Todesopfern, Daten bis 2002 aus (Proske, 2003), danach eigene Recherche

Tabelle 3: Anprallhäufigkeit pro Brücke auf verschiedenen Flüssen; Daten aus (Proske, 2003)

Tabelle 4: Zielversagenswahrscheinlichkeiten pro Jahr nach (CEB, 1976)

Tabelle 5: Dynamische Frontal- und Flankenstoßlasten in Abhängigkeit von der Restnutzungsdauer, nach Tabelle 2 in (Kunz, 2013)

Tabelle 6: Zuverlässigkeitsindizes für reduzierte Restnutzungsdauern

Tabelle 7: Zuverlässigkeitsindex für Bestandsbauwerke bezogen auf Grenzzustand der Tragfähigkeit, Abminderungen durch ökonomische Optimierung ermittelt, Werte aus (Allaix et al., 2016) entnommen

Tabelle 8: Jährliche Ziel-Zuverlässigkeiten unter Maßgabe des „individuellen Risikos“ gemäß (Allaix et al., 2016), mit Anpassungen

Tabelle 9: Flottenstruktur auf der Nord-Ostsee-Kanal-Ostroute, entnommen aus (Kunz, 2019)

Tabelle 10: Nord-Ostsee-Kanal: Schiffsgrößenverteilung für 2006; DWT = ton dead weight, entnommen aus (Kunz, 2019)

Tabelle 11: Dynamische Stoßlasten für die Böschungen der neuen Rader Hochbrücke, aus (Kunz, 2019)

Tabelle 12: Grundwert u_0 [m] für Senkrechtufer und Hilfswert $u_{0,n}$ [m] für geböschte Ufer in Abhängigkeit vom Anfahrwinkel α [°]

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßen- und Verkehrswesen Unterreihe „Brücken- und Ingenieurbau“

2024

B 196: Zukünftige Entwicklung eines Tools für ein indikatorengestütztes, verkehrsträgerübergreifendes Lebenszyklusmanagement von Infrastrukturbauwerken

Hajdin, Schiffmann, Blumenfeld, Tanasić

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 197: Erfahrungssammlung Monitoring für Brückenbauwerke – Dokumentation 2021

Novák, Stein, Farouk, Thomas, Reinhard, Zeller, Koster

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 198: Erprobung einer geothermischen Bergwassernutzung am Grenztunnel Füssen

Moormann, Kugler

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 199: Zuverlässigkeitsbasierte Bauwerksprüfung – Feinkonzept

Hajdin, Fastrich

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 200: Konzeption zur Bestimmung von Lage und Anzahl asbesthaltiger Abstandhalter in Betonbrücken – Handlungsanweisung für den Umgang mit asbesthaltigen Hilfsbauteilen in Brückenbauwerken aus Stahlbeton

Hönig, Bossemeyer, Sanio, Thome

€ 16,00

B 201: Blockhinterlegung und Verpressverfahren zur Abdichtung von Tunnelinnenschalen

Thienert, Kessler, Brummermann, Tintelnot, Matsini, Handke, Lis, Schmidt

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 202: 10. BAST-Tunnelsymposium

€ 19,00

2025

B 203: Experimentelle und theoretische Untersuchungen zur Querkraft- und Torsionstragfähigkeit von Betonbrücken im Bestand

Hegger, Dommès, Adam, Fischer, Lamatsch, Thoma, Maurer, Lavrentyev, Stakalies, Kerkeni, Teworte, Sharei, Stettner, Zilch(+), Tecusan

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 204: Erarbeitung eines Prüfverfahrens zur Feststellung der inneren Standsicherheit von Gabionen aus punktgeschweißten Drahtgittern

Heimbecher, Lengers, Thünemann

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 205: Einfluss des Pannenbuchtensabstands auf die Tunnelsicherheit

Mayer, Brennberger, Haack, Zimmermann

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 206: Erfahrungsbericht zur Innenbeschichtung nach TL-Blatt 50 an der Brücke über den Petersdorfer See

Rüters, Schröder, Windmann, Lebelt

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 207: Entwicklung eines leistungsorientierten Prüfregimes für Brückenseilverfüllmittel

Hübscher

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 208: Korrosionsschutz von Brückenseilen

Friedrich, Windmann

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 209: Analyse des Reaktions- und Fluchtverhaltens in Straßentunneln unter Berücksichtigung von Gruppeneffekten

Thienert, Leismann, Kaufmann, Jenki, Stuehler, Hahn-Klimroth, Oetinger, Czudnochowski, Galler, Wenighofer

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 210: Leitfaden – Strategischer Einsatz von Monitoring für Ingenieurbauwerke

Wedel, Pitters, Hille, Herrmann, Schneider

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 211: Konzeptionelle Untersuchung zur Zusammenführung von Komponenten des Digital Twins Brücke

Zinke, Reymer, Schumann, Kosse, König, Wedel, Schneider, Marx

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 212: Geburtszertifikat für Brückenbauwerke – Die Nullmessung als Bewertungsgrundlage des Bauwerkszustands im Lebenszyklus

Wedel, Stark, Morgenthal, Rau

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 213: Auswirkungen der Anforderungen des BBQ-Konzeptes (Beton Bau Qualitätsklassen) für Ingenieurbauwerke nach ZTV-ING

Breit, Adams

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 214: Ursachenforschung zu Schäden an Lärmschutzwänden mit Vorsatzschale aus haufwerksporigem Leichtbeton

Breitenbücher, Krikelis

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 215: Stahlverbundbrücken – Überprüfung der Schädigungshypothese an Stahlbetonplatten unter Zug- und Querkraftbeanspruchung und Ermüdungsfestigkeit von Konsolträgern

Stein, Kraus, Geißler, Erlemann, Kuhlmann, Stempniewski

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2026**B 216: Abdichtung von Verkehrsflächen auf Betonbrücken nach TL BEL-B 1**

Sikinger, Martens

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 217: Lebenszyklusmanagement von Brücken mit Hilfe von Key Performance Indikatoren auf Basis unterschiedlicher Erfassungsquellen

Boros, Ralbovsky, Hula, Dohnalik

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 218: Nachweis bestehender Brücken auf Schiffsanprall

Gasser, Boros

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG


Zweite Schlachtpforte 7 · 28195 Bremen

Telefon (04 21) 3 69 03 - 0 · E-Mail: kontakt@schuenemann-verlag.de

Alternativ können Sie alle lieferbaren Titel auch auf unserer Website finden und bestellen.

www.schuenemann-verlag.de

Alle Berichte, die nur in digitaler Form erscheinen, können wir auf Wunsch als »Book on Demand« für Sie herstellen.



ISSN 0943-9293
ISBN 978-3-95606-933-8
<https://doi.org/10.60850/bericht-b218>

www.bast.de