

**Ermittlung von Schiffsstoßlasten
für die Schutzböschungen vor der
Rader Hochbrücke (A 7),
NOK-km 68,1**

Karlsruhe, 08. November 2019

BAW-Nr. A3951.00.10.10120

1000

1000

1000

**Ermittlung von Schiffsstoßlasten
für die Schutzböschungen vor der
Rader Hochbrücke (A 7),
NOK-km 68,1**

Auftraggeber:

DEGES Deutsche Einheit Fernstraßenplanungs- und Bau GmbH
Herr Dipl.-Ing. J. Brüchner
Zimmerstr. 54
10117 Berlin

Az.: AA03270129-3

Auftrags-Nr.:

BAW-Nr. A3951.00.10.10120

Aufgestellt von:

Abteilung: Bautechnik
Bearbeiter: C. Kunz

Karlsruhe, 08. November 2019

Das Gutachten darf nur ungekürzt vervielfältigt werden.
Die Vervielfältigung und eine Veröffentlichung bedürfen der schriftlichen Genehmigung der BAW.

Inhaltsverzeichnis	Seite
1 Veranlassung und Aufgabenstellung	1
2 Unterlagen	1
3 Wasserstraße und Bauwerk	3
3.1 Nord-Ostsee-Kanal (NOK)	3
3.2 Rader Hochbrücke BAB A7	6
4 Die Einwirkung Schiffstoß	9
5 Ermittlung der Stoßlast-Verteilungsfunktionen	13
6 Ermittlung der Kollisions-Raten	15
6.1 Ermittlung der Fehlerrate aus Unfalldaten	15
6.2 Kollisions-Modell	16
6.3 Berechnung der Kollisions-Wahrscheinlichkeiten	18
7 Stoßlasten, Stoßhöhen und Stoßlast-Zeitfunktionen	19
8 Gefährdungsraum	20
Literatur	22

Bild-Verzeichnis

- 1 Lageplan/Längsschnitt des NOK
- 2 Lage der Maßnahme Rader Hochbrücke
- 3 Trassierung im Bereich der Rader Hochbrücke
- 4 Verkehrsentwicklung auf dem NOK, 1952 - 2017
- 5 Rader Hochbrücke, NOK-km 68,1
- 6 Rader Hochbrücke, vorhandene Steinschüttung
- 7 Neue Rader Hochbrücke, Visualisierung der Vorplanung
- 8 Neue Rader Hochbrücke, Schnitt und Draufsicht der Vorplanung
- 9 Lastangriffsrichtung für Schiffsstoß
- 10 Trendentwicklung der durchschnittlichen BRZ auf dem NOK
- 11 Prognostizierte Flottenstruktur NOK 2125
- 12 Unfallstreckenrate NOK für 1998/2017
- 13 Kollisions-Modell

Tabellen-Verzeichnis

- 1 Flottenstruktur auf der NOK-Ostroute für 2006
- 2 NOK, Schiffsgrößen- bzw. auch Massenverteilung für 2006
- 3 Zusammenstellung der Kollisionsraten
- 4 Dynamische Stoßlasten für die Böschung an der neuen Rader Hochbrücke

Anlagen-Verzeichnis

- 1 Lageplan
- 2 Ermittlung der Stoßlast-Verteilungsfunktion
 - 1 Grundlagen für Stoßlast-Verteilungen
 - 2 Stoßlast-Verteilungen
- 3 Ermittlung der Unfallrate
- 4 Abschätzung der Kollisions-Wahrscheinlichkeiten
 - 1 Grundlagen
 - 2 Kollisions-Wahrscheinlichkeit mit Schutz-Böschung vor der Rader Hochbrücke
 - 3 Zusammenstellung der Kollisionsraten (λ -Werte)

1 Veranlassung und Aufgabenstellung

DEGES Deutsche Einheit Fernstraßenplanungs- und Bau GmbH plant den Ersatz-Neubau der Rader Hochbrücke im Zuge der BAB A7, deren Restnutzungsdauer wegen verkehrsbedingter Degradation und Schäden nur noch bis etwa 2025 prognostiziert wird. Die neue Rader Hochbrücke soll etwa 25 m östlich versetzt zur bestehenden und mittlerweile mit einem 6-streifigen Überbau erstellt werden.

Die bestehende Rader Hochbrücke ist seit etwa den 1990er Jahren durch den Pfeilern vorgelagerte Schutz-Böschungen gegenüber einer Schiffsanfahrung gesichert. Für den Ersatz-Neubau soll diese Sicherung als vergleichbare Sicherung überprüft bzw. ggf. angepasst werden. Für den Nachweis der Schutzwirkung ist die Einwirkung Schiffsanprall auf die vorhandene bzw. ggf. in gleicher Abmessung versetzte Böschung zu ermitteln; ggf. sind Bewertungsansätze für eine Verbesserung aufzuzeigen.

Im Auftrag der DEGES ermittelt die BAW im Rahmen einer Einzelfall-Betrachtung die Schiffsstoßlasten auf der Grundlage (Methodik) der (DIN EN 1991-1-7, 2010) ortsbezogen und gibt ggf. objektspezifische Erfordernisse hinsichtlich des Nachweises für Schiffsstoß (z.B. Geometrien, z.B. Verformungsnachweise, ...) an. Dabei werden Flottenstruktur, Schiffsdurchgänge, Geschwindigkeiten, Unfallaufkommen, nautische Verhältnisse analysiert und die Anpralllasten für die Schutzböschung mittels eines Last- und eines Kollisionsmodells ermittelt. Eine Betrachtung hinsichtlich der geometrischen Sicherheit bei havarierenden Schiffskörpern wird nach den verfügbaren Unterlagen vorgenommen. Bei Fehlen von Daten werden Vergleichsbetrachtungen vorgenommen.

2 Unterlagen und Daten

[U1] Plan Nord-Ostsee-Kanal, M. 1 : 100.000

[U2] DEGES, Kurzbeschreibung „A7 Ersatzbauwerk Rader Hochbrücke“, 22.03.2016

[U3] DEGES: Besprechungsprotokolle DEGES mit WSA Kiel-Holtenau, vom 30.04.2015 sowie vom 02.05.2016.

[U4] Pläne

- Bauwerksskizze „Bauwerk 603, Brücke über den Nord-Ostsee-Kanal, Hochbrücke „Rader Insel“ – Betr.-km 60,00, Ersatzneubau (Vorplanung): Lichtraumprofil Nord-Ostsee-Kanal, M. 1 : 500; Stand 10/2016; DEGES/Schüßler Plan/SSF Ingenieure AG;
- Bauwerksskizze „Bauwerk 603, Brücke über den Nord-Ostsee-Kanal, Hochbrücke „Rader Insel“ – Betr.-km 60,00, Ersatzneubau (Vorplanung): Variante 2 – Einzelliger Hohl-

kasten mit Konsolträgern, M. 1 : 2000/1: 100; Stand 04/2017; DEGES/Schüßler
Plan/SSF Ingenieure AG;

- Systemskizze „Gewässerbett NOK, Amt 114 ABz 1 (Hauptstrecke)“, Systemskizze NOK
Lichtraumprofil; M. 1 : 1.000; 03.08.2015; WSA Kiel-Holtenau
- Bestandsplan „Gewässerbett NOK, Amt 114 ABz 1 (Hauptstrecke)“, Übersichtsplan Kkm
67,1 – 69,8; M. 1 : 5.000; 03.08.2015; WSA Kiel-Holtenau
- Bauwerksskizze „A7, Ersatzneubau Rader Hochbrücke, Betr.-km 58,6 – 61,85, Bauwerk
603, Rader Hochbrücke – Betr.-km 60,00, Brücke über den Nord-Ostsee-Kanal,
Lichtraumprofil Nord-Ostsee-Kanal, M. 1 : 500; Stand 03/2018; DEGES/Schüßler
Plan/SSF Ingenieure AG;
- Entwurfszeichnung Sicherung der Pfeiler gegen Schiffsstoß: Gesamtansicht M. 1 : 500;
WSA Kiel-Holtenau, 19.06.1989
- Entwurfszeichnung Sicherung der Pfeiler gegen Schiffsstoß: Pfeiler P4, Nordseite,
Querschnitte M. 1 : 200; WSA Kiel-Holtenau, 19.06.1989

[U5] Verkehrs- und Unfallstatistiken für die Jahre 1998 – 2009, WSA Brunsbüttel, Sb 4, sowie für
die Jahre 2010 – 2017 Oststrecke, WSA Brunsbüttel, und 2010 – 2017 Weststrecke, WSA
Kiel-Holtenau.

[U6] Aktualisierung der Verkehrsprognose für den Nord-Ostsee-Kanal, PLANCO Consulting
Essen, 2009

[U7] Fehmarn Belt Link, Bridge Design, Ship impact risk, COWI-Obermeyer, Entwurf 2010 (un-
veröffentlicht); dort insbesondere Angaben zu „Kiel-Canal Ost-Route“

[U8] Mail-Nachricht von WSA Kiel-Holtenau, Herr Brockmann, 2011, zur Kapazitätsgrenze auf
dem NOK

[U9] Entwurf-HU/AU für die Sicherung der Rader Hochbrücke gegen Schiffsstoß, WSA Kiel-
Holtenau/Straßenbauamt Rendsburg, Kiel/Rendsburg 19.06.1989, Gesch.Z. 3-332.2/1.

[U10] [https://www.kuestendaten.de/NOK/DE/Projekte/Ausbau_NOK/Ausbau-des-Nord-
Ostsee-Kanals-node.html](https://www.kuestendaten.de/NOK/DE/Projekte/Ausbau_NOK/Ausbau-des-Nord-Ostsee-Kanals-node.html)

[U11] Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt Kiel-Holtenau: Schreiben „Ergänzende Zusendung
von Schiffsdaten“, vom 02. August 2019.

3 Wasserstraße und Bauwerk

3.1 Nord-Ostsee-Kanal (NOK)

Der Nord-Ostsee-Kanal verbindet Nordsee mit Ostsee und gehört zu den spiegelgleichen Seekanälen, der an beiden Enden durch Schleusen gegen die wechselnden Wasserstände (verursacht durch Gezeiten oder Windstau) der Nordsee und der Ostsee abgeschlossen wird, Bild 1. Die Endpunkte befinden sich in Brunsbüttel an der Elbe, NOK-km 0,38, und in Kiel-Holtenau an der Kieler Förde, NOK-km 98,64, (Wikipedia, 2016). Als Wassertiefe stehen 11 m zur Verfügung; die Breite des Wasserspiegels bzw. die Breite in der Sohle beträgt in der Weststrecke 162 m bzw. 90 m und in der Oststrecke noch 102,5 m bzw. 44 m, [U10]. In den Bereichen von Weichen ist der Kanal über diese Standardmaße verbreitert. Im Bereich der Rader Hochbrücke beträgt die Wasserspiegelbreite 191 m [U4].

Acht Straßen- und vier Eisenbahnstrecken überqueren den Nord-Ostsee-Kanal auf insgesamt zehn Brücken; dreizehn Fahrzeug- und eine Personenfähre ermöglichen den Transport auf die andere Seite, und bei Rendsburg existieren seit 1961 ein Straßen- und ein Fußgängertunnel. Alle Brücken haben die gleiche Durchfahrtshöhe von 42 Metern für die Schifffahrt.

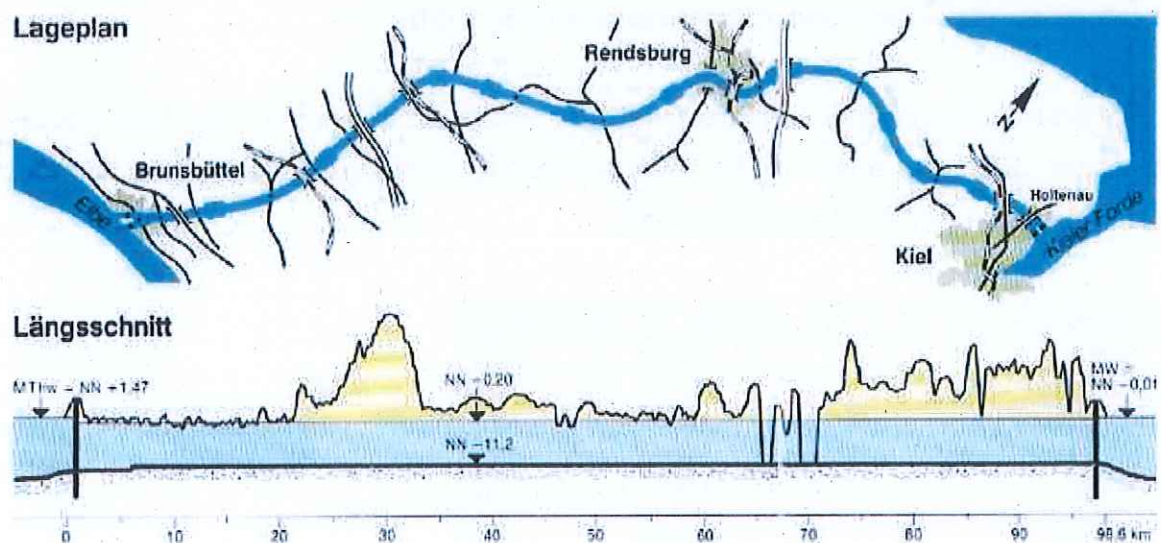


Bild 1: Lageplan/Längsschnitt des NOK (Quelle: WSA Kiel-Holtenau)

Steigender Schiffsverkehr und zunehmende Schiffsgrößen stellen den Nord-Ostsee-Kanal vor große Herausforderungen. Insbesondere der Bereich der Oststrecke zwischen den Weichen Königsförde und dem Binnenhafen Holtenau hat sich für den Schiffsverkehr zu einem Flaschenhals entwickelt. Nach gründlichen Voruntersuchungen wurde eine Lösung gefunden, mit der ein größtmöglicher Nutzen für die Schifffahrt erzielt und Eingriffe in Natur und Landschaft mini-

miert werden. Vorgesehen sind die Verbreiterung des Kanals im Bereich dieser Oststrecke und die Abflachung der engen Kurven. Auf ca. 11 km wird die Kanalböschung ausgebaut und im Bereich der Oststrecke wird der Nord-Ostsee-Kanal auf eine Mindestsohlbreite von 70 m erweitert. Eine Anpassung der Wassertiefe soll zunächst nicht vorgenommen werden, [U10].



Bild 2: Lage der Maßnahme Rader Hochbrücke (Quelle: [U2])

Aus [U7] kann die Flottenstruktur für den Nord-Ostsee-Kanal, Ostroute, zum Stand 2006 entnommen werden; [U7] ist nach wie vor die zusammenfassendste Datengrundlage. Danach verteilen sich die Schiffstypen wie in Tabelle 1 dargestellt.

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

Tabelle 1: Flottenstruktur auf der NOK-Ostroute, nach [U7]

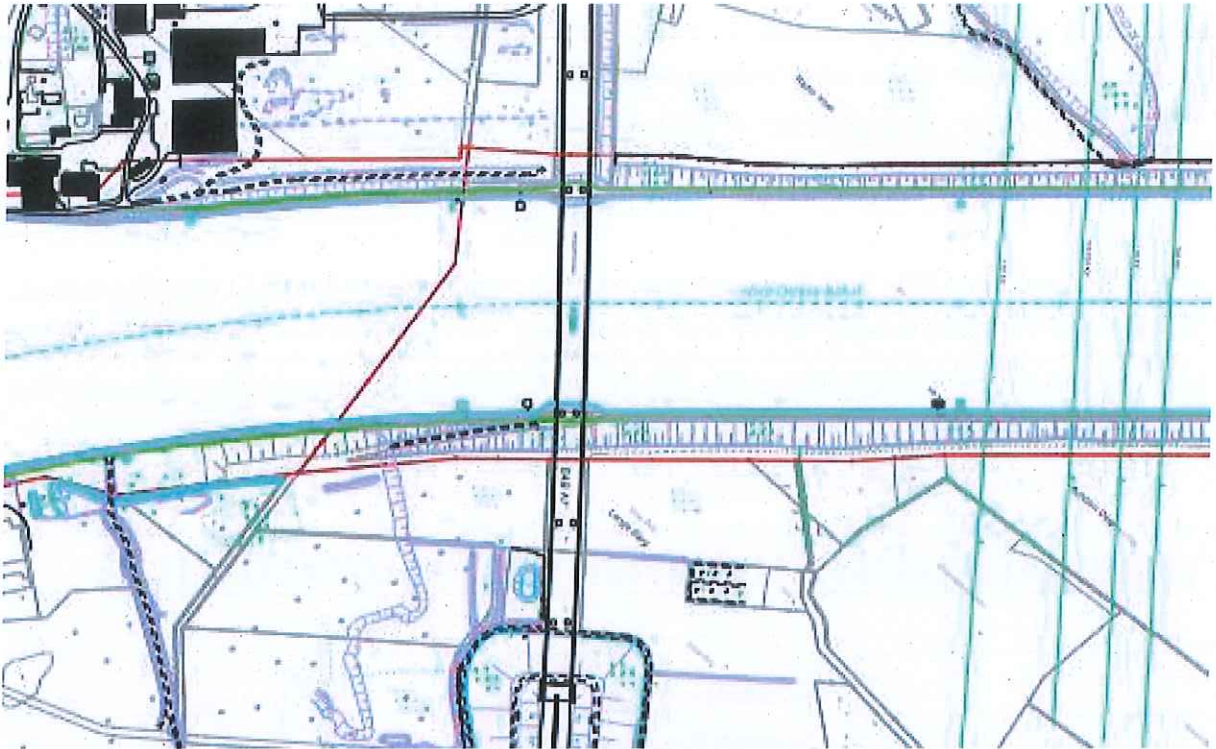


Bild 3: Trassierung im Bereich der Rader Hochbrücke, Ausschnitt aus [U4]

Je Fahrtrichtung und Jahr verkehrten in 2006 somit 15.770 Schiffe, Seeschiffe und einige Binnenschiffe. Im Mittel verkehrten diese Schiffe zu 64% beladen, zu 24% teil-beladen und zu 12% leer, [U7]. Die Schiffsgrößen- bzw. auch Massenverteilung für 2006 geht aus Tabelle 2 hervor; sie bildet die Grundlage für weitere Hochrechnungen.

V [dwt]	Du. V [dwt]	Anzahl 2006/Ri.	2006: Anteil in [%]	2006: Σ-Anteil in [%]
< 2500	1250	2423	15,4	15,40
< 5000	3750	6266	39,8	55,20
< 7500	6250	2493	15,75	70,95
< 10000	8750	2094	13,25	84,20
< 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	36250	20	0,1	99,72
< 40000	38750	18	0,1	99,82
< 42500	41250	16	0,1	99,92
< 45000	43750	12	0,08	100,00
		15770	100,00	

Tabelle 2: NOK, Schiffsgrößen- bzw. auch Massenverteilung für 2006, dwt = ton dead weight

Ca. 90% aller Schiffe haben eine Verdrängung von weniger als 12.500 dwt, ca. 95% weniger als 15.000 dwt. Das Durchschnittsschiff in 2006 weist eine mittlere Größe von 6.252 dwt (entsprechend etwa BRZ = 2.208) auf.

Seit etwa dem Jahr 2000 sind transportierte Ladung und Schiffsgröße (BRZ) signifikant angestiegen, Bild 4, (Völkl/Schnell, 2017), und pendeln um ein - trotz infolge der Wirtschaftskrise bedingten Einbruchs - hohes Niveau. Die Anzahl der Schiffspassagen nimmt allerdings gemäßigt ab, was letztlich auf eine Zunahme von relativ größeren Schiffen zurück zu führen ist.

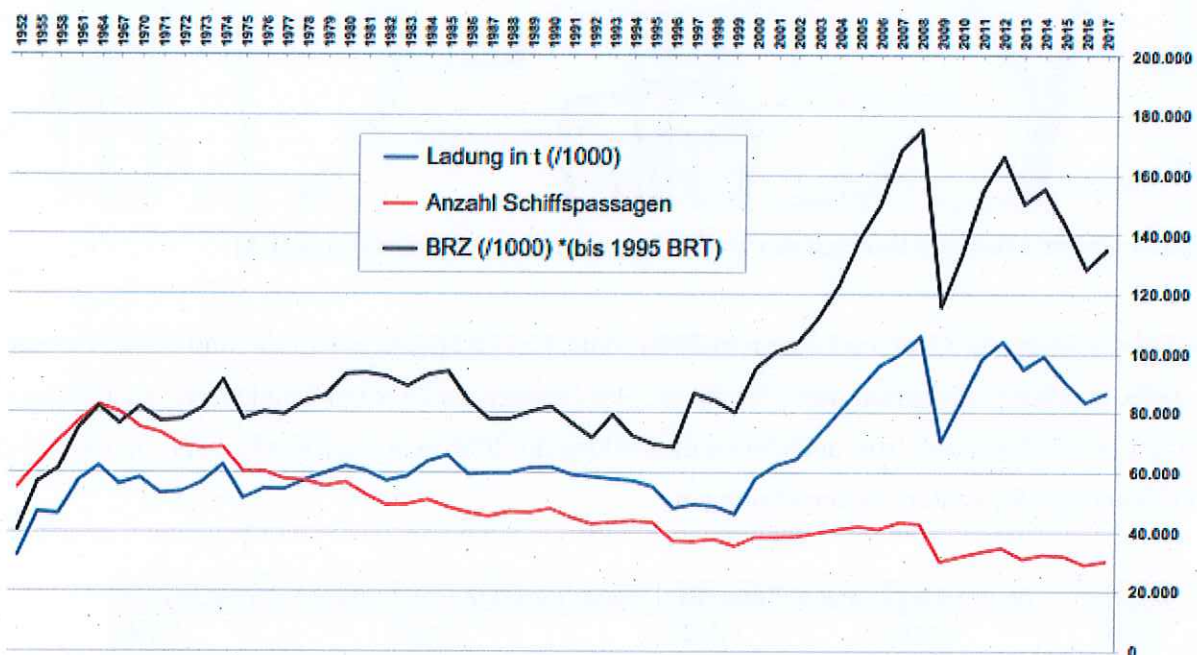


Bild 4: Verkehrsentwicklung auf dem NOK, 1952 – 2017 (Völkl/Schnell, 2017)

3.2 Rader Hochbrücke A 7

Die bestehende Rader Hochbrücke wurde 1972 für den Verkehr freigegeben und überführt die BAB A 7 über den Nord-Ostsee-Kanal, die Rader Insel und das Gewässer Borgstädter Enge (Gebert, 2018), Bilder 2 bis 3. Das Bauwerk ist ca. 1.500 m lang, die Hauptstützweite über dem NOK beträgt 221,5 m bei 42 Durchfahrtshöhe. Der 29,5 m breite Stahlüberbau ist einteilig und nimmt 4 Fahrspuren zuzüglich der Standstreifen auf. Die Überbau-Konstruktion ist ein zwei-stegiger Plattenbalken mit offenen, zwischen 5 m und 9,5 m hohen Hauptträgern und orthotroper Fahrbahn (Gebert, 2018), Bild 5.



**Bild 5: Rader Hochbrücke, NOK-km 68,1
(Quelle: DEGES)**

Seit etwa 1990 ist an der bestehenden Rader Hochbrücke zur Sicherung gegen Schiffsanprall der nicht auf Schiffsstoß bemessenen Pfeiler eine Schutz-Böschung aus geschütteten Steinen vorhanden, Bild 6, [U4]. Diese Schutz-Böschung ist auf die natürliche Böschung im oberen Bereich „aufgelegt“, ab etwa NN – 5,0 m, mit einer Böschungsneigung von 1 : 3. Eine vorher vorhandene Steinschüttung wurde durch eine neuere Steinschüttung überschüttet. Die darunterliegende natürliche Uferböschung hat gemäß [U4] eine Böschungsneigung zwischen 1 : 3 und 1 : 4.



Bild 6a: Rader Hochbrücke, vorhandene Schutz-Böschung (Quelle: DEGES)

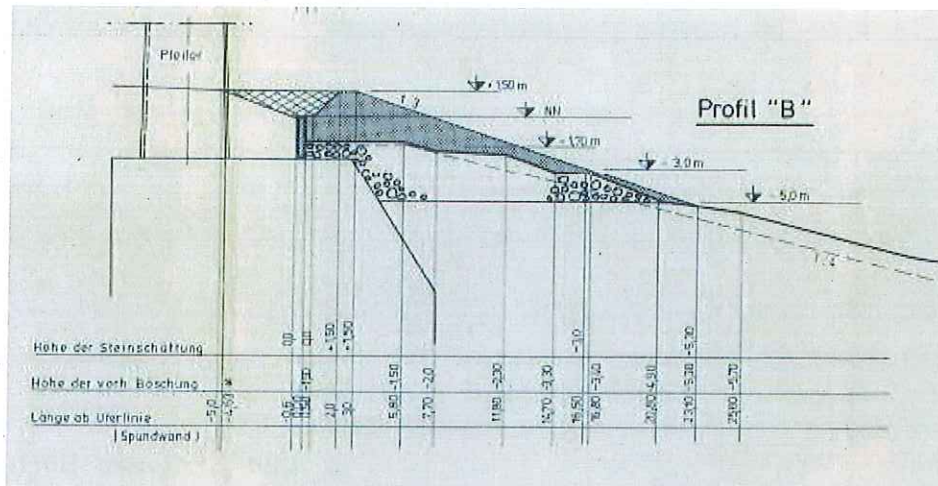


Bild 6b: Rader Hochbrücke, vorhandene Schutz-Böschung, aus [U4]

Gravierende Schäden an den Pfeilerköpfen mit zwischenzeitlichen Teilsperungen der Rader Hochbrücke sowie eine Begutachtung des Überbaus mit prognostizierter Restnutzungsdauer bis 2025 führten zu umgehenden Planungen für einen Ersatz-Neubau. Im September 2017 wurden die Planungen schließlich auf einen sechs-streifigen Überbau umgestellt. Vorzugslösung ist eine Stahlverbundbauweise mit einem Fahrbahndeck aus Verbundhohlkästen mit auskragender Fahrbahnplatte, die durch Konsolen bzw. Schrägstäben abgestützt wird, Bild 7 (Gebert, 2018). Der NOK soll mit einer Stützweite von 224 m überbrückt werden, die Bauhöhe des Verbund-Überbaus variiert dann von 4 m in den Regelbereichen bis 6 m im Kanalfeld. Die NOK-berandenden Pfeiler sollen eine Anvoutung erhalten. Die den NOK berandenden Pfeiler tragen die Bezeichnung „130“, Nordseite, und „140“, Südseite. Die Achse der Ersatz-Brücke ist gegenüber der bestehenden Achse um 25 m nach Osten verschoben.



Bild 7: Neue Rader Hochbrücke, Visualisierung der Vorplanung (Gebert, 2018)

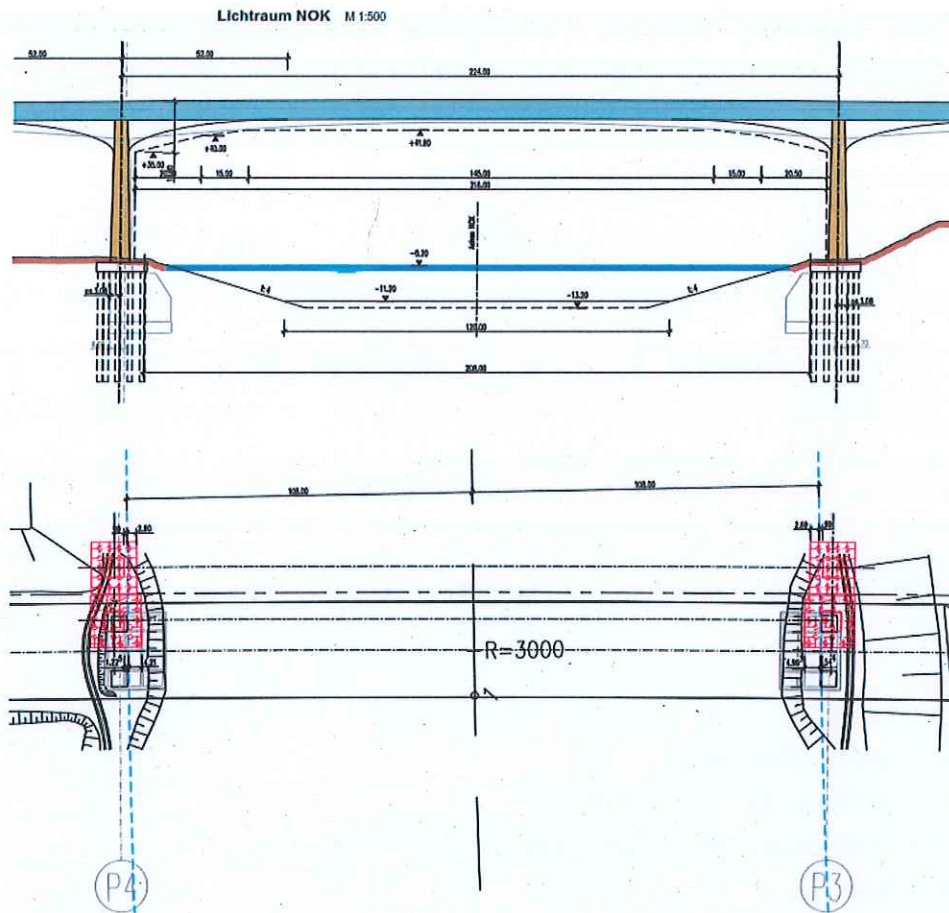


Bild 8: Neue Rader Hochbrücke, Schnitt und Draufsicht der Vorplanung (Quelle: DEGES)

4 Die Einwirkung Schiffsstoß

Die außergewöhnliche Einwirkung "Schiffsstoß" ist gekennzeichnet durch eine Belastung von sehr kurzer Dauer, deren Eintritts-Wahrscheinlichkeit während der Nutzungsdauer eines Bauwerkes sehr gering ist. Mechanisch ist der Schiffsstoß ein dynamischer Vorgang, dessen Auswirkungen über die Impulsbeziehung ermittelt werden.

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 und Zhang, 1998; DIN EN 1991-1-7, 2010). Die Last-Energie-Beziehung für Seeschiffe wird nach Gleichung (C.11) in (DIN EN 1991-1-7, 2010) berechnet, hier Gleichung (1 a/b). Das getroffene Bauwerk wird demgegenüber als starrer Baukörper angenommen, was baodynamisch zu maximalen Lasten führt. Für nachweislich nachgiebige Bau-

Körper ist diese Annahme des starren Bauwerkes nicht mehr zutreffend und eine Anpassung der Kontaktkraft entsprechend der jeweiligen Steifigkeiten von Schiff und Baukörper vorzunehmen.

Die Bestimmungsgleichung nach (DIN EN 1991-1-7, 2010) lautet:

$$F_{bow} = \begin{cases} F_o \cdot \bar{L} \left[\bar{E}_{imp} + (5.0 - \bar{L}) \bar{L}^{1.6} \right]^{0.5} & \text{for } \bar{E}_{imp} \geq \bar{L}^{2.6} \\ 2.24 \cdot F_o \left[\bar{E}_{imp} \bar{L} \right]^{0.5} & \text{for } \bar{E}_{imp} < \bar{L}^{2.6} \end{cases} \quad (1a/b)$$

wobei

$$\bar{L} = L_{pp} / 275m$$

$$\bar{E}_{imp} = E_{imp} / 1425 MNm$$

$$E_{imp} = \frac{1}{2} m_x v_o^2$$

und

F_{bow} maximale Buganpralllast [MN];

F_o Bezugswert der Anpralllast = 210 MN;

E_{imp} Energie, die durch plastische Verformungen zu absorbieren ist;

L_{pp} Länge des Schiffes [m];

m_x Masse plus Zusatzmasse bei Längsbewegung [10^6 kg];

v_o Anfangsgeschwindigkeit des Schiffes.

Für die betrachtete Flottenstruktur kommt Gleichung (1b) zum Tragen. Die größte Schiffsverformung s_{max} bestimmt sich über

$$s_{max} = \frac{\pi E_{imp}}{2 P_{bow}} \quad (2)$$

und die zugehörige Stoßzeit T_o wird mit

$$T_o \approx 1.67 \frac{s_{max}}{v_o} \quad (3)$$

berechnet.

Für die Bestimmung der Anpralllasten mit probabilistischen Methoden können gemäß (DIN EN 1991-1-7, 2010), C.4.4(2), probabilistische Modelle der Basisvariablen benutzt werden, die die Verformungsenergie oder das Anprallverhalten des Schiffes bestimmen.

Im allgemeinen ist die Stoßbelastung durch zwei Lastrichtungen gekennzeichnet, die nicht gleichzeitig auftreten und für die angenommen wird, dass sie senkrecht zum Bauteil wirken, Bild 7:

- der Frontalstoß wirkt i.a. in Fahrtrichtung (häufig in Längsachse eines Pfeilers oder Widerlagers),
- der Flankenstoß wirkt i.a. senkrecht zur Fahrtrichtung (häufig senkrecht zur Längsachse eines Pfeilers oder Widerlagers) und gleichzeitig wirkt ein Reibungsstoß parallel, d. h. in Längsrichtung.

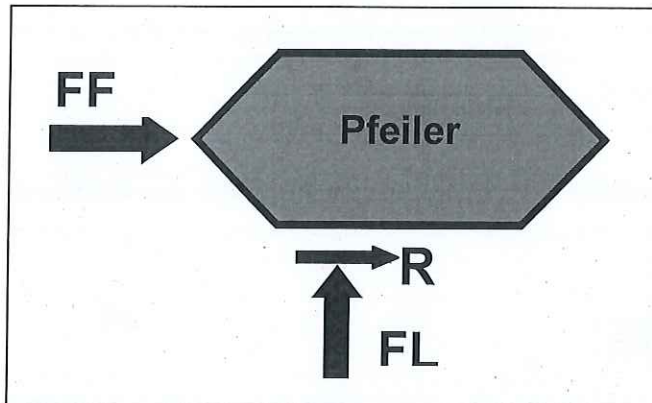


Bild 9: Lastangriffsrichtungen für Schiffsstoß

Bei Frontalstoß wird das havarierende Schiff in der Regel vollständig abgebremst. Die Größe des Reibungsstoßes, der gleichzeitig mit dem Flankenstoß auftritt, beträgt wegen des Reibungsbeiwertes rechnerisch 40% der Größe der Flankenstoßlast. Der Angriffspunkt des Flankenstoßes soll so angesetzt werden, dass die ungünstigste Wirkung erzielt wird (wandernde Last).

Im vorliegenden Fall einer aufgesetzten Schutz-Böschung vor den Pfeilern der Hochbrücke spielen nur Flankenstoß/Reibungsstoß eine Rolle; ein Frontalstoß auf den in Querrichtung vorstehenden Keil der aufgesetzten Böschung wird aber mitbetrachtet.

Außergewöhnliche Einwirkungen, zu denen Schiffsanprall zählt, wurden bereits in früheren Zeiten mit probabilistischen Modellen behandelt. Insofern griff (DIN EN 1991-1-7, 2010) – wie auch diverse Vorgängernormen – für mehrere Sachverhalte die probabilistische Modellbildung zur Bestimmung der Bemessungslast auf. So beruht die Vorgehensweise in (DIN EN 1991-1-7, 2010) für Schiffsanprall im Binnenbereich auf einer probabilistischen Studie, die in der BAW angefertigt wurde (Kunz, 1990; Kunz, 1993; Kunz, 1998 und Kunz, 2006). Auch in Seeschifffahrtsbereichen sind probabilistische Betrachtungen Stand der Technik, vgl. (Krappinger, 1978; IABSE, 1983 und Larsen, 1993).

Flottenstruktur und Wasserstraßenverkehr werden durch Verteilungen beschrieben (vgl. 5), auf deren Grundlage später eine wahrscheinlichkeitstheoretische Bestimmung der Stoßenergie und damit der Stoßlast erfolgt (vgl. 7). Die einzelnen Parameter werden dabei nach der direkten Integrationsmethode verknüpft. Die ermittelten Stoßlasten werden als Summenfunktion der relativen

Häufigkeiten aufbereitet, die wiederum im Sinne des klassischen Wahrscheinlichkeitsbegriffes als Wahrscheinlichkeit interpretiert werden (vgl. 5, Anlage 3).

Das mögliche Eintreten einer Kollision selbst wird auf der Grundlage einer Strecken-Unfallrate als Wahrscheinlichkeits-Ereignis modelliert (vgl. 6). Für den Fall und die Wahrscheinlichkeit einer möglichen Fehlmanövrierung des Schiffes wird in Abhängigkeit von Brücken-Geometrie und nautischen Randbedingungen die Kollisionsrate λ , unterschieden nach Frontalstoß und Flankenstoß, hier im Wesentlichen aber Flankenstoß, bestimmt.

Die Verknüpfung von Stoßlast-Verteilungsfunktion und Kollisionsrate mit Hilfe der mathematischen Beziehung :

$$\lambda * t_R = \frac{1}{1 - F_p(F)}, \quad (4)$$

vgl. (Kunz, 1993; Kunz, 2006), ergibt als das Produkt $\lambda * t_R$ eine dimensionslose Stoßlast-Verteilungsfunktion, jeweils für Frontalstoß und für Flankenstoß, aus Kollisions-Rate λ [1/a] (vgl. 7) und Wiederkehrintervall t_R [a] über der zugehörigen Verteilung $F_p(F)$ der dynamischen Stoßlast F_{dyn} in [MN] (vgl. 5). Hieraus lässt sich jeweils eine Bemessungs-Stoßlast für ein festgelegtes bzw. auch wirtschaftlich optimiertes Grenz-Risiko bestimmen, wobei t_R die für den Bemessungswert zugrunde zulegende Rückkehrperiode zwischen den akzeptablen Bemessungs-Schiffsstoß-Ereignissen ist.

Der repräsentative Wert dieser außergewöhnlichen Einwirkung "Schiffsstoß" wird nach einschlägiger Vorgehensweise, vgl. (DIN EN 1991-1-7, 2010), mit einer Überschreitungswahrscheinlichkeit der Stoßenergie bzw. der Stoßlast von $p = 10^{-4}/a$ bestimmt. Die Rückkehrperiode t_R als die für den Bemessungswert zugrunde zulegende Zeit zwischen den akzeptablen Bemessungs-Schiffsstoß-Ereignissen bestimmt sich zu $1/(10^{-4}/a) = 10.000$ a. (DIN EN 1991-1-7, 2010) geht bei Brückenbauwerken gemäß (DIN EN 1990, 2010) von einer Nutzungsdauer von $T_N = 100$ a aus. Als Prognosejahr für Hochrechnungen wird daher das Jahr $2025 + 100 = 2125$ gewählt.

5 Ermittlung der Stoßlast-Verteilungsfunktionen

Für die probabilistische Ermittlung der Einwirkung Schiffsstoß wird eine Stoßlast-Verteilungsfunktion unter Berücksichtigung der Verkehrsdaten berechnet. Für diese Berechnung werden Daten im Sinne des frequentistischen Wahrscheinlichkeitsbegriffes bewertet.

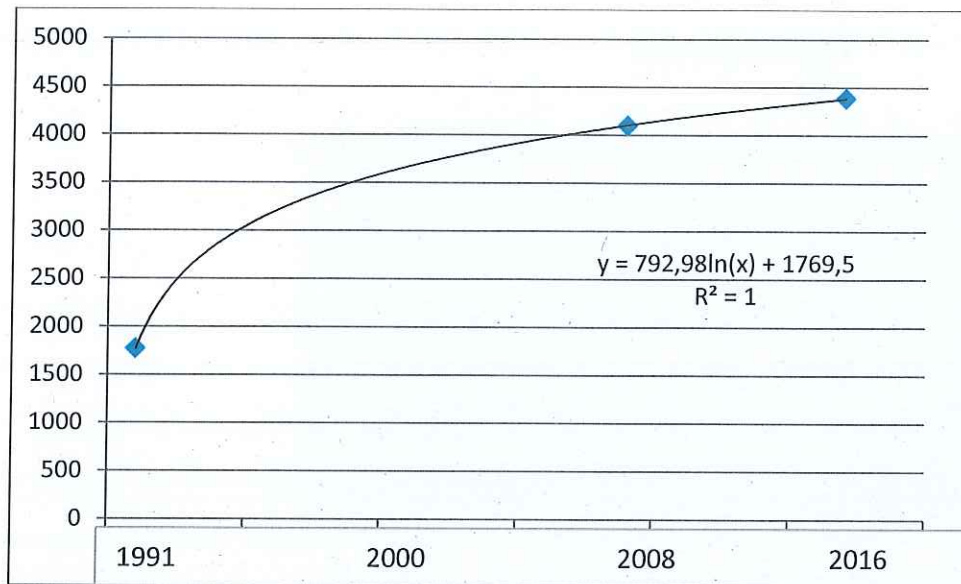


Bild 10: Trendentwicklung des durchschnittlichen BRZ auf dem NOK

Aus [U7] wurden Massen, in dwt, und Häufigkeiten der die Brückenstelle passierenden Schiffe ermittelt, vgl. Tabelle 1. Die Schiffsgrößenverteilung für das Last-Modell wurde hochgerechnet über ausgewertete Daten für die mittlere BRZ-Zahl der passierenden Schiffe zwischen 1998 und 2016, (HANSA, 2017), vgl. Bild 10. Danach folgt die Entwicklung der durchschnittlichen BRZ einer logarithmischen Funktion, die für die Steigerung der Schiffsgrößen, diese dann in dwt berechnet, verwendet wurde, Bilder 10 und 11. Während das Durchschnittsschiff in 2006 eine mittlere Größe von 6.252 dwt hat, würde nach Prognose in 2125 eine mittlere Größe von 9.716 dwt zu verzeichnen sein. Mit einigen Näherungen würde dieses durchschnittliche Schiff eine Länge von ca. 130 m, eine Breite von ca. 15,6 m und einen Tiefgang von ca. 6,7 m haben. Als größte Schiffsgruppe würden Fahrzeuge mit bis zu 65.000 dwt verkehren. Als mittlere Beladung der jeweiligen Schiffe wird – vor dem Hintergrund der bisherigen Auslastungen – im Mittel von einem Beladungsgrad von 85% ausgegangen.

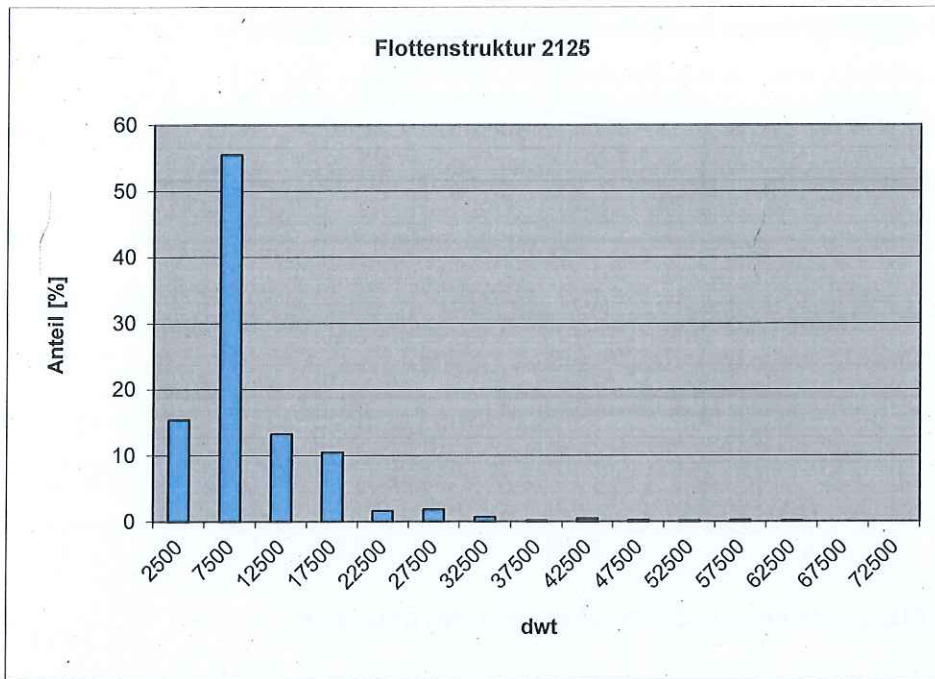


Bild 11: Prognostizierte Flottenstruktur NOK 2125, dwt = ton dead weight

Die Anzahl verkehrender Schiffe (Fahrzeuge) wird für ein Prognosejahr 2125 ermittelt. Aus [U6], aber insbesondere aus [U7] geht für die vergangenen Jahre eine jährliche Zunahme der Schiffsdurchgänge mit 2,4 % hervor. Eine diesbezügliche Prognose für 2125 würde einen Schiffsdurchgang von > 100.000 Fz/a bedeuten, der allerdings nach [U8] die Kapazität des NOK deutlich überschreiten würde. In Anlehnung an [U8] wurde daher ein Schiffsdurchgang als der Kapazitätsgrenze von 56.000 Fz/a in 2125 gewählt, somit 28.000 Fz/(a * Richtung), was eine Annahme auf der sicheren Seite darstellt, vgl. hierzu auch Bild 4.

Die Geschwindigkeits-Verteilung wurde mit einer mittleren Geschwindigkeit $v = 14,5 \text{ km/h}$ angesetzt, die Standardabweichung wurde aus Erfahrungen zu $\sigma_v = 0,4 \text{ km/h}$ gewählt. Eine Veränderung der Geschwindigkeits-Verteilung über die betrachteten Zeiträume wird nicht erwartet (Anlage 2). Aus Vergleichsberechnungen wird, wie auch bei Binnenschiffen, eine Verteilung für die Anfahrwinkel bei Flankenstoß angesetzt, bei dem als Gleitreibungsstoß jeweils vom Anfahrwinkel abhängige Normalkräfte in das Bauwerk eingetragen werden.

Statistische Auswertungen von zum Teil regionalen See- und Binnenschifffahrtsunfällen, vgl. (Fujii und Shiobara, 1971; Kunz, 1990; Larsen, 1993), lassen die Interpretation zu, dass nicht jede Schiffskollision mit der mechanisch möglichen maximalen Stoßwirkung verbunden ist. Dies kann bei Schifffahrtsunfällen zurückzuführen sein z.B. auf Bugformen, die weniger steif sind als der den Betrachtungen zugrundeliegende Bug, z.B. auf eine gegenüber der Fahrgeschwindigkeit erfolgte Reduzierung der Geschwindigkeit vor der Kollision, z.B. auf Effekte, die bei der modellhaften Betrachtung, auch bei einer Neubewertung einer Kollision, unberücksichtigt bleiben. Somit ist eine

Abminderung der Stoßwirkung gerechtfertigt. Sie wird durch den Ansatz einer auf o.a. Statistiken basierenden lognormalen Stoßlast-Schwerefunktion bei der Ermittlung der Stoßlast berücksichtigt, Anlage 2. Auch für diesen Schwere-Einfluss wird eine wesentliche Veränderung über die betrachteten Zeiträume nicht erwartet, so dass deren Einbezug für die vergleichende Fragestellung nicht entscheidungsrelevant ist.

6 Ermittlung der Kollisions-Raten

6.1 Ermittlung der Fehlerrate aus Unfalldaten

Als maßgebende Einflüsse auf die Anzahl der Unfälle in einem Wasserstraßen-Abschnitt können global die Anzahl der verkehrenden Fahrzeuge und die Dauer der Beteiligung dieser Fahrzeuge am Verkehr identifiziert werden, wobei letzteres durch die mittlere Transportentfernung repräsentiert wird. Zwischen Unfallzahl einerseits und der fahrzeug-kilometrischen Leistung andererseits wird ein linearer Zusammenhang angenommen. Als Unfallrate $URSKM [U/(Fz * km)]$ ergibt sich damit eine Unfall-Häufigkeit je Fahrzeug und zurückgelegte Kilometer Wegstrecke. Maßgebende Unfälle sind dabei Strecken-Unfälle, nicht z.B. Grundberührungen, Erzeugung von Sog und Wellenschlag, etc. .

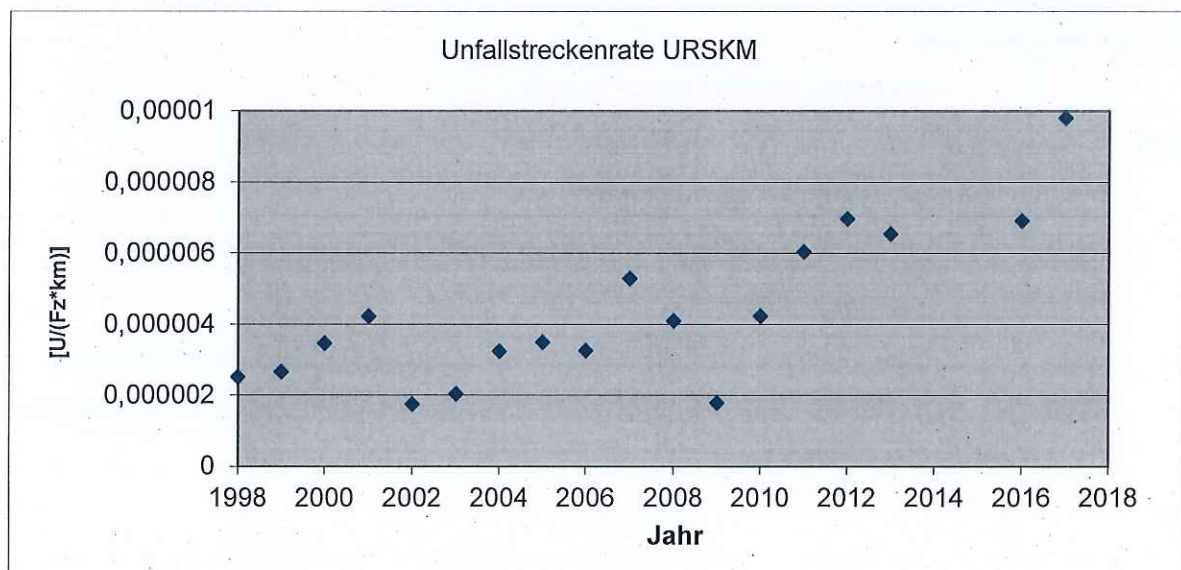


Bild 12: Unfallstreckenrate NOK für 1998/2017

Verkehrs- und Unfallzahlen wurden aus [U5] bis [U7] aufbereitet. Aus [U5] wurde eine Unfallstreckenrate $URSKM [U/(Fz. * km)]$ für die Jahre 1998 bis 2017 ermittelt, vgl. Bild 12. Als Unfälle wurden die Unfälle auf der 74,1 km freien Strecke des NOK, also ohne Schleusen- und Weichenbereiche, herangezogen.

Als Mittelwert kann ein $URSKM = 4,9 * 10^{-6} [U/(Fz. * km)]$ ermittelt werden, was für Seeschiff-fahrtsstraßen einen relativ guten Unfallwert darstellt. Als oberes 95%-Quantilwert ergäbe sich

ein $URSKM = 5,1 \cdot 10^{-6} [U/(Fz. \cdot km)]$. Wegen eines Trend-Verlauf wird den Berechnungen zunächst ein $URSKM = 2,0 \cdot 10^{-5} [U/(Fz. \cdot km)]$ zugrunde gelegt.

6.2 Kollisionsmodell

Für die Bestimmung der Kollisions-Rate wird eine Unfallrate mit einem geometrischen Kollisions-Modell verknüpft (Bild 13, Anlage 4). Der prinzipielle Ansatz derartiger Kollisions-Modelle findet sich in verschiedenen Literaturstellen, (Krappinger, 1978; Furnes und Amdahl, 1979; Larsen, 1993; AASHTO, 2009; DIN EN 1991-1-7, 2010). Für Brücken-Projekte an Binnen- und Seeschiff-fahrtsstraßen Deutschlands wurde ein Kollisions-Modell angepasst und weiterentwickelt (Kunz, 1990; Kunz, 1998; Kunz, 2006). Ein derartiges Kollisionsmodell wurde auf die Geometrie der Rader Hochbrücke im Zuge der A 7 angewendet.

Die Kollisions-Rate setzt sich dabei zusammen aus:

- der Fehlerrate je Wegeinheit, die die Wahrscheinlichkeit von kollisionsauslösenden Fehlern auf den passierenden Schiffen wiedergibt und
- der Kollisions-Wahrscheinlichkeit, dass ein "mit Fehlern behaftetes Schiff" einen Weg auf einen Bauwerkskörper, wie z.B. Brückenpfeiler, etc., nimmt

und wird berechnet über:

$$\lambda = \sum N_i \cdot \int (d\lambda_x/ds) \cdot W_1(s) \cdot W_2(s) ds \quad (5)$$

wobei

λ	die jährliche Kollisions-Rate
$\sum N_i$	die jährliche Anzahl passierender Schiffe, ggf. nach Klassen unterteilt
$(d\lambda_x/ds)$	die streckenbezogene Fehlerrate
$W_1(s) =$	$F_\varphi(\varphi_1) - F_\varphi(\varphi_2)$, die bedingte Wahrscheinlichkeit eines Kollisionsweges,
$W_2(s) =$	$1 - F_x(s)$, die bedingte Wahrscheinlichkeit, dass die Kollision nicht vermieden werden kann,

sind.

Die o.a. Fehler können durch menschliches Fehlverhalten, technische Fehler (Ausfall der Ruder- oder Antriebsanlage), Witterungseinflüsse, Strömungseinflüsse oder einer Kombination derselben bedingt sein. Die Fehlerrate wird näherungsweise aus der Unfallstatistik bzw. Unfallrate ermittelt.

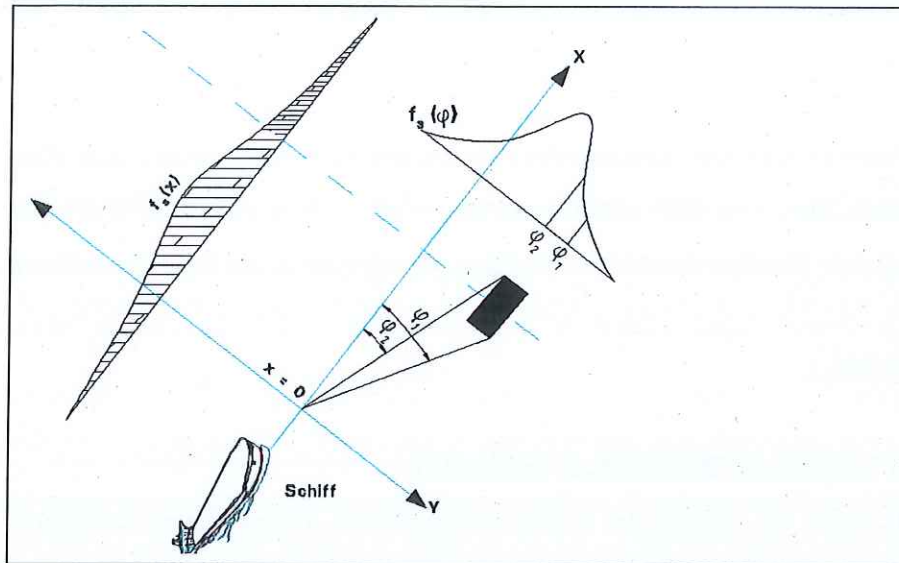


Bild 13: Kollisionsmodell (prinzipielle Darstellung)

Die Kollisions-Wahrscheinlichkeit für den Weg eines Schiffes nach dem Fehler-Ereignis hängt von einer großen Zahl zufallsbedingter Einflüsse ab, wie z.B. Schiffseigenschaften, Strömungs- und Windeinflüssen, Sollkurs bzw. Abweichungen davon, etc. . Als zufällige Variable zur Beschreibung dieses Schiffsweges werden:

- die Abweichung φ des havarierten Schiffes vom Sollkurs sowie
 - der bis zum Stillstand zurückgelegte Weg s (Stop-Weg)
- gewählt.

Da eine Vielzahl von Einflüssen diese zufälligen Variablen φ und s bestimmen können, wird für sie gemäß dem zentralen Grenzwertsatz der Wahrscheinlichkeitsrechnung eine Normalverteilung angesetzt (Pfaffinger, 1989). Daher reichen zur Bestimmung dieser Verteilungen jeweils Mittelwert und Standardabweichung aus, die aus Beobachtungen und Erfahrungswerten in die Berechnungen mit eingehen.

Mit den Verteilungsfunktionen der Winkel φ und der Auslaufwege s lässt sich für jede Stelle s_i entlang der Zufahrt zur Brückenstelle die Wahrscheinlichkeit berechnen, mit der ein fehlmännovriertes Schiff die Brückenpfeiler erreicht. Das Schiff selbst wird als sich der Brücke annähernder Punkt betrachtet, wobei die mittlere Schiffsbreite, ermittelt zu $B = 16$ m entsprechend der Prognose, vgl. Anlage 2, fiktiv der untersuchten Breite des Bauwerkskörpers zugerechnet wird.

Für die beiden Parameter Abweichung φ des havarierten Schiffes vom Sollkurs sowie für den vom Schiff bis zum Stillstand zurückgelegten Weg s werden Werte-Bereiche plausibel angenommen,

innerhalb deren fast alle möglichen Fälle - repräsentiert durch 98 % aller Werte - eingeschätzt werden können.

So wird über einen Mittelwert 0° und eine Standardabweichung von $\sigma_\varphi = 10^\circ$ berücksichtigt, dass innerhalb einer Wahrscheinlichkeit von 98% alle havarierten Schiffe sich in einem Winkelfächer von $\pm 20^\circ$ auf das betrachtete Brücken-Bauteil zu bewegen. Entsprechend wird ein Auslaufweg (Stopweg) zwischen 300 m und 800 m durch einen Mittelwert $s = 500$ m und eine Standardabweichung $\sigma_s = 150$ m charakterisiert.

6.3 Berechnung der Kollisions-Wahrscheinlichkeiten

Die Kollisions-Rate als die über die Anzahl der passierenden Schiffe aufintegrierte Kollisions-Wahrscheinlichkeit, je Richtung und Jahr werden insgesamt 28.000 Fz verkehren, ergibt sich aus der Verknüpfung von Fehlerrate und Treffer-Wahrscheinlichkeit. Verteilungen und Integrale werden numerisch berechnet (Anlage 4). Berechnet werden die Kollisions-Wahrscheinlichkeiten für die laterale Kollision beladener Schiffe an die Uferböschung sowie frontal an den Böschungsversatz.

Für den Schiffsverkehr in der Brückendurchfahrt wird angenommen, dass Ost- und Westfahrer in der Brücken-Durchfahrt mittig im 191 m breiten Fahrwasser fahren. Richtungsverkehre kleinerer Schiffseinheiten würden das Ergebnis nicht ändern. Für die Zufahrt der Schiffe zur Brücke von Ost und von West wird jeweils eine Weglänge von 1.000 m berücksichtigt. Die durch einen möglichen Schiffstoß gefährdete Uferböschung wird mit einer exponierten Länge von $l = 33$ m und einem stirnseitigen Versatz von 2 m abgebildet (Anlage 4). Der Stoßpunkt der Böschung liegt entsprechend der für den Prognosezeitpunkt ermittelten Schiffsgröße und dessen Tiefgang bei 6,7 m unter dem maßgebenden Wasserspiegel, also auf NN - 6,9 m.

Auf der sicheren Seite werden gedanklich alle „beladenen“ Schiffe auf die Böschung stoßend gerechnet. Die maßgebenden Kollisionsraten sind in nachfolgender Tabelle 3 dargestellt (FL = Flankenstoß, FF = Frontalstoß, vO = von Osten, vW = von Westen):

Bauteil	max. $\lambda_{FF,vO/vW}$	$\lambda_{FL,vO}$	$\lambda_{FL,vW}$	$\Sigma \lambda_{FL}$
Böschung „130“	0,00117	0,004	0,004	0,008
Böschung „140“	0,00105	0,00385	0,00385	0,0077

Tabelle 3: Zusammenstellung der Kollisionsraten, vgl. auch Anlage 4.

Die Summe der Kollisions-Wahrscheinlichkeiten für die Böschung vor Pfeiler „130“ beträgt $\Sigma \lambda = 0,00117 + 0,008 = 0,00917$, so dass statistisch für die Uferböschung „130“ mit einer Schiffsanfahrung von im Mittel alle 109 Jahren zu rechnen ist.

7 Stoßlasten, Stoßhöhen und Stoßlast-Zeitfunktionen

Die Stoßlasten lassen sich auf probabilistischer Basis aus Kollisions-Raten sowie Stoßlast-Verteilungsfunktionen über das o.a. Grenzkriterium zwischen relativer Sicherheit und relativer Unsicherheit, dem Sicherheitsniveau, bestimmen. Es beinhaltet eine Überschreitungs-Wahrscheinlichkeit der Stoßlast von $p = 10^{-4} / a$, vgl. 4.

Es ergeben sich aus den Stoßlast-Verteilungsfunktionen (vgl. 5 und Anlage 2) und Kollisions-Raten (vgl. 6 und Anlage 4) nachfolgend die für einen Standsicherheits- und Tragfähigkeits-Nachweis prinzipiell anzusetzenden Einwirkungen. Die Einwirkungen gelten für die aufgesetzte Schutz-Böschung (Leerbahn mit $T = 3$ m) bzw. für die Uferböschung (durchschnittlich beladene Schiffe mit $T = 6,7$ m).

Die dynamischen Stoßlasten betragen:

Bauteil	$\max. \lambda_{FF} * t_R$	FF_{dyn} [MN]	$\Sigma \lambda_{FL} * t_R$	FL_{dyn} [MN]
Böschung „130“	11,7	37,5	80	14,5
Böschung „140“	10,5	36,4	77	14,0

Tabelle 4: Dynamische Stoßlasten für die Böschungen der neuen Rader Hochbrücke

Ersatzlasten bei massigen Bauteilen oder bei erdhinterfüllten Bauwerken dürften in der Regel nahe an der dynamischen Last liegen, für eine erste Vorbemessung könnte ein dynamischer Lastfaktor von $DLF = 1,1$ verwendet werden, also $F_{stat} = DLF * F_{dyn}$. Flankenstoßlasten, normal zur Bauteil-Oberfläche, sind zusammen mit der Reibungskomponente $R = 0,4 * FL$ zu betrachten, vgl. 4 und Bild 9.

Schiffsstoß ist als außergewöhnliche Einwirkung innerhalb einer außergewöhnlichen Bemessungssituation zu behandeln.

Der Stoßlast-Ansatzpunkt für die Böschung würde zum einen bei $-6,7$ m und zum anderen bei -3 m unter dem maßgebenden Wasserspiegel NN $-0,2$ m sein. Als Lastverteilungsfläche für den lokalen Nachweis wird $l \times h = 2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ empfohlen, in der Böschung dürfte eine Lastausbreitung räumlich angenommen werden. Die Auswirkungen der Schiffsstoßlast auf die Pfeilergründung der neuen Rader Brücke sind zu untersuchen.

Eine genauere dynamische Einwirkung-Tragwerk-Analyse, die in der Regel eine wirtschaftlichere Bemessung ermöglicht, setzt die Kenntnis der Stoßlast-Zeit-Funktion voraus. Die Bestimmung der Stoßlast-Zeit-Funktion für Schiffsstöße von Seeschiffen gibt Gleichung (5) an. Durch die probabilistische Ermittlung der Stoßlast über Verteilungen der Einfluss-Parameter muss hier die

Bemessungsstoßenergie E_{imp} rückbestimmt werden. Sie beträgt mit Gleichung (1b) für das in 2125 zu erwartende Durchschnittsschiff $E_{\text{imp}} = 19,2 \text{ MNm}$ für den Frontalstoß und $E_{\text{imp}} = 2,9 \text{ MNm}$ für den Flankenstoß, die zugehörige Verformung im Schiff aus Gleichung (2) ist $s_{\text{max}} \approx 0,8 \text{ m}$ aus Frontalstoß und $s_{\text{max}} \approx 0,3 \text{ m}$ aus Flankenstoß. Die Stoßzeiten aus Gleichung (3) betragen $T_0 \approx 0,5 \text{ s}$ aus Frontalstoß und $T_0 \approx 0,2 \text{ s}$ aus Flankenstoß.

Einwirkungen auf den Überbau der neuen Rader Hochbrücke sind gemäß (DIN EN 1991-1-7, 2010), 4.6.3, mit einer statisch äquivalenten Anpralllast von $F = 1 \text{ MN}$ zu bemessen, da über die Höhenkontrollen an den Eingangsschleusen reguläre Aufbauten nicht stoßen können, sondern allenfalls Maste oder zuvor „losgelöste“ Krangeschirre bzw. Ausrüstungsteile des Schiffes.

8 Gefährdungsraum

Da die Brückenpfeiler „130“ und „140“ der neuen Rader Hochbrücke nicht planmäßig auf Schiffsstoß bemessen werden sollen, bedarf es noch einer Betrachtung der geometrischen Gefährdung, die auf der Grundlage früherer Untersuchungen empirisch vorgenommen wird. Die Gefährdungsräume werden sinnvollerweise für Schiffe „in Ballast“ mit Tiefgängen zwischen 3 und 6 m ermittelt, da diese höher aufliegen und über ihre Bugstruktur bei (Schräg-)Anfahrunge weiter überhängen.

In [U9] wurde der Gefährdungsraum für das 1989 als maßgebend eingestufte Schiff „Eistanker Tiira“ mit einem Stoßpunkt von -3 m unter der Wasserlinie auf der unter 1 : 3 geneigten Böschung zu horizontal 20,8 m ermittelt. Das Schiff lag gedanklich ohne Anfahrgeschwindigkeit in voller Querlage ($\alpha = 90^\circ$).

Zur Pfeilersicherung an der NOK-Hochbrücke Hochdonn, NOK-km 18,76, wurden Schutzböschungen mit Böschungsneigungen 1 : 1 im unteren und 1 : 2 im oberen Bereich eingebaut, die für ein havariierendes Schiff mit einem Tiefgang von -6,1 m unter der Wasserlinie einen Abstand von Stoßpunkt zur Pfeiler-Vorderflucht von 18,05 m sicherstellen. Weitere Untersuchungen zur Schiffsstoßsicherung der Brücke Hochdonn ergaben für ein Typschiff „MS Borussia“ mit $v = 15 \text{ km/h}$, einer Anfahrgeschwindigkeit und einem Anfahrwinkel von $\alpha = 35^\circ$ eine horizontale Aufschiebung von 16,4 m (Kramer, 2006).

Die mit [U11] übersandte Geometrie eines moderneren Kreuzfahrtschiffes „Seaborn Ovation“ liefert mit einem Bugüberstand von ca. 16,5 m bei Leertiefgang und voller Querlage ($\alpha = 90^\circ$) anscheinend keine ungünstigere Bug-Geometrie als der „Eistanker Tiira“.

Im Weiteren wurden die in AASHTO (2009), dort Abschnitt 7.3.4, angegebenen Ergebnisse früherer Modellversuche zu Schiffsanfahrungen an Schutzinseln im Zusammenhang mit den seinerzeitigen Planungen für die Sunshine Skyway Bridge (USA) und die Orwell Bridge (UK) ausgewertet. Auch hier führen vergleichbare Expositionen (Schiffsmassen, -geschwindigkeiten, Anfahrwinkel) zu keinem größeren Auffahrtsweg oder geometrischen Überstand als sie oben für den „Eistanker Tiira“ angesetzt wurden.

Es wird eingeschätzt, dass die seinerzeit 1989 konzipierte Schutz-Böschung an der bestehenden Rader Hochbrücke auch geometrisch eine Sicherheit für die Pfeiler „130“ und „140“ der geplanten neuen Rader Hochbrücke bietet und in entsprechender Geometrie (horizontaler Abstand zur Uferlinie, Böschungsneigung) verlängert werden kann.

Die Dimensionierung der im Zuge des Brücken-Neubaus zu verlängernden Schutzböschung sollte auch in Längsrichtung die Geometrie der vorhandenen Böschung fortführen und an den Enden wie die vorhandene Böschung gestaltet werden. Der Böschungs-Aufbau sollte filterstabil sein und die obere Deckwerkslage grundsätzlich der Gewichtsklasse HMB_{300/3000} gemäß DIN EN 13383-1 (2013) entsprechen. Die Deckwerkslage sollte eine Dicke von ca. 1,0 bis 1,5 m haben, ggf. ist der Böschungsfuß mit einem Fußauflager zu fixieren.

Bundesanstalt für Wasserbau
Karlsruhe, November 2019

Im Auftrag

(Kunz)
Ltd. Baudirektor

Literatur

AASHTO (2009): Guide Specification and Commentary for Vessel Collision Design of Highway Bridges. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington D.C., 2009.

DIN EN 1990 (2010): Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung; Deutsche Fassung EN 1990:2002 + A1:2005 + A1:2005/AC:2010. Beuth-Verlag, Berlin.

DIN EN 1991-1-7 (2010): Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-7: Allgemeine Einwirkungen - Außergewöhnliche Einwirkungen; 2010-12, einschließlich Nationalem Anhang. Beuth-Verlag, Berlin.

DIN EN 13383-1 (2013-08): Wasserbausteine – Teil 1: Anforderungen; Deutsche Fassung EN 13383-1:2013. Beuth-Verlag, Berlin.

EAU (2012): Empfehlung für die Ausführung von Ufereinfassungen, Fassung 2012. Verlag W. Ernst & Sohn, Berlin.

Fujii, Y., Shiobara, R.(1971): The Analysis of Traffic Accidents. In: Journal of Navigation, 1971(24)4.

Furnes, O; Amdahl, J (1979):. Computer Simulation Study of Offshore Collisions and Analysis of Ship-Platform Impacts. In: International Symposium on Offshore Structures, Rio de Janeiro, 1979

Gebert, G. (2018): Anstehende Großbrückenprojekte der DEGES. In: Brückenbau – Construction & Engineering. 18. Symposium Brückenbau in Leipzig. Verlag Wiedenspahn, 2018.

HANSA (2017): Schweres Jahr für den Nord-Ostsee-Kanal. HANSA International Maritime Journal – 154. Jahrgang, Nr. 2 – 2017.

IABSE (1983): Ship Collision with Bridges and Offshore Structures. IABSE Colloquium Copenhagen 1983. IABSE Preliminary Report, Vol. 42.

Kramer, H. (2006): Eisenbahnbrücke Hochdonn – Schiffsstoß. Schlußbericht. 24.04.2006 (im Auftrag der Bundesanstalt für Wasserbau), unveröffentlicht.

Krappinger, O. (1978): Abschätzung des Risikos, daß Tanker mit gefährlicher Ladung im Jadedfahrwasser mit anderen Schiffen kollidieren oder auf Grund laufen. HSVA, Hamburg, 1978, - unveröffentlicht

Kunz, C. (1990): Risiko-orientierte Last-Konzeption für Schiffstoß auf Bauwerke. In: Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau, Nr 67, Karlsruhe.

Kunz, C. (1993): Beurteilung der Sicherheit von Brücken hinsichtlich Schiffskollisionen. In: Zeitschrift für Binnenschifffahrt und Wasserstraßen, Nr. 6, 1993

Kunz, C.(1998): Ship Bridge Collision in River Traffic, Analysis and Design Practice. In: Proceedings of the International Symposium: Advances in Bridge Aerodynamics, Ship Collision Analysis, Operation and Maintenance, May 10-13, 1998, Technical University of Denmark. Balkema, Rotterdam, 1998.

Kunz, C.(2006): DIN 1055-9 – Außergewöhnliche Einwirkungen und probabilistische Verfahren. In: Der Prüfenieur, Nr. 4, Oktober 2006.

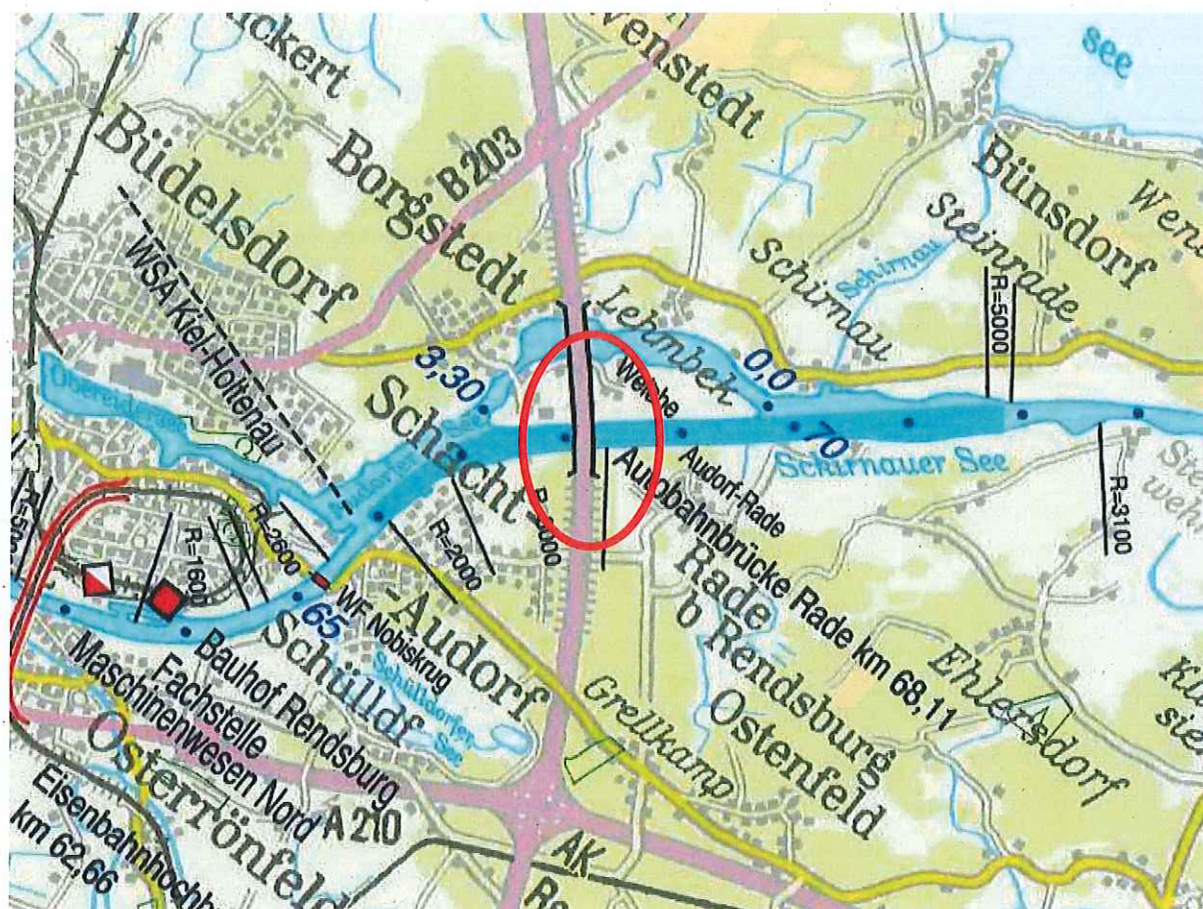
Larsen, O.D. (1993): Ship collision with bridges. Structural Engineering Document No. 4; International Association for Bridge and Structural Engineering, Zürich, 1993.

Pedersen, P.T; Zhang, S. (1998a): The mechanics on ship impact against bridges. In: Proceedings of the International Symposium: Advances in Bridge Aerodynamics, Ship Collision Analysis, Operation and Maintenance, May 10-13, 1998, Technical University of Denmark. Balkema, Rotterdam, 1998.

Pedersen, P.T; Zhang, S. (1998b): On Impact mechanics in ship collisions. In: Marine Structures, Volume 11, Issue 10, 1998.

Pfaffinger, D.(1989): Tragwerksdynamik. Verlag Springer, Wien, 1989

Völkl, G.; Schnell, D. (2017): Langfristig leistungsfähig – Investitionen in die Zukunft des Nord-Ostsee-Kanals. In: Jahresbericht 2017 der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung.



(Quelle: WSA Kiel-Holtenau)

Ermittlung der Stoßlast-Verteilungsfunktion für das beladene Durchschnittsschiff „Rader Hochbrücke“

1 Grundlagen für Stoßlast-Verteilungsfunktion

1.1 Größe des beladenen Durchschnitts-Schiffes

V [tdw]	Ø V [tdw]	Anzahl 2006	2006: Anteil in [%]	2006: Σ-Anteil in [%]
< 2500	1250	2423	15,4	15,40
< 5000	3750	6266	39,8	55,20
< 7500	6250	2493	15,75	70,95
< 10000	8750	2094	13,25	84,20
< 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	36250	20	0,1	99,72
< 40000	38750	18	0,1	99,82
< 42500	41250	16	0,1	99,92
< 45000	43750	12	0,08	100,00
		15770	100,00	

Tabelle 1: NOK, Schiffsgrößen- bzw. auch Massenverteilung für 2006, NOK-Ostroute

Aus Tabelle 1 folgt für 2006 eine jährliche Passagezahl von 15.770 Fz. je Fahrtrichtung. Das Durchschnittsschiff in 2006 hat eine mittlere Größe von 6.252 dwt, was in etwa Abmessungen mit einer Länge von ca. 119 m, einer Breite von ca. 14 m und einem Tiefgang von ca. 4 m entspricht. Ca. 90% aller Schiffe haben eine Verdrängung von weniger als 12.500 dwt, ca. 95% weniger als 15.000 dwt.

1.2 Ermittlung der Fahrzeug-Anzahl und -Verteilung für die Nutzungsdauer der Brücke

Die Schiffsgrößenverteilung wurde aus der Schiffsgrößen-Verteilung für das Jahr 2006, vgl. [U6], mit dort angegebenen jährlichen Zuwachsraten in der Tonnage von 1% für das Prognosejahr 2050 hochgerechnet, Tabelle 2. Die Schiffsgrößenverteilung für das Last-Modell wurde hochgerechnet über ausgewertete Daten für die mittlere BRZ-Zahl der passierenden Schiffe zwischen 1998 und 2016, (HANSA, 2017).. Danach folgt die Entwicklung der durchschnittlichen BRZ einer logarithmischen Funktion, die für die Steigerung der Schiffsgrößen, diese dann in dwt berechnet, verwendet wurde, Bilder 1. Während das Durchschnittsschiff in 2006 eine mittlere Größe von 6.252 dwt hat, würde nach Prognose in 2125 eine mittlere Größe von 9.716 dwt zu verzeichnen sein. Mit einigen Näherungen würde dieses durchschnittli-

che Schiff eine Länge von ca. 130 m, eine Breite von ca. 15,6 m und einen Tiefgang von ca. 6,7 m haben. Als größte Schiffsgruppe würden Fahrzeuge mit bis zu 65.000 dwt verkehren.

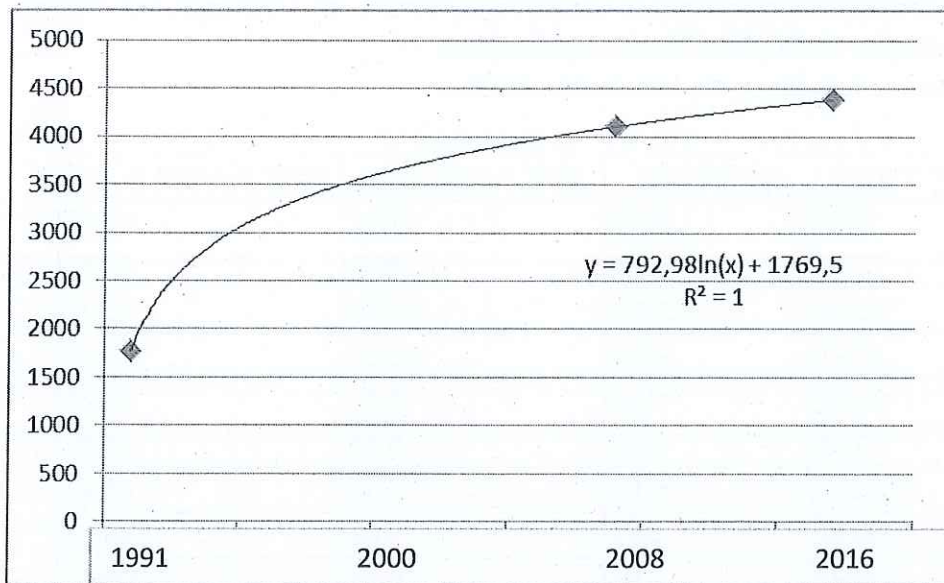


Bild 1: Trendentwicklung des durchschnittlichen BRZ auf dem NOK

Nach Prognose würde das Durchschnittsschiff in 2050 eine mittlere Größe von 10.878 dwt aufweisen, dwt = ton dead weight. Näherungsweise würde dieses durchschnittliche Schiff eine Länge von ca. 135 m, eine Breite von ca. 16 m und ein Tiefgang von ca. 6 m haben. Als größte Schiffsgruppe würden Fahrzeuge mit ca. 72.500 dwt verkehren.

Du. DWT 2006	Anteil 2006	Steigerung DWT 2006 -> 2125	DWT	Du. DWT 2125	Anteil 2125	Anzahl 2125
1250	15,4	1775	< 5000	2500	15,4	8624
3750	39,8	5325	< 10000	7500	55,5	31080
6250	15,75	8875	< 15000	12500	13,3	7420
8750	13,25	12425	< 20000	17500	10,5	5858
11250	7,03	15975	< 25000	22500	1,63	913
13750	3,43	19525	< 30000	27500	1,83	1025
16250	1,63	23075	< 35000	32500	0,70	392
18750	1,83	26625	< 40000	37500	0,18	101
21250	0,35	30175	< 45000	42500	0,45	252
23750	0,35	33725	< 50000	47500	0,20	112
26250	0,15	37275	< 55000	52500	0,10	56
28750	0,15	40825	< 60000	57500	0,20	112
31250	0,3	44375	< 65000	62500	0,10	56
33750	0,2	47925	< 70000	67500	0	0
36250	0,1	51475	< 75000	72500	0	0
38750	0,1	55025				
41250	0,1	58575				
43750	0,08	62125				
			Summe:		100,00	56000

Tabelle 2: Hochrechnung der mittleren Schiffsgröße der NOK-Schiffe für 2125

Tabelle 3: Verteilung der Flottenstruktur der NOK-Schiffe in 2125

Die Anzahl verkehrender Schiffe (Fahrzeuge) wird für ein Prognosejahr 2125 über eine in der Vergangenheit jährliche Zunahme der Schiffsdurchgänge mit 2,4 % ermittelt, [U5], [U6]. Eine diesbezügliche Prognose für 2125 würde einen Schiffsdurchgang von ca. 82.000 Fz/a bedeuten, der allerdings nach [U7] die Kapazität des NOK deutlich überschreiten würde. In Anlehnung an [U7] wurde daher ein Schiffsdurchgang von 56.000 Fz/a in 2125 als Kapazitätsgrenze gewählt, somit 28.000 Fz/(a * Richtung). Da die Schiffe auch in Zukunft nicht alle voll beladen sein werden, wird ein Beladungsfaktor von 85% angesetzt.

1.3 Geschwindigkeits-Verteilung

$$\bar{v} = 14,5 \text{ km/h} = 4,03 \text{ m/s}$$

$$\sigma_v = 0,4 \text{ km/h} = 0,11 \text{ m/s}$$

Geschwindigkeits-Verteilung als Normal-Verteilung:

Verteilungs-Funktion [-]	Wahrscheinlichkeit [-]	Klassenmittel v [m/s]
$\Phi(3,7) = 0,0001$	0,001	3,65
$\Phi(3,8) = 0,018$	0,017	3,75
$\Phi(3,9) = 0,119$	0,101	3,85
$\Phi(4,0) = 0,393$	0,274	3,95
$\Phi(4,1) = 0,738$	0,345	4,05
$\Phi(4,2) = 0,939$	0,201	4,15
$\Phi(4,3) = 0,993$	0,054	4,25
$\Phi(4,4) = 1,000$	0,007	4,35

1.4 Anfahrwinkel und Deformationsenergie

Aus der Impulsbeziehung beim (Reibungs-)Stoß ergibt sich ein Verhältnis von Deformationsenergie EDEF zur Anfahrerenergie EA bei Schräganfahrt für ausgewählte Anfahrwinkel und einen Reibungsbeiwert $\mu = 0,4$:

Winkel α	EDEF/EA
$\alpha = 5^\circ$	= 0,003
$\alpha = 10^\circ$	= 0,013
$\alpha = 15^\circ$	= 0,030
$\alpha = 20^\circ$	= 0,056
$\alpha = 25^\circ$	= 0,091
$\alpha = 30^\circ$	= 0,136
$\alpha = 35^\circ$	= 0,193
$\alpha = 40^\circ$	= 0,264

mit EDEF = Deformationsenergie

mit EA = Bewegungsenergie

Das Verhältnis EDEF/EA wird durch die geometrische Regressions-Gleichung:

$$\text{EDEF/EA} = w(m) = 0,00286973 \cdot m^{2,169224} [-]$$

mit $m = \alpha/5$ angenähert !

Häufigkeiten der Winkel bei einer Anfahrung aus einer Betrachtung an einem geometrischen Vergleichs-Modell (vgl. Kollisions-Modell), bei dem die geometrische Lage des in die Kollision verwickelten Objektes zur Fahrlinie der Schiffe berücksichtigt wird:

Ø Winkel [°]	Wahrscheinlichkeit [-]
5	0,37
10	0,31
15	0,15
20	0,08
25	0,06
30	0,01
35	0,01
40	0,01

1.5 Stoßlast-Schwere

Auf der Grundlage der Unfall-Schwere-Statistik in Kunz (1990) bietet sich zur Beschreibung eine Log-Normalverteilung an mit den Charakteristiken stetig, positive Schiefe und Beschränkung der Variablen auf positive Werte. Die Konstruktion der Verteilung erfolgt im Wahrscheinlichkeitsnetz über 2 Punkte grafisch:

- Schwerefaktor = 1,0: wird von 1% aller Fälle erreicht oder überschritten,
- Schwerefaktor = 0,1: wird von 99% aller Fälle erreicht oder überschritten.

Es wird als Verteilung angesetzt:

Schwerefaktor Wahrscheinlichkeit

0	0,18
0,2	0,51
0,4	0,21
0,6	0,07
0,8	0,02
1,0	0,01

2

Stoßlast-Verteilung Frontalstoß und Flankenstoß
Stoßlast nach DIN EN 1991-1-7 (2010), PEDERSEN
Verkehr NOK 2125, Fz. voll beladen, $v_m = 14,5$ km/h
für Rader Hochbrücke, NOK-km 68,1,

Datei: Rader_HoBrü_F.MCD

$i := 1..15 \quad j := 1..8 \quad k := 1..6 \quad m := 1..8$

Schiffsmassen: $T(i) := 5000 \cdot i - 2500 \quad L(i) := 5.77222 \cdot T(i)^{0.3386361}$

Geschwindigkeiten: $v(j) := 3.55 + j \cdot 0.1$

Stoßlast-Schwere-Faktor $SF(k) := 0.2 \cdot k - 0.2$

Bewegungsenergie: $EST(i,j) := \frac{T(i) \cdot v(j)^2}{(2 \cdot 9.81 \cdot 1000)} \cdot 10$

Winkel-Beiwert $w(m) := 0.00286973 \cdot (m^{2.169224})$

Wahrscheinlichkeiten der Schiffsmassen:

$p_1 := 15.4 \quad p_2 := 55.5 \quad p_3 := 13.25 \quad p_4 := 10.46 \quad p_5 := 1.63$
 $p_6 := 1.83 \quad p_7 := 0.7 \quad p_8 := 0.18 \quad p_9 := 0.45 \quad p_{10} := 0.2$
 $p_{11} := 0.1 \quad p_{12} := 0.2 \quad p_{13} := 0.1 \quad p_{14} := 0.0 \quad p_{15} := 0.0$

Wahrscheinlichkeiten der Geschwindigkeit:

$v_1 := 0.001 \quad v_2 := 0.017 \quad v_3 := 0.1$
 $v_4 := 0.274 \quad v_5 := 0.346 \quad v_6 := 0.201$
 $v_7 := 0.054 \quad v_8 := 0.007$

Stoßlast-Schwere-Wahrscheinlichkeit

$sf_1 := 0.18 \quad sf_2 := 0.51$
 $sf_3 := 0.21 \quad sf_4 := 0.07$
 $sf_5 := 0.02 \quad sf_6 := 0.01$

Wahrscheinlichkeiten der Anfahrwinkel:

$wf_1 := 0.37 \quad wf_2 := 0.31 \quad wf_3 := 0.15$
 $wf_4 := 0.08 \quad wf_5 := 0.06 \quad wf_6 := 0.01$
 $wf_7 := 0.01 \quad wf_8 := 0.01$

Frontal-Stoßlast: $PSt(i,j,k) := \left[2.24 \cdot 210 \cdot \left[L(i) \cdot \left(\frac{1}{275} \right) \cdot \frac{EST(i,j)}{1425} \right]^{\left(\frac{1}{2} \right)} \right] \cdot SF(k)$

Flanken-Stoßlast: $PSSSt(i,j,m,k) := \left[2.24 \cdot 210 \cdot \left[L(i) \cdot \left(\frac{1}{275} \right) \cdot w(m) \cdot \frac{EST(i,j)}{1425} \right]^{\left(\frac{1}{2} \right)} \right] \cdot SF(k)$

Wahrscheinlichkeit
der Frontal-Stoßlast: $pSt(i,j,k) := p_i \cdot v_j \cdot sf_k$

Wahrscheinlichkeit
der Flanken-Stoßlast: $pSSSt(i,j,m,k) := p_i \cdot v_j \cdot wf_m \cdot sf_k$

Kontrolle: $\sum_i \sum_j \sum_k pSt(i,j,k) = 100 \quad \sum_i \sum_j \sum_m \sum_k pSSSt(i,j,m,k) = 100$

Verteilungsfunktion der Frontal-Stoßlast:

PSt<5	$\sum_k \sum_j \sum_i (pSt(i,j,k) \cdot \Phi(4.99 - PSt(i,j,k))) = 18$
PSt<10	$\sum_k \sum_j \sum_i (pSt(i,j,k) \cdot \Phi(9.99 - PSt(i,j,k))) = 25.854$
PSt<15	$\sum_k \sum_j \sum_i (pSt(i,j,k) \cdot \Phi(14.99 - PSt(i,j,k))) = 57.393$
PSt<20	$\sum_k \sum_j \sum_i (pSt(i,j,k) \cdot \Phi(19.99 - PSt(i,j,k))) = 65.220954$
PSt<25	$\sum_k \sum_j \sum_i (pSt(i,j,k) \cdot \Phi(24.99 - PSt(i,j,k))) = 72.1665253$
PSt<30	$\sum_k \sum_j \sum_i (pSt(i,j,k) \cdot \Phi(29.99 - PSt(i,j,k))) = 83.4857014$
PSt<35	$\sum_k \sum_j \sum_i (pSt(i,j,k) \cdot \Phi(34.99 - PSt(i,j,k))) = 85.0365928$
PSt<40	$\sum_k \sum_j \sum_i (pSt(i,j,k) \cdot \Phi(39.99 - PSt(i,j,k))) = 91.3504534$
PSt<45	$\sum_k \sum_j \sum_i (pSt(i,j,k) \cdot \Phi(44.99 - PSt(i,j,k))) = 92.7277612$
PSt<50	$\sum_k \sum_j \sum_i (pSt(i,j,k) \cdot \Phi(49.99 - PSt(i,j,k))) = 94.3101408$
PSt<55	$\sum_k \sum_j \sum_i (pSt(i,j,k) \cdot \Phi(54.99 - PSt(i,j,k))) = 96.3293314$
PSt<60	$\sum_k \sum_j \sum_i (pSt(i,j,k) \cdot \Phi(59.99 - PSt(i,j,k))) = 96.728237$
PSt<65	$\sum_k \sum_j \sum_i (pSt(i,j,k) \cdot \Phi(64.99 - PSt(i,j,k))) = 97.479926$
PSt<70	$\sum_k \sum_j \sum_i (pSt(i,j,k) \cdot \Phi(69.99 - PSt(i,j,k))) = 98.292357$
PSt<75	$\sum_k \sum_j \sum_i (pSt(i,j,k) \cdot \Phi(74.99 - PSt(i,j,k))) = 98.7552612$
PSt<80	$\sum_k \sum_j \sum_i (pSt(i,j,k) \cdot \Phi(79.99 - PSt(i,j,k))) = 98.8498136$

PSt<85	$\sum_k \sum_j \sum_i (pSt(i,j,k) \cdot \Phi(84.99 - PSt(i,j,k))) = 99.0013101$
PSt<90	$\sum_k \sum_j \sum_i (pSt(i,j,k) \cdot \Phi(89.99 - PSt(i,j,k))) = 99.1832362$
PSt<95	$\sum_k \sum_j \sum_i (pSt(i,j,k) \cdot \Phi(94.99 - PSt(i,j,k))) = 99.468937$
PSt<100	$\sum_k \sum_j \sum_i (pSt(i,j,k) \cdot \Phi(99.99 - PSt(i,j,k))) = 99.55811$
PSt<105	$\sum_k \sum_j \sum_i (pSt(i,j,k) \cdot \Phi(104.99 - PSt(i,j,k))) = 99.623396$
PSt<110	$\sum_k \sum_j \sum_i (pSt(i,j,k) \cdot \Phi(109.99 - PSt(i,j,k))) = 99.6838644$
PSt<115	$\sum_k \sum_j \sum_i (pSt(i,j,k) \cdot \Phi(114.99 - PSt(i,j,k))) = 99.7675442$
PSt<120	$\sum_k \sum_j \sum_i (pSt(i,j,k) \cdot \Phi(119.99 - PSt(i,j,k))) = 99.8046154$
PSt<125	$\sum_k \sum_j \sum_i (pSt(i,j,k) \cdot \Phi(124.99 - PSt(i,j,k))) = 99.84794$
PSt<130	$\sum_k \sum_j \sum_i (pSt(i,j,k) \cdot \Phi(129.99 - PSt(i,j,k))) = 99.8671567$
PSt<135	$\sum_k \sum_j \sum_i (pSt(i,j,k) \cdot \Phi(134.99 - PSt(i,j,k))) = 99.8878356$
PSt<140	$\sum_k \sum_j \sum_i (pSt(i,j,k) \cdot \Phi(139.99 - PSt(i,j,k))) = 99.9070636$
PSt<170	$\sum_k \sum_j \sum_i (pSt(i,j,k) \cdot \Phi(169.99 - PSt(i,j,k))) = 99.971318$
PSt<200	$\sum_k \sum_j \sum_i (pSt(i,j,k) \cdot \Phi(199.99 - PSt(i,j,k))) = 99.9856084$

Verteilungsfunktion der Flanken-Stoßlast:

PSSt<1	$\sum_k \sum_m \sum_j \sum_i (pSSt(i,j,m,k) \cdot \Phi(0.99 - PSSt(i,j,m,k))) = 37.0128842$
PSSt<2	$\sum_k \sum_m \sum_j \sum_i (pSSt(i,j,m,k) \cdot \Phi(1.99 - PSSt(i,j,m,k))) = 58.3737863$
PSSt<3	$\sum_k \sum_m \sum_j \sum_i (pSSt(i,j,m,k) \cdot \Phi(2.99 - PSSt(i,j,m,k))) = 73.6505672$
PSSt<4	$\sum_k \sum_m \sum_j \sum_i (pSSt(i,j,m,k) \cdot \Phi(3.99 - PSSt(i,j,m,k))) = 81.334637$
PSSt<5	$\sum_k \sum_m \sum_j \sum_i (pSSt(i,j,m,k) \cdot \Phi(4.99 - PSSt(i,j,m,k))) = 87.5565222$
PSSt<6	$\sum_k \sum_m \sum_j \sum_i (pSSt(i,j,m,k) \cdot \Phi(5.99 - PSSt(i,j,m,k))) = 90.2117231$
PSSt<7	$\sum_k \sum_m \sum_j \sum_i (pSSt(i,j,m,k) \cdot \Phi(6.99 - PSSt(i,j,m,k))) = 93.0560921$
PSSt<8	$\sum_k \sum_m \sum_j \sum_i (pSSt(i,j,m,k) \cdot \Phi(7.99 - PSSt(i,j,m,k))) = 94.7591772$
PSSt<9	$\sum_k \sum_m \sum_j \sum_i (pSSt(i,j,m,k) \cdot \Phi(8.99 - PSSt(i,j,m,k))) = 95.7650888$
PSSt<10	$\sum_k \sum_m \sum_j \sum_i (pSSt(i,j,m,k) \cdot \Phi(9.99 - PSSt(i,j,m,k))) = 96.7402959$
PSSt<11	$\sum_k \sum_m \sum_j \sum_i (pSSt(i,j,m,k) \cdot \Phi(10.99 - PSSt(i,j,m,k))) = 97.1829576$
PSSt<12	$\sum_k \sum_m \sum_j \sum_i (pSSt(i,j,m,k) \cdot \Phi(11.99 - PSSt(i,j,m,k))) = 97.9247948$
PSSt<13	$\sum_k \sum_m \sum_j \sum_i (pSSt(i,j,m,k) \cdot \Phi(12.99 - PSSt(i,j,m,k))) = 98.3406789$
PSSt<14	$\sum_k \sum_m \sum_j \sum_i (pSSt(i,j,m,k) \cdot \Phi(13.99 - PSSt(i,j,m,k))) = 98.6214854$
PSSt<15	$\sum_k \sum_m \sum_j \sum_i (pSSt(i,j,m,k) \cdot \Phi(14.99 - PSSt(i,j,m,k))) = 98.8172092$
PSSt<16	$\sum_k \sum_m \sum_j \sum_i (pSSt(i,j,m,k) \cdot \Phi(15.99 - PSSt(i,j,m,k))) = 99.000988$
PSSt<17	$\sum_k \sum_m \sum_j \sum_i (pSSt(i,j,m,k) \cdot \Phi(16.99 - PSSt(i,j,m,k))) = 99.2245679$
PSSt<18	$\sum_k \sum_m \sum_j \sum_i (pSSt(i,j,m,k) \cdot \Phi(17.99 - PSSt(i,j,m,k))) = 99.3266119$

PSSt<19	$\sum_k \sum_m \sum_j \sum_i (pSSt(i,j,m,k) \cdot \Phi(18.99 - PSSt(i,j,m,k))) = 99.4029689$
PSSt<20	$\sum_k \sum_m \sum_j \sum_i (pSSt(i,j,m,k) \cdot \Phi(19.99 - PSSt(i,j,m,k))) = 99.5106195$
PSSt<21	$\sum_k \sum_m \sum_j \sum_i (pSSt(i,j,m,k) \cdot \Phi(20.99 - PSSt(i,j,m,k))) = 99.5878025$
PSSt<22	$\sum_k \sum_m \sum_j \sum_i (pSSt(i,j,m,k) \cdot \Phi(21.99 - PSSt(i,j,m,k))) = 99.6543557$
PSSt<23	$\sum_k \sum_m \sum_j \sum_i (pSSt(i,j,m,k) \cdot \Phi(22.99 - PSSt(i,j,m,k))) = 99.709444$
PSSt<24	$\sum_k \sum_m \sum_j \sum_i (pSSt(i,j,m,k) \cdot \Phi(23.99 - PSSt(i,j,m,k))) = 99.7460778$
PSSt<25	$\sum_k \sum_m \sum_j \sum_i (pSSt(i,j,m,k) \cdot \Phi(24.99 - PSSt(i,j,m,k))) = 99.7729438$
PSSt<26	$\sum_k \sum_m \sum_j \sum_i (pSSt(i,j,m,k) \cdot \Phi(25.99 - PSSt(i,j,m,k))) = 99.7946279$
PSSt<27	$\sum_k \sum_m \sum_j \sum_i (pSSt(i,j,m,k) \cdot \Phi(26.99 - PSSt(i,j,m,k))) = 99.8184017$
PSSt<28	$\sum_k \sum_m \sum_j \sum_i (pSSt(i,j,m,k) \cdot \Phi(27.99 - PSSt(i,j,m,k))) = 99.8521764$
PSSt<29	$\sum_k \sum_m \sum_j \sum_i (pSSt(i,j,m,k) \cdot \Phi(28.99 - PSSt(i,j,m,k))) = 99.8760289$
PSSt<30	$\sum_k \sum_m \sum_j \sum_i (pSSt(i,j,m,k) \cdot \Phi(29.99 - PSSt(i,j,m,k))) = 99.8900354$
PSSt<31	$\sum_k \sum_m \sum_j \sum_i (pSSt(i,j,m,k) \cdot \Phi(30.99 - PSSt(i,j,m,k))) = 99.8997101$
PSSt<32	$\sum_k \sum_m \sum_j \sum_i (pSSt(i,j,m,k) \cdot \Phi(31.99 - PSSt(i,j,m,k))) = 99.9103684$
PSSt<33	$\sum_k \sum_m \sum_j \sum_i (pSSt(i,j,m,k) \cdot \Phi(32.99 - PSSt(i,j,m,k))) = 99.9183649$
PSSt<34	$\sum_k \sum_m \sum_j \sum_i (pSSt(i,j,m,k) \cdot \Phi(33.99 - PSSt(i,j,m,k))) = 99.9280299$
PSSt<35	$\sum_k \sum_m \sum_j \sum_i (pSSt(i,j,m,k) \cdot \Phi(34.99 - PSSt(i,j,m,k))) = 99.9370599$
PSSt<36	$\sum_k \sum_m \sum_j \sum_i (pSSt(i,j,m,k) \cdot \Phi(35.99 - PSSt(i,j,m,k))) = 99.9485609$

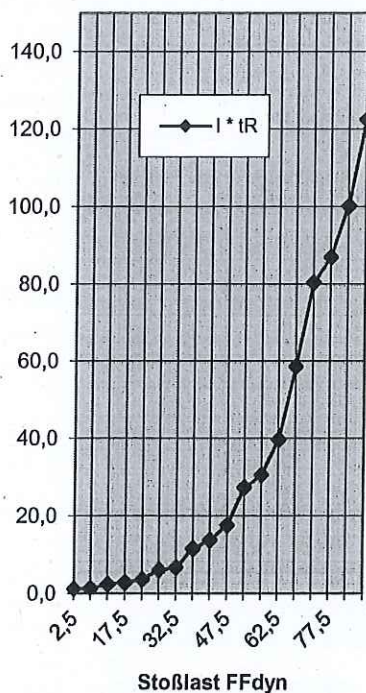
$$\text{PSSt} < 37 \quad \sum_k \sum_m \sum_j \sum_i (\text{pSSSt}(i, j, m, k) \cdot \Phi(36.99 - \text{PSSt}(i, j, m, k))) = 99.9531601$$

$$\text{PSSt} < 38 \quad \sum_k \sum_m \sum_j \sum_i (\text{pSSSt}(i, j, m, k) \cdot \Phi(37.99 - \text{PSSt}(i, j, m, k))) = 99.9582667$$

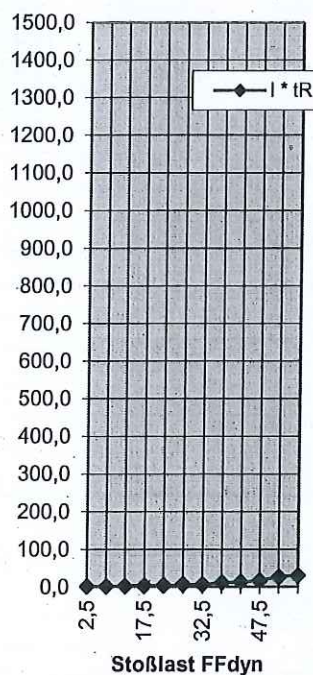
$$\text{PSSt} < 39 \quad \sum_k \sum_m \sum_j \sum_i (\text{pSSSt}(i, j, m, k) \cdot \Phi(38.99 - \text{PSSt}(i, j, m, k))) = 99.9619743$$

Ermittlung der Stoßlast-Verteilung:				Frontalstoß
für Verkehr "NOK 2125"				
Fahrzeuge voll beladen, Formel PEDERSEN				
Frontalstoß				
Stoßlast FFdyn [MN]	Verteilungs- funktion F [-] * 10E-02	Wahrschein- lichkeit f [-] * 10E-02	Stoßlast FFdyn [MN] Klassen-Mittel	$1/(1 - F) =$ $\lambda * tR$
			Stoßlast FFdyn	$\lambda * tR$
0 - 5	18,00000	18	2,5	1,2
5 - 10	25,85400	7,85400	7,5	1,3
10 - 15	57,39300	31,53900	12,5	2,3
15 - 20	65,220954	7,82795	17,5	2,9
20 - 25	72,16653	6,94557	22,5	3,6
25 - 30	83,48570	11,31918	27,5	6,1
30 - 35	85,03659	1,55089	32,5	6,7
35 - 40	91,35045	6,31386	37,5	11,6
40 - 45	92,72776	1,37731	42,5	13,8
45 - 50	94,31014	1,58238	47,5	17,6
50 - 55	96,32933	2,01919	52,5	27,2
55 - 60	96,72824	0,39891	57,5	30,6
60 - 65	97,47993	0,75169	62,5	39,7
65 - 70	98,29236	0,81243	67,5	58,6
70 - 75	98,75526	0,46290	72,5	80,3
75 - 80	98,8498136	0,09455	77,5	86,9
80 - 85	99,0013101	0,15150	82,5	100,1
85 - 90	99,18324	0,18193	87,5	122,4
90 - 95				

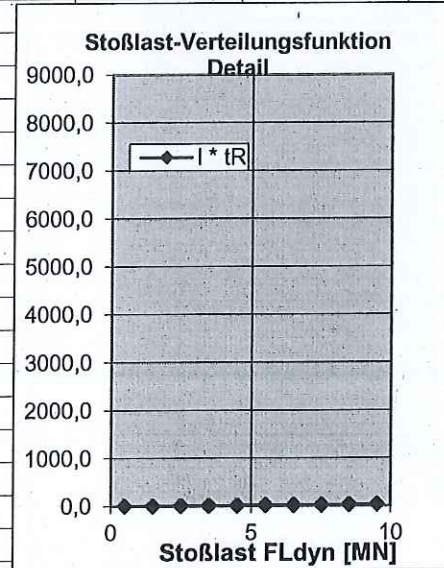
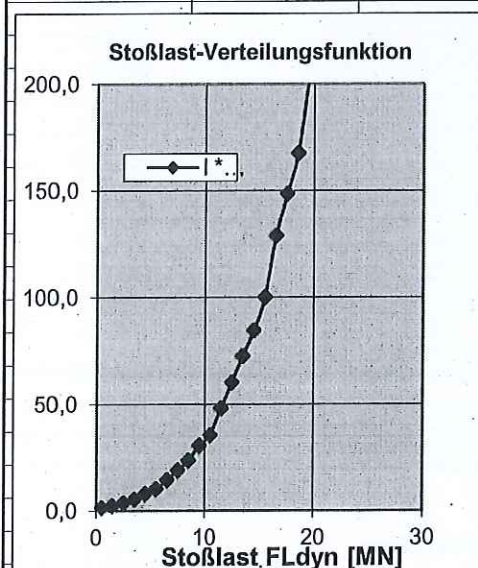
Stoßlast-Verteilungsfunktion



Stoßlast-Verteilungsfunktion
Detail



Ermittlung der Stoßlast-Verteilung: Flankenstoß				
für Verkehr "NOK 2125"				
Fahrzeuge voll beladen, Formel PEDERSEN				
Stoßlast FLdyn [MN]	Flankenstoß Verteilungs-funktion F [-]	Wahrschein-lichkeit f [-]	Stoßlast FLdyn [MN]	$1/(1 - F) = \lambda * tR$
	* 10E02	* 10E02	Klassen-Mittel	
			Stoßlast FLdyn	$\lambda * tR$
0-1	37,0128842	37,0128842	0,5	1,6
1-2	58,3737863	21,36090	1,5	2,4
2-3	73,6505672	15,27678	2,5	3,8
3-4	81,334637	7,68407	3,5	5,4
4-5	87,5565222	6,22189	4,5	8,0
5-6	90,2117231	2,65520	5,5	10,2
6-7	93,0560921	2,84437	6,5	14,4
7-8	94,7591772	1,70309	7,5	19,1
8-9	95,7650888	1,00591	8,5	23,6
9-10	96,7402959	0,97521	9,5	30,7
10-11	97,1829576	0,44266	10,5	35,5
11-12	97,9247948	0,74184	11,5	48,2
12-13	98,3406789	0,41588	12,5	60,3
13-14	98,6214854	0,28081	13,5	72,5
14-15	98,8172092	0,19572	14,5	84,5
15-16	99,0009880	0,18378	15,5	100,1
16-17	99,2245679	0,22358	16,5	129,0
17-18	99,3266119	0,10204	17,5	148,5
18-19	99,4029689	0,07636	18,5	167,5
19-20	99,5106195	0,10765	19,5	204,3
20-21	99,5878025	0,07718	20,5	242,6
21-22	99,6543557	0,06655	21,5	289,3
22-23	99,7094440	0,05509	22,5	344,2
23-24	99,7460778	0,03663	23,5	393,8
24-25	99,7729438	0,02687	24,5	440,4
25-26	99,7946279	0,02168	25,5	486,9



Ermittlung der Unfallrate

1 Grundlagen

Als allgemeine Fehlerrate wird die Anzahl der Unfälle je Fahrzeug und Transport-km URSKM im Bereich der Brücke ermittelt. Annahmen dabei sind:

- Gleichverteilung der Unfälle über die Strecke, hier 74,1 km
- Linearität zwischen Anzahl Unfällen und Anzahl Passagen
- Fehlerrate entspricht Unfallrate auf betrachteter Strecke

2 Abschätzung der Unfallrate im NOK

Grundlage der Unfallauswertungen stellen folgende Literaturstellen dar:

- [U5] Verkehrs- und Unfallstatistiken für die Jahre 1998 – 2009, WSA Brunsbüttel, Sb 4, sowie für die Jahre 2010 – 2017 Oststrecke, WSA Brunsbüttel, und 2010 – 2017 Weststrecke, WSA Kiel-Holtenau.

	Abschnitt 4.3, Unfallursachen, Kanalstrecke zw. Weichen, Br.	Abschnitt 3, NOK gesamt		
Jahr	Strecken-Unfälle	Fz.		URSKM
1998	7	37589		2,51315E-06
1999	7	35482		2,66239E-06
2000	10	39029		3,45776E-06
2001	12	38406		4,21662E-06
2002	5	38562		1,74982E-06
2003	6	39797		2,03462E-06
2004	10	41682		3,23767E-06
2005	11	42552		3,48863E-06
2006	10	41472		3,25407E-06
2007	17	43378		5,28885E-06
2008	13	42811		4,09798E-06
2009	4	30314		1,78073E-06
2010	10	31933		4,22612E-06
2011	15	33522		6,0387E-06
2012	18	34879		6,96451E-06
2013	15	30948		6,54094E-06
2014	30	32589		1,24232E-05
2015	27	32091		1,13544E-05
2016	15	29284		6,91262E-06
2017	22	30269		9,80859E-06
Summe	264	726589	Mittel	4,9034E-06

Tabelle: Zusammenstellung der analysierten Schiffsunfälle und Schiffsbewegungen

Unfallrate:

$$\rightarrow \text{Unfallstreckenrate URSKM} = 264 / (726589 * 74,1) = 4,903 * 10^{-6} [\text{Unf.}/(\text{Fz} * \text{km})]$$

Da die Auswertung statistisch eine Schätzung von über die Jahre veränderlichen Ereignissen darstellt, wird ein 95%-Vertrauensintervall für URSKM ermittelt.

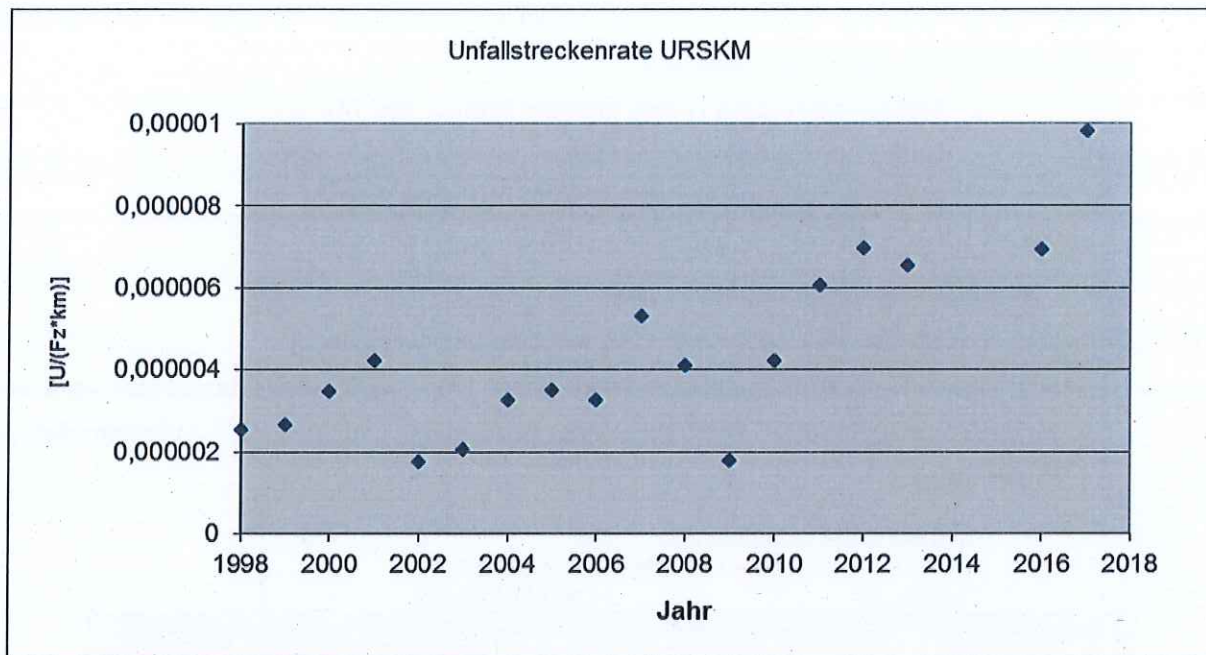


Bild: Unfallstreckenrate NOK für 1998/2017

Bestimmung des 95%-Vertrauens-Intervalles unter Berücksichtigung havarierender Fahrzeuge und der BERNOULLI-Verteilung:

$$n = \text{Anzahl Fahrzeuge/a} = 36.330 \text{ Fz/a}$$

$$p = \text{Unfallrate URSKM} = 4,903 \cdot 10^{-6} \text{ Unf/(Fz} \cdot \text{km)}$$

$$\mu = n \cdot p = 36.330 \cdot 4,903 \cdot 10^{-6} = 0,1781$$

$$\sigma^2 = n \cdot p \cdot (1 - p) = \mu = 0,1781$$

$$t \cdot (s/(n^{1/2})) = 1,96 \cdot (0,1781^{1/2}/(36.330^{1/2})) = 0,00434$$

$$\mu_{\text{KONF, 95\%}} = 0,1781 + 0,00434 = 0,1824$$

$$\text{URSKM}_{\text{Brücke, 95\%}} = 0,1824 / 36.330 = 5,02 \cdot 10^{-6} \text{ Unf/(Fz} \cdot \text{km)}$$

➔ Angesetzt werden $2,0 \cdot 10^{-5} \text{ Unf/(Fz} \cdot \text{km)}$

Abschätzung der Kollisions-Wahrscheinlichkeiten

1 Grundlagen

Die allgemeine Fehlerrate wird unter Berücksichtigung der Unfallrate, vgl. Anlage 3, zu:

$$\text{URSKM (2125)} = 2,0 \cdot 10^{-5} [\text{Unf.}/(\text{Fz.} \cdot \text{km})]$$

Kollisionsmodell

mittlere Schiffsbreite (vgl. Anl. 2): $B_{\varnothing} = 16 \text{ m}$

mittlerer Stoppweg: $x = 500 \text{ m}, \sigma = 150 \text{ m}$
($200 \text{ m} < x \pm 2\sigma < 800 \text{ m}$)

Kurswinkel

$\mu_{\perp} = 0^{\circ}, \sigma_{\perp} = 10^{\circ}$ ($-20^{\circ} < x \pm 2\sigma_{\perp} < +20^{\circ}$)

Bereichsgrenze für Berechnung $S = \pm 1.000 \text{ m}$

Schiffe gehen auf Brückenkurs vor der Brücke:

- von oberstrom ab 1.000 m

- von unterstrom ab 1.000 m

Wahrscheinlichkeit für Kollision, vgl. Bild A4.1:

$$\begin{aligned} W\{\text{Kollisionskurs auf Pfeiler Nr } i\} &= W\{\varphi_{i1} < \varphi < \varphi_{i2}\} \\ &= F_{\varphi}(\varphi_{i2}) - F_{\varphi}(\varphi_{i1}) = W_{i1}(s) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{davon: } W\{\text{Flanken-Kollisionskurs auf Pfeiler } i\} &= W\{\varphi_{i3} < \varphi < \varphi_{i2}\} \\ &= F_{\varphi}(\varphi_{i2}) - F_{\varphi}(\varphi_{i3}) = W_{i3}(s) \end{aligned}$$

$$W\{\text{Schiff erreicht Brücke}\} = W\{x > s\} = 1 - F_x(s) = W_{i2}(s)$$

$$\begin{aligned} W\{\text{Kollision mit Pfeiler, wenn Fehler an Stelle } s \text{ auftritt}\} \\ = W_{i1}(s) \cdot W_{i2}(s) = W(s) \end{aligned}$$

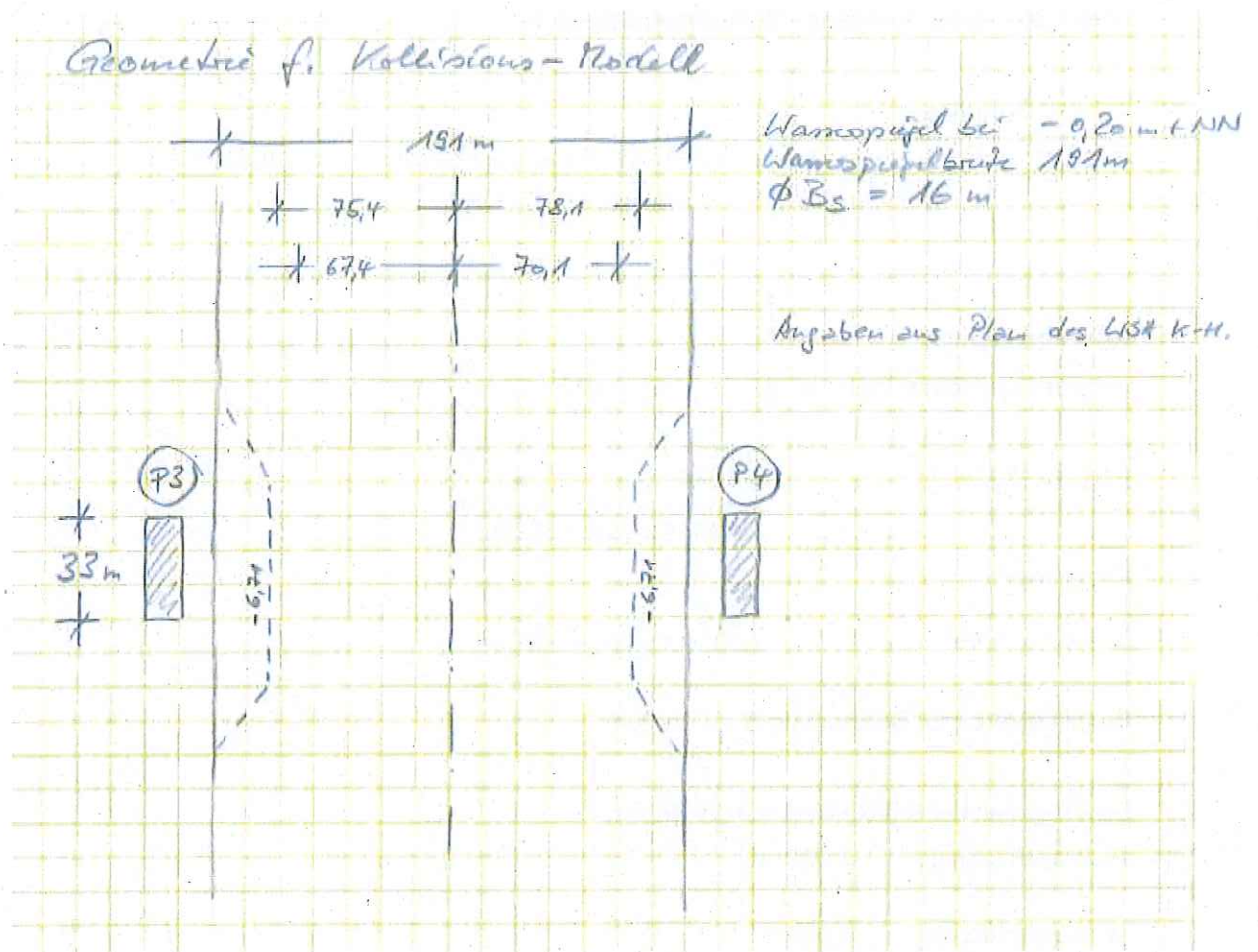


Bild A4.1: Geometrie Kollisions-Modell, auf der Basis [U2] und [U4]

4.2 Berechnung der Kollisions-Wahrscheinlichkeit mit Böschung vor der Rader Hochbrücke, NOK-km 68,1, Verkehr NOK 2075

Datei "Rader_HoBrü_K-Var-FF.MCD"

Eingangswerte:

$i := 20$ $x := 1..i$ $s(x) := 50 \cdot x$ Abstände zur Brückenachse
 Anzahl der passierenden Fahrzeuge q: $j := 1$ $q_j := 28000 \cdot j$
 Fehlerrate je Wegeinheit: $\lambda x_j := 2.0 \cdot q_j \cdot 10^{-5}$

1. Berechnung auf Schutzböschung

1.1 Mittige Fahrt, Böschung 130

Berechnung aus einer Richtung:

Grenzwinkel

$$\begin{aligned}
 \phi_{11}(x) &:= \operatorname{atan}\left(\frac{65.4}{s(x)}\right) \cdot \left(\frac{180}{\pi}\right) & \phi_{12}(x) &:= \operatorname{atan}\left(\frac{67.4}{s(x) + 33.0}\right) \cdot \left(\frac{180}{\pi}\right) & \phi_{13}(x) &:= \operatorname{atan}\left(\frac{67.4}{s(x)}\right) \cdot \left(\frac{180}{\pi}\right) \\
 z_{11}(x) &:= \frac{\phi_{11}(x)}{10} & z_{12}(x) &:= \frac{\phi_{12}(x)}{10} & z_{13}(x) &:= \frac{\phi_{13}(x)}{10}
 \end{aligned}$$

$$W_{11}(x) := (\operatorname{knorm}(z_{11}(x)) - \operatorname{knorm}(z_{12}(x)))$$

Kollisions-Wahrscheinlichkeit
auf Bösch, gesamt

$$W_{12}(x) := (\operatorname{knorm}(z_{11}(x)) - \operatorname{knorm}(z_{13}(x)))$$

Kollisions-Wahrscheinlichkeit
auf Bösch, Frontalstoß

$$W_{13}(x) := (\operatorname{knorm}(z_{13}(x)) - \operatorname{knorm}(z_{12}(x)))$$

Kollisions-Wahrscheinlichkeit
auf Bösch, Flankenstoß

$$zs(x) := \frac{s(x) - 500}{150}$$

$$WW(x) := 1 - \operatorname{knorm}(zs(x))$$

Wahrscheinlichkeit, daß
Schiff Bösch erreicht

$$W_1(x) := W_{11}(x) \cdot WW(x)$$

Wahrscheinlichkeit Kollision mit Bösch, gesamt

$$WF_1(x) := W_{12}(x) \cdot WW(x)$$

Wahrscheinlichkeit Kollision m. Bösch, Frontal

$$WS_1(x) := W_{13}(x) \cdot WW(x)$$

Wahrscheinlichkeit Kollision m. Bösch, Flanke

Berechnung der
Kollisions-Wahrscheinlichkeiten:

Kollisions-Wahrschein-
lichkeit mit Bösch, gesamt

$$\int_1^{20} 0.05 \cdot W_1(x) \, dx = 0.00506$$

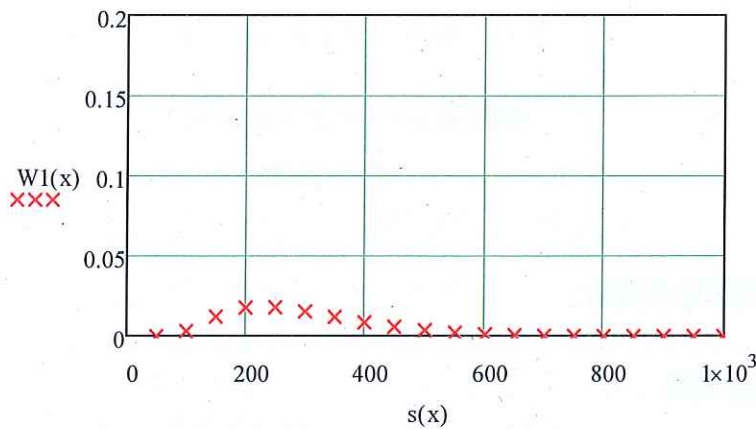
Kollisions-Wahrschein-
lichkeit m. Bösch, Frontal

$$\int_1^{20} 0.05 \cdot WF_1(x) \, dx = -0.00208$$

Kollisions-Wahrschein-
lichkeit m. Bösch, Flanke

$$\int_1^{20} 0.05 \cdot WS_1(x) \, dx = 0.00714$$

Verteilungsdichte Treffer-Wahrscheinlichkeit



Berechnung der Kollisionsraten:

Kollisionsrate λ , gesamt, sowie
Wiederkehrintervall t

$$\lambda_j := \lambda_{x_j} \cdot \int_1^{20} 0.05 \cdot W1(x) dx \quad t_j := (\lambda_j)^{-1}$$

Kollisionsrate λ_F , Frontal, sowie
Wiederkehrintervall t_F

$$\lambda_{F_j} := \lambda_{x_j} \cdot \int_1^{20} 0.05 \cdot WF1(x) dx \quad t_{F_j} := (\lambda_{F_j})^{-1}$$

Kollisionsrate λ_S , Flanke, sowie
Wiederkehrintervall t_S

$$\lambda_{S_j} := \lambda_{x_j} \cdot \int_1^{20} 0.05 \cdot WS1(x) dx \quad t_{S_j} := (\lambda_{S_j})^{-1}$$

$$q_j = 28000 \quad \lambda_j = 0.00283 \quad t_j = 353 \quad \lambda_{F_j} = -0.00117 \quad t_{F_j} = -857.7 \quad \lambda_{S_j} = 0.004 \quad t_{S_j} = 250.1$$

Berechnungen aus Gegenrichtung:

ist symmetrisch

1.2 Mittige Fahrt, Böschung 140

Berechnung aus einer Richtung:

Grenzwinkel

$$\phi_{11}(x) := \operatorname{atan}\left(\frac{72.1}{s(x)}\right) \cdot \left(\frac{180}{\pi}\right) \quad \phi_{12}(x) := \operatorname{atan}\left(\frac{70.1}{s(x) + 33.0}\right) \cdot \left(\frac{180}{\pi}\right) \quad \phi_{13}(x) := \operatorname{atan}\left(\frac{70.1}{s(x)}\right) \cdot \left(\frac{180}{\pi}\right)$$

$$z_{11}(x) := \frac{\phi_{11}(x)}{10} \quad z_{12}(x) := \frac{\phi_{12}(x)}{10} \quad z_{13}(x) := \frac{\phi_{13}(x)}{10}$$

$$W_{11}(x) := (\operatorname{knorm}(z_{11}(x)) - \operatorname{knorm}(z_{12}(x)))$$

$$W_{12}(x) := (\operatorname{knorm}(z_{11}(x)) - \operatorname{knorm}(z_{13}(x)))$$

Kollisions-Wahrscheinlichkeit
auf Bösch, gesamt
Kollisions-Wahrscheinlichkeit
auf Bösch, Frontalstoß

$$\underline{W13(x)} := (\text{knorm}(z13(x)) - \text{knorm}(z12(x)))$$

Kollisions-Wahrscheinlichkeit
auf Bösch, Flankenstoß

$$\underline{zs(x)} := \frac{s(x) - 500}{150}$$

$$\underline{WW(x)} := 1 - \text{knorm}(zs(x))$$

Wahrscheinlichkeit, daß
Schiff Bösch erreicht

$$\underline{W1(x)} := W11(x) \cdot WW(x)$$

Wahrscheinlichkeit Kollision mit Bösch, gesamt

$$\underline{WF1(x)} := W12(x) \cdot WW(x)$$

Wahrscheinlichkeit Kollision m. Bösch, Frontal

$$\underline{WS1(x)} := W13(x) \cdot WW(x)$$

Wahrscheinlichkeit Kollision m. Bösch, Flanke

Berechnung der
Kollisions-Wahrscheinlichkeiten:

Kollisions-Wahrscheinlichkeit mit Bösch, gesamt

$$\int_1^{20} 0.05 \cdot W1(x) dx = 0.00874$$

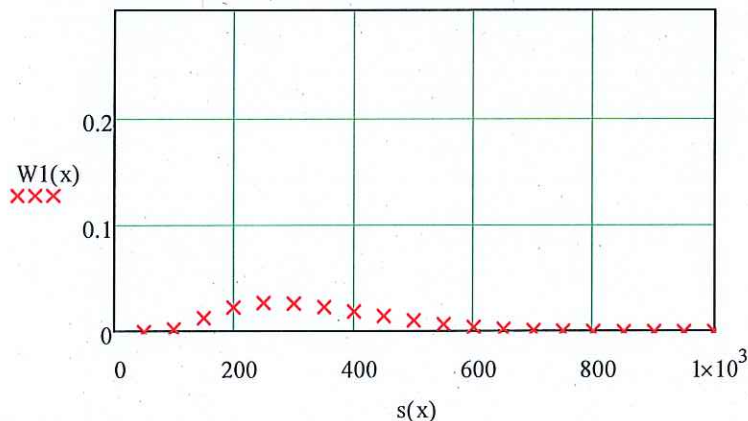
Kollisions-Wahrscheinlichkeit m. Bösch, Frontal

$$\int_1^{20} 0.05 \cdot WF1(x) dx = 0.00187$$

Kollisions-Wahrscheinlichkeit m. Bösch, Flanke

$$\int_1^{20} 0.05 \cdot WS1(x) dx = 0.00687$$

Verteilungsdichte Treffer-Wahrscheinlichkeit



Berechnung der Kollisionsraten:

Kollisionsrate λ , gesamt, sowie
Wiederkehrintervall t

$$\lambda_j := \lambda_{x_j} \cdot \int_1^{20} 0.05 \cdot W1(x) dx \quad t_j := (\lambda_j)^{-1}$$

Kollisionsrate λ_F , Frontal, sowie
Wiederkehrintervall t_F

$$\lambda_{F_j} := \lambda_{x_j} \cdot \int_1^{20} 0.05 \cdot WF1(x) dx \quad t_{F_j} := (\lambda_{F_j})^{-1}$$

Kollisionsrate λ_S , Flanke, sowie
Wiederkehrintervall t_S

$$\lambda_{S_j} := \lambda_{x_j} \cdot \int_1^{20} 0.05 \cdot WS1(x) dx \quad t_{S_j} := (\lambda_{S_j})^{-1}$$

$$q_j = 28000 \quad \lambda_j = 0.00489 \quad t_j = 204.4 \quad \lambda_{F_j} = 0.00105 \quad t_{F_j} = 954.1 \quad \lambda_{S_j} = 0.00385 \quad t_{S_j} = 260.1$$

Berechnungen aus Gegenrichtung:

ist symmetrisch

3 Zusammenstellung der Kollisionsraten (λ -Werte)

Bauteil	λ_{FF}	$\Sigma \lambda_{FL}$
Böschung „130“ Nordseite	0,00117	0,008
Böschung „140“ Südseite	0,00105	0,0077

Tabelle 1: Kollisionsraten

... und für den Stoßlast-Ansatz maßgebende ($\lambda * t_R$)-Werte, mit $t_R = 10.000$ a:

Bauteil	$\Sigma \lambda * t_R$	$FF_{dyn} [MN]$	$\Sigma \lambda * t_R$	$FL_{dyn} [MN]$
Böschung „130“ Nordseite	11,7	37,5	80	14,5
Böschung „140“ Südseite	10,5	36,4	77	14,0

Tabelle 2: ($\lambda * t_R$)-Werte für die Ermittlung der Stoßlasten