

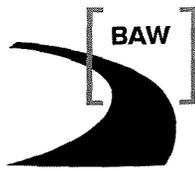


Bundesanstalt für Wasserbau
Kompetenz für die Wasserstraßen

**Ermittlung von Schiffsstoßlasten
für die Süderelbequerung A26-Ost,
Hamburg,
Elbe-km 620**

Karlsruhe, 30. November 2016

BAW-Nr. A395 100 10115

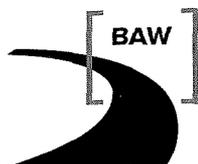


Bundesanstalt für Wasserbau
Kompetenz für die Wasserstraßen

**Ermittlung von Schiffsstoßlasten
für die Süderelbequerung A26-Ost,
Hamburg,
Elbe-km 620**

Karlsruhe, 30. November 2016

BAW-Nr. A395 100 10115



Bundesanstalt für Wasserbau
Kompetenz für die Wasserstraßen

**Ermittlung von Schiffsstoßlasten
für die Süderelbequerung A26-Ost,
Hamburg,
Elbe-km 620**

Auftraggeber: DEGES
Deutsche Einheit Fernstraßenplanungs- und -bau GmbH
Zimmerstr. 54
10117 Berlin

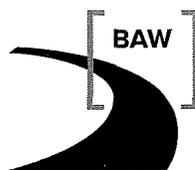
Az.: A705-250214

Auftrags-Nr.: BAW-Nr. A395 100 10115

Aufgestellt von: Abteilung: Bautechnik
 Bearbeiter: C. Kunz

Karlsruhe, 30. November 2016

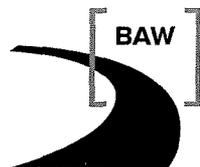
Das Gutachten darf nur ungekürzt vervielfältigt werden.
Die Vervielfältigung und eine Veröffentlichung bedürfen der schriftlichen Genehmigung der BAW.



Zusammenfassung

Die DEGES GmbH plant für den Senat der Freien und Hansestadt Hamburg die neue Süderelbequerung Hamburg-Moorburg als Teil der BAB 26 bei Elbe-km 620. Im Auftrag von DEGES ermittelte die BAW im Rahmen einer *Einzelfall-Betrachtung* die Schiffsstoßlasten auf der Grundlage (Methodik) der DIN EN 1991-1-7 (2010) ortsbezogen. Schiffsstoß-gefährdet sind die beiden Pylon- bzw. Hauptpfeiler der Süderelbequerung, die ufernah angeordnet werden sollen. Flottenstruktur, Schiffsdurchgänge, Geschwindigkeiten, Unfallaufkommen, nautische Verhältnisse wurden analysiert und Schiffsstoßlasten für die Pfeiler bzw. Schutz-Uferbauten mittels eines Last- und eines Kollisionsmodells ermittelt. Fehlende Daten machten Vergleichsbetrachtungen erforderlich. Last- und Kollisionsmodell sind probabilistisch und beruhen auf entsprechenden Verteilungen der maßgebenden Einflußparameter, wobei diese Betrachtungsweise einen Stand der Technik darstellt.

Aus dem Kollisionsmodell ist statistisch für Pfeiler Ost mit einer Schiffsanfahrung von im Mittel alle 470 Jahren zu rechnen, bei Pfeiler West liegt der Wert bei im Mittel alle 1.240 Jahre. Als Stoßlasten ergeben sich für den Pfeiler Ost dynamische Lasten von $FF_{dyn} = 17.5 \text{ MN}$ für Frontalstoß und $FL_{dyn} = 4,0 \text{ MN}$ für Flankenstoß, für den Bereich des Pfeilers West beträgt die Last $FL_{dyn} = 4,0 \text{ MN}$ für Flankenstoß. Bei Flankenstößen ist zusätzlich ein tangentialer Reibungsstoß in Höhe von 40% der Flankenstoßlast zu berücksichtigen. Der Stoß auf den Überbau wird als statisch äquivalente Last zu $F = 1,75 \text{ MN}$ ermittelt. Empfehlungen zum Ansatz von Stoßhöhe und Anprallfläche sowie zur dynamischen Behandlung der dynamischen Stoßlasten werden gegeben.



Inhaltsverzeichnis

Seite

Inhaltsverzeichnis

1	Veranlassung und Aufgabenstellung	1
2	Unterlagen	1
3	Wasserstraße und Bauwerk	2
	3.1 Süderelbe	2
	3.2 Süderelbequerung A26-Ost	5
4	Die Einwirkung Schiffstoß	10
5	Ermittlung der Stoßlast-Verteilungsfunktionen	13
6	Ermittlung der Kollisions-Raten	14
	6.1 Ermittlung der Fehlerrate aus Unfalldaten	14
	6.2 Kollisions-Modell	15
	6.3 Berechnung der Kollisions-Wahrscheinlichkeiten	17
7	Stoßlasten, Stoßhöhen und Stoßlast-Zeitfunktionen	18
8	Bewertung der Schiffsstoßlast-Ermittlung	19
	Literatur	21

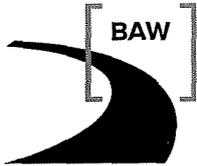


Bild-Verzeichnis

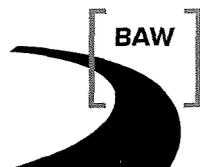
- 1 Verlauf der Süderelbe im Stadtgebiet Hamburg
- 2 Übersicht über Zählstellen mit Bezug zur Zählstelle „12“
- 3 Animation Süderelbequerung aus 1. Platz des Wettbewerbs
- 4 Längsschnitt/Ansicht der geplanten Süderelbequerung
- 5 Draufsicht der geplanten Süderelbequerung
- 6 Schnitt durch Pfeilergründung der geplanten Süderelbequerung
- 7 Draufsicht auf bestehende und geplante Kattwykbrücke
- 8 Längsansicht von bestehender (rechts) und geplanter (links) Kattwykbrücke
- 9 Lastangriffsrichtungen für Schiffsstoß
- 10 Kollisions-Modell
- 11 Dynamische Stoßlast in Abhängigkeit des Abstands von Pfeiler Ost zur Fahrwasserachse

Tabellen-Verzeichnis

- 1 Klassenhäufigkeiten an der Zählstelle „12“, Kattwykbrücke
- 2 Zusammenstellung der analysierten Seeschiffsunfälle und Seeschiffsbewegungen im Hamburger Hafen
- 3 Zusammenstellung der Kollisionsraten
- 4 Dynamische Stoßlasten für Pfeiler der geplanten Süderelbequerung

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 Pfeiler Süderelbebrücke
 - 3 Zusammenstellung der Kollisionsraten (λ -Werte)



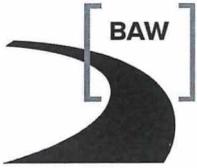
1 Veranlassung und Aufgabenstellung

Die DEGES GmbH plant für den Senat der Freien und Hansestadt Hamburg die neue Süderelbequerung Hamburg-Moorburg als Teil der BAB 26 bei Elbe-km 620. Für die geplante Brücke sind ufernahe Brückenpfeiler beidseits des Fahrwassers vorgesehen. Schiffsstoßlasten sowohl für den Bau- als auch für den Endzustand lassen sich aus *technisch-wirtschaftlicher Sicht nicht direkt* aus der eingeführten einschlägigen Norm DIN EN 1991-1-7 (2010) ableiten. Dies ist für den betreffenden Seeschiffsverkehr zum einen durch die in DIN EN 1991-1-7 zu wenig klassifiziert und pauschal angegebenen Schiffsstoß-Lasten für Seeschiffe und zum anderen durch die im Uferbereich vorgesehenen Pfeilerstellungen bedingt, so dass eine Einzelfall-Untersuchung hinsichtlich Schiffsanpralllasten vorgenommen werden soll.

Im Auftrag von DEGES ermittelt die BAW im Rahmen einer Einzelfall-Betrachtung die Schiffsstoßlasten auf der Grundlage (Methodik) der DIN EN 1991-1-7 (2010) ortsbezogen für ggf. den Bauzustand und den Endzustand 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 Pfeiler bzw. Schutz-Uferbauten mittels eines Last- und eines Kollisionsmodells ermittelt. Bei Fehlen von Daten werden Vergleichsbetrachtungen vorgenommen.

2 Unterlagen

- [U1] Planungsgemeinschaft Süderelbebrücke, A26-Ost, VKE 7052, Süderelbequerung Hamburg-Moorburg, Arbeitspapier „Schiffsanprall; Vorgaben – Einflüsse auf den Bauwerksentwurf“, 25.11.2014.
- [U2] Planunterlagen:
- Planungsgemeinschaft Süderelbequerung, Anforderung der HPA-Hafenbahn auf den Entwurf der Süderelbequerung, Klärungsblatt 6b; M. 1 : 500/ 2000, 12.12.2014.
 - Planungsgemeinschaft Süderelbequerung, Plan 1, Bauwerksübersichtsplan: Längsschnitt, Draufsicht, Regelquerschnitt, M. 1 : 75/750, Nr. 135742
 - Planungsgemeinschaft Süderelbequerung, Plan 2, Maste, Schnitte, Ansicht, M. 1 : 100/200, Nr. 135742
 - Planungsgemeinschaft Süderelbequerung, Plan 4, Lageplan, Höhenplan, M. 1 : 500/5000, Nr. 135742
 - HPA UB Entwicklungsvorhaben, Neue Bahnbrücke Kattwyk (Entwurf), Bauwerk 2 – EÜ über Süderelbe, Längsschnitt/Grundriss, M. 1 : 500, 09-2011
 - HPA Infrastruktur Wasser, Peil- und Vermessungsdienst. Süderelbe, Kattwykbrücke, Peilplan, M. 1 : 1000; 02.09.2011
- [U3] HPA: Excel-Sheet „2009-09-10_HPF_ASW_TPL_LP0_MVO_Schiffsbewegungen_und_Anprall.xls“;
- [U4] Weitergeleitete mail von HPA an DEGES „Bemessungsschiff Süderelbe“ an BAW, vom 30.03.2015



- [U5] Telefonat mit HPA, Oberhafenamt, Herrn Brummermann, am 06.11.2015.
 [U6] Mail von HPA an BAW, am 23.11.2015.
 [U7] Telefonat mit HPA, Nautische Zentrale, Herrn Harfenmeister, am 31.05.2016.

3 Wasserstraße und Bauwerk

3.1 Süderelbe

Die Süderelbe ist ein ca. 16 km langer Abschnitt der Unterelbe im Bereich der Hansestadt Hamburg. Noch vor dem Beginn des eigentlichen Stadtgebiets an der Bunthäuser Spitze (Flußkilometer 609) teilt sich die Elbe in Norder- und Süderelbe. Von dort umfließen beide Ströme die Elbinsel Wilhelmsburg, um sich am Köhlbrandhöft wieder zu vereinigen, Faltboot (2016). Der heutige Verlauf der Süderelbe weicht im unteren Bereich stark von dem historischen Hauptstrom ab. Der Strom wurde durch den natürlich entstandenen und später künstlich erweiterten Köhlbrand schon früher nach Norden geleitet. Der ursprüngliche Abschnitt heißt jetzt "Alte Süderelbe" und ist beidseitig von der Elbe abgeschnitten und hat jetzt eher den Charakter eines langgezogenen Sees. Der Übergang von Süderelbe zu Köhlbrand ist heute nicht mehr bemerkbar, der Name Köhlbrand für den letzten Abschnitt hat sich aber trotzdem erhalten.

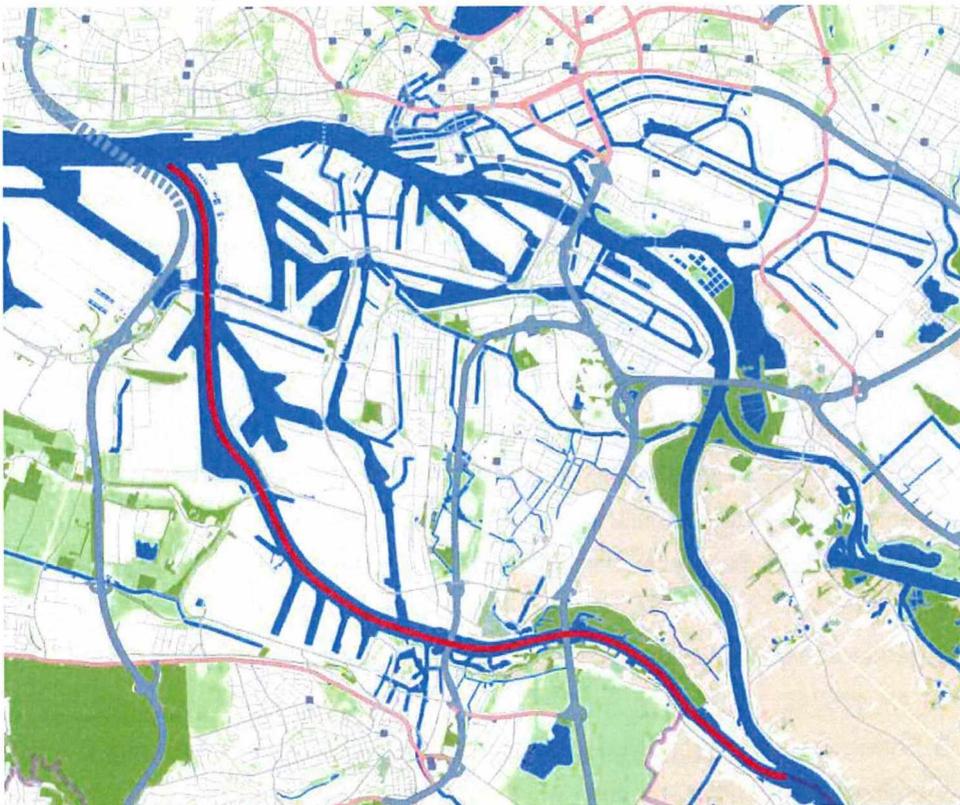
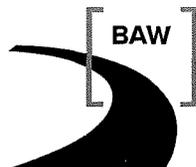


Bild 1: Verlauf der Süderelbe im Stadtgebiet Hamburg (Quelle: OpenStreetMap
 Lizenz: [http://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.0/ Creative Commons Attribution-ShareAlike 2.0] license (CC BY-SA)).

Die Süderelbe umgeht die historischen Hafengebiete Hamburgs (wie Speicherstadt und Binnenhafen) und führt stattdessen an Harburg und einigen neueren Hafengebieten vorbei. Sie ist weniger befahren als



die Norderelbe, trotzdem ist der Schiffsverkehr noch beträchtlich. Wie die gesamte Unterelbe (bis hinauf nach Geesthacht) unterliegt auch die Süderelbe den Gezeiten. Der mittlere Gezeitenhub beträgt ca. 3,60m und führt zu starken Strömungen, Faltboot (2016).

Im betreffenden Bereich der Süderelbe wird die bestehende Kattwykbrücke, erbaut 1973, überführt, zu der unter 3.2 im Zusammenhang mit der geplanten Süderelbequerung ausgeführt wird.

Aus [U3] gehen Schiffsanzahlen und Schiffsgrößen für Seeschiffe im Zeitraum 2000 – 2007 für die Zählstelle „12“, Kattwykbrücke, hervor; neuere Zählungen sind nicht verfügbar [U5]. Danach liefen in diesen 8 Jahren 5.784 Seeschiffe ein, was im Mittel 723 Seeschiffe pro Jahr und Richtung bedeutet. Die Schiffe kommen wiederholt bzw. regelmäßig. Die Spannweite der Verdrängungen reicht von ca. 200 [m³] bis 107.000 [m³], der Mittelwert liegt bei 10.550 [m³]; 98% der Durchgänge für Seeschiffe bleiben unter 50.000 [m³]. Die bedeutendsten Mengenanteile im Durchgang „12“ haben das Stückgutschiff (ca. 42 %, L < 120 m), der Chemietanker (ca. 36 %), der Tanker (ca. 13 %, L < 201 m) und das Massengutschiff (ca. 8 %, L < 204 m). Schlepperassistenten erhalten Schiffe mit einer Länge über 200 m, darüber hinaus bei bestimmten Windstärken (ca. > 8) und geringen Sichtweiten (ca. < 3 x Schiffslänge), [U5]. Kohleschiffe für das Kraftwerk Moorburg (maximale Abladung T = 12,8 m) werden achtern voraus geschleppt.

Nach [U5] verkehren etwa drei-mal so viele Binnenschiffe wie Seeschiffe, so dass diese ursprüngliche Zahl mit 5.784 Seeschiffen mit einer Schiffsanzahl in der Größe von 17.400 Binnenschiffen in der kleinsten Verdrängungsklasse < 5.500 [m³] zusätzlich berücksichtigt wurden. 2015 wurde das Kohlekraftwerk Moorburg eröffnet, das von Kohlefrachtern mit bis zu 100.000 tdw angelaufen werden soll, die Schlepperassistenten erhalten. Da Durchgangszahlen aus [U3] nicht hervorgehen können, wurde über Literatur-Recherche eine Durchgangszahl für diese Schiffe bestimmt. Mit den Angaben aus Gegenstrom (2016) und Vattenfall (2015) wurde für einen jährlichen Steinkohlebedarf von 4,2 Mio. t/a und Transportzuladungen von 60.000 t je Schiff eine Frequenz in Höhe von 70 Seeschiffe/a einlaufend (= 560 Seeschiffe über 8 Jahre) ermittelt.

Prognosen für die Zukunft, und damit einem Planungshorizont (= Nutzungsdauer der neuen Brücke), sind nicht zur Verfügung gestellt worden. Nach Diskussion mit dem Auftraggeber werden die aktualisierten Schiffsdurchgänge und -verteilung auch für diesen Planungshorizont beibehalten.

Die aktualisierte Größenverteilung, die nach tdw-Klassen mit einer Klassenbreite von 5.500 tdw eingeteilt wurde, zeigt Tabelle 1.

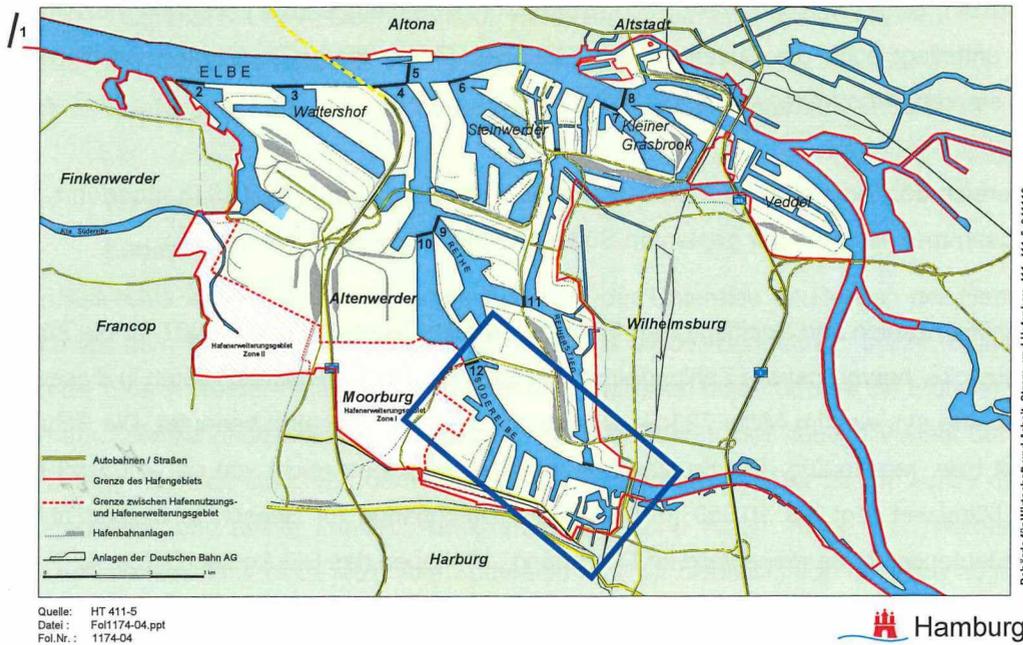
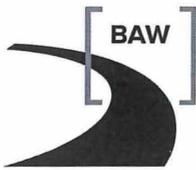
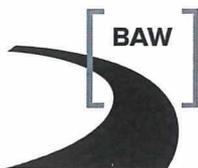


Bild 2: Übersicht über Zählstellen mit Bezug zur Zählstelle „12“, nach [U3]

V-Klasse < [m³]	Sum-Anzahl	Klassen-Anz	[%]	Sum-[%]
5500	21155	21155	89,10	89,10
11000	21889	734	3,09	92,19
16500	22088	199	0,84	93,03
22000	22262	174	0,73	93,76
27500	22406	144	0,61	94,36
33000	22602	196	0,83	95,19
38500	22793	191	0,80	95,99
44000	22929	136	0,57	96,57
49500	23052	123	0,52	97,09
55000	23090	38	0,16	97,25
60500	23098	8	0,03	97,28
66000	23100	2	0,01	97,29
71500	23103	3	0,01	97,30
77000	23105	2	0,01	97,31
82500	23106	1	0,00	97,31
88000	23106	0	0,00	97,31
93500	23107	1	0,00	97,32
99000	23107	0	0,00	97,32
104500	23667	560	2,36	99,68
110000	23744	77	0,32	100,00

Tabelle 1: Klassenhäufigkeiten an der Zählstelle „12“, Kattwykbrücke, im Hamburger Hafen, ermittelt auf Basis [U3], jedoch angepasst hinsichtlich Binnenschiffe und Kohleschiffe (Anzahlen jeweils für 8 Jahre)



Aus Tabelle 1 folgt eine jährliche Passagezahl von 2.968 Schiffen je Richtung und Jahr, insgesamt 5.936 Schiffe pro Jahr. Ca. 90% aller Schiffe haben – unter Berücksichtigung auch der Binnenschiffe – nunmehr eine Verdrängung von weniger als 11.000 tdw, ca. 95% weniger als 33.000 tdw.

Unfallzahlen bzw. -berichte sind für den Bereich der Süderelbe bzw. des betreffenden Bereichs gemäß [U4] nicht bekannt bzw. vorhanden. Sie werden in 6.1 aus Vergleichsbetrachtungen generiert.

3.2 Süderelbequerung A26

Der Bund, Hamburg, und die DEGES GmbH hatten im August 2012 zum Entwurf einer neuen Süderelbebrücke eine europaweite Ausschreibung veranlasst, DEGES (2016). Die neue Brücke wird Teil der A 26, die im östlichen Abschnitt als Querverbindung zwischen der A 7 und der A 1 den überregionalen Ost-West-Verkehr aufnehmen, weiträumige Hafenverkehre bündeln und so innerstädtische Wohnquartiere im Hamburger Süden entlasten soll. Gleichzeitig soll durch die neue Linienführung die Erreichbarkeit des Hamburger Hafens verbessert und ein seit Jahren empfindlicher Engpass geschlossen werden. Mit der Brücke wird der Lückenschluss zwischen der A 1 und der A 7 im Bundesfernstraßennetz, die bereits seit Jahren einen empfindlichen Engpass darstellt, geschlossen. Die Linienbestimmung für den östlich der A7 gelegenen Teil der A26 gibt es bereits seit 2011. Danach soll die A26-Trasse von der A7 kommend in einem südlichen Bogen um Moorburg herum verlaufen und zu einer neuen Süderelbebrücke geführt werden. Das Wilhelmsburger Industriegebiet quert die Autobahntrasse dann als Hochstraße. Im Bereich Kornweide soll sie in einen überdeckelten Trog führen und schließlich an der Auffahrt Stillhorn an die A1 angeschlossen werden, DEGES (2016).



Bild 3: Animation Süderelbequerung aus 1. Platz des Wettbewerbs, Blick von Moorburg nach Wilhelmsburg; aus DEGES (2013)

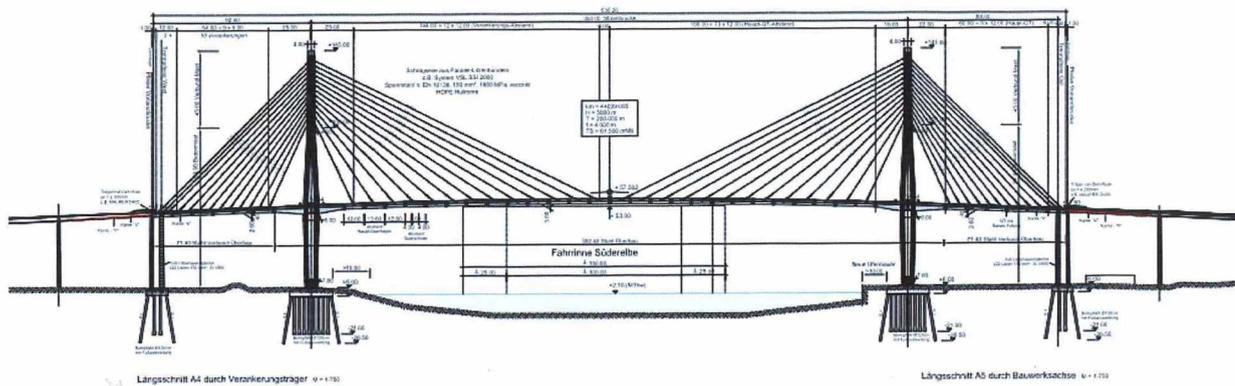
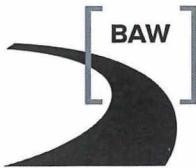


Bild 4: Längsschnitt/Ansicht der geplanten Süderelbequerung; aus [U2], Plan 4

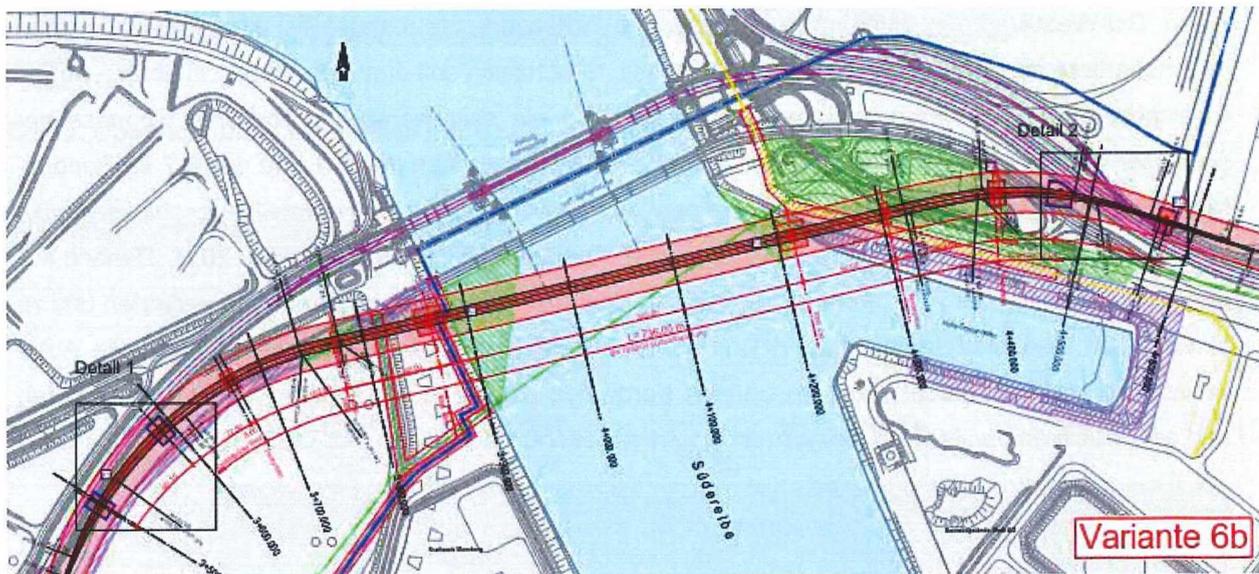


Bild 5: Draufsicht der geplanten Süderelbequerung; aus [U2], Klärungsblatt 6b

Die neue Süderelbequerung in Hamburg wird als Schrägseilbrücke mit zwei hohen Pylonen konzipiert. Der Gewinnerentwurf des Wettbewerbs kommt von der deutsch-dänischen Planungsgemeinschaft Süderelbequerung, den Firmen schlaich bergemann und partner - sbp GmbH aus Stuttgart, WTM Engineers GmbH aus Hamburg und DISSING + WEITLING architecture aus Kopenhagen, Dänemark. Mit dem Bau soll 2021 begonnen werden.

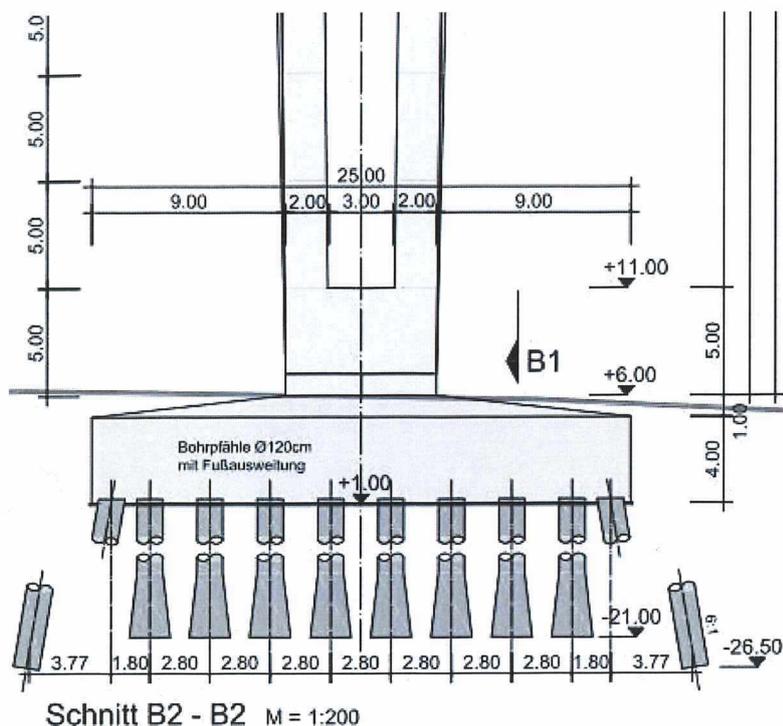
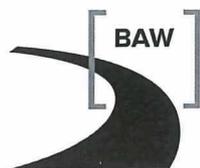


Bild 6: Schnitt durch Pfeilergründung der geplanten Süderelbequerung; aus [U2], Plan 2

Nach [U2] hat die Süderelbequerung eine Länge von 736 m, wobei die das Fahrwasser überbrückende Hauptspannweite 350 m betragen soll. Die Pylonhöhe der Hauptpfeiler ist mit 140 m Höhe vorgesehen. Die Pfeiler sollen auf Pfählen gegründet werden, die quadratische Pfahlkopfplatte soll eine Kantenlänge von 25 m und eine Dicke von 4 m haben, Bild 6. Strompfeiler sind gemäß [U1] ausgeschlossen, so dass ufernahe Pfeiler konzipiert wurden, [U2]. Die lichte Durchfahrtshöhe der Süderelbequerung soll auf + 53 m+NN liegen (= 50,89 m über MTHw) betragen. Diese Durchfahrtshöhe ist auf einer Breite von 150 m zu gewährleisten [U1]. Die geplante Ausbautiefe ist mit – 17 m+NN (-15 m zuzüglich -2 m für Toleranzen und Auskolkungen) vorgesehen.

Die Süderelbe ist tide-beeinflusst; an der Brückenstelle ist mit Wasserständen bis zu 6,9 m+NN zu rechnen. Die geplanten Höhen der Geländeoberflächen im Bereich der Pfeilerkopfplatten liegen bei 6,0 m+NN, die Konstruktionshöhe der geplanten Uferwand Ostseite, vor Pfeiler Ost, vgl. Bilder 4 bis 6, ist ebenfalls auf 6,0 m+NN geplant. Für die Westseite ist ebenfalls eine vorgelagerte Uferwand in der Überlegung.

Die Standorte der geplanten Pfeiler sind im Ufer- bzw. Böschungsbereich, vgl. [U2], Peilplan, was zunächst auch direkte Schiffsstöße relativiert. Der derzeitige östliche Böschungsbereich vor Pfeiler Ost dürfte jedoch überplant werden, so dass die endgültige Böschungslage noch nicht klar liegt. Der Böschungsbereich vor Pfeiler West wird auf der sicheren Seite zunächst nicht weiter betrachtet.

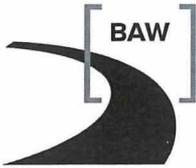


Bild 7: Draufsicht auf bestehende und geplante Kattwykbrücke; aus Bild-Plus (2014)

Der geplanten Süderelbequerung benachbart ist die bestehende Kattwykbrücke, eine bewegliche, kombinierte Eisenbahn-/Straßenbrücke als Hubbrücke mit einer Hauptöffnung von 108,5 m, Wikipedia (2016b). Die Kattwykbrücke wurde am 21. März 1973 eingeweiht und ist mit den 70 Meter hohen Endportalen, einer Hubhöhe von 46 Metern, Durchfahrthöhe von 53 und Durchfahrtsbreite von 96 Metern die größte Hubbrücke Deutschlands. Zum Zeitpunkt ihrer Erbauung war sie die weltweit größte Hubbrücke. Für das Passieren von Seeschiffen wird die Brücke auf 53 m+NN angehoben. Im Mittel findet dies über einen Zeitraum von täglich ca. 3 Stunden statt, je Einzelvorgang ca. 15 - 20 min. Geplant ist ca. 58 m nördlich der Bestehenden eine neue Kattwykbrücke, 287 m lang, ebenfalls beweglich, die künftig Eisenbahn und Fußgängerverkehr aufnehmen soll, wobei dann der Straßenverkehr auf der alten Brücke verbleibt. Die Hauptöffnung der neuen Brücke wird 133 m betragen, die Nebenöffnungen je 75 m; die Lichtraumhöhe entspricht der bestehenden Brücke. Den Pfeilern der Hauptöffnungen der bestehenden und neuen Kattwykbrücke sind bzw. werden Leitwerke zur Schiffsführung vorgelagert. Damit werden Seeschiffe von Norden auf eine Fahrspurweite von $B = 94$ gebündelt, [U2].

Durch Schiffsstoß gefährdet sind demnach:

- der Pylon-Pfeiler auf der Ostseite (Wilhelmsburg) von Süden durch See- und Binnenschiffe und von Norden nur durch Binnenschiffe wegen der Abschirmung für Seeschiffe durch einen Brückenpfeiler der bestehenden und künftig neuen Kattwykbrücke,
- der Pylon-Pfeiler auf der Westseite (Moorburg) von Süden durch See- und Binnenschiffe und von Norden nur durch Binnenschiffe wegen der Abschirmung für Seeschiffe durch einen Brückenpfeiler der bestehenden und künftig neuen Kattwykbrücke,
- der Überbau der Süderelbequerung.

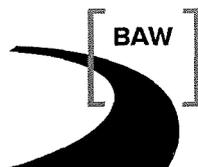


Bild 8: Längsansicht von bestehender (rechts) und geplanter (links) Kattwykbrücke; aus Bild-Plus (2014)

In [U1], [U4] und [U5] sind weitere Anforderungen bzw. Randbedingungen hinsichtlich Schiffsstoß für die geplante Süderelbequerung aufgeführt:

- als Bemessungsschiff wurde eine Geometrie $L/B/T = 255\text{m}/40\text{m}/12,7\text{m}$ angegeben, als Bemessungsgeschwindigkeit sollen 10 km/h angesetzt werden,
- für Anpralllasten wird auf DIN EN 1991-1-7 (2010), Tabelle C.4, und hier auf die Schiffsklasse „sehr groß“ verwiesen; dies würde für Seeschiffe $\leq 300\text{ m}$ Länge und einer Masse 100.000 t und unter Berücksichtigung des Hafenbereichs dynamische Stoßkräfte $F_{dx} = 230.000\text{ kN}$ und $F_{dy} = 115.000\text{ kN}$ bedeuten,
- Leitwerke vor Pfeilern von beweglichen Brücken im Hafen Hamburg werden vergleichsweise für eine statisch äquivalente Stoßlast $F = 6\text{ MN}$ bemessen, da durch die Verkehrswegunterbrechung (Brückenhebung !) ein geringeres Risiko für die Bauwerksnutzer besteht,
- für Pfeiler, die weiter als ca. 10 m von einer vertikalen Uferbefestigung entfernt stehen, brauchen gemäß Wettbewerbsunterlage keine Anpralllasten mehr angesetzt werden (die Herkunft dieser Angabe lässt sich allerdings nicht mehr verifizieren),
- auf Überbauten im Gefährdungsbereich sind Anpralllasten gemäß DIN EN 1991-1-7 (2010) anzusetzen.

Die vorstehend aufgeführten Angaben sind hinsichtlich einer Schiffsstoß-Bemessung der geplanten Süderelbequerung zu bewerten. Ein Stoßlastwert aus Bemessungsschiff und –geschwindigkeit, Tired 1, passt nicht zu den sehr grob differenzierten Pauschalwerten in DIN EN 1991-1-7 (2010), Tired 2. Beide Werte, aus Tireds 1 und 2, passen nicht zu der „schadlosen“ Entfernungsangabe in Tired 4, da bei



diesen hohen Kräften ein Kraft- bzw. Energieabbau nach wenigen Metern unwahrscheinlich ist; Desweiteren wären geometrische Schiffsüberhänge zu beachten. Die geringen Werte aus Tired 3 müssten, sofern auf einen Brückenpfeiler angesetzt, im Vergleich zu Werten aus den Tireds 1 und 2 faktisch ein Nullrisiko abbilden, das auch keine wirtschaftlichen Folgeschäden beinhalten dürfte. Somit macht eine genauere Betrachtung der maßgebenden Schiffsstoßlast für die geplante Süderelbequerung Sinn.

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 baudynamisch zu maximalen Lasten führt. Für nachweislich nachgiebige Baukörper 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

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

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

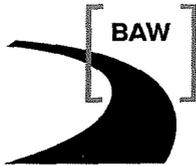
$$E_{imp} = \frac{1}{2} m_x v_o^2$$

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, $v_o = 5$ m/s (in Häfen: 2, 5 m/s).

Für die betrachtete Flottenstruktur kommt Gleichung (1b) zum Tragen. Hierin werden auch die Binnenschiffe gemäß Tabelle 1 subsumiert, was auf der sicheren Seite liegt. 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 9:

- 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.

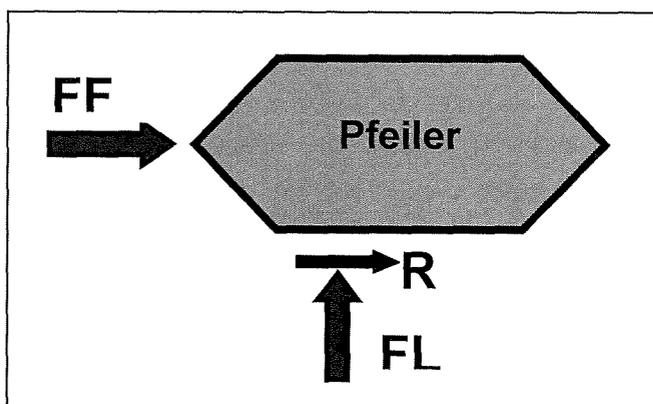
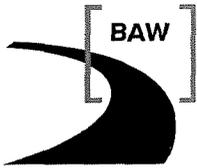


Bild 9: Lastangriffsrichtungen für Schiffsstoß

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 rech-



nerisch 40% der Größe der Flankenstoßlast. Der Angriffspunkt des Flankenstoßes soll so angesetzt werden, dass die ungünstigste Wirkung erzielt wird (wandernde Last).

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 Seeschiffahrtsbereichen 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).

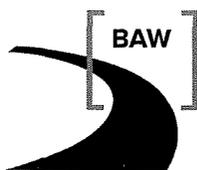
Das mögliche Eintreten einer Kollision selbst wird auf der Grundlage einer Strecken-Unfallrate als Wahrscheinlichkeits-Ereignis modelliert (vgl. 6). Für den Fall und die Wahrscheinlichkeit einer möglichen Fehlmanövrierung des Schiffes wird in Abhängigkeit von Brücken-Geometrie und nautischen Randbedingungen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



sungswert zugrunde zulegende Zeit zwischen den akzeptablen Bemessungs-Schiffsstoß-Ereignissen bestimmt sich zu $1/(10^{-4} / a) = 10.000 \text{ a}$. DIN EN 1991-1-7 (2010) geht bei Brückenbauwerken gemäß DIN EN 1990 (2010) von einer Nutzungsdauer von $T_N = 100 \text{ a}$ aus.

5 Ermittlung der Stoßlast-Verteilungsfunktionen

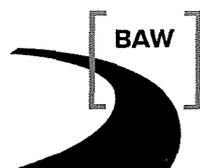
Für die probabilistische Ermittlung der Einwirkung Schiffsstoß wird eine Stoßlast-Verteilungsfunktion unter Berücksichtigung der Verkehrsdaten berechnet. Für diese Berechnung werden Daten im Sinne des frequentistischen Wahrscheinlichkeitsbegriffes bewertet.

Aus [U3] werden Massen und Häufigkeiten der die Brückenstelle passierenden Schiffe ermittelt, vgl. Tabelle 1. Eine Veränderung in der und für die Zukunft, also auch dem Nutzungsdauer-Zeitraum der geplanten Süderelbequerung, wird nicht gesehen, [U5]. Wie in 3.1 dargestellt, ist demnach mit einer Massenverteilung entsprechend Tabelle 1 und einer Schiffsfrequenz in Höhe von 3.000 Schiffe je Jahr und Richtung zu rechnen. Den Schiffstypen wurden typenabhängige Völligkeitsbeiwerte nach EAU (2012), dort Abschnitt 5, zur Ermittlung der Verdrängung zugeordnet. Da die HPA-Statistik, [U3], nicht den jeweils aktuellen Tiefgang, sondern den Konstruktions-Tiefgang, aufweist, ist daher von einer „Vollbeladung“ auszugehen, was eine konservative Annahme darstellt.

Die Geschwindigkeits-Verteilung wurde gemäß [U1] und [U4] für Süd- und Nordverkehr mit einer mittleren Geschwindigkeit $v = 10 \text{ km/h}$ angesetzt, die Standardabweichung wurde aus Erfahrungen zu $\sigma_v = 2,0 \text{ km/h}$ 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 Binnenschiffahrtsunfällen, 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 Schiffahrtsunfällen 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 Nachbewertung 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

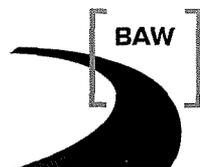
6.1 Ermittlung der Fehlerrate aus Unfalldaten

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 $URSKM [Unf/(Fz * km)]$ 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..

Gemäß [U4] stehen für die betrachtete Brückenstelle seitens Hamburg Port Authority (HPA) keine Unfalldaten bereit. Deshalb wurden Daten im Bereich des Hamburger Hafens bzw. auch der Elbe recherchiert und vergleichsbetrachtet, vgl. BMVI (2009), Bürgerschaft Hamburg (2013), (2015a), (2015b) und (2016), Hafen-Hamburg (2016), HPA (2016), Hamburg (2016), Statistisches Amt für Hamburg und Schleswig-Holstein (2011), WSA-Hamburg (2015).

Aus BMVI (2009) und WSA-Hamburg (2015) lässt sich ein Anteil von Grundberührungen (hier nur als Rückrechnungsgröße !, weil Grundberührungen häufig Gegenstand einer parlamentarischen Anfrage sind) an allen Unfällen mit ca. 15% ermitteln. Für einen Zeitraum 2010 bis 2014, Bürgerschaft Hamburg (2015a), wurden auf eine parlamentarische Anfrage hin 18 Grundberührungen in 5 Jahren durch Seeschiffe angegeben, was somit für den Hamburger Hafen zu durchschnittlich zu 3,6 Grundberührungen pro Jahr und damit $3,6/0,15 = 24$ Seeschiffs-Unfällen pro Jahr führt. Werden die beiden Unfallarmen Jahre 2011 und 2012 extrahiert, so liegen die Zahlen bei 16 Grundberührungen in 3 Jahren, durchschnittlich zu 5,33 Grundberührungen pro Jahr und damit $5,33/0,15 = 36$ Seeschiffs-Unfällen pro Jahr. Bürgerschaft Hamburg (2013) liefert 28 Seeschiffahrtsunfälle im ersten Halbjahr, mithin dann 56 Unfälle in 2013, die allerdings in dieser Größenordnung in Bürgerschaft Hamburg (2015a) nicht verifizierbar ist. Bürgerschaft Hamburg (2015b) liefert für den Zeitraum bis Mitte Juli 2015 Seeschiffahrtsunfallzahlen im Hamburger Hafen in der Größe von 23 Unfällen, was hochgerechnet 43 Unfälle in 2015 ergeben würde. Die Unfallzahlen sind den Schiffsankünften im Hamburger Hafen, vgl. HPA (2016), nicht direkt proportional, vgl. auch Tabelle 2. Ein etwa möglicher Trend mit leicht steigenden Unfallzahlen bei leicht abnehmender Schiffsfrequenz bliebe zu beobachten.

Aus den recherchierten Zahlen werden die Jahre 2010 und 2013 bis 2015 ausgewertet: aus dem Vier-Jahres-Mittel der Seeschiffsunfälle mit 37,25 werden die durchschnittlichen Grundberührungen (15%) abgezogen, so dass anrechenbare Seeschiffsunfälle in der Größe von 32 Unf./a verbleiben. In diesem Vier-Jahres-Mittel verkehren durchschnittlich 18.699 Seeschiffe.



Jahr	Seeschiffs-Unfälle (gesamt)	Seeschiffs- Unfälle (gesamt) o. Grundber.	Seeschiffs- Ankünfte	Seeschiffs- Ankünfte+Abgänge
2010	33	28	9.843	19.686
2011	7 (?)	6 (?)	10.106	20.212
2012	7 (?)	6 (?)	9.745	19.508
2013	33	28	9.681	19.362
2014	40	34	9.138	18.276
2015	43	37	8.735	17.470
Summe	149	127		74.794
2010,2013-2015				

Tabelle 2: Zusammenstellung der analysierten Seeschiffsunfälle und Seeschiffsbewegungen im Hamburger Hafen

Als mittlere Fahrstrecke der den Hafen Hamburg einlaufenden und auslaufenden Seeschiffe werden $l = 15$ km angesetzt, die sich aus einer Strecke von 10 km von Landesgrenze bis Hafen Hamburg und einer mittleren Strecke von 5 km im eigentlichen Hafen zusammensetzen.

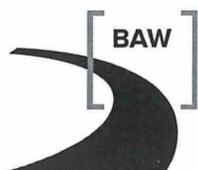
Somit lässt sich eine mittlere Unfallstreckenrate $URSKM = 32 / (18699 * 15) = 1,14 * 10^{-4}$ [Unf./ $(Fz * km)$] errechnen. Da die Auswertung statistisch eine Schätzung von über die Jahre veränderlichen Ereignissen darstellt, wird ein 95%-Vertrauensintervall für $URSKM$ ermittelt. Dies führt auf ein $URSKM$ von $URSKM_{KONF,95\%} = 1,2 * 10^{-4}$ [Unf./ $(Fz * km)$]. Angesetzt werden jedoch wegen gewisser Unwägbarkeiten (Datengrundlage, ggf. Trend) ein $URSKM = 1,5 * 10^{-4}$ [Unf./ $(Fz * km)$], was noch etwas unter den Angaben von Larsen (1993) für eine „causation probability P_C “ bleibt.

6.2 Kollisionsmodell

Für die Bestimmung der Kollisions-Rate wird eine Unfallrate mit einem geometrischen Kollisions-Modell verknüpft (Bild 10, Anlage 4). Der prinzipielle Ansatz derartiger Kollisions-Modelle findet sich in verschiedenen Literaturstellen, Krappinger (1978), Furnes und Amdahl (1979), AASHTO (1991), Larsen (1993), DIN EN 1991-1-7 (2010). Für Brücken-Projekte an Binnen- und Seeschiffahrtsstraßen Deutschlands wurde ein Kollisions-Modell angepasst und weiterentwickelt, Kunz (1990), Kunz (1998), Kunz (2006). Ein derartiges Kollisionsmodell wurde auf die Geometrie der Süderelbequerung 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:

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

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.

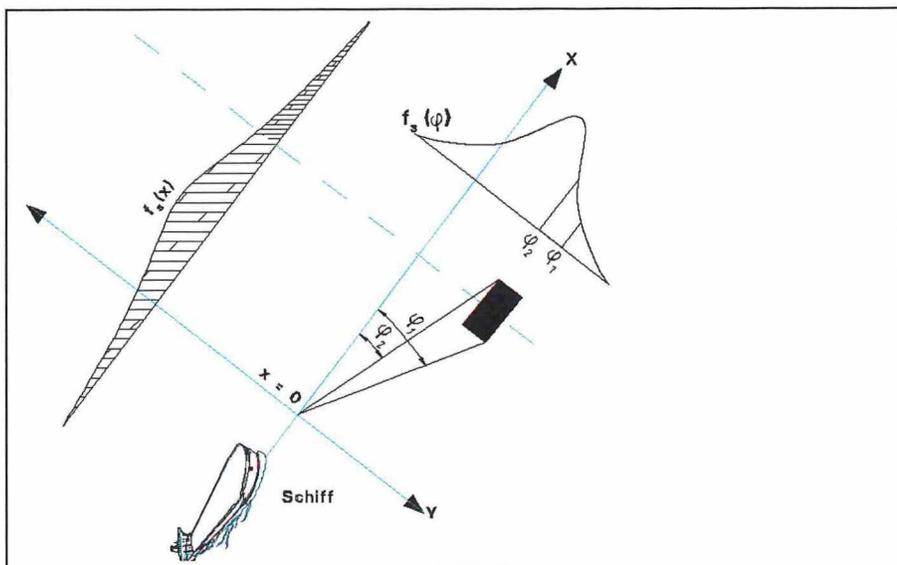
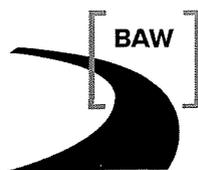


Bild 10: Kollisionsmodell (prinzipielle Darstellung)

Die Kollisions-Wahrscheinlichkeit für den Weg eines Schiffes nach dem Fehler-Ereignis hängt von einer großen Zahl zufallsbedingter Einflüsse ab, wie z.B. Schiffeigenschaften, 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 fehlmanövriertes Schiff die Brückenpfeiler erreicht. Das Schiff selbst wird als sich der Brücke annähernder Punkt betrachtet, wobei die Schiffsbreite, ermittelt zu $B = 15,2$ m, vgl. Anlage 2, fiktiv der untersuchten Breite des Bauwerkskörpers zugerechnet wird.

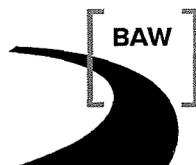
Für die beiden Parameter Abweichung φ des havarierten Schiffes vom Sollkurs sowie für den vom Schiff bis zum Stillstand zurückgelegten Weg s werden Werte-Bereiche plausibel angenommen, innerhalb deren fast alle möglichen Fälle - repräsentiert durch 98 % aller Werte - eingeschätzt werden können.

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 verkehren insgesamt 3.000 Fz, ergibt sich aus der Verknüpfung von Fehlerrate und Treffer-Wahrscheinlichkeit. Verteilungen und Integrale werden numerisch berechnet (Anlage 4). Berechnet werden jeweils die Kollisions-Wahrscheinlichkeiten für die frontale und laterale Kollision beladener Schiffe an die Pfeiler. Durch die Bündelung der von Norden einlaufenden Seeschiffe und durch die Abschirmwirkung der Brückenpfeiler der bestehenden und auch der zukünftig neuen Kattwykbrücke ist eine Gefährdung der Süderelbequerung von Norden her sehr unwahrscheinlich. Eine Beobachtung von Binnenschiffspassagen durch die Seitenöffnungen der Kattwykbrücke existiert nicht. Pfeiler West soll so hinter der Uferböschung angeordnet werden, dass hier lediglich ein Flankenstoß durch dann sich hochschiebende Schiffe auftreten kann, vgl. Bild 4. Diese Gefährdung durch Binnenschiffe aus Richtung Nord wird nicht eigens berechnet, sondern durch einen Zuschlag bei Kollisionsrate und Stoßlast berücksichtigt.

Für den Schiffsverkehr in der Brückendurchfahrt wird angenommen, dass Nord- und Südfahrer in der Brücken-Durchfahrt mittig fahren, was durch die Bündelungswirkung der Schiffsdurchfahrten durch die Kattwykbrücke(n) unterstrichen wird. Für die Zufahrt der Schiffe zur Brücke von Nord und von Süd wird



jeweils eine Weglänge von 1.000 m berücksichtigt. Die durch einen möglichen Schiffstoß gefährdeten Pfeiler werden mit den jeweiligen Abmessungen von $l \times b = 25 \text{ m} \times 25 \text{ m}$ abgebildet (Anlage 4).

Die maßgebenden Kollisionsraten sind in nachfolgender Tabelle 3 dargestellt (FF = Frontalstoß, FL = Flankenstoß, vN = von Norden, vS = von Süden):

Bauteil	$\lambda_{\text{FF,vN}}$	$\lambda_{\text{FF,vS}}$	λ_{FL}
Pfeiler West	= 0	= 0	0,00081 + ≈ 0
Pfeiler Ost	= 0	0,0016	0,00053 + ≈ 0

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

So ist statistisch für Pfeiler Ost mit einer Schiffsanfahrung von im Mittel alle 470 Jahren zu rechnen, bei Pfeiler West liegt der Wert bei im Mittel alle 1.240 Jahre.

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 und Anlage 5.

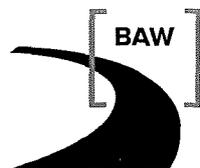
Es ergeben sich aus den Stoßlast-Verteilungsfunktionen (vgl. 5 und Anlage 2) und Kollisions-Raten (vgl. 6 und Anlage 4) nachfolgend die für einen Standsicherheits- und Tragfähigkeits-Nachweis prinzipiell anzusetzenden Einwirkungen (Anlage 5). Die Einwirkungen gelten für die Pfeiler bzw. alternativ auch für vorgelagerte Uferwände sowie ggf. auch für Böschungen.

Die dynamischen Stoßlasten auf die Brückenpfeiler betragen:

	Dynamische Stoßlasten in [MN]		
	Frontalstoß		Flankenstoß
	von Norden	von Süden	
Pfeiler West	-	-	4,0 ¹⁾
Pfeiler Ost	-	17,5	4,0 ¹⁾
¹⁾ nach oben aufgerundet wegen Gefährdung aus Richtung Norden durch Binnenschiffe			

Tabelle 4: Dynamische Stoßlasten für Pfeiler der geplanten Süderelbequerung

Die Stoßlast-Höhen für die Pfeiler sollten gemäß DIN EN 1991-1-7 (2010), 4.6.3 (4), auf $0,05 \cdot L$ über und unter dem maßgebenden Wasserstand angesetzt werden. Für L wird die mittlere Schiffslänge mit



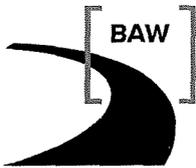
$L_0 = 100,3$ m, vgl. Anlage 2, und für den maßgebenden Wasserstand MTHw auf 2,11 m+NN empfohlen. Der Stoßlastansatz ist folglich +/- 5 m bezogen auf den maßgebenden Wasserstand anzusetzen. Die Anprallfläche sollte nach ebenfalls nach DIN EN 1991-1-7 (2010), 4.6.3 (4), $h \times b = (0,05 * L) \times (0,1 * L)$ betragen, somit $(0,05 * L_0) \times (0,1 * L_0) = 5 \times 10$ m². Selbstverständlich werden diese rechnerischen Höhen und Breite durch die jeweils maximalen Bauwerksabmessungen begrenzt, sofern diese kleiner sind. Die Höhen und Anprallflächen gelten für Uferwände bzw. Böschungen sinngemäß. Durch die o.a. normativen Regelungen erübrigt sich eine Flottenstruktur-spezifische Bugstruktur-Analyse.

Die Pfeiler sollten, wie geplant, jeweils durch eine senkrechte Uferwand eingefasst werden, wofür die Anpralllasten und -geometrien sinngemäß gelten. Pfeiler Ost würde durch eine Art Insel aus Uferwänden, Pfeiler West durch eine nahezu uferparallele Uferwand geschützt werden. Dies bildet eine zusätzliche Sicherheit. Hierzu sollte unter Berücksichtigung der Verformung der Uferwand Δx zwischen Konstruktionsoberkante und aufgehendem Pfeiler in Frontalstoß-Richtung ein geometrischer Mindestabstand von $l = 8$ m + Δx , in Flankenstoßrichtung $l = 3$ m + Δx eingehalten werden. Durch den weiteren Ansatz der Lasten auf die Pfeiler würden auch Folgestöße infolge weiteren Schiffsüberhängen sowie Aufschiebens und Eindringens abgedeckt.

Böschungen vor den Uferwänden sollten mit Wasserbausteinen abgedeckt sein. Die Uferwände sollten als Massivbau entweder als Bohrpfahlwand oder als Stahlbetonwand ausgebildet sein.

Pauschalierte dynamische Lastfaktoren DLF für Frontal- und Flankenstoß können DIN EN 1991-1-7/NA entnommen werden, um zu äquivalenten statischen Lasten zu gelangen. 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 Frontalstoß auf Pfeiler Ost $E_{imp} = 8,3$ MNm; die zugehörige Verformung im Schiff aus Gleichung (2) ist $s_{max} \approx 0,75$ m und die Stoßzeit aus Gleichung (3) beträgt $T_0 \approx 0,45$ s. Für Flankenstoß an beiden Pfeilern ergibt sich ein $E_{imp} = 0,43$ MNm, ein $s_{max} \approx 0,17$ m und ein $T_0 \approx 0,1$ s. Erdhinterfüllte Bauwerke tendieren erfahrungsgemäß zu einem DLF $\approx 1,0$.

Auf den Überbau sind die Regelungen von DIN EN 1991-1-7 (2010), 4.6.3 (5), hier auch unter Berücksichtigung des NDP zu 4.6.3 (5), anzuwenden. Somit sind als statisch äquivalente Kraft 10% der Frontalstoßlast, also $17,5$ MN * $0,1 = 1,75$ MN in ungünstigster Laststellung anzusetzen. Da DIN EN 1991-1-7 (2010) keine Angabe zur Stoßfläche macht, werden hierfür $h \times b = 1,0 \times 1,0$ m empfohlen, nicht mehr aber als die Geometrie der gestoßenen Überbaufläche zulässt.



Bei der derzeitigen Planung ist kein expliziter Bauzustand/Baubehelf ersichtlich, da ggf. die Uferwände sowohl Baubehelf als auch endgültiges Bauteil sein werden. Somit entfällt zunächst eine explizite Betrachtung von Bauzuständen.

8 Bewertung des Schiffsstoßlast-Ermittlung

Nach dem Stand der Technik, der derzeit durch DIN EN 1991-1-7 (2010) repräsentiert wird, wurden auf probabilistischer Basis Stoßlasten aus Schiffsstoß für einen Nachweis der ufernah geplanten Pfeiler der geplanten Süderelbequerung ermittelt. Die beiden Haupt-Pfeiler Ost und West wurden als im Wesentlichen frei erreichbar modelliert. Hierzu wurden ein Lastmodell für einen prognostizierten Zeitpunkt mit einem Kollisionsmodell verknüpft, daraus eine Verteilungsfunktion erstellt und mit der in DIN EN 1991-1-7 angegebenen Überschreitungswahrscheinlichkeit für die außergewöhnliche Einwirkung Schiffsstoß die anzusetzenden dynamischen Lasten ermittelt, vgl. Tabelle 4. Für die Modelle waren Daten des Verkehrsgeschehens aus der Vergangenheit ausgewertet und Unfalldaten vergleichsbetrachtet worden. Durch eine Verbesserung der Datenlage bei den Schiffsunfällen könnte eine Reduzierung der Lasten erreicht werden.

Die ermittelten Lasten liegen unter den in Tabelle C.4 von DIN EN 1991-1-7 auch unter Berücksichtigung einer Hafen-Situation angegebenen Werten, was zum einen den in Normen generalisierten Festlegungen und hier für Seeschiffe deterministisch ermittelten Werten geschuldet ist und zum anderen der ortsbezogenen Einzelfall-Ermittlung, die die besonderen Umstände einer Bauwerkslage, hier der Randlage der Pfeiler, erfassen lässt. Die Einzelfall-Betrachtung lässt auch eine Differenzierung der Stoßlasten entsprechend der Expositionsrichtung, also von Oberstrom oder Unterstrom oder der Flankenrichtung, zu.

Eine Rückbestimmung aus der probabilistisch ermittelten Stoßlast auf ein „greifbares“ Schiff ist wegen der verarbeiteten Verteilungen kaum mehr möglich. Nur als Abschätzung jedoch könnte man sich die Frontalstoßlast durch ein Schiff mit ca. 2.200 to Verdrängung und einer Anprallgeschwindigkeit von 10 km/h vorstellen. Eine bessere Plausibilisierung der vorgenommenen Berechnungen legt der Graph in Bild 11 nahe, bei dem mit dem verwendeten Modell der Abstand des Pfeilers Ost näher zur Fahrwasserachse bis fast zur „Blockade“ simuliert wurde. Ein Anstieg der Stoßlast in Richtung deterministischem Wert wird deutlich. Die deterministischen Werte aus [U1] auf der Basis DIN EN 1991-1-7 werden allerdings nicht erreicht, da in der Simulation Schiffsverdrängungen und Geschwindigkeiten noch durch Verteilungen abgebildet werden. Ohne diese würde man nahe an den deterministischen Wert nach DIN EN 1991-1-7 gelangen.

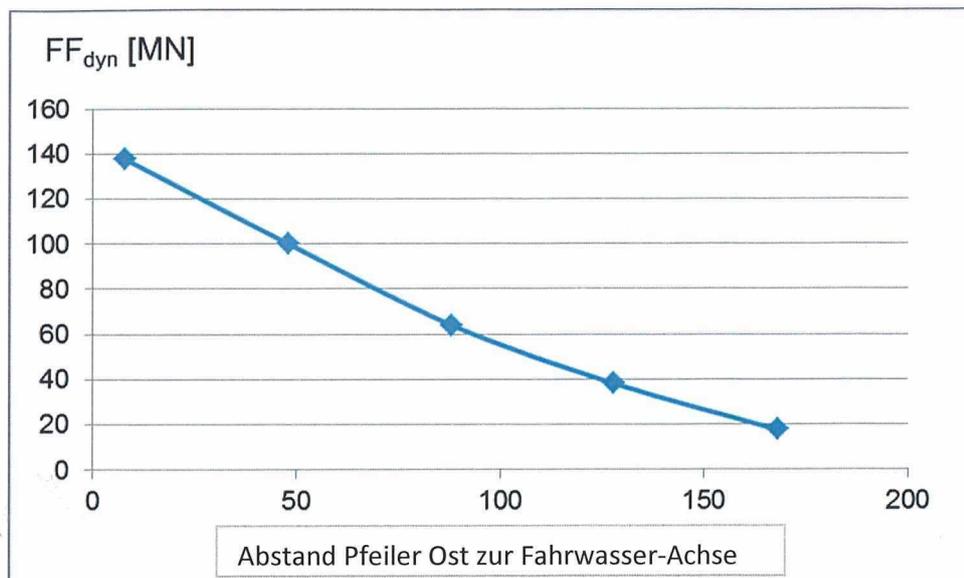


Bild 11: Dynamische Stoßlast in Abhängigkeit des Abstands von Pfeiler Ost zur Fahrwasser-achse

Bundesanstalt für Wasserbau

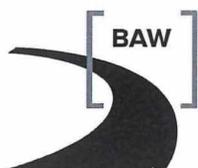
Karlsruhe, 30. November 2016

Im Auftrag



(Kunz)

Ltd. Baudirektor



Literatur

AASHTO (1991): Guide Specification and Commentary for Vessel Collision Design of Highway Bridges. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington D.C., 1991.

Bild-Plus (2014): Hafenschock – Kattwykbrücke wird zwei Jahre später fertig. Vom 03.04.2014, abgerufen am 31.05.2016.

BMVI (2009): Zusammenstellung von Schiffsunfällen auf der Elbe 1993 – 2009. Unveröffentlicht.

Bürgerschaft Hamburg (2013): Schriftliche Kleine Anfrage und Antwort des Senats - Drucksache 20/9918: Schiffskontrolldichte bei Seeschiffen im Hamburger Hafen. Bürgerschaft der Freien und Hansestadt Hamburg, 19.11.2013.

Bürgerschaft Hamburg (2015a): Schriftliche Kleine Anfrage und Antwort des Senats - Drucksache 21/105: Grundberührung des Frachtschiffs „Choapa Trader“. Bürgerschaft der Freien und Hansestadt Hamburg, 08.04.2015.

Bürgerschaft Hamburg (2015b): Schriftliche Kleine Anfrage und Antwort des Senats - Drucksache 21/988: Havarien der NYK Olympus am 3. und 4.7.2015. Bürgerschaft der Freien und Hansestadt Hamburg, 14.07.2015.

Bürgerschaft Hamburg (2016): Schriftliche Kleine Anfrage und Antwort des Senats - Drucksache 21/3139: Grundberührung des Frachtschiffs „CSCL Indian Ocean“. Bürgerschaft der Freien und Hansestadt Hamburg, 04.02.2016.

DEGES (2013): A26 Süderelbebrücke Moorburg – Dokumentation des Realisierungswettbewerbs. DEGES, Berlin, Juni 2013.

DEGES (2016): Vorstellung des Wettbewerbsentwurfs für die Süderelbebrücke. Abgerufen unter <http://www.deges.de/Startseite/A-26-Entwurf-fuer-neue-Suederelbebruecke-vorgestellt-E1215.htm> am 31.05.2016.

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.

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

Faltboot (2016): <http://www.faltboot.org/wiki/index.php?title=S%C3%BCderelbe&printable=yes>. Abgerufen am 22.06.2016.

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

GDWS-Nord (2015): Auflistung von Besonderen Ereignissen für das Jahr 2015 im Zuständigkeitsbereich des WSA Hamburg. Unveröffentlicht.

Gegenstrom 13 (2016): Warum Kohle aus Kolumbien für Moorburg ? aus:
<http://www.gegenstrom13.de/moorburg/handelsstrukturen/>, abgerufen 22.06.2016.

Hafen-Hamburg (2016): Ankünfte von Schiffen im Hamburger Hafen. Abgerufen unter www.hafen-hamburg.de/de/schiffsankuenfte-im-hamburger-hafen am 31.05.2016.

Hamburg (2016): Schiffsunglücke Hamburg. Abgerufen unter www.hamburg-fuer-die-elbe.de/?tag=schiffsungluecke am 31.05.2016.

HPA (2016): Der Hamburger Hafen – Daten und Fakten 2016. Faltblatt online unter www.hafen-hamburg.de.

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

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.

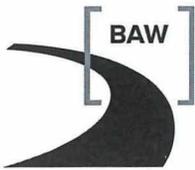
Kunz, C. (1993): Beurteilung der Sicherheit von Brücken hinsichtlich Schiffskollisionen. In: Zeitschrift für Binnenschifffahrt und Wasserstraßen, Nr. 6, 1993

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 Prüferingenieur, 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

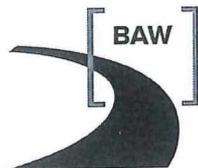
Statistisches Amt für Hamburg und Schleswig-Holstein (2011): Schifffahrt in Hamburg 2011; Abgerufen am 31.05.2016 unter www.statistik-nord.de/publikationen/publikationen/presse-informationen/dokumentenansicht/schifffahrt-in-hamburg-2011-3/

Vattenfall (2015): Kraftwerk Moorburg, Daten und Fakten. Vattenfall GmbH Communications.

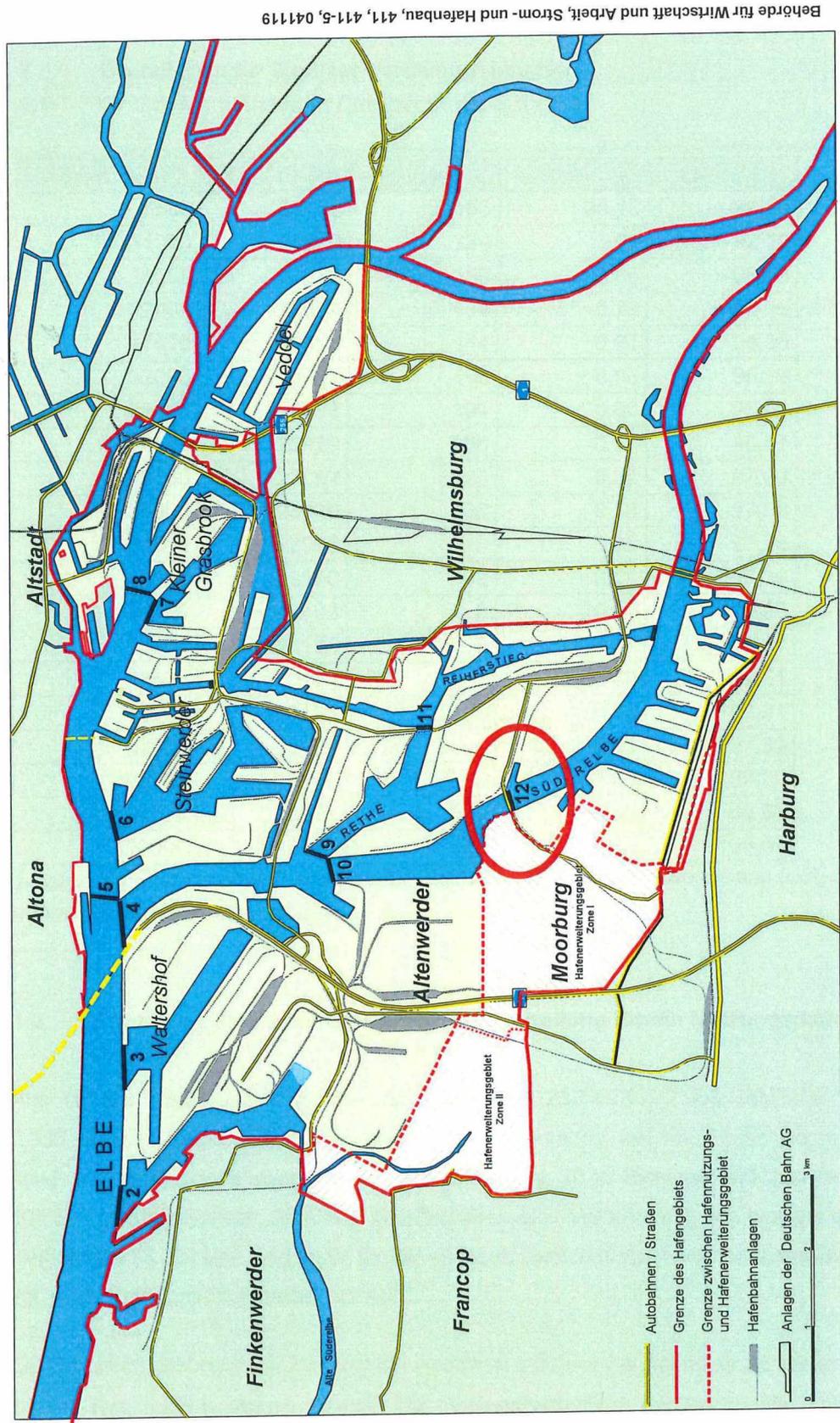
Wikipedia (2016a): Hamburger Hafen. https://de.wikipedia.org/wiki/Hamburger_Hafen. Abgerufen am 31.05.2016.

Wikipedia (2016b): Kattwykbrücke. <https://de.wikipedia.org/wiki/Kattwykbrücke>. Abgerufen am 31.05.2016.

WSA Hamburg (2015): Schiffsverkehr auf der Unterelbe. Abgerufen unter www.wsv.de/wsa-hh/schifffahrt/Nautik/Statistik/index.html am 02.06.2016



Hafen Hamburg mit Süderelbe, aus [U3]



Behörde für Wirtschaft und Arbeit, Strom- und Hafenaufbau, 411, 411-5, 041119

/ 1

Quelle: HT 411-5
Datei: Fol1174-04.ppt
Fol.Nr.: 1174-04

Ermittlung der Stoßlast-Verteilungsfunktion für das beladene Durchschnittsschiff „Süderelbe“

1 Grundlagen für Stoßlast-Verteilungsfunktion

1.1 Größe des beladenen Durchschnitts-Schiffes

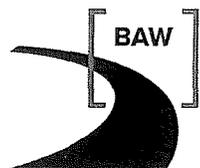
V-Klasse < [m³]	Sum-Anzahl	Klassen-Anz	[%]	Sum-[%]
5500	21155	21155	89,10	89,10
11000	21889	734	3,09	92,19
16500	22088	199	0,84	93,03
22000	22262	174	0,73	93,76
27500	22406	144	0,61	94,36
33000	22602	196	0,83	95,19
38500	22793	191	0,80	95,99
44000	22929	136	0,57	96,57
49500	23052	123	0,52	97,09
55000	23090	38	0,16	97,25
60500	23098	8	0,03	97,28
66000	23100	2	0,01	97,29
71500	23103	3	0,01	97,30
77000	23105	2	0,01	97,31
82500	23106	1	0,00	97,31
88000	23106	0	0,00	97,31
93500	23107	1	0,00	97,32
99000	23107	0	0,00	97,32
104500	23667	560	2,36	99,68
110000	23744	77	0,32	100,00

Tabelle 1: Flottenstruktur Süderelbe für Zeitraum 8 Jahre, ausgewertet aus [U3], und ergänzt um Binnenschiffe sowie Kohleschiffe, vgl. 1.2

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

Aus Tabelle 1 folgt eine jährliche Passagezahl von $23.744/8 = 2.968$ Schiffe/(a * Ri.), entsprechend 5.936 Schiffen insgesamt. Binnenschiffe, etwa drei-mal so viel wie Seeschiffe, wurden der kleinsten [tdw]- bzw. [m³]-Klasse zugewiesen. Kohleschiffe, ca. 70 je Richtung und Jahr, wurden der Klasse < 104.500 tdw zugewiesen. 90% aller Schiffe haben eine Verdrängung von weniger als 11.000 tdw, 95% weniger als 33.000 tdw. Angesetzt für die weiteren Berechnungen werden insgesamt 3.000 Fz/(a * Ri), vgl. auch Kollisions-Wahrscheinlichkeit.

Die Durchschnittsbreite der See-Schiffe errechnet sich aus den relativen Schiffsbreiten in [U3] zu $B_{\emptyset} = 15,2$ m (vgl. auch Kollisions-Modell). Die Durchschnittslänge der Seeschiffe liegt bei $L_{\emptyset} = 100,3$ m, [U3].



1.3 Geschwindigkeits-Verteilung

$$\bar{v} = 10 \text{ km/h} = 2,78 \text{ m/s}$$

$$\sigma_v = 2,0 \text{ km/h} = 0,56 \text{ m/s}$$

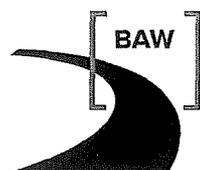
Geschwindigkeits-Verteilung als Normal-Verteilung:

Verteilungs-Funktion [-]	Wahrscheinlichkeit [-]	Klassenmittel v [m/s]
$\Phi(1,0) = 0,0007$		
	0,006	1,2
$\Phi(1,4) = 0,00686$		
	0,033	1,6
$\Phi(1,8) = 0,04$		
	0,11	2,0
$\Phi(2,2) = 0,15$		
	0,224	2,4
$\Phi(2,6) = 0,374$		
	0,279	2,8
$\Phi(3,0) = 0,653$		
	0,213	3,2
$\Phi(3,4) = 0,866$		
	0,100	3,6
$\Phi(3,8) = 0,966$		
	0,029	4,0
$\Phi(4,2) = 0,994$		
	0,006	4,4
$\Phi(4,6) = 1,0$		

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

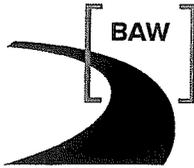
Das Verhältnis EDEF/EA wird durch die geometrische Regressions-Gleichung:

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

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-Verteilungen "Süderelbebrücke A26"
 2.1 Stoßlast-Verteilung Frontalstoß und Flankenstoß
 Stoßlast nach DIN EN 1991-1-7 (2010), PEDERSEN
 Verkehr HPA 2000/07, $v_m = 10 \text{ km/h}$

Datei: 2016-06-30_Süderelbe_Pedersen_F.MCD

$i := 1..20 \quad j := 1..9 \quad k := 1..6 \quad m := 1..8$

Schiffsmassen: $T(i) := 5500 \cdot i - 2750 \quad L(i) := 4.5622 \cdot T(i)^{0.3387}$

Geschwindigkeiten: $v(j) := 0.8 + j \cdot 0.4$

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

Bewegungsenergie: $ESt(i,j) := \frac{T(i) \cdot v(j)^2}{1962}$

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

Wahrscheinlichkeiten der Schiffsmassen:

$p_1 := 89.11 \quad p_2 := 3.09 \quad p_3 := 0.84 \quad p_4 := 0.73 \quad p_5 := 0.61 \quad p_6 := 0.83 \quad p_7 := 0.80$
 $p_8 := 0.57 \quad p_9 := 0.52 \quad p_{10} := 0.16 \quad p_{11} := 0.03 \quad p_{12} := 0.01 \quad p_{13} := 0.01 \quad p_{14} := 0.01$
 $p_{15} := 0.0 \quad p_{16} := 0.0 \quad p_{17} := 0.0 \quad p_{18} := 0.0 \quad p_{19} := 2.36 \quad p_{20} := 0.32$

Wahrscheinlichkeiten der Geschwindigkeit:

$v_1 := 0.006 \quad v_2 := 0.033 \quad v_3 := 0.11$
 $v_4 := 0.224 \quad v_5 := 0.279 \quad v_6 := 0.213$
 $v_7 := 0.100 \quad v_8 := 0.029 \quad v_9 := 0.006$

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: $pSSt(i,j,m,k) := p_i \cdot v_j \cdot wf_m \cdot sf_k$

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

Verteilungsfunktion der Frontal-Stoßlast:

PSt<5	$\sum_k \sum_j \sum_i (pSt(i,j,k) \cdot \Phi(4.99 - PSt(i,j,k))) = 58.1021475$
PSt<10	$\sum_k \sum_j \sum_i (pSt(i,j,k) \cdot \Phi(9.99 - PSt(i,j,k))) = 82.1108675$
PSt<15	$\sum_k \sum_j \sum_i (pSt(i,j,k) \cdot \Phi(14.99 - PSt(i,j,k))) = 90.9390743$
PSt<20	$\sum_k \sum_j \sum_i (pSt(i,j,k) \cdot \Phi(19.99 - PSt(i,j,k))) = 93.8733217$
PSt<25	$\sum_k \sum_j \sum_i (pSt(i,j,k) \cdot \Phi(24.99 - PSt(i,j,k))) = 95.451529$
PSt<30	$\sum_k \sum_j \sum_i (pSt(i,j,k) \cdot \Phi(29.99 - PSt(i,j,k))) = 96.2895037$
PSt<35	$\sum_k \sum_j \sum_i (pSt(i,j,k) \cdot \Phi(34.99 - PSt(i,j,k))) = 96.8110398$
PSt<40	$\sum_k \sum_j \sum_i (pSt(i,j,k) \cdot \Phi(39.99 - PSt(i,j,k))) = 97.2954547$
PSt<45	$\sum_k \sum_j \sum_i (pSt(i,j,k) \cdot \Phi(44.99 - PSt(i,j,k))) = 97.5103893$
PSt<50	$\sum_k \sum_j \sum_i (pSt(i,j,k) \cdot \Phi(49.99 - PSt(i,j,k))) = 98.0858253$
PSt<55	$\sum_k \sum_j \sum_i (pSt(i,j,k) \cdot \Phi(54.99 - PSt(i,j,k))) = 98.5501154$
PSt<60	$\sum_k \sum_j \sum_i (pSt(i,j,k) \cdot \Phi(59.99 - PSt(i,j,k))) = 98.760451$
PSt<65	$\sum_k \sum_j \sum_i (pSt(i,j,k) \cdot \Phi(64.99 - PSt(i,j,k))) = 98.867749$
PSt<70	$\sum_k \sum_j \sum_i (pSt(i,j,k) \cdot \Phi(69.99 - PSt(i,j,k))) = 99.038008$
PSt<75	$\sum_k \sum_j \sum_i (pSt(i,j,k) \cdot \Phi(74.99 - PSt(i,j,k))) = 99.0725334$
PSt<80	$\sum_k \sum_j \sum_i (pSt(i,j,k) \cdot \Phi(79.99 - PSt(i,j,k))) = 99.2272886$

PSt<85	$\sum_k \sum_j \sum_i (pSt(i,j,k) \cdot \Phi(84.99 - PSt(i,j,k))) = 99.2650282$
PSt<90	$\sum_k \sum_j \sum_i (pSt(i,j,k) \cdot \Phi(89.99 - PSt(i,j,k))) = 99.2941808$
PSt<95	$\sum_k \sum_j \sum_i (pSt(i,j,k) \cdot \Phi(94.99 - PSt(i,j,k))) = 99.471883$
PSt<100	$\sum_k \sum_j \sum_i (pSt(i,j,k) \cdot \Phi(99.99 - PSt(i,j,k))) = 99.503034$
PSt<105	$\sum_k \sum_j \sum_i (pSt(i,j,k) \cdot \Phi(104.99 - PSt(i,j,k))) = 99.6286914$
PSt<110	$\sum_k \sum_j \sum_i (pSt(i,j,k) \cdot \Phi(109.99 - PSt(i,j,k))) = 99.6499626$
PSt<115	$\sum_k \sum_j \sum_i (pSt(i,j,k) \cdot \Phi(114.99 - PSt(i,j,k))) = 99.6568608$
PSt<120	$\sum_k \sum_j \sum_i (pSt(i,j,k) \cdot \Phi(119.99 - PSt(i,j,k))) = 99.7506949$
PSt<125	$\sum_k \sum_j \sum_i (pSt(i,j,k) \cdot \Phi(124.99 - PSt(i,j,k))) = 99.766809$
PSt<130	$\sum_k \sum_j \sum_i (pSt(i,j,k) \cdot \Phi(129.99 - PSt(i,j,k))) = 99.7715703$
PSt<135	$\sum_k \sum_j \sum_i (pSt(i,j,k) \cdot \Phi(134.99 - PSt(i,j,k))) = 99.79362$
PSt<140	$\sum_k \sum_j \sum_i (pSt(i,j,k) \cdot \Phi(139.99 - PSt(i,j,k))) = 99.8451338$
PSt<145	$\sum_k \sum_j \sum_i (pSt(i,j,k) \cdot \Phi(144.99 - PSt(i,j,k))) = 99.8565347$
PSt<150	$\sum_k \sum_j \sum_i (pSt(i,j,k) \cdot \Phi(149.99 - PSt(i,j,k))) = 99.8582527$
PSt<155	$\sum_k \sum_j \sum_i (pSt(i,j,k) \cdot \Phi(154.99 - PSt(i,j,k))) = 99.860067$
PSt<160	$\sum_k \sum_j \sum_i (pSt(i,j,k) \cdot \Phi(159.99 - PSt(i,j,k))) = 99.9060764$
PSt<165	$\sum_k \sum_j \sum_i (pSt(i,j,k) \cdot \Phi(164.99 - PSt(i,j,k))) = 99.9157818$

$$PSt < 170 \quad \sum_k \sum_j \sum_i (pSt(i,j,k) \cdot \Phi(169.99 - PSt(i,j,k))) = 99.9166421$$

$$PSt < 175 \quad \sum_k \sum_j \sum_i (pSt(i,j,k) \cdot \Phi(174.99 - PSt(i,j,k))) = 99.9172487$$

Verteilungsfunktion der Flanken-Stoßlast:

$$PSSt < 4 \quad \sum_k \sum_m \sum_j \sum_i (pSSSt(i,j,m,k) \cdot \Phi(3.99 - PSSt(i,j,m,k))) = 95.9208687$$

$$PSSt < 8 \quad \sum_k \sum_m \sum_j \sum_i (pSSSt(i,j,m,k) \cdot \Phi(7.99 - PSSt(i,j,m,k))) = 98.5442437$$

$$PSSt < 12 \quad \sum_k \sum_m \sum_j \sum_i (pSSSt(i,j,m,k) \cdot \Phi(11.99 - PSSt(i,j,m,k))) = 99.2675655$$

$$PSSt < 16 \quad \sum_k \sum_m \sum_j \sum_i (pSSSt(i,j,m,k) \cdot \Phi(15.99 - PSSt(i,j,m,k))) = 99.5618772$$

$$PSSt < 20 \quad \sum_k \sum_m \sum_j \sum_i (pSSSt(i,j,m,k) \cdot \Phi(19.99 - PSSt(i,j,m,k))) = 99.7334046$$

$$PSSt < 24 \quad \sum_k \sum_m \sum_j \sum_i (pSSSt(i,j,m,k) \cdot \Phi(23.99 - PSSt(i,j,m,k))) = 99.8218738$$

$$PSSt < 28 \quad \sum_k \sum_m \sum_j \sum_i (pSSSt(i,j,m,k) \cdot \Phi(24.99 - PSSt(i,j,m,k))) = 99.8420191$$

$$PSSt < 32 \quad \sum_k \sum_m \sum_j \sum_i (pSSSt(i,j,m,k) \cdot \Phi(31.99 - PSSt(i,j,m,k))) = 99.915102$$

$$PSSt < 36 \quad \sum_k \sum_m \sum_j \sum_i (pSSSt(i,j,m,k) \cdot \Phi(35.99 - PSSt(i,j,m,k))) = 99.9404755$$

$$PSSt < 40 \quad \sum_k \sum_m \sum_j \sum_i (pSSSt(i,j,m,k) \cdot \Phi(39.99 - PSSt(i,j,m,k))) = 99.9574783$$

$$PSSt < 44 \quad \sum_k \sum_m \sum_j \sum_i (pSSSt(i,j,m,k) \cdot \Phi(43.99 - PSSt(i,j,m,k))) = 99.970776$$

$$PSSt < 48 \quad \sum_k \sum_m \sum_j \sum_i (pSSSt(i,j,m,k) \cdot \Phi(47.99 - PSSt(i,j,m,k))) = 99.9766872$$

$$PSSt < 52 \quad \sum_k \sum_m \sum_j \sum_i (pSSSt(i,j,m,k) \cdot \Phi(51.99 - PSSt(i,j,m,k))) = 99.983831$$

$$PSSt < 56 \quad \sum_k \sum_m \sum_j \sum_i (pSSSt(i,j,m,k) \cdot \Phi(55.99 - PSSt(i,j,m,k))) = 99.9874011$$

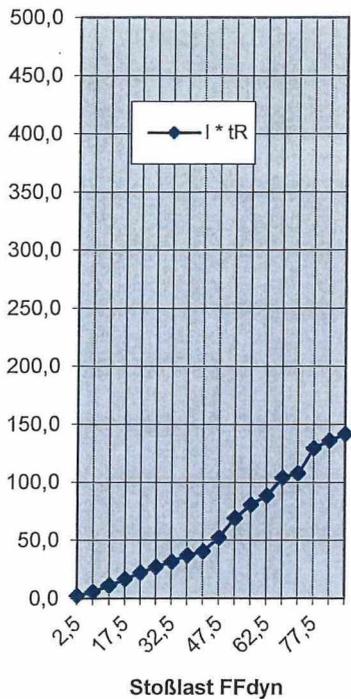
$$PSSt < 60 \quad \sum_k \sum_m \sum_j \sum_i (pSSSt(i,j,m,k) \cdot \Phi(59.99 - PSSt(i,j,m,k))) = 99.9907312$$

PSSt<64	$\sum_k \sum_m \sum_j \sum_i (pSSt(i,j,m,k) \cdot \Phi(63.99 - PSSt(i,j,m,k))) = 99.9928149$
PSSt<68	$\sum_k \sum_m \sum_j \sum_i (pSSt(i,j,m,k) \cdot \Phi(67.99 - PSSt(i,j,m,k))) = 99.994087$
PSSt<72	$\sum_k \sum_m \sum_j \sum_i (pSSt(i,j,m,k) \cdot \Phi(71.99 - PSSt(i,j,m,k))) = 99.9959501$
PSSt<76	$\sum_k \sum_m \sum_j \sum_i (pSSt(i,j,m,k) \cdot \Phi(75.99 - PSSt(i,j,m,k))) = 99.9966346$
PSSt<80	$\sum_k \sum_m \sum_j \sum_i (pSSt(i,j,m,k) \cdot \Phi(79.99 - PSSt(i,j,m,k))) = 99.9974417$
PSSt<84	$\sum_k \sum_m \sum_j \sum_i (pSSt(i,j,m,k) \cdot \Phi(83.99 - PSSt(i,j,m,k))) = 99.9981831$
PSSt<88	$\sum_k \sum_m \sum_j \sum_i (pSSt(i,j,m,k) \cdot \Phi(87.99 - PSSt(i,j,m,k))) = 99.99842$
PSSt<92	$\sum_k \sum_m \sum_j \sum_i (pSSt(i,j,m,k) \cdot \Phi(91.99 - PSSt(i,j,m,k))) = 99.9987858$
PSSt<96	$\sum_k \sum_m \sum_j \sum_i (pSSt(i,j,m,k) \cdot \Phi(95.99 - PSSt(i,j,m,k))) = 99.9990866$
PSSt<100	$\sum_k \sum_m \sum_j \sum_i (pSSt(i,j,m,k) \cdot \Phi(99.99 - PSSt(i,j,m,k))) = 99.9992728$
PSSt<104	$\sum_k \sum_m \sum_j \sum_i (pSSt(i,j,m,k) \cdot \Phi(103.99 - PSSt(i,j,m,k))) = 99.9994559$

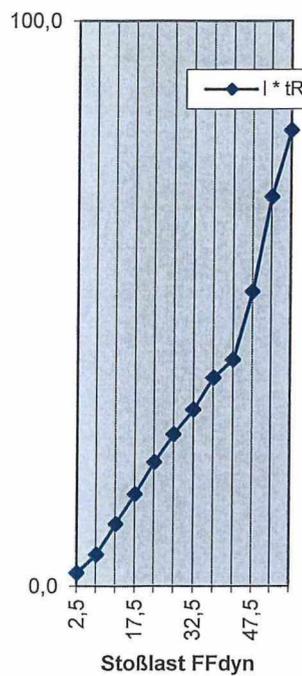
Bundesanstalt für Wasserbau
 Ermittlung probabilistischer Schiffsstoßlasten für Süderelbequerung - A26
 BAW-Nr. A39510010115 - November 2016

Ermittlung der Stoßlast-Verteilung:		Frontalstoß		
für Verkehr "HPA 2000-2007"				
Fahrzeuge voll beladen, Pedersen, einschl. Binnen- und Kohleschiffe				
	Frontalstoß			
Stoßlast FF _{dyn} [MN]	Verteilungs- funktion F [-] * 10E-02	Wahrschein- lichkeit f [-] * 10E-02	Stoßlast FF _{dyn} [MN] Klassen-Mittel	1/(1 - F) = λ * tR
			Stoßlast FF _{dyn}	λ * tR
0 - 5	58,10215	58,1021475	2,5	2,4
5 - 10	82,11087	24,00872	7,5	5,6
10 - 15	90,93907	8,82821	12,5	11,0
15 - 20	93,8733217	2,93425	17,5	16,3
20 - 25	95,45153	1,57821	22,5	22,0
25 - 30	96,28950	0,83797	27,5	27,0
30 - 35	96,81104	0,52154	32,5	31,4
35 - 40	97,29545	0,48441	37,5	37,0
40 - 45	97,51039	0,21493	42,5	40,2
45 - 50	98,08583	0,57544	47,5	52,2
50 - 55	98,55012	0,46429	52,5	69,0
55 - 60	98,76045	0,21034	57,5	80,7
60 - 65	98,86775	0,10730	62,5	88,3
65 - 70	99,03801	0,17026	67,5	104,0
70 - 75	99,07253	0,03453	72,5	107,8
75 - 80	99,2272886	0,15476	77,5	129,4
80 - 85	99,2650282	0,03774	82,5	136,1
85 - 90	99,2941808	0,02915	87,5	141,7

Stoßlast-Verteilungsfunktion



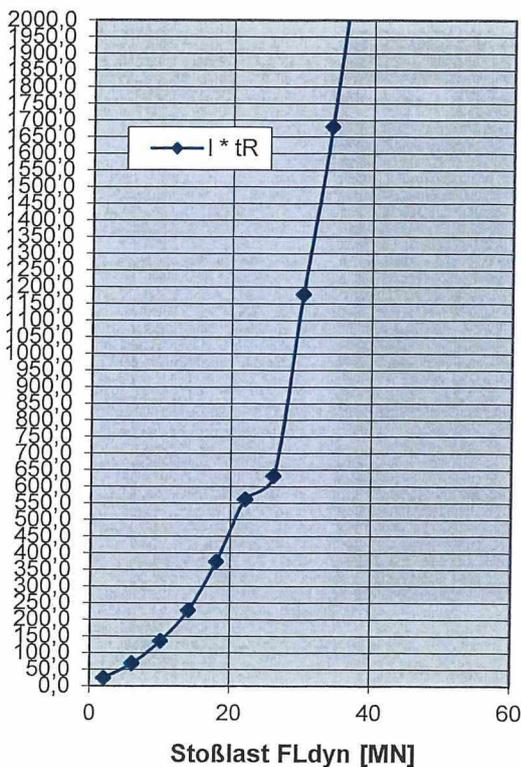
Stoßlast-Verteilungsfunktion Detail



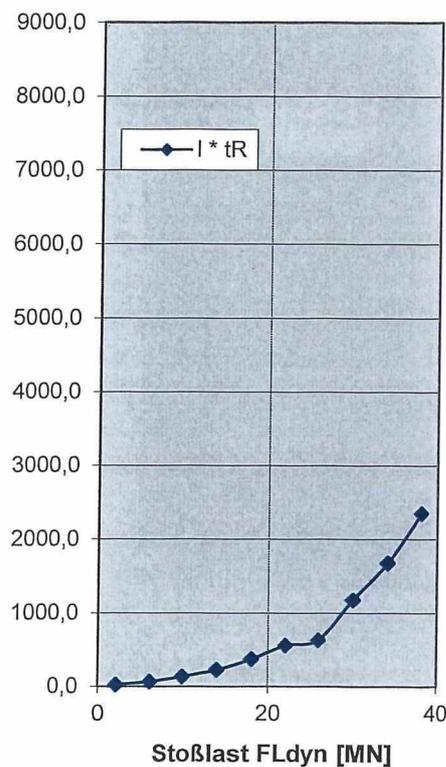
Bundesanstalt für Wasserbau
 Ermittlung probabilistischer Schiffsstoßlasten für Süderelbequerung - A26
 BAW-Nr. A39510010115 - November 2016

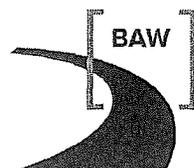
Ermittlung der Stoßlast-Verteilung:		Flankenstoß		
für Verkehr "HPA 2000-2007"				
Fahrzeuge voll beladen, Pedersen, einschl. Binnen- und Kohleschiffe				
	Flankenstoß			
Stoßlast FL _{dyn} [MN]	Verteilungs- funktion F [-] * 10E02	Wahrschein- lichkeit f [-] * 10E02	Stoßlast FL _{dyn} [MN] Klassen-Mittel	1/(1 - F) = λ * tR
0-4	95,9208687	95,9208687	2	24,5
4-8	98,5442437	2,62338	6	68,7
8-12	99,2675655	0,72332	10	136,5
12-16	99,5618772	0,29431	14	228,2
16-20	99,7334046	0,17153	18	375,1
20-24	99,8218738	0,08847	22	561,4
24-28	99,8420191	0,02015	26	633,0
28-32	99,9151020	0,07308	30	1177,9
32-36	99,9404755	0,02537	34	1680,0
36-40	99,9574783	0,01700	38	2351,7
40-44	99,9707760	0,01330	42	3421,8
44-48	99,9766872	0,00591	46	4289,5
48-52	99,9838310	0,00714	50	6184,7
52-56	99,9874011	0,00357	54	7937,2
56-60	99,9907312	0,00333	58	10788,9
60-64	99,9928149	0,00208	62	13917,7
64-68	99,9940870	0,00127	66	16911,9
68-72	99,9959501	0,00186	70	24692,0

Stoßlast-Verteilungsfunktion



Stoßlast-Verteilungsfunktion Detail





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
- Linearität zwischen Anzahl Unfällen und Anzahl Passagen
- Fehlerrate entspricht Unfallrate auf betrachteter Strecke

2 Abschätzung der Unfallrate an der Süderelbebrücke

Grundlage der Unfallauswertungen stellen folgende Literaturstellen dar:

- BMVI (2009),
- Bürgerschaft Hamburg (2013), (2015a), (2015b) und (2016),
- Hafen-Hamburg (2016),
- HPA (2016),
- Hamburg (2016),
- Statistisches Amt für Hamburg und Schleswig-Holstein (2011),
- WSA-Hamburg (2015).

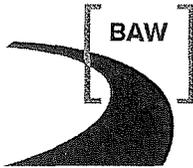
Jahr	Seeschiffs- Unfälle (gesamt)	Seeschiffs- Unfälle (gesamt) o. Grundber.	Seeschiffs- Ankünfte	Seeschiffs- Ankünfte+Abgänge
2010	33	28	9.843	19.686
2011	7 (?)	6 (?)	10.106	20.212
2012	7 (?)	6 (?)	9.745	19.508
2013	33	28	9.681	19.362
2014	40	34	9.138	18.276
2015	43	37	8.735	17.470
Summe	149	127		74.794
2010,2013-2015				

Tabelle: Zusammenstellung der analysierten Seeschiffsunfälle und Seeschiffsbewegungen im Hamburger Hafen

Unfallrate für den Hafen Hamburg:

Aus den recherchierten Zahlen werden die Jahre 2010 und 2013 bis 2015 ausgewertet:

- Vier-Jahres-Mittel der Seeschiffsunfälle = 37,25 abzüglich durchschnittliche Grundberührungen (15%) ergibt anrechenbare Seeschiffsunfälle = 32 Unf./a.



- in diesem Vier-Jahres-Mittel verkehren durchschnittlich 18.699 Seeschiffe.

Mittlere Fahrstrecke der den Hafen Hamburg einlaufenden und auslaufenden Seeschiffe: $l = 15$ km
 (aus Strecke 10 km von Landesgrenze bis Hafen Hamburg und einer mittleren Strecke 5 km im eigentlichen Hafen).

-> Unfallstreckenrate $URSKM = 32 / (18699 * 15) = 1,14 * 10^{-4}$ [Unf./($Fz * km$)]

errechnen. Da die Auswertung statistisch eine Schätzung von über die Jahre veränderlichen Ereignissen darstellt, wird ein 95%-Vertrauensintervall für $URSKM$ ermittelt. Dies führt auf ein $URSKM$ von $URSKM_{KONF,95\%} = 1,2 * 10^{-4}$ [Unf./($Fz * km$)]. Angesetzt werden jedoch wegen gewisser Unwägbarkeiten (Datengrundlage, ggf. Trend) ein $URSKM = 1,5 * 10^{-4}$ [Unf./($Fz * km$)], was noch etwas unter den Angaben von Larsen (1993) für eine „causation probability P_c “ bleibt

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

$n = \text{Anzahl Fahrzeuge/a} = 18.699 \text{ Fz/a}$

$p = \text{Unfallrate } URSKM = 1,14 * 10^{-4} \text{ Unf./}(Fz * km)$

$$\mu = n * p = 18.699 * 1,14 * 10^{-4} = 2,13$$

$$\sigma^2 = n * p * (1 - p) = \mu = 2,13$$

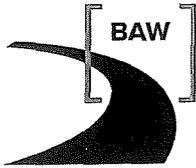
$$t * (s/(n^{1/2})) = 1,96 * (2,13^{1/2} / (18.699^{1/2})) = 0,021$$

$$\mu_{KONF,95\%} = 2,13 + 0,021 = 2,15$$

$$URSKM_{Brücke,95\%} = 2,15 / 18.699 = 1,2 * 10^{-4} \text{ Unf./}(Fz * km)$$

Es wird im Weiteren wegen Unwägbarkeiten in den Grundlagen-Daten und ggf. Trends mit

$URSKM_{Brücke} = 1,5 * 10^{-5} \text{ Unf./}(Fz * km)$ gerechnet.



Abschätzung der Kollisions-Wahrscheinlichkeiten

1 Grundlagen

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

$$\text{URSKM (2015)} = 1,5 * 10^{-4} [\text{Unf.}/(\text{Fz.} * \text{km})]$$

Kollisionsmodell

mittlere Schiffsbreite (vgl. Anl. 2): $B_{\varnothing} = 15,2 \text{ m}$

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:

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

$$\begin{aligned} \text{davon: } W\{\text{Flanken-Kollisionskurs auf Pfeiler } i\} &= W\{\varphi_{i3} < \varphi < \varphi_{i2}\} \\ &= F_{\varphi}(\varphi_{i2}) - F_{\varphi}(\varphi_{i1}) = W_{i3}(s) \end{aligned}$$

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

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

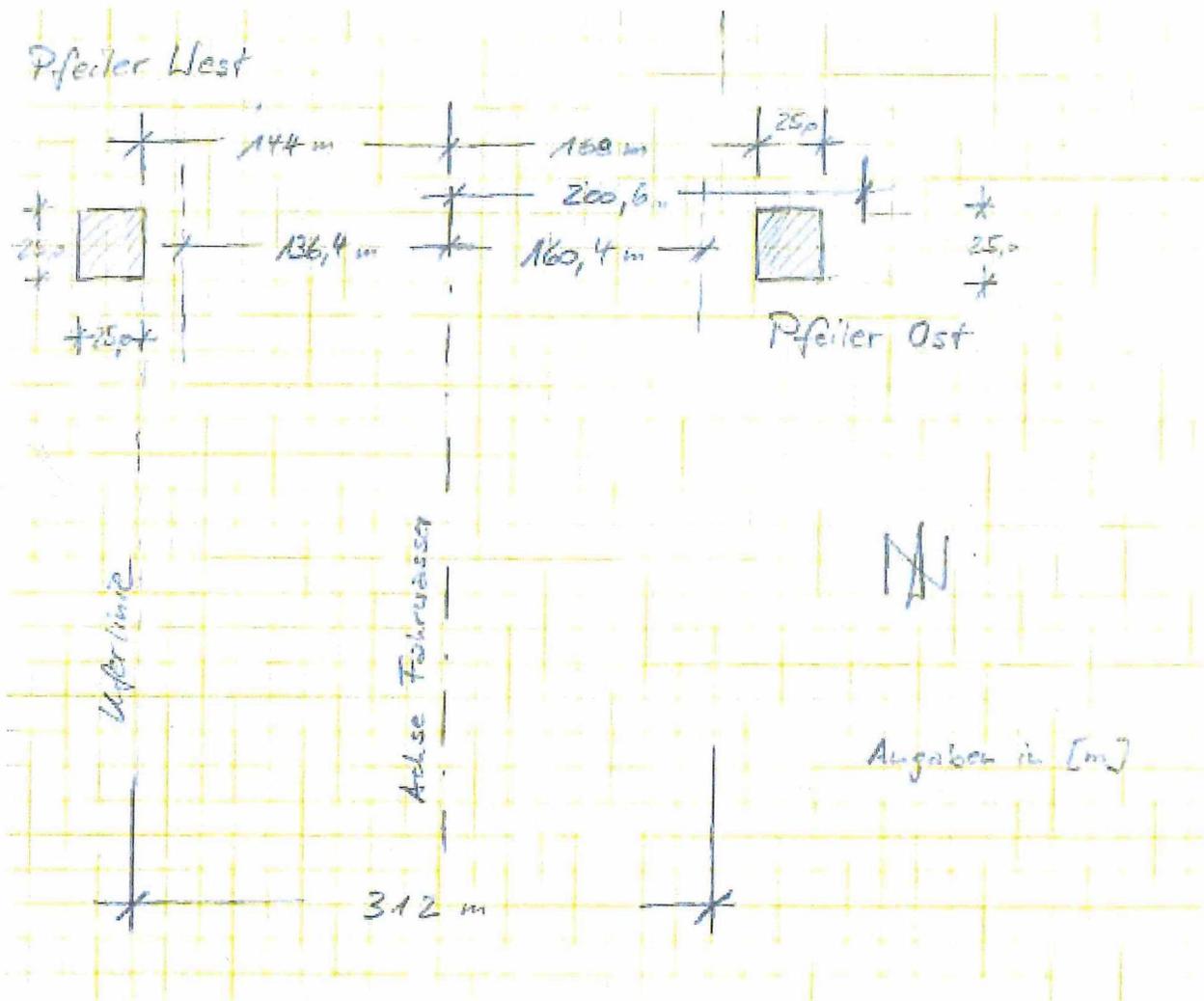
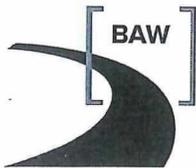


Bild A4.1: Geometrie Kollisions-Modell, auf der Basis [U2], Plan der Variante 6b

**2 Berechnung der Kollisions-Wahrscheinlichkeit
 mit Pfeiler der Süderelbebrücke (A26),
 Süderelbe, Verkehr HPA 2000-2007**

Datei "2016-06-30_Süderelbe-A26_K.MCD"

Eingangswerte:

$i := 20$ $x := 1..i$ $s(x) := 50 \cdot x$ Abstaende zur Brueckenachse
 Anzahl der passierenden Fahrzeuge q: $j := 1$ $q_j := 3000 \cdot j$
 Fehlerrate je Wegeinheit: $\lambda_{x_j} := 1.5 \cdot q_j \cdot 10^{-4}$

1. Berechnung für Pfeiler Ost

1.1 Mittige Fahrt

Berechnungen aus einer Richtung:

Grenzwinkel

$$\phi_{11}(x) := \operatorname{atan}\left(\frac{200.6}{s(x)}\right) \cdot \left(\frac{180}{\pi}\right) \quad \phi_{12}(x) := \operatorname{atan}\left(\frac{160.4}{s(x) + 25.0}\right) \cdot \left(\frac{180}{\pi}\right) \quad \phi_{13}(x) := \operatorname{atan}\left(\frac{160.4}{s(x)}\right) \cdot \left(\frac{180}{\pi}\right)$$

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

$W_{11}(x) := (\operatorname{knorm}(z_{11}(x)) - \operatorname{knorm}(z_{12}(x)))$ Kollisions-Wahrscheinlichkeit auf Uferwd, gesamt
 $W_{12}(x) := (\operatorname{knorm}(z_{11}(x)) - \operatorname{knorm}(z_{13}(x)))$ Kollisions-Wahrscheinlichkeit auf Uferwd, Frontalstoß
 $W_{13}(x) := (\operatorname{knorm}(z_{13}(x)) - \operatorname{knorm}(z_{12}(x)))$ Kollisions-Wahrscheinlichkeit auf Uferwd, Flankenstoß

$z_s(x) := \frac{s(x) - 500}{150}$ $WW(x) := 1 - \operatorname{knorm}(z_s(x))$ Wahrscheinlichkeit, daß Schiff Uferwd erreicht

$W_1(x) := W_{11}(x) \cdot WW(x)$ Wahrscheinlichkeit Kollision mit Uferwd,gesamt
 $WF_1(x) := W_{12}(x) \cdot WW(x)$ Wahrscheinlichkeit Kollision m. Uferwd, Frontal
 $WS_1(x) := W_{13}(x) \cdot WW(x)$ Wahrscheinlichkeit Kollision m. Uferwd, Flanke

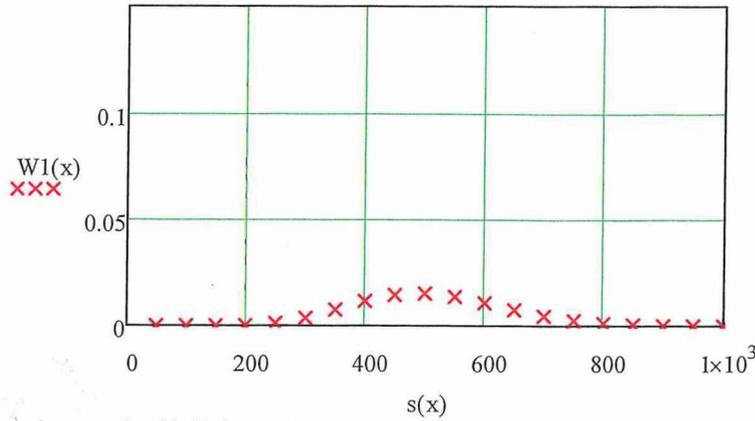
Berechnung der Kollisions-Wahrscheinlichkeiten:

Kollisions-Wahrscheinlichkeit mit Uferwd, gesamt $\int_1^{20} 0.05 \cdot W_1(x) \, dx = 0.00474$

Kollisions-Wahrscheinlichkeit m. Uferwd, Frontal $\int_1^{20} 0.05 \cdot WF_1(x) \, dx = 0.00356$

Kollisions-Wahrscheinlichkeit m. Uferwd, Flanke $\int_1^{20} 0.05 \cdot WS_1(x) \, dx = 0.00118$

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

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

$$q_j = 3000 \quad \lambda_j = 0.00213$$

$$\lambda_{F_j} = 0.0016$$

$$\lambda_{S_j} = 0.00053 \quad t_{S_j} = 1875.8$$

$$t_j = 468.4$$

$$t_{F_j} = 624.3$$

Berechnungen aus Gegenrichtung:

ist symmetrisch

2. Berechnung für Pfeiler West

2.1 Mittige Fahrt

Berechnung aus einer Richtung:

Grenzwinkel

$$\phi_{11}(x) := \operatorname{atan}\left(\frac{136.41}{s(x)}\right) \cdot \left(\frac{180}{\pi}\right) \quad \phi_{12}(x) := \operatorname{atan}\left(\frac{136.4}{s(x) + 25.0}\right) \cdot \left(\frac{180}{\pi}\right) \quad \phi_{13}(x) := \operatorname{atan}\left(\frac{136.4}{s(x)}\right) \cdot \left(\frac{180}{\pi}\right)$$

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

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

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

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

$$W_W(x) := 1 - \operatorname{knorm}(z_s(x))$$

Wahrscheinlichkeit, daß
 Schiff Bösch erreicht

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

Wahrscheinlichkeit Kollision mit Bösch, gesamt

$$W_{F1}(x) := W_{12}(x) \cdot W_W(x)$$

Wahrscheinlichkeit Kollision m. Bösch, Frontal

$$W_{S1}(x) := W_{13}(x) \cdot W_W(x)$$

Wahrscheinlichkeit Kollision m. Bösch, Flanke

Berechnung der

Kollisions-Wahrscheinlichkeiten:

Kollisions-Wahrscheinlichkeit mit Bösch, gesamt

$$\int_1^{20} 0.05 \cdot W_1(x) \, dx = 0.00179$$

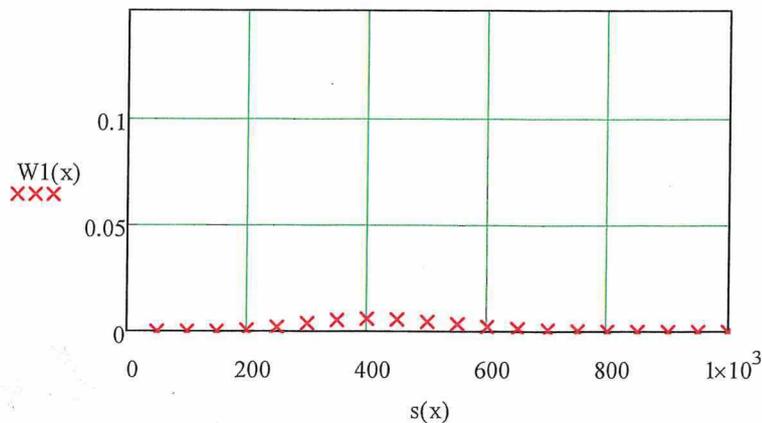
Kollisions-Wahrscheinlichkeit m. Bösch, Frontal

$$\int_1^{20} 0.05 \cdot W_{F1}(x) \, dx = 0$$

Kollisions-Wahrscheinlichkeit m. Bösch, Flanke

$$\int_1^{20} 0.05 \cdot W_{S1}(x) \, dx = 0.00179$$

Verteilungsdichte Treffer-Wahrscheinlichkeit



Berechnung der Kollisionsraten:

Kollisionsrate λ_j , gesamt, sowie
 Wiederkehrintervall t_j

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

Kollisionsrate λ_{F_j} , Frontal, sowie
 Wiederkehrintervall t_{F_j}

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

Kollisionsrate λ_{S_j} , Flanke, sowie
 Wiederkehrintervall t_{S_j}

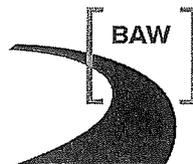
$$\lambda_{S_j} := \lambda_{x_j} \cdot \int_1^{20} 0.05 \cdot WS1(x) dx \quad t_{S_j} := (\lambda_{S_j})^{-1}$$

$$q_j = 3000 \quad \lambda_j = 0.00081 \quad \lambda_{F_j} = 1.00345 \times 10^{-6} \quad t_{F_j} = 10 \times 10^5 \quad \lambda_{S_j} = 0.00081 \quad t_{S_j} = 1239.9$$

$$t_j = 1238.3$$

Berechnungen aus Gegenrichtung:

ist symmetrisch



3 Zusammenstellung der Kollisionsraten (λ -Werte)

Bauteil	$\lambda_{FF,vN}$	$\lambda_{FF,vS}$	λ_{FL}
Pfeiler West	= 0	= 0	0,00081 + ≈ 0
Pfeiler Ost	= 0	0,0016	0,00053 + ≈ 0

Tabelle 1: Kollisionsraten

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

Bauteil	$\Sigma \lambda_{FF} * t_R$	$\Sigma \lambda_{FL} * t_R$
Pfeiler West	-	8,1
Pfeiler Ost	16,0	5,3

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



Bundesanstalt für Wasserbau
Kompetenz für die Wasserstraßen

Kußmaulstraße 17 · 76187 Karlsruhe
Tel. 0721 97 26-0 · Fax 0721 97 26-45 40

Wedeler Landstraße 157 · 22559 Hamburg
Tel. 040 81 908-0 · Fax 040 81 908-373

Am Ehrenberg 8 · 98693 Ilmenau
Tel. 03677 669-0 · Fax 03677 669-33 33

www.baw.de