

# HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

---

Conference Paper, Published Version

**Egge, E. D.; Scharrer, M.; Niemeyer, K.-H.**

## **Havariebedingte Lasten**

Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen

Zur Verfügung gestellt in Kooperation mit/Provided in Cooperation with:

**Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik**

---

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/104019>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Egge, E. D.; Scharrer, M.; Niemeyer, K.-H. (2000): Havariebedingte Lasten. In: Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik (Hg.): Belastung, Stabilisierung und Befestigung von Sohlen und Böschungen wasserbaulicher Anlagen. Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen 18. Dresden: Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik. S. 175-185.

### **Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:**

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

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



## **Havariebedingte Lasten**

### **Kurzfassung**

Durch Kollisionen von Binnenschiffen mit Kanalbrücken können Schäden evtl. sehr großen Ausmaßes verursacht werden. Es wird ein Rechenverfahren beschrieben, mit dem die dabei entstehenden Lasten und Verformungen unter Berücksichtigung der Schiffsdynamik ermittelt werden. In der Schiffsdynamik sind sowohl die Starrkörperbewegungen als auch die durch den Stoß verursachten Schiffsschwingungen enthalten. Im Kontaktbereich wird das elastisch-plastische Tragverhalten der Schiffstruktur angesetzt. Die Berechnungen, die mit Finiten Element Techniken erfolgten, können auch das Steifigkeits- und Tragverhalten der Kanalbrücke berücksichtigen.

### **Abstract**

Collisions of inland vessels against canal bridges can cause severe damages. A calculation procedure is presented that allows the evaluation of loads and deformations with inclusion of the ship's dynamic. The dynamic behaviour describes the rigid body motions and the vibrations caused by the impact. In the contact area the elastic-plastic bearing capacity of the ship is regarded. The calculations, which are done by means of the Finite Element techniques can also include effects of the stiffness and bearing behaviour of the canal bridge.

### **Einleitung**

Seit über 30 Jahren führt der Germanische Lloyd Berechnungen mit der Finiten-Element-Methode durch. Standardmäßig werden Festigkeitsuntersuchungen an Schiffen, Offshoreeinrichtungen und anderen Strukturen vorgenommen, wobei sich die computergestützte lineare FE-Methode als sehr robustes und zuverlässiges Werkzeug erwiesen hat.

In diesem Zeitraum ist das Interesse an weitergehenden Fragen stark gewachsen, gerade auch Untersuchungen in Bereichen zu machen, die nicht mehr linear sind. Ursprünglich fragte man, welche maximale Last kann ein Bauteil unter der Voraussetzung aufnehmen, daß es völlig intakt bleibt. Heute möchte man oft auch das plastische Verformungsverhalten jenseits dieser Grenze bis zum totalen Versagen kennen, samt des Verlaufs der Verformungsenergie. Varianten der klassischen linearen FE-Technik, nämlich inkrementelle, werkstofflich und geometrisch nichtlineare FE-Programme sind hierfür geeignet.

Ein für den Germanischen Lloyd aktuelles Anwendungsgebiet ist die Berechnung von Schiffskollisionen. In Abb. 1 ist eine solche Kollisionssituation zwischen zwei Seeschiffen zu sehen. Diese sehr aufwendigen Berechnungen werden mit Hilfe von expliziten FE-Programmen durchgeführt, die auch in der Automobilindustrie für Crash-Simulationen verwendet werden. Der Aufwand wird verständlich, wenn man weiß, daß hier für jede Sekunde Realzeit etwa 740000 Zeitschritte berechnet werden müssen.

### **Havariebedingte Lasten an Kanalbrücken**

Ähnliche Fragestellungen kommen mitunter auch in dem Bereich der Binnenschifffahrt vor. So wurde der Germanische Lloyd von dem Bundesamt für Wasserbau beauftragt, havariebedingte Entwurfslasten für die Kanalbrücken der Neubaustrecke des Dortmund-Ems-Kanals zu bestimmen. Für diese Strecke waren fünf Kanalbrücken mit gleichem trapezförmigen Kanalquerschnitten vorgesehen. Ziel der Arbeit war es, Stoßlasten für den Fall zu berechnen, daß ein Binnenschiff auf die geneigt Seitenfläche auffährt. Diese Lasten sollten sowohl zur Dimensionierung der Brückenlager als auch zur Bemessung der Brückenkonstruktion selbst dienen. Eine Darstellung der Brückenquerschnitte ist in Abb. 2 gegeben. Im Querschnitt und in Draufsicht ist eine angenommene Kollisionssituation dargestellt.

Diese Kanalbrücken sind Stahlkonstruktionen, die an den Seiten eine Steigung von 1:3 aufweisen. Die Wassertiefe in den Kanalbrücken beträgt 4.30m. Sie dürfen von Schiffen mit einem max. Tiefgang von 2.80m befahren werden. Die Längen der Kanalbrücken variierten stark, nämlich von 3.58m (KÜ-Klauke) bis 69.60m (KÜ-Lippe).

Da die Brückenkonstruktion zu jener Zeit noch nicht vorlag und die Kollisionskräfte aber wiederum von der Steifigkeit der Konstruktion abhingen, sah der Auftrag vor, von einer starren Brückenkonstruktion auszugehen.

Zur Berechnung der Kollisionen wurden vier verschiedene Schiffstypen herangezogen. Abb. 3 und 4 zeigen die idealisierten FE-Modelle. Da es im Prinzip nur auf ihr Schwingungsverhalten ankam, konnten sie einfach gehalten werden.

Dies waren:

Typschiff 1:	Großmotorschiff mit Pontonbug Länge 105m Breite 11.40m Tiefgang 2.80m Anfahrwinkel 5.0, 7.5, 10.0 Grad
Typschiff 2:	Großmotorschiff mit Spitzbug Sonst wie 1)
Typschiff 3:	Tankschiff, sonst wie 1)
Typschiff 4:	Schubverband aus GMS (wie 1) und einem Leichter Europa E II a, Gesamt-Länge 185.00m Breite 11.40m Tiefgang 2.80m Anfahrwinkel 2.5, 5.0, 7.5 Grad

Typschiff 2 (GMS mit Spitzbug) wurde gerechnet, weil die Bugform und die Konstruktion des Laderaumfrontschotts Einfluß auf die Stoßkraft haben. Die Schiffe vom Typ 1, 2 und 4 zeichnen sich wegen ihrer langen Ladeluken durch eine geringe Torsionssteifigkeit aus. Deshalb wurde zusätzlich eine Variation mit hoher Torsionssteifigkeit analog der eines Tankschiffes berücksichtigt.

Mit einem FE-Programm wurden dann Eigenschwingungsuntersuchungen dieser Modelle durchgeführt. Dazu wurden für jedes Modell 45 Eigenformen und deren Frequenzen berechnet. Richtungsabhängige hydrodynamische Zusatzmassen wurden auch im Hinblick auf die geringe Wassertiefe abgeschätzt und als Knotenmassen auf das Modell aufgebracht. Da die Modelle in Horizontalrichtung nicht gelagert waren, ergaben sich drei Starrkörperbewegungen, nämlich Längs- und Seitversetzen bzw. Gieren als unterste Eigenformen, mit unendlich großer Eigenperiode. Eine Besonderheit ist noch, daß hydrodynamische Federn idealisiert wurden, die die Auftriebszunahme bei Tiefertauchung simulierten, dadurch werden auch die hydrodynamischen Eigenformen Tauchen, Stampfen und Rollen berechnet. Einige Eigenformen sind beispielhaft in Abb. 5 und 6 gegeben.

Die Eigenschwingungsanalyse dient als Vorstufe zu Berechnung erzwungener Schwingungen. Sie können durch Überlagerung von Eigenschwingungen dargestellt werden. Dabei wird angesetzt, daß die erregende Kraft auf jede Eigenform gesondert wirkt und Verformungen erzeugt, die die Summe der Verformungen der einzelnen Eigenformen darstellen. Dieses Vorgehen ist auch für impulsförmige Kräfte anwendbar. Es wird beispielsweise in der BV 043/19 (Bauvorschrift für Schiffe der Bundeswehr) zum Nachweis der Schocksicherheit für militärische Schiffe verwendet. Allerdings muß der Impuls

zeitlich so lange wirken, daß er durch die Frequenzen der berechneten Eigenformen angemessen darstellbar ist.

Da sich die Kräfte erst aus dem Bewegungsablauf ergeben, mußte diese Methode für das vorliegende Problem modifiziert werden. Dies führt auf eine Differentialgleichung (Anfangswertaufgabe), deren Lösung der Bewegungsablauf und die übertragenden Kräfte sind. Im einzelnen berücksichtigt das Programm:

1. die Kontaktsituation, d.h. zwischen Schiff und Kanalbrücke wirken nur Druckkräfte
2. die elastischen Steifigkeiten in der Nähe des Kontaktpunktes
3. die plastischen Eigenschaften in der Nähe des Kontaktpunktes
4. die Starrkörperbewegungen des Schiffes (Längs- und Seitversetzen bzw. Gieren)
5. die hydrodynamischen Schiffsbewegungen (Tauchen, Stampfen und Rollen)
6. die elastischen Verformungen der Schiffsstruktur (Biegung, Torsion und höhere Formen, dargestellt durch die Eigenformen)
7. Reibung des Schiffes an der geneigten Kanalwand (Reibkraft = Reibkoeffizient\*Stoßkraft, die der Bewegungsrichtung des Kontaktpunktes entgegengesetzt ist)
8. Dämpfung der Eigenschwingungen (pauschal 5 Prozent der kritischen Dämpfung bei allen Eigenformen)

Die Lösung dieser Differentialgleichung erfolgte im Zeitbereich mit einer Schrittweite von 0.02 s Länge, um auch die höchsten berechneten Eigenfrequenzen (ca. 12 Hz) berücksichtigen zu können. Bei den Einzelschiffen wurden jeweils 500, bei dem Schiffsverband 600 Zeitschritte berechnet.

Die unter Punkt 2) aufgeführten elastischen Steifigkeiten in der Umgebung der Kontaktstelle wurden gesondert, d.h. ausserhalb der Eigenschwingungsanalyse betrachtet. In der Nähe des Kontaktpunktes befindet sich das Laderaumfrontschott, über das die Kontaktkräfte auf das Schiff übertragen werden. Da es sehr steif ist, liegen seine Eigenfrequenzen weit über dem durch die Eigenwertanalyse berücksichtigen Bereich. Um die Steifigkeit des Laderaumfrontschotts zu ermitteln, wurde eine Detailrechnung erstellt, in der neben den Platten des Schottes auch die mittragende Breite der Aussenhaut, der Wände und des Decks angesetzt wurden. Die Steifigkeit ergab sich zu

500000 kN/m für die Schiffstypen 1 und 2  
625000 kN/m für die Schiffstypen 3 und 4.

Für das plastische Tragverhalten wurden die in Abb. 7 angegebenen Werte verwendet. Die unterschiedlichen Formen der Traglastkurven ergeben sich aus den Spantformen am Kontaktpunkt.

Als Ergebnis erhält man eine Funktion der Kontaktkraft über der Zeit. Unter den gerechneten Fällen ergibt sich eine maximale Stoßkraft von 720 kN für die Kollision des Tankschiffes gegen die Kanalbrücke bei einer Geschwindigkeit von 8 km/h und einem Kurswinkel von 10 Grad. Diese Situation ist in Abb. 8 dargestellt. Deutlich zu sehen sind hier verschiedene Kraftspitzen, die von den unterschiedlichen Eigenformen bzw. -frequenzen verursacht werden. An den Punkten maximaler Kraft treten im Schiffsboden plastische Verformungen auf.

Als größte Vereinfachung dieser Rechnung muß angesehen werden, dass die Elastizität der Kanalbrücke nicht berücksichtigt wurde. Es ist ein Irrtum anzunehmen, daß die Betrachtung der Kanalbrückenböschung als starre Wand zu einem konservativen Ergebnis führt. Um das auffahrende Schiff so abzulenken, dass es wieder in den Kanal zurückkommt ist im Wesentlichen ein durch die äußere Mechanik bestimmter Impuls nötig. Man erhält ihn, wenn man das Integral der Kontaktkraft über die Zeit bildet. Er bewirkt, dass die Schiffsmasse (incl. der Hydromassen) eine Geschwindigkeitsänderung erfährt, wobei es sich unter den betrachteten Bedingungen vornehmlich um eine Änderung der Geschwindigkeitsrichtung handelt. Je inhomogener nun die Steifigkeitsverteilung der Wand ist, desto inhomogener wird auch der Kraftverlauf sein. Da aber der Impuls irgendwie aufgebracht werden muß, treten wahrscheinlich auch höhere Kraftspitzen auf.

Als im Zuge der Überführung des Mittellandkanals über die Leine bei Hannover zwei größere Kanalbrücken vorgesehen wurden, beauftragte das Bundesamt für Wasserbau den Germanischen Lloyd nun exemplarisch Kollisionssituationen zu berechnen, bei denen auch das reale elastische und plastische Verformungsverhalten der Brücke eingeht. Diese Brücken waren als Dreifeldträger mit unterschiedlichen Stützweiten ausgebildet. Die Feldlängen betragen zwischen 15.6m und 30.0m. Auch hier war das Fahrprofil trapezförmig mit einer Steigung der Trogschrägen im Verhältnis 1:3. Die Trogtiefe war mit 5.0m und der Wasserstand mit 4.0m etwas größer ausgelegt als die entsprechenden Werte des Dortmund-Ems-Kanals waren. Grundlage für die Berechnung sollte die größere der beiden Brücken sein, wobei jedoch ihr etwas gekrümmter Verlauf nicht in die Rechnung mit einbezogen werden sollte.

Die Stoßkraft ist im wesentlichen von der Masse bzw. Tiefgang des Schiffes, der Schiffsgeschwindigkeit, dem Kurswinkels und dem Auftreffpunkt auf die Brückenstruktur abhängig. Hierzu machte Die Bundesanstalt für Wasserbau folgende Vorgaben:

Beladenes Schiff	Tiefgang 2,8m, Geschwindigkeit 10.0 km/h
Leeres Schiff	Tiefgang 0.6m, Geschwindigkeit 12.0 km/h
Kurswinkelbereich:	5 Grad bis 10 Grad

Als Schiff wurde ein Großmotorschiff mit Spitzbug in der torsionssteifen Tankerversion zugrundegelegt, weil dieses bei der Untersuchung für den Dortmund-Ems-Kanal die größten Stoßkräfte erzielte.

Das Steifigkeitsverhalten der tragenden Brückenkonstruktion wurde ermittelt, indem ein FE-Modell der Brücke mit Einheitslasten an diesen Punkten belastet wurde und mit der sich ergebenden Verformung ins Verhältnis gesetzt wurde. Die Berechnung der Steifigkeit der Plattenfelder ist relativ aufwendiges, weil bereits nach kleinen Verformungen (ca. halbe Plattendicke) Membrankräfte und pastische Effekte wirksam werden. Auch spielt der Ort der Lasteinleitung im Plattenfeld eine Rolle. Dabei wurde ein Belastungskörper mit der Krümmung der Kimm angesetzt und die Kraft-Verformungskennlinie mit dem geometrisch und materiell nichtlinearen FE-Programm ANSYS berechnet. Dabei reduzieren sich die Nichtlinearitäten der Membranwirkung und des Plastizierens gegenseitig, so dass sich als Ergebnis eine nur noch schwach nichtlineare Kraft-Verformungs-Kennlinie ergibt. (siehe Abb. 9). Die durchgezogene Kurve beschreibt das Verformungsverhalten bei der ersten Belastung. Zurückgehende Lasten und erneute Belastungen folgen den unterbrochenen Linien.

Das Gesamt-Verformungsverhalten der Kanalbrücke setzt sich nun aus den elastischen Steifigkeiten der Unterkonstruktion und dem elastisch-plastischen Verformungsverhalten der Deckbleche zusammen. Diese variierten in ihrer Länge Zwischen 10.00m und 11.75m bei einer Plattenbreite von 1.55m.

Die eigentlichen Kollisionsrechnungen wurden wie beim Dortmund-Ems-Kanal durchgeführt, mit dem Unterschied, daß nun auch das Verformungsverhalten der Kanalbrücke mitberechnet wurde. Die Kraftübertragung erfolgt wiederum nur am Kontaktpunkt, der sich aufgrund der Vorwärtsgeschwindigkeit des Schiffes ständig weiterbewegt und sich je nach örtlicher Steifigkeit mehr oder weniger stark in die Brückenschräge eindrückt.

Die Abb. 10 und 11 zeigen Ergebnisse derjenigen Rechenläufe, bei denen die größten Stoßkräfte auftraten. Sie betragen

für Tiefgang 2.8m	1310 kN
für Tiefgang 0.6m	944 kN

Die Maxima im Stoßkraftverlauf lassen sich deutlich erkennbar unterteilen, und zwar in eher runde Maxima, die von der schwingenden Schiffstruktur herrühren, und in sehr spitze Extrema auf die eine steile abfallende Flanke folgt. Letztere werden von den steifen Unterzügen der Brücke verursacht. An diesen Stellen ist die Verformung der Brücke natürlich gering, während hier das Schiff deutliche plastische Deformationen erlangt. In den weichen Plattenfeldern der Brücke entstehen plastische Verformungen bis ca. 45 mm. Kollisionen mit einem leeren Schiff sind deutlich kürzer und der Kontakt wird in mehrere Einzelkontakte aufgeteilt, die sich aus den Schiffsschwingungen und den harten Brückenpunkten ergeben. Trotz der höheren Geschwindigkeit von 12 kn gegenüber 10 kn für das beladene Schiff, sind die Spitzenwerte der Stoßkraft geringer.

### **Havariebedingte Lasten bei anderen Bauwerken**

Wie eingangs ausgeführt möchte man zunehmend auch das Verhalten einiger Strukturen jenseits des normalen linearen elastischen Bereichs berechnen. In diesem Zusammenhang führte der Germanische Lloyd z.B. Untersuchungen an den Trogtoren der Schiffshebewerke Niederfinow, Rothensee und Scharnebek und für Schleusentore durch. In diesem Zusammenhang sei noch die Herrenbrücke in Lübeck erwähnt, eine bekannte Klappbrücke, deren Pfeiler im Wasser der Trave stehen. Der Klappmechanismus der Brücke wurde als sehr empfindlich eingestuft, so daß eine Kollision eines Schiffes mit einem der Brückenpfeiler verhindert werden muß. Auf diesem Abschnitt wird die Trave auch durch Seeschiffe, insbesondere regelmäßig durch seegängige Fährschiffe befahren. Das ursprüngliche Leitwerk bildete keinen nennenswerten Schutz gegen derartige Schiffe, da die überkragenden Büge zuerst den Brückenpfeiler berühren und erst dann Kontakt mit dem Leitwerk bekommen. Hier hat der Germanische Lloyd im Auftrag der Wasser und Schifffahrtsdirektion Lübeck Vorschläge für den Umbau des Leitwerks erarbeitet, die unter Berücksichtigung nichtlinearer Fender, dem elasto-plastischen Verformungsverhalten der Pfähle und Querbalken des Leitwerks berechnet wurden.

Es ist abzusehen, daß Untersuchungen von Kollisionssituationen mit den sich ständig verbessernden nichtlinearen Berechnungsmöglichkeiten zunehmen und auch bei speziellen Fragen der Binnenwasserfahrt eingesetzt werden.

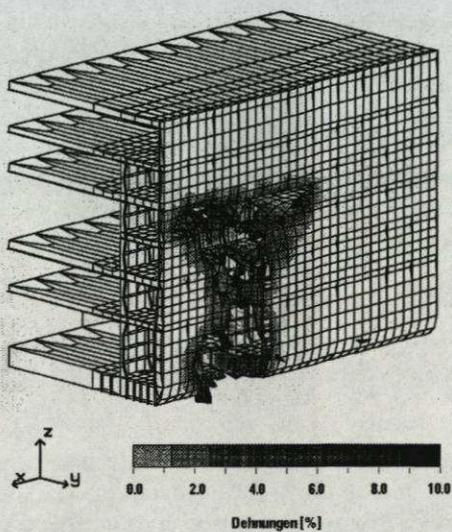


Bild 1: Kollisionsrechnung mit  
FEM-Crash-Programm DYNA3D  
Verformungen und plastische Dehnungen  
bei 6 m Eindringtiefe, Bugform entfernt

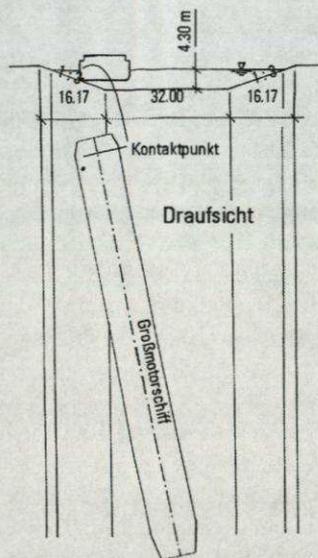


Bild 2: Brückenbereich, Querschnitt

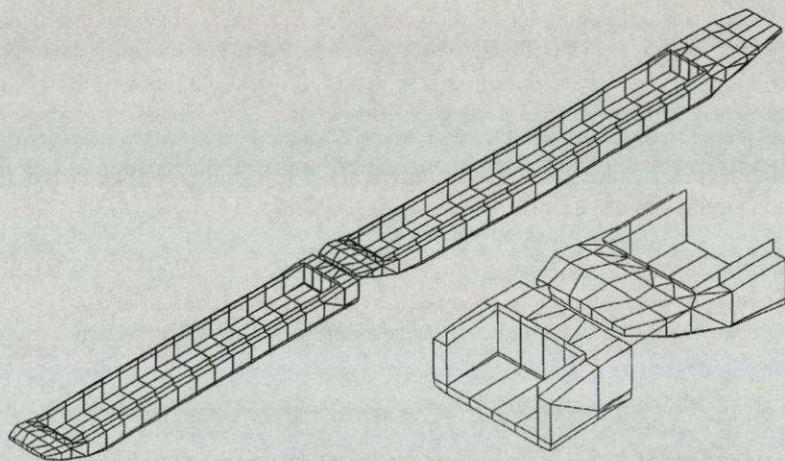


Bild 3: FE-Modell vom Verband Großmotorschiff und Schubleichter

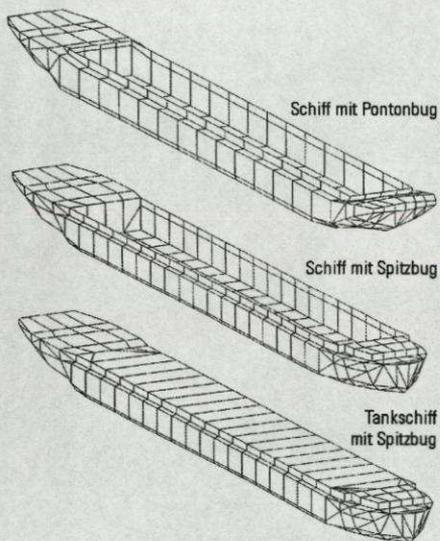


Bild 4: FE-Modelle von 3 Großmotorschiffen

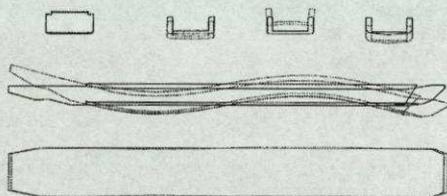


Bild 5: Beispiel für Eigenform GMS-Pontonbug  
hier 9. Eigenform, 1,5 Hz,  
Vertikale 3-Knoten-Biegeschwingung

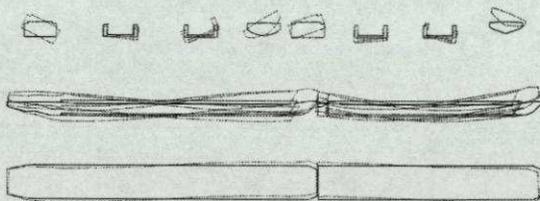


Bild 6: Beispiel für Eigenform des Schubverbandes  
hier 12. Eigenform, 0,92 Hz, Torsionsschwingung

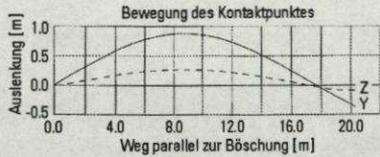
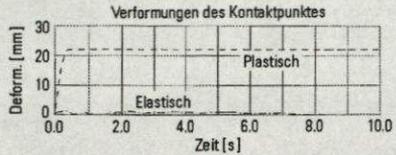
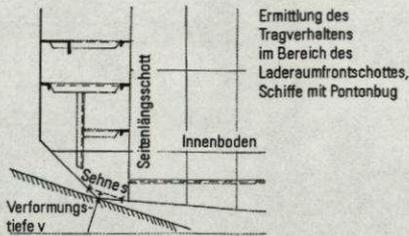
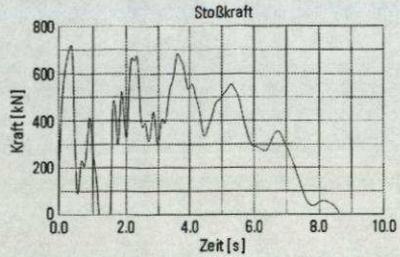
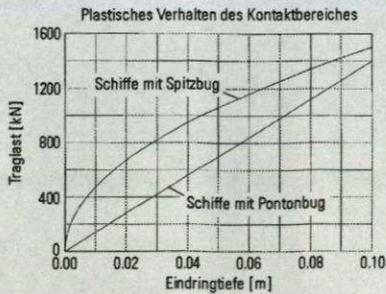


Bild 7: Plastisches Verhalten der Schiffe im Kontaktbereich

Bild 8: Ergebnisse für Tankschiff  
V= 8 Km/h, Kurs= 10 Grad  
Brückenböschung starr

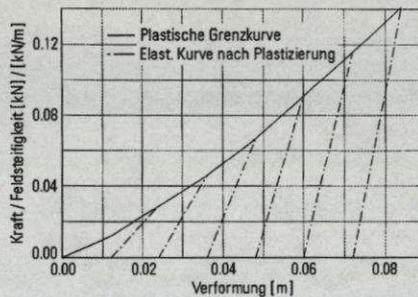


Bild 9: Kraft-Verformungs-Diagramm der Plattenfelder

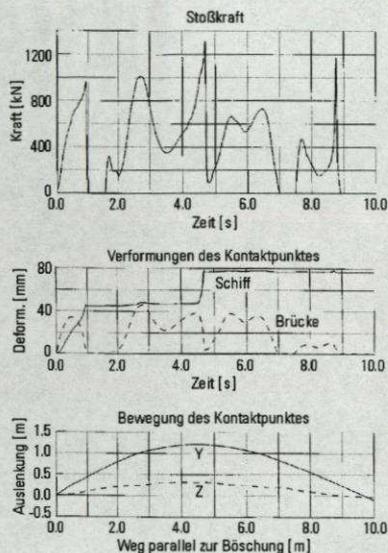


Bild 10: Ergebnisse für Tankschiff (beladen)  
Kollisionsfall 1.1:  
T= 2,8m, V= 10km/h, Kurs= 10 Grad  
Auftreffpunkt : x= 21m, y= 3,8m

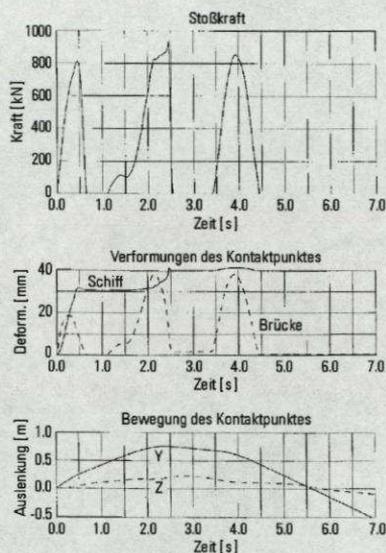


Bild 11: Ergebnisse für Tankschiff (leer)  
Kollisionsfall 2:  
T= 0,6m, V= 12km/h, Kurs= 10 Grad  
Auftreffpunkt : x= 16m, y= 10,2m

M. Scharrer  
Germanischer Lloyd  
Vorsetzen 32  
20459 Hamburg  
E-mail:  
srr @ germanlloyd.org

Dr. E. D. Egge  
Germanischer Lloyd  
Vorsetzen 32  
20459 Hamburg  
E-mail:  
eg @ germanlloyd.org

Dipl.-Ing. K.-H. Niemeyer  
Germanischer Lloyd  
Heerstr. 32  
14052 Berlin  
E-mail:  
niem @ germanlloyd.org