

# Das Kollapsverhalten von Binnengüterschiffen unter Berücksichtigung struktureller Imperfektionen

Im allgemeinen werden Strukturen für eine Betriebslast ausgelegt, bei der ein totales Versagen ausgeschlossen werden kann. Unwägbarkeiten werden durch entsprechende Sicherheitsbeiwerte berücksichtigt, die in Dimensionierungsvorschriften festgelegt sind. So lange diese Lasten nicht überschritten werden, kann die Konstruktion als sicher angesehen werden.

In Ausnahmesituationen (Unfälle, unsachgemäße Handhabung) kann es vorkommen, daß äußeren Lasten die ursprünglich vorgesehenen Bemessungslast überschreiten. Schäden an der Konstruktion sind dann nicht mehr zu vermeiden. Für Fahrzeuge (Flugzeuge, Schiffe, Kraftfahrzeuge) ist in einem solchen Fall die oberste Priorität der Schutz von Menschenleben. In der Schifffahrt kommt noch die Sicherung von Fracht und Umwelt hinzu. Ziel muß es somit sein, schon bei der Konstruktion von Schiffen ein möglichst gutartiges Verhalten oberhalb der Kollapslast zu erreichen.

Moderne Binnengüterschiffe sind offene Doppelhüllenschiffe mit ungewöhnlich großen Länge-Höhe- und Breite-Höhe-Verhältnissen, geringem Tiefgang und extrem langem Laderaum. Diese Schiffe sind daher relativ biege- und torsionsweich. Durch leichte Kollisionen, Grundberührungen in flachen Gewässern, Abrostung, Abrieb und Ermüdung stellen sich im Laufe der Zeit erhebliche Veränderungen der Schiffsstruktur ein. Solche Imperfektionen haben eine Reduzierung der Festigkeit und der Strukturstabilität zur Folge. Die Kollapsicherheit der Schiffe nimmt deutlich ab.

In der vorliegenden Arbeit erfolgt die Untersuchung der Kollapslast und des Einflusses verschiedener Imperfektionen mit Hilfe der Finiten-Element-Methode (FEM). Betrachtet werden schiffbautypische Teilkonstruktionen sowie gebräuchliche Binnenschiffe.

## 1 Einleitung

In der Fachpresse sowie in Fernsehen und Tageszeitungen sind zunehmend Berichte über Unfälle und Havarien mit Binnenschiffen zu finden. Nicht immer sind menschliches Versagen, schlechtes Wetter o.ä. als Ursachen zu nennen. Immer häufiger sind diese auf das globale Strukturversagen der Schiffe zurückzuführen. Ein für die Medien sehr spektakulärer Fall war z. B. das Auseinanderbrechen der "Carabella" im Mai 1996 auf dem Rhein bei Wesel.

Allerdings ist bei Binnenschiffen zu beachten, daß das globale Strukturversagen häufig erst nach ca. 15 bis 20 Betriebsjahren auftritt. Diese Schiffe sind somit nicht grundsätzlich unterdimensioniert worden, sondern die Struktureigenschaften haben sich im Laufe der Zeit negativ verändert. Für diese Aussage spricht auch der große Reparaturbedarf dieser Schiffe mit zunehmenden Alter. Bei dem Versagen einer solchen Struktur kann davon ausgegangen werden, daß nicht eine einzelne Ursache zu nennen ist, sondern daß mehrere unvorteilhafte Faktoren eine Rolle spielen. Diese können z. B. eine ungünstige Ladungsverteilung, die Minderung der Plattenstärken und die recht hohen betriebsbedingten Schädigungen sein.

Um aber die Auswirkungen der genannten Punkte (Imperfektionen, Ladevorgänge) ausreichend genau erfassen zu können, sind die herkömmlichen Berechnungsmethoden (Balkentheorie, GL-Berechnungsvorschriften) nicht ausreichend, so daß die Anwendung der Finiten-Element-Methode (FEM) erforderlich wird.

Die Verwendung der FEM bei schwimmenden Strukturen erfordert spezielle Überlegungen bei der Beschreibung der Randbedingungen. Um dennoch eine wirtschaftliche Durchführung der FEM Analysen zu ermöglichen, wird in Kapitel 3 ein **Berechnungskonzept** vorgestellt. In diesem Konzept werden lineare und nichtlineare Untersuchungen am globalen FEM-Modell sinnvoll miteinander verknüpft. Da eine FEM Analyse immer mit recht hohen Kosten verbunden ist, ist weiter zu überprüfen, ob durch die Anwendung besonderer Techniken der zu betreibende Ingenieuraufwand gesenkt werden kann. Die einzelnen Punkte des gesamten Konzeptes sind auf die Gegebenheiten der Binnenschifffahrt zugeschnitten.

Insbesondere bei der Betrachtung des Strukturverhaltens oberhalb der Bemessungslast sind einige allgemeine Besonderheiten bei Problemen der Strukturstabilität zu beachten. Diese erhöhen den zu betreibenden Aufwand erheblich (Kapitel 4).

Anhand systematischer Untersuchungen wird an einer relativ einfachen Struktur (**versteifte Platte**) zunächst der Einfluß von Imperfektionen untersucht (Kapitel 5). Die Bedeutung der Randbedingungen wird in Kapitel 6 am Beispiel eines **Kastenträgers** erläutert. Darauf aufbauend werden die gewonnen Erkenntnisse auf typischen Binnenschiffe angewendet. Die hierfür zu verwendenden FE-Modelle eines **Schubleichters** (Kapitel 7) und eines modernen **Containerbinnenschiffes** (Kapitel 8) werden vorgestellt und die Berechnungsergebnisse erörtert. So werden u.a. die Verformungen und Spannungen dargelegt, die in den Modellen während der verschiedenen Belastvorgänge berechnet wurden. Ebenfalls wird auf das nichtlineare Verhalten der Strukturen bei extremen Belastungen eingegangen, um so das Kollapsverhalten der Schiffe zu simulieren. Abschließend werden die Auswirkungen von **konstruktiven Veränderungen** (Kapitel 9) betrachtet. Nach einer kurzen Zusammenfassung der Ergebnisse werden in Kapitel 10 einige **Vorschläge für zukünftige Forschungsarbeiten** auf diesem Gebiet gemacht.

Naturgemäß können in dieser Arbeit nicht alle erzielten Ergebnisse ausführlich dokumentiert werden. Weitere Informationen sind den zugehörigen Studien- und Diplomarbeiten (/B.../ siehe Abschnitt 12.2) und den "institutsinternen Berichten" (/V.../ siehe Abschnitt 12.3) zu entnehmen.

## 1.1 Beispiele aus der Praxis

Zu Beginn dieser Arbeit wurde in Zusammenarbeit mit Sachverständigen, Schiffsbetreibern, Reedern und Werften ein Schadensbild von Binnenschiffen erstellt und in zahlreichen Fotos dokumentiert. Im folgenden werden einige dieser Fotos wiedergegeben. Weitere sind unter der Internetseite des Autors<sup>1</sup> abrufbar.

Die zum Teil sehr starken Schädigungen an einzelnen Bauteilen des Schiffes können u.U. ein Auseinanderbrechen des gesamten Schiffskörpers und somit einen Totalverlust zur Folge haben. Dieses wird im Abschnitt 1.1.1 behandelt. Die dort wiedergegebenen Fotos verschiedener Schadensfälle verdeutlichen, daß u.U. eine erhebliche Gefährdung für das Schiff und das Personal besteht.

Die lokalen Schäden an der Schiffsstruktur äußern sich in starken Falten im Innenboden und der Trogwand sowie Rissen im Dennebaum.

Dies werden durch den täglichen rauen Umgang aber auch durch unsachgemäße Handhabung verursacht. Eine detaillierte Beschreibung dieser lokalen Schäden ist in den folgenden Abschnitten und /V16/ enthalten.



**Abb. 1-1: Totalverlust eines Schubleichters**

**Fig. 1-1: Total loss of a pusher barge**

<sup>1</sup> <http://www.uni-duisburg.de/FB7/ISD/mitarbeiter/meinken>

### 1.1.1 Totalverluste

Die lokalen Schäden an den Schiffen führen nicht selten zu einem Totalverlust des gesamten Fahrzeuges (Abb. 1-1). Der genaue Ablauf eines solchen globalen Strukturschadens ist nur schwer zu rekonstruieren. Es ist aber anzumerken, daß auch bei älteren Schiffen mehrere negative Einflüsse zusammentreffen müssen, um einen solchen Kollaps hervorzurufen. Zunächst werden die vorgeschädigten Strukturen (Beulen im Blech, Abrostung) z. B. durch eine ungünstige Ladungsverteilung übermäßig beansprucht. Je nach Ladefall erfolgt eine starke globale Auf- bzw. Durchbiegung des Schiffskörpers. Hierdurch werden einzelne lokale Schäden (Reißen von Verbänden, Ausbeulen von Plattenfeldern) eingeleitet. Am Binnenschiff sind dieses Risse im Dennebaum und eine starke Faltenbildung in der Außenhaut, dem Innenboden und der Trogwand. Die Gesamtstruktur ist dann soweit geschwächt, daß sie bei einer (späteren) Überbeanspruchung komplett versagt. Wenn zusätzlich Wasser in den Laderaum eindringt ist ein Sinken der Schiffe kaum noch zu verhindern.

Der Auslöser für den in der Abb. 1-2 dargestellten Schaden war eine ungünstig verteilte Beladung. Bei diesem Leichter wurden im vorderen und hinteren Drittel Wasserbausteine geladen. Die Gesamtladung betrug ca. 1500 t bei einer Tragfähigkeit von 2067 t und einem Eigengewicht von 400 t.

In Abb. 1-2 ist zu erkennen, daß an dem Leichter die inneren Verbände, der Dennebaum und das Gangbord gerissen sind. Trogwand und Doppelboden sind stark eingeeult. Die Außenhaut wurde nach außen gedrückt, die Kimm nach innen gezogen. Dies führte dann zum globalen Kollaps, was schließlich den Totalverlust des Leichters zur Folge hatte. Der Leichter ist regelrecht auseinandergebrochen und gesunken. Er wurde anschließend geborgen und verschrottet.



**Abb. 1-2: Leichter nach der Bergung**

**Fig. 1-2: Barge after the wreck raising operation**



**Abb. 1-3: Carabella bei der Bergung**

**Fig. 1-3: Carabella at the wreck raising operation**



**Abb. 1-4: Schäden an der Carabella**

**Fig. 1-4: Damages of the Carabella**

Die Wechselwirkung zwischen lokalen Schäden und globalem Kollaps wird auch als Interaktion bezeichnet. In den allermeisten Fällen geschieht dieses schon bei Be- und Entladevorgängen im Hafen. In selteneren Fällen kann es aber auch während der Fahrt geschehen.

Wie bereits schon erwähnt, war der Kollaps der "Carabella" auf dem Rhein bei Wesel schon wegen der Berichterstattung in den Medien ein aufsehenerregender Unfall (Abb. 1-3 und Abb. 1-4). Das Motorgüterschiff war

mit Eisenbahnschienen (ca. 3000 t ) beladen, als es während der Fahrt plötzlich auseinanderbrach und innerhalb von Minuten sank. Primäre Unfallursache war sicherlich die ungünstige Ladungsverteilung. Aber auch das fortgeschrittene Alter des Schiffes und die großen Schäden an der Struktur sind als Gründe zu nennen. Endgültiger Auslöser waren dann vermutlich ungünstig anlaufende Wellen des Gegenverkehrs.

## 1.1.2 Schäden im Innenboden

Typische Schäden an Binnenschiffen sind u.a. Schäden im Innenboden. Bei Schiffen mit Querspantenbauweise im Doppelboden zeichnen sich nach einer gewissen Betriebszeit Wellen zwischen den Bodenwrangen ab. Durch extreme örtliche Belastung können diese ein mehrfaches der Plattendicke erreichen.



**Abb. 1-5: Wellen im Innenboden**  
**Fig. 1-5: Corrugations in the inner bottom**



**Abb. 1-6: Örtliche Verformungen im Innenboden**  
**Fig. 1-6: Local deformations in the inner bottom**

Die beiden obigen Darstellungen zeigen die örtlichen Schäden im Innenboden eines Binnenschiffes nach dem Transport einer Brammenladung (40t/Stk.). Um die einzelne Bramme mit dem Kran wieder herausheben zu können, wurden diese mit Kanthölzern unterfüttert. Dabei wurde versäumt die Belastung auf mehrere Bodenwrangen zu verteilen. Statt dessen wurde die Futterungen in die bereits vorhanden leichten Mulden gelegt. Da in dem Laderaum mehrere dieser Brammen übereinander lagen, ergab sich für diese Stellen eine extreme örtliche Belastung. Die Fotos zeigen die tiefen Verformungen des Bleches zwischen den Bodenwrangen. Unglücklicherweise befand sich an dieser Stelle auch noch eine Quernaht des Innenbodens, die infolge der hohen Zugbelastung fast auf der gesamten Schiffsbreite gerissen ist.

### 1.1.3 Kollaps eines Leichters

Bei dem hier beschriebenen Beispiel handelt es sich um einen Schaden, der ebenfalls durch unsachgemäße Beladung entstand. In dem Schubleichter wurden im vorderen und hinteren Drittel des Laderaums schwere Stückgüter geladen.



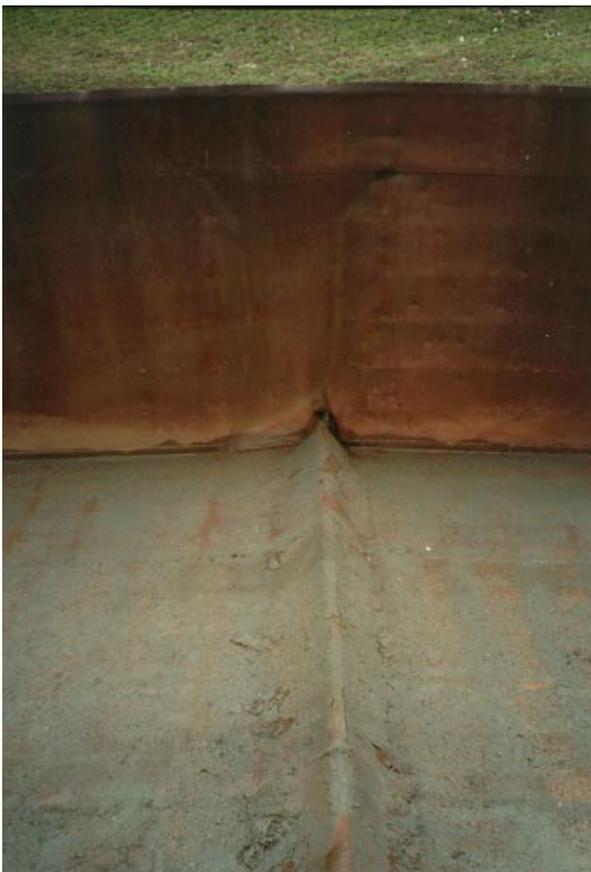
**Abb. 1-7: Aufbiegung eines Schubleichters (1)**

**Fig. 1-7: Hogging of a pusher barge (1)**



**Abb. 1-8: Aufbiegung eines Schubleichters (2)**

**Fig. 1-8: Hogging of a pusher barge (2)**



Bevor mittschiffs eine Ausgleichsladung mit Schüttgut eingebracht werden konnte, versagte die Struktur durch lokale Faltenbildung im Innenboden und in der Außenwand. Neben diesen Falten ist auf den Fotos auch deutlich die globale Aufbiegung des Leichters zu erkennen. Die Wallgänge neigten sich dabei um ca. 1 m nach außen. Um die Schleusenfahrt zur Werft zu ermöglichen, wurde der Leichter mit Hilfe eines anderen Schiffes zuvor gegen die Kaimauer gepreßt, um die Aufweitung des Querschnittes zu reduzieren.

In der Abb. 1-9 ist deutlich die Ausbildung einer spitzwinkligen Falte im Innenboden zu erkennen. Diese mittschiffs sichtbare Falte entstand durch starke lokale plastische Verformungen.

**Abb. 1-9: Spitzwinklige Falte im Innenboden**

**Fig. 1-9: Sharp edge fold in the innerbottom**

### 1.1.4 Risse und Arbeitsfalten in der Außenwand

Ein häufig auftretender Schaden an Binnenschiffen sind sogenannte Arbeitsfalten im Außenboden. Diese treten nach ca. 15-20 Jahren bei Doppelböden in Querspannenbauweise auf. Falten, die sich über die gesamte Schiffsbreite bis in die Kimm erstrecken, werden als "Hungerfalten" oder "hungry horse" bezeichnet.



Bei entsprechender Ermüdung des Materials können Risse im Außenboden entstehen. Dies wird auf den nachfolgenden Fotos durch auslaufendes Wasser erkennbar.

Abb. 1-10: "Hungerfalten" in der Kimmbeplattung und Korrosionsschäden

Fig. 1-10: "Hungry horse" in the bilge plating and corrosion damages



Abb. 1-11: Risse und Arbeitsfalten im Außenboden (1)

Fig. 1-11: Cracks and folds in the outer bottom (1)



Abb. 1-12: Risse und Arbeitsfalten im Außenboden (2)

Fig. 1-12: Cracks and folds in the outer bottom (2)



Abb. 1-13: Risse und Arbeitsfalten im Außenboden (3)

Fig. 1-13: Cracks and folds in the outer bottom (3)

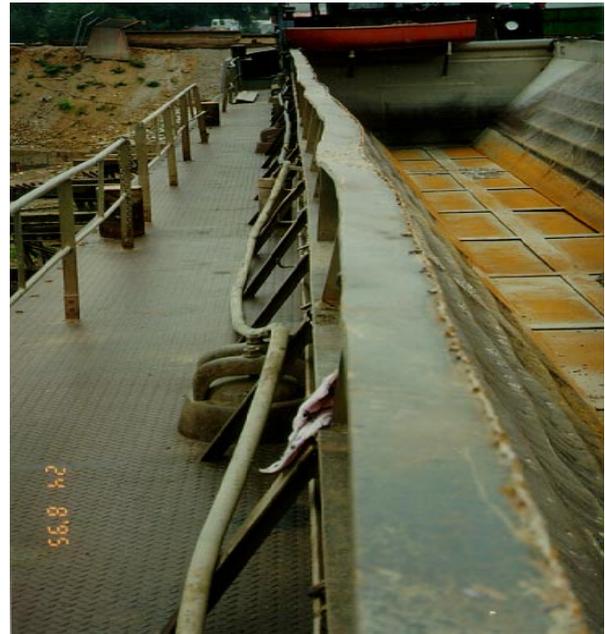
### 1.1.5 Schäden am Dennebaum

Ein weiterer sehr häufiger Fall von Schäden an Binnenschiffen ist eine starke Deformation des Dennebaums. Diese wird i. a. durch Greifer beim Be- und Entladen von Massengütern verursacht. Auf den folgenden Fotografien sind gut die lokalen Verformungen im Dennebaum einer Klappschute zu erkennen. Diese werden i.a. durch Schläge des Greifers verursacht. Da es sich bei dem Dennebaum um einen wichtigen Längsverband handelt, der sehr häufig Druckbeanspruchungen ausgesetzt ist, werden durch solche Schäden teure Reparaturen notwendig.



**Abb. 1-14: Verformungen des Dennebaums (1)**

**Fig. 1-14: Deformations of the hatch coaming (1)**



**Abb. 1-15: Verformungen des Dennebaums (2)**

**Fig. 1-15: Deformations of the hatch coaming (2)**



**Abb. 1-16: Verformungen des Dennebaums (3)**

**Fig. 1-16: Deformations of the hatch coaming (3)**



**Abb. 1-17: Verformungen des Dennebaums (4)**

**Fig. 1-17: Deformations of the hatch coaming (4)**



**Abb. 1-18: Abgerissene Dennebaumstützen**

**Fig. 1-18: Ragged supports of the hatch coaming**

In der Abb. 1-15 werden einige abgerissenen Dennebaumstützen sichtbar. Dies vermittelt einen Eindruck darüber, welche Kräfte an diesen Bauteilen wirken.

## 1.1.6 Schäden durch Korrosion

Die Abrostung des Materials kann sehr drastischen Festigkeitsverlust zu Folge haben. In der Abb. 1-19 werden tiefe Mulden im Steg des Trägers und Einkerbungen am Flansch erkennbar.



Abb. 1-19: Korrosion nach dem Sandstrahlen

Fig. 1-19: Corrosion after sand blast



Abb. 1-20: Einfluß der Korrosion auf Verbände

Fig. 1-20: Influence of the corrosion on the connections

Korrosion im Inneren der Schiffe kann sich sehr stark auf den Zusammenhalt der Verbände auswirken. In dem Foto der Abb. 1-20 ist zu erkennen, daß sich die Flansche zum Teil trennen bzw. vom Steg abreißen.

## 1.2 Beispiele aus der Presse

In letzter Zeit wurde in der Presse über die folgenden Schadensfälle berichtet:

Die gesunkene "Carabella":

- ◆ VDI Nachrichten Nr. 25 vom 21 Juni 1996
- ◆ NRZ vom 01 Juni 1996
- ◆ NRZ vom 18 Juni 1996

Die durchgebrochene "Sankt Gertraud":

- ◆ Wasserspiegel Nr. 6 / 1997
- ◆ Wasserspiegel Nr. 21 / 1997

Die gesunkene "Morion":

- ◆ Wasserspiegel Nr. 11 / 1997