

7 FE-Analyse eines Schubleichters

Schubleichter haben in der Binnenschifffahrt eine große Bedeutung. Bei dem hier betrachteten handelt es sich um einen Schubleichter vom Typ Europa IIa. In den folgenden Abschnitten erfolgt eine zusammengefaßte Beschreibung der Struktur, des FE-Modells und der Berechnungsergebnisse. Eine ausführlichere Darstellung ist /V80/, /V82/, /V83/, /V84/ und /V85/ zu entnehmen.

7.1 Strukturbeschreibung

Die zur Erstellung des FE-Netzes notwendigen Maße und Daten wurden Zeichnungen entnommen, die dem ISD freundlicherweise von der Ruhrorter Schiffswerft zur Verfügung gestellt wurden. In der Abb. 7-1 ist die modellierte Struktur mit den wichtigsten Hauptmaßen wiedergegeben. Bei FE-Modellen muß beachtet werden, daß bei der Nachbildung von Plattenstrukturen die Maße im allgemeinen auf die Plattenmitte bezogen werden. Aus diesem Grund sind die Maße des FE-Modells nicht unbedingt identisch mit den konstruktiven Ausgangsmaßen.

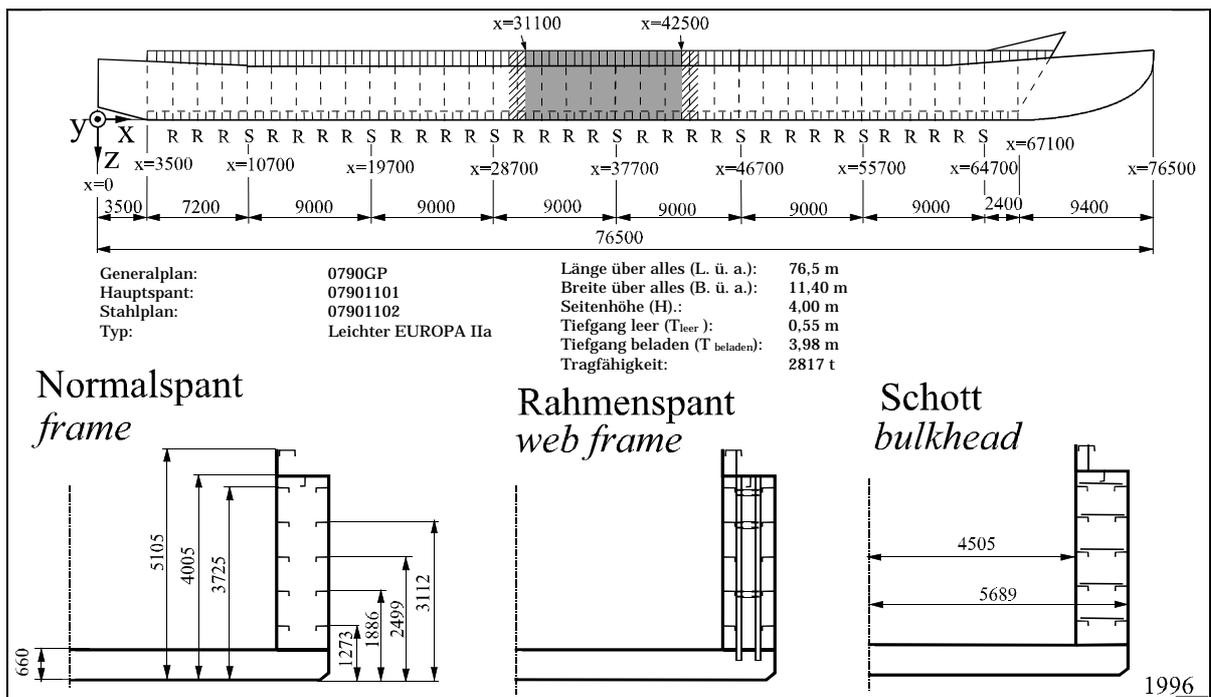


Abb. 7-1: Hauptmaße des Schubleichters

Fig. 7-1: Main dimensions of the pusher barge

Wie für Schubleichter im allgemeinen üblich, wird der Wallgang in Längsspantenbauweise und der Doppelboden in Querspantenbauweise gebaut. Der Abstand zwischen den Bodenwrangen beträgt 0,6 m. Es sind keine Längsträger im Doppelboden. Die Rahmenspanten befinden sich auf jedem dritten Bauspant (1,8 m), auf jedem 15. Bauspant ist ein Schott (9 m) im Wallgang.

Um die zu erstellenden FORTRAN Routinen möglichst universell zu gestalten, werden für die wichtigsten Abmessungen und Geometriedaten einheitliche Bezeichnungen eingeführt. Deren Bedeutung kann der Abb. 7-2 entnommen werden. Die Variablen x_a , x_b , x_c , etc. bestimmen dabei die Lage der Ladung im Schiffskörper.

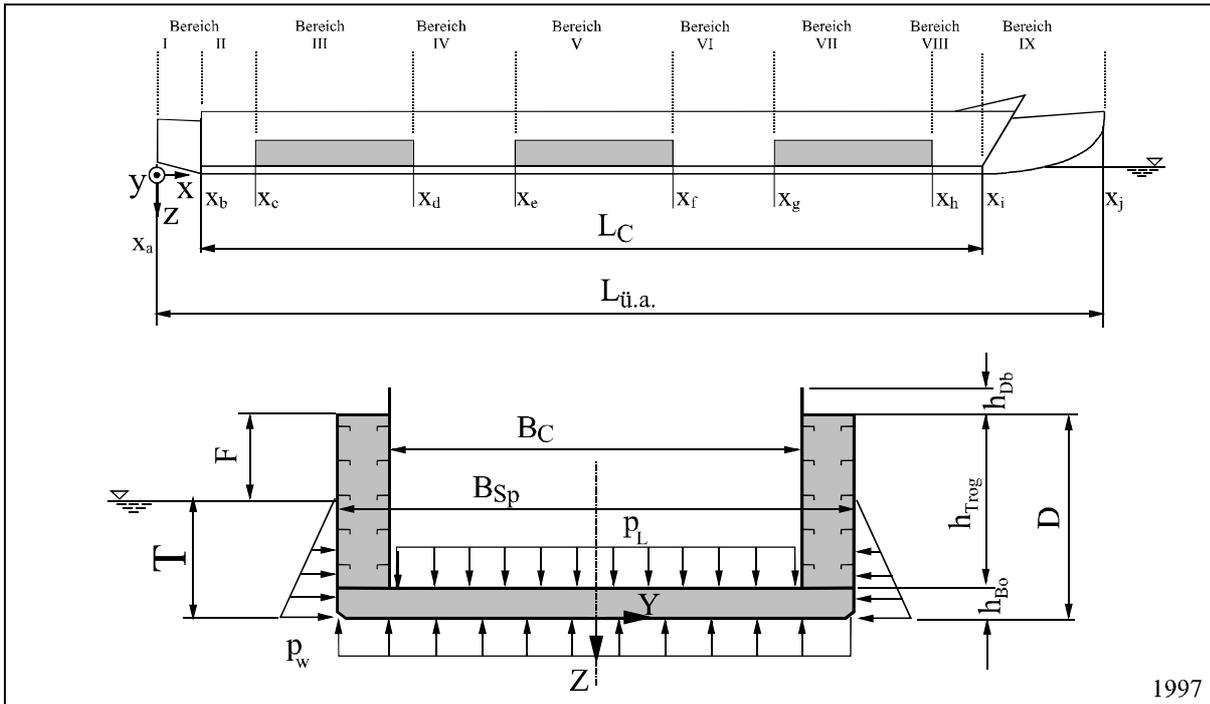


Abb. 7-2: Variablen für Abmessungen und Geometriedaten

Fig. 7-2: Variable of the dimensions and geometrical data

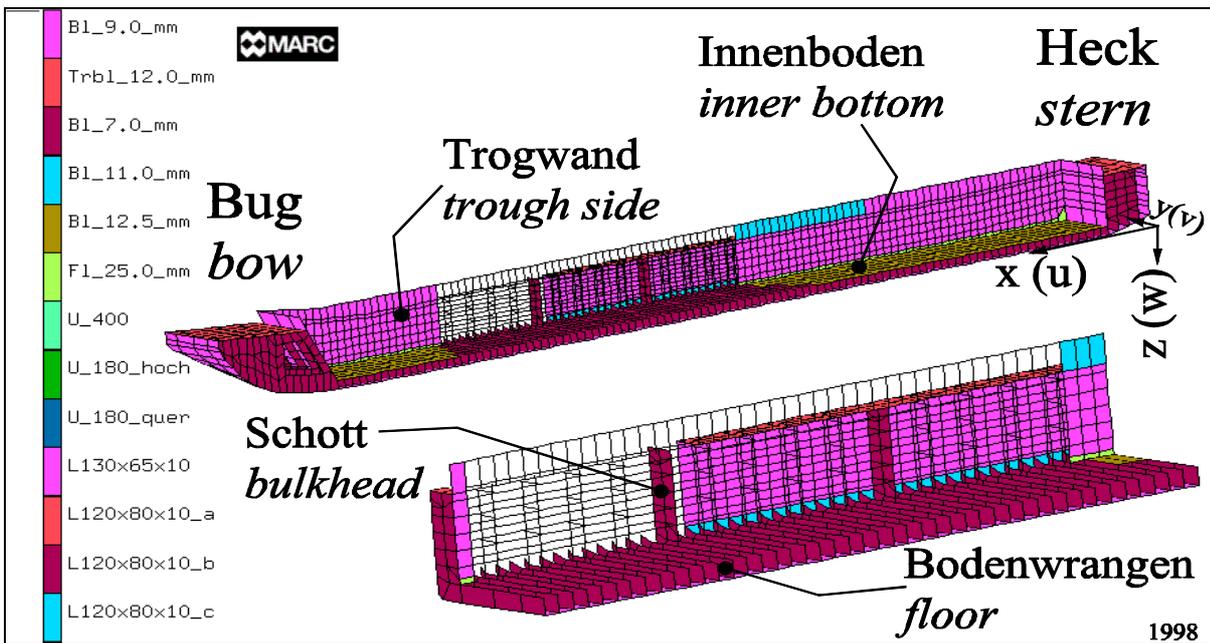


Abb. 7-3: FE-Netz des Schubleichters und Geometriedaten

Fig. 7-3: FE-mesh of the pusher barge and the geometrical data

7.2 Berechnungsergebnisse für den Ladefall 2

Bevor aufwendige nichtlineare Untersuchungen am Feinmodell des Schubleichters durchgeführt werden, sind einige Voruntersuchungen sinnvoll. Diese bauen sich wie folgt auf:

- ◆ Eigenwertuntersuchungen zur Überprüfung der Vernetzung.
- ◆ Berechnungen als starrer Körper zur Verifizierung der Randbedingungen (Vergleich der Tiefgänge mit den Angaben der Werft).
- ◆ Lineare und nichtlineare Berechnungen an einem Grobmodell zur Abschätzung möglicher numerischer Probleme.

7.2.1 Ergebnisse der Voruntersuchungen

Die Berechnungen der dritten Gruppe erfolgen zunächst linear und anschließend nichtlinear, wobei die Nichtlinearitäten langsam gesteigert werden. Die Vernetzung dieses Modells ist in den Voruntersuchungen relativ grob. Dies bedeutet, daß die Elemente gerade so groß gewählt sind, um die korrekte Lage der Bauteilanschlüsse (z.B. der Steifen) zu ermöglichen. Die Daten des verwendeten Grobmodells sind:

- ◆ 24870 Freiheitsgrade
- ◆ 4145 Knoten
- ◆ 6757 Elemente

Bevor ausführlich auf die Ergebnisse der nichtlinearen Untersuchung am Feinmodell eingegangen wird, werden die Resultate der Eigenwertuntersuchung und der linearen Berechnungen ausgewertet und im folgenden kurz wiedergegeben.

7.2.1.1 Eigenwertuntersuchung

Wie schon in Abschnitt 3.6.1 erläutert, werden Eigenwertuntersuchung genutzt um die Qualität der Vernetzung zu überprüfen. Am Beispiel des Schubleichters traten Fehler sehr häufig bei den Versteifungen im Wallgang und im Übergangsbereich am Bug und Heck auf. Dies ist auf den zu geringen Standardwert der SWEEP Toleranz zurückzuführen wodurch numerische Ungenauigkeiten beim Kopieren von Laderaumsegmenten zu Fehlern führten. Ein anderer Grund sind die relativ starken Unregelmäßigkeiten in der Geometrie der Übergangsbereiche. Dies führte zu einem hohen manuellen Nachbearbeitungsaufwand mit den entsprechenden Vernetzungsfehlern durch den USER.

7.2.1.2 Betrachtung als starrer Körper

Um bei der Beurteilung der Ergebnisse den Starrkörperanteil korrekt einschätzen zu können, sind Berechnungen durchzuführen, in denen das FE-Modell als starrer Körper angesehen wird. Dieses läßt sich verwirklichen, in dem der E-Modul aller Elemente auf einen unnatürlich hohen Wert gesetzt wird.

Das Diagramm der Abb. 7-4 zeigt die Ergebnisse des Schubleichters als starrer Körper im Ladefall 2 (Id2). Mit zunehmender Belastung auf dem Innenboden taucht der Leichter immer weiter ein und vertrimmt nur minimal. Aufgrund des eingesetzten hohen E-Moduls sind die Verformungsanteile vernachlässigbar. Für die maximale Beladung von 2817 t wird der von der Werft angegebene Tiefgang von 4 m nahezu ideal erreicht. Es kann somit davon ausgegangen werden, daß im FE-Modell keine Fehler bezüglich der Massenverteilung vorhanden sind. Außerdem können die Randbedingungen der Symmetrieebene und zur Unterdrückung der Starrkörperbewegung als korrekt angesehen werden.

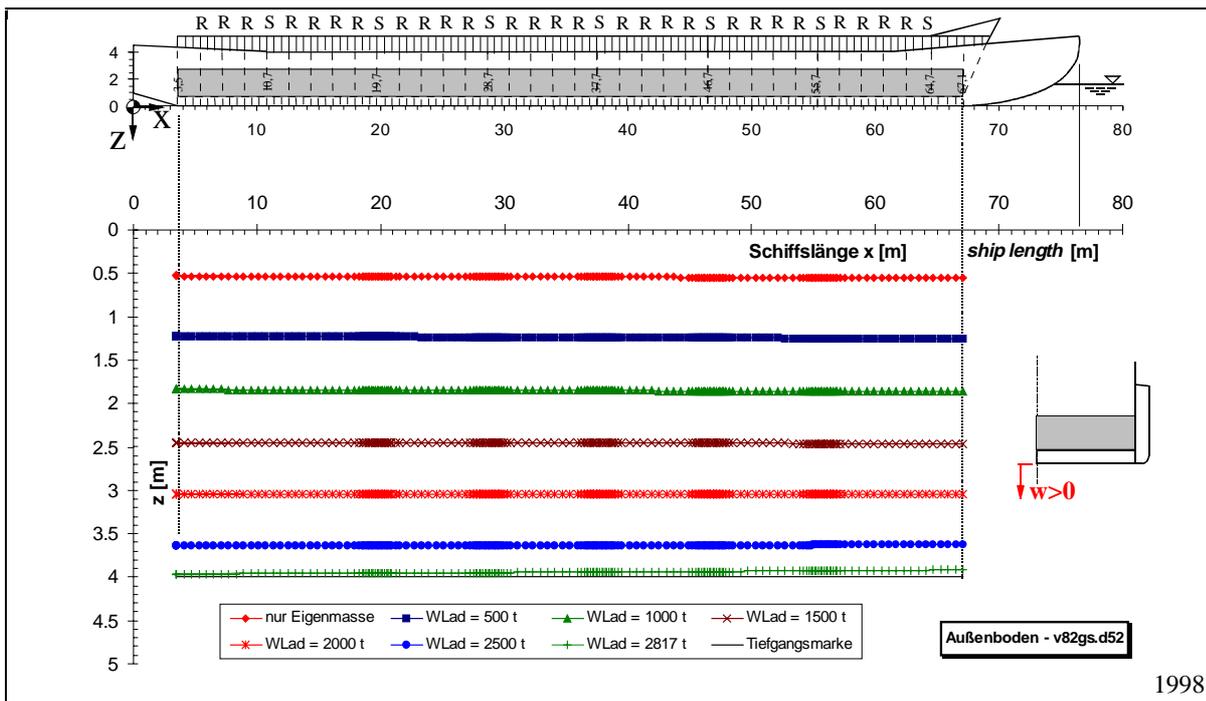


Abb. 7-4: Tiefgang, Trimm für den Ladefall 2 als starrer Körper

Fig. 7-4: Immersion, trim for the loadcase 2 as a rigid body

7.2.1.3 Nichtlineare Berechnungen am Grobmodell

Zur Überprüfung der Programmierung (z.B. Ladungsverteilung, Ergebnisausgabe, etc.) und der Modellgüte werden an einem Grobmodell Berechnungen durchgeführt, in denen die Nichtlinearitäten langsam gesteigert werden. Wie sich für Id3 und Id4 zeigen wird, geben diese Voruntersuchungen Rückschlüsse auf mögliche numerische Probleme, welche dann ggf. eine Überarbeitung des Modells notwendig machen.

In den nichtlinearen Voruntersuchungen (Grobmodell) des Id2 traten keine besonderen Probleme auf, so daß an dieser Stelle auf eine ausführliche Dokumentation verzichtet wird. In den folgenden Kapiteln sind die Ergebnisse für das verfeinerte Modell wiedergegeben, welche die Qualität der Ergebnisse am Grobmodell bei weitem übertreffen.

7.2.2 Verformungen

Die Berechnungsergebnisse dieses Abschnittes basieren auf einem FE-Modell in dem physikalische und geometrische Nichtlinearitäten berücksichtigt werden. Die Belastung wird in inkrementellen Schritten bis auf die maximale Tragfähigkeit gesteigert. Die Vernetzung ist deutlich detaillierter als in den Voruntersuchungen. Die Daten des hier verwendeten Halbmodells sind:

- ◆ 55890 Freiheitsgrade
- ◆ 9315 Knoten
- ◆ 13034 Elemente

Der Plot des globalen Modells in Abb. 7-5 zeigt die Ausgangslage des Schubleichters sowie Tiefgang, Trimm und Verformungen nach Beladung mit 2817 t. Die von der Werft angegebenen 4 m Tiefgang stimmen ziemlich genau mit den numerischen Berechnungsergebnissen überein (siehe auch Abb. 7-7 und Abb. 7-4).

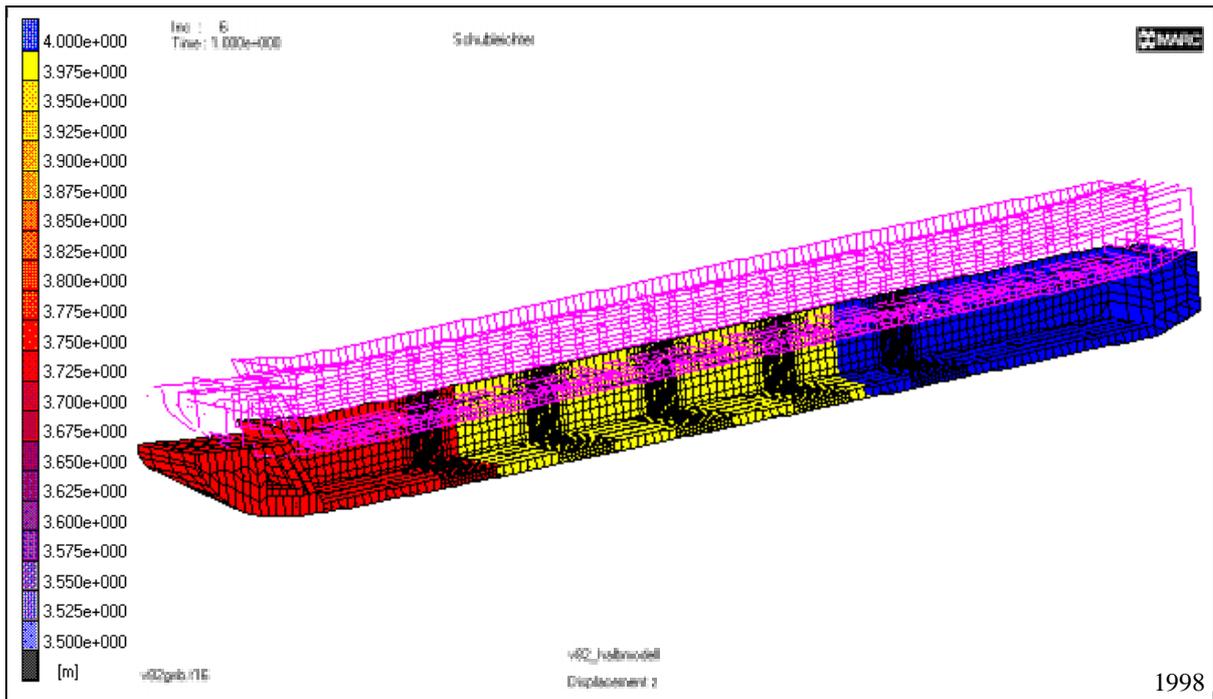


Abb. 7-5: Tiefgang, Trimm und Verformung des globalen Modells (Id2: Modell B)

Fig. 7-5: Immersion, trim and deformation of the global model (Id2: model B)

Aufgrund der relativ großen Abmessungen der Struktur lassen sich in der Abb. 7-5 die lokalen Verformungen der einzelnen Bauteile nicht erkennen. Aus diesem Grund werden diese in den folgenden Abbildungen in den erwähnten speziellen Diagrammen (siehe Abschnitt 3.6.2) wiedergegeben.

Die Abb. 7-6 zeigt die Verformungen des Dennebaums in vertikaler Richtung (y-Achse) über der Schiffslänge. Im unbeladenen Zustand verformt sich der Wallgang bzw. der Dennebaum nach außen. Dies erscheint auf den ersten Blick vielleicht unerwartet, da man vermuten könnte, daß der Wasserdruck auf der Außenwand diesen nach innen drückt. Es ist aber festzuhalten, daß dieser Wasserdruck aufgrund des relativ geringen Tiefganges nur einen kleinen Einfluß hat. Wegen der großen Fläche wirkt sich der Wasserdruck unter dem Außenboden stärker aus. Dieser drückt den Doppelboden nach oben und den Wallgang und Dennebaum somit nach außen (v_D positiv) [Abb. 7-6 - nur Eigenmasse]. Mit zunehmender Beladung deformiert sich der Dennebaum nach innen. Bei der maximalen Beladung mit 2817 t hat der Verformungsverlauf des Dennebaums eine leichte Wellenform. In dieser Wellenform zeichnet sich die erhöhte Quersteifigkeit der Schotte ab. Deren Position ist in der Darstellung durch senkrechte Linien und ein S markiert.

In der Abb. 7-7 sind Tiefgang, Trimm und die Verformung des Schiffskörpers über der Schiffslänge abgetragen. Bei der maximalen Beladung mit 2817 t fällt eine leichte Krümmung auf. Diese ist auf den großen Auftrieb des voluminösen Bugs zurückzuführen. Der Vergleich der Kurven für 2817 t in den Diagrammen mit dem Farbplot der Abb. 7-5 zeigt deutlich die Vorteile der Darstellungsweise in dem Diagramm. Die lokalen Verformungen des Dennebaums und des Außenbodens sind am verformten FE-Modell nicht zu erkennen.

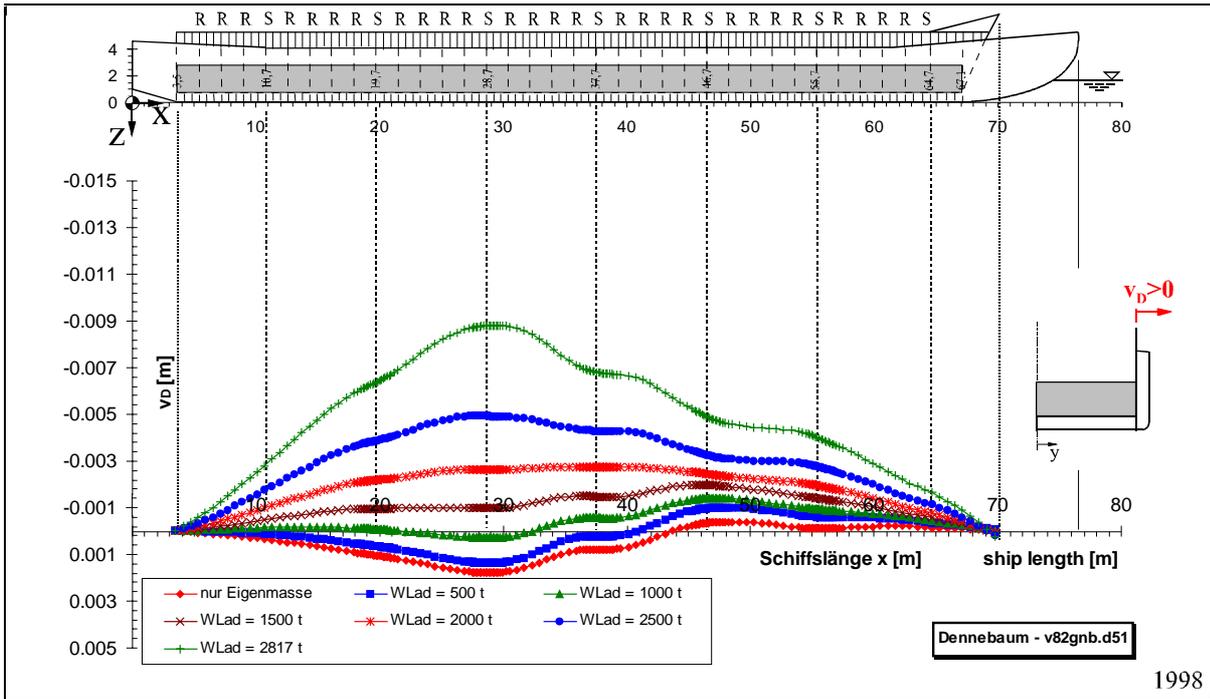


Abb. 7-6: Einbiegung des Dennebaums (ld2: Modell B)

Fig. 7-6: Deformation of the hatch coaming (ld2: model B)

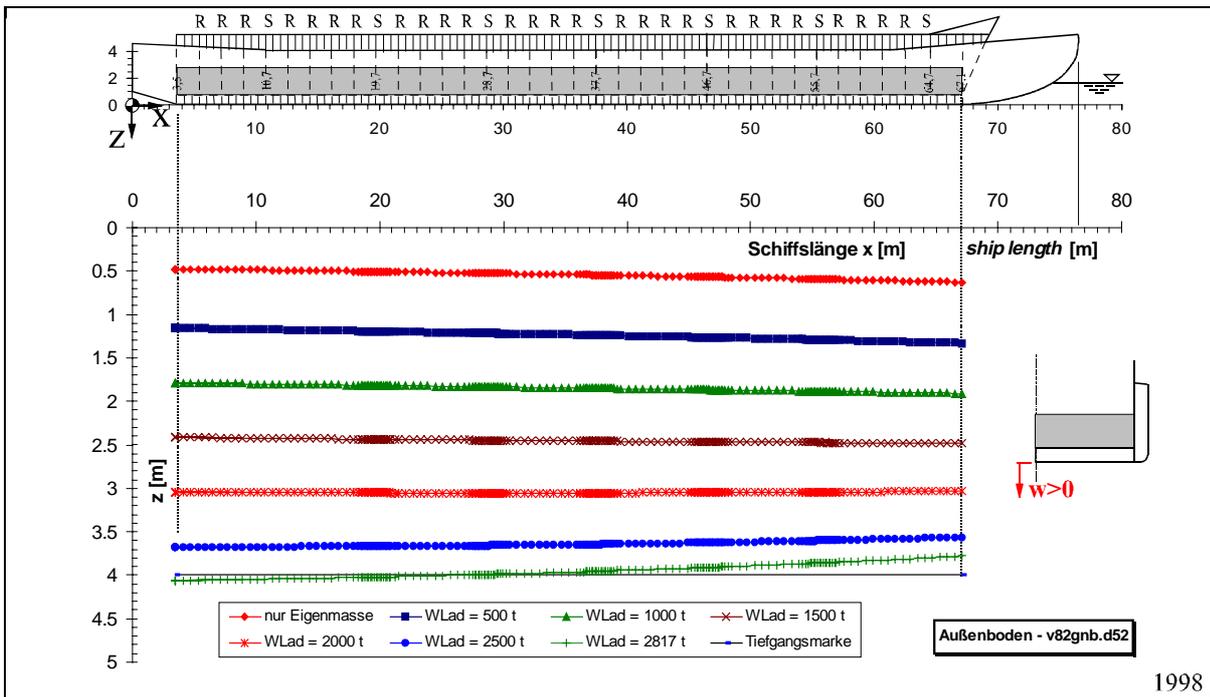


Abb. 7-7: Tiefgang, Trimm und Verformung des Außenbodens (ld2: Modell B)

Fig. 7-7: Immersion, trim and deformation of the outer bottom (ld2: model B)

Betrachtet man die Ergebnisse aus der Abb. 7-7 mit der Abb. 7-4 so wird deutlich, daß die Verformungen des Schiffes einen nicht unerheblichen Anteil an der globalen Schwimmelage haben. Um diese unabhängig von Tiefgang und Trimm beurteilen zu können, ist ein direkter Vergleich mit den Ergebnissen des starren Körpers notwendig. Dieser erfolgt in Abb. 7-8. Stellt man die Ergebnisse der verformbaren denen der starren Struktur gegen-

über, so zeigt sich doch ein recht deutlicher Unterschied im Tiefgang. Der verformbare Schiffskörper taucht am Bug ca. 20 cm weiter aus, was auf den Auftrieb des voluminösen Vorschiffes zurückzuführen ist. Das Heck taucht entsprechend tiefer ein.

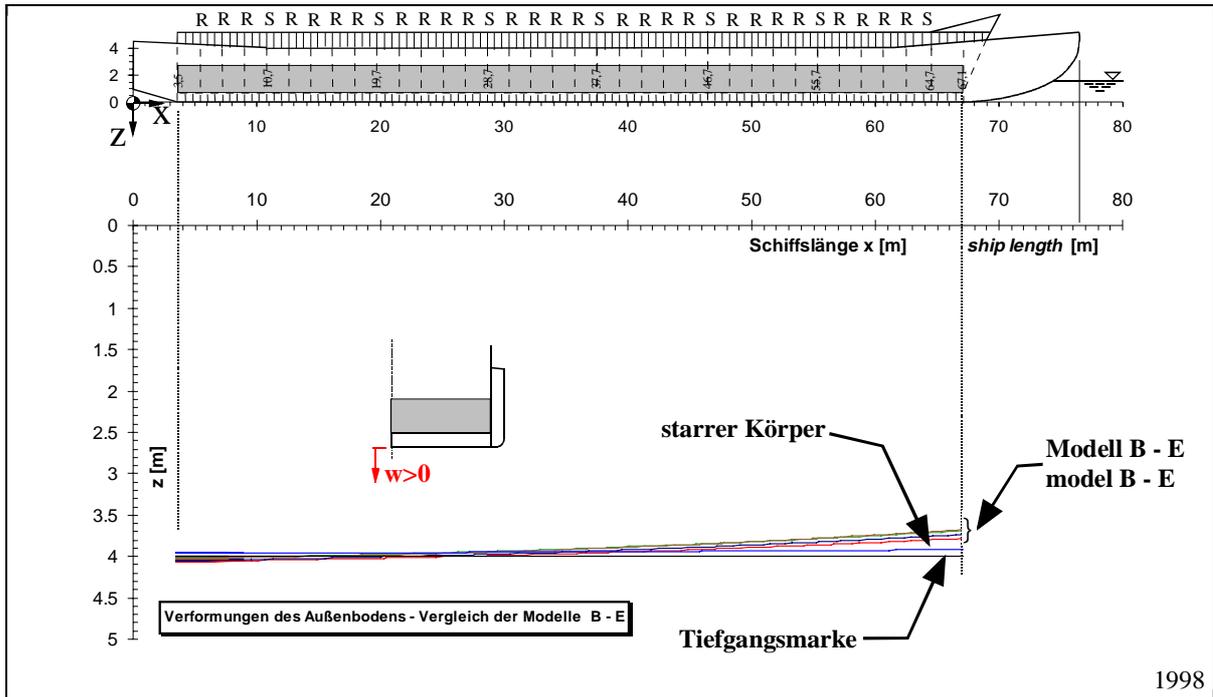


Abb. 7-8: Vergleich der Verformung des Außenbodens (ld2: Modell B - E)

Fig. 7-8: Comparison of the deformation of the outer bottom (ld2: model B - E)

Der Darstellung ist weiter zu entnehmen, daß die Imperfektionen (Abschnitt 3.7.3) auf das Verformungsverhalten des Außenbodens keinen großen Einfluß haben. Lediglich der Tiefgang ändert sich geringfügig, da der Schubleichter mit zunehmender Abrostung an Masse verliert.

In dem Diagramm der Abb. 7-9 werden der Berechnungsergebnisse am Dennebaum mit und ohne die betriebsbedingten Imperfektionen gegenübergestellt. Erwartungsgemäß treten die größten Verformungen für das Modell E auf. Im Verformungsverlauf des Dennebaum über der Schiffslänge ist sehr deutlich der Sitz der Querschotte erkennbar. Beachtenswert ist der wachsende Einfluß der Querschotte bei zunehmenden Imperfektionen. Die bereits erwähnte Wellenform wird mit zunehmenden Imperfektionen deutlicher ausgeprägt. Es ist leicht nachzuvollziehen, daß wenn es zu einer Ablösung der Schotte von der Trogwand kommt (z.B. durch Korrosion) die maximalen Verformungen stark zunehmen werden.

Zusammenfassend läßt sich daraus folgern, daß für den Ladefall 2 (ld2) die Längsfestigkeit des Schiffes nach 10 Jahren bzw. nach 20 Jahren nur unwesentlich abgenommen hat. Im Modell E werden neben den betriebsbedingten Imperfektionen für 20 Jahre auch noch außergewöhnlich starke Schäden wie z.B. eine Arbeitsfalte im Außenboden betrachtet. Wie den Diagrammen zu entnehmen ist, haben die Schäden am Modell E keinen großen Einfluß auf die Verformungen. Diese unterscheiden sich nur unwesentlich von denen des Modell D.

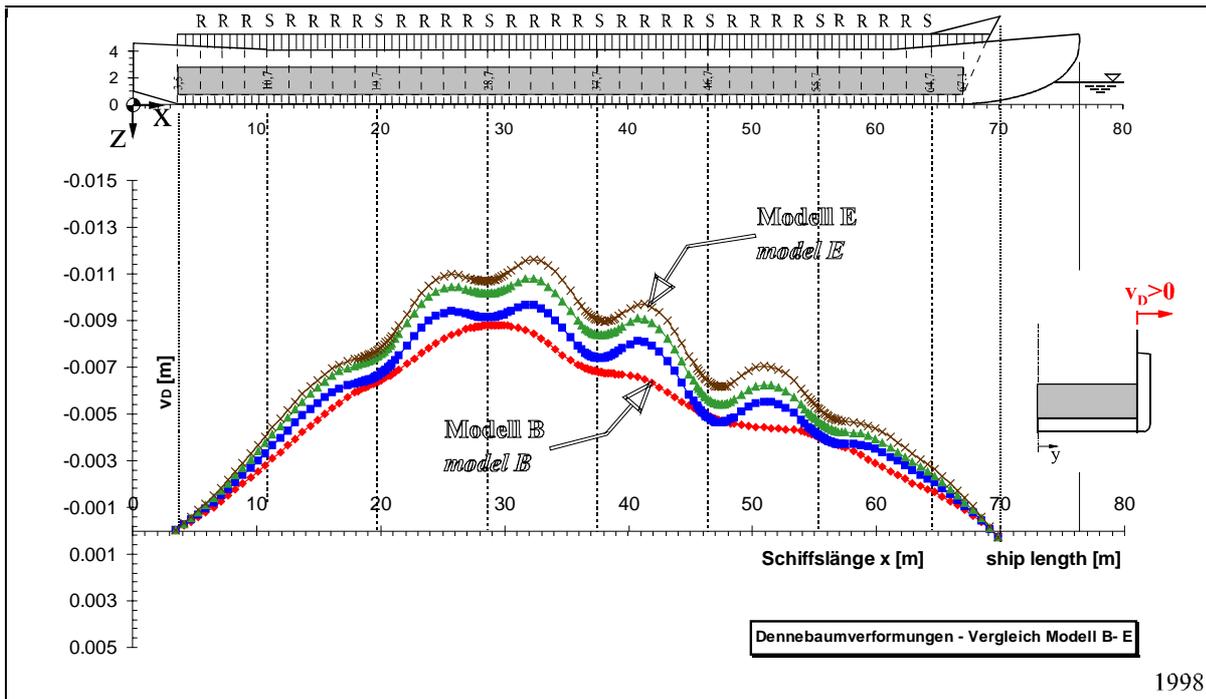


Abb. 7-9: Vergleich der Einbiegung des Dennebaums (Id2: Modell B-E)

Fig. 7-9: Comparison of the deformation of the hatch coaming (Id2: model B-E)

7.2.3 Spannungen

Neben den Verformungen ist es natürlich auch wichtig, die Ergebnisse für die Spannungen zu betrachten. Für den Neubauzustand sind diese in der Abb. 7-10 wiedergegeben. Die Darstellung ist unterteilt in den Spannungsverlauf am globalen Modell und einen Ausschnitt des hochbelasteten Bereiches in Schiffsmitte.

An dieser Stelle ist darauf hinzuweisen, daß in den folgenden Plots die Farbskalen ggf. unterschiedliche Bereiche abdecken. Dieses ist notwendig, da sich die erreichten Spannungen in den verschiedenen Modellen B-E doch recht erheblich voneinander unterscheiden. Bei einem gemeinsamem Maximalwert in der Skala würden z.B. für den Neubauzustand die Kontraste zu gering, als daß sich Unterschiede noch erkennen ließen.

Wie zu erwarten war, ergeben sich für den Dennebaum und den Doppelboden Bereiche mit erhöhten Spannungen. Im Vergleich zur restlichen Struktur liegen diese im Dennebaum relativ hoch. Dies ist darauf zurückzuführen, daß sich die Belastungen aus der Längsbiegung auf eine sehr kleine Fläche (Dennebaum + Dennebaumprofil) verteilen. Dennoch können diese als absolut unkritisch angesehen werden. Die maximal erreichten Mises Spannungen für den Neubauzustand im Ladefall 2 liegen bei ca. 60 N/mm^2 am Dennebaum.

Daß auch die Spannungen im Innenboden ein recht hohes Niveau erreichen, liegt an der Querspantenbauweise des Leichters. Die entstehenden Belastungen werden lediglich durch den Innen- und den Außenboden aufgenommen. In keinem Schiffslängsschnitt werden diese durch einen Längsträger unterstützt.

Da sich für die Modelle C und D am qualitativen Spannungsverlauf kaum etwas ändert und nur die absoluten Spannungswerte etwas höher liegen, wird auf eine detaillierte Wiedergabe an dieser Stelle verzichtet. Für das Modell E (20 Jahre und Arbeitsfalte - siehe Abschnitt 3.7.3) zeigen die Abb. 7-11 und die Abb. 7-12 die berechneten Mises Spannungen. Auf den ersten Blick treten lediglich im Innenboden am Übergang zur Trogwand Spannungsspitzen von ca. 200 N/mm^2 auf (Abb. 7-11). Indem einige Elemente ausgeblendet werden, wird deutlich, daß auch an der Außenwand und der Kimm erhöhte Spannungen auftreten (Abb. 7-12).

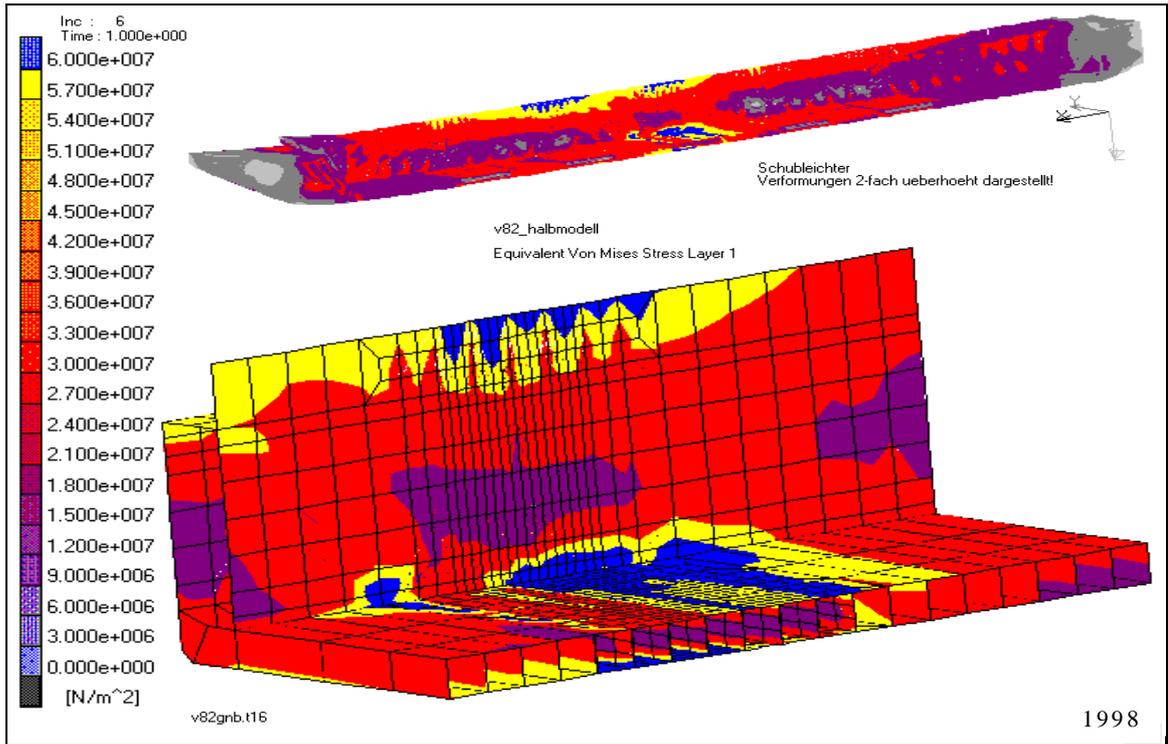


Abb. 7-10: Spannungen am Modell B (ld2)

Fig. 7-10: Stresses for the model B (ld2)

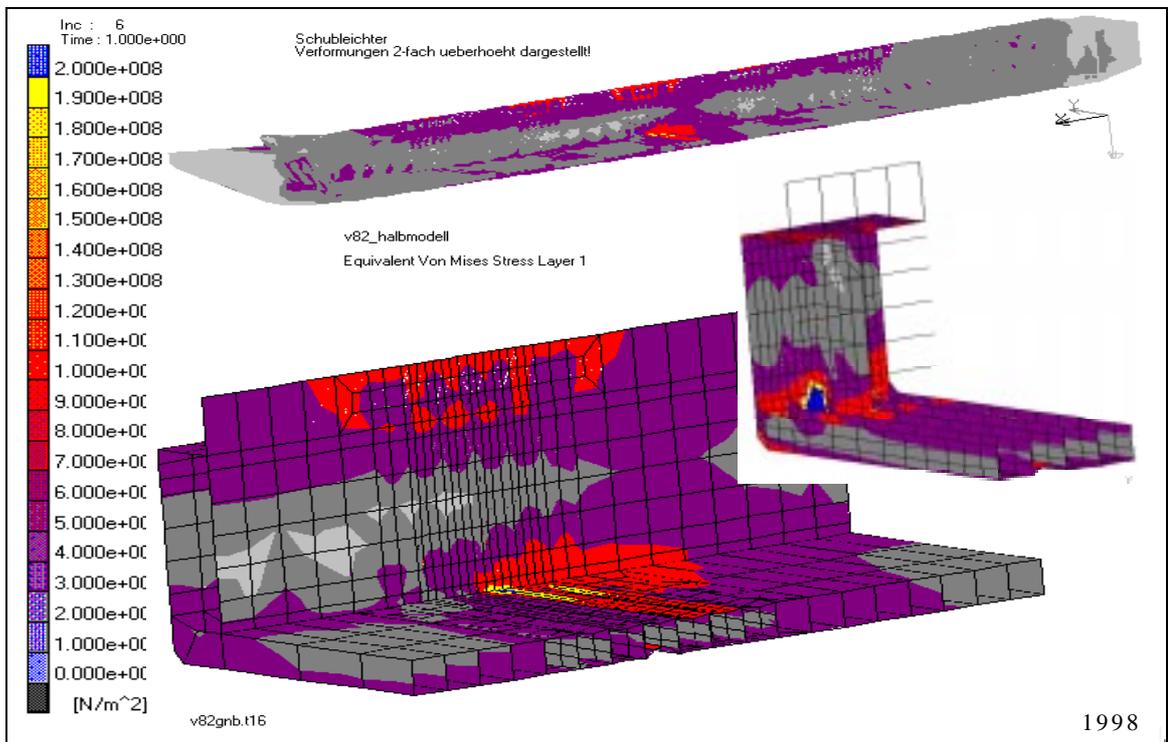


Abb. 7-11: Spannungen am Modell E (ld2)

Fig. 7-11: Stresses for the model E (ld2)

Die obere linke Darstellung in Abb. 7-12 zeigt einen Detailausschnitt des Laderaums. Um die Spannungsspitzen genau zu lokalisieren, werden einige Elemente ausgeblendet und das Modell gedreht. Es zeigt sich, daß an einer lokalen Stelle in der Kimm und der Außenwand das Spannungsniveau der umliegenden Bauteile deutlich überschritten wird. Dieses geschieht in dem Spantabschnitt mit der Arbeitsfalte. Zu begründen ist dieser Effekt damit, daß aufgrund der Vorverformungen der Doppelboden an dieser Stelle "weicher" ist. Er weist eine deutlich geringere Längssteifigkeit auf, wodurch die aufzunehmenden Längskräfte auf die umliegenden Bauteile (Kimm und Außenwand) verteilt werden und somit ein Anstieg der Spannungen verursacht wird.

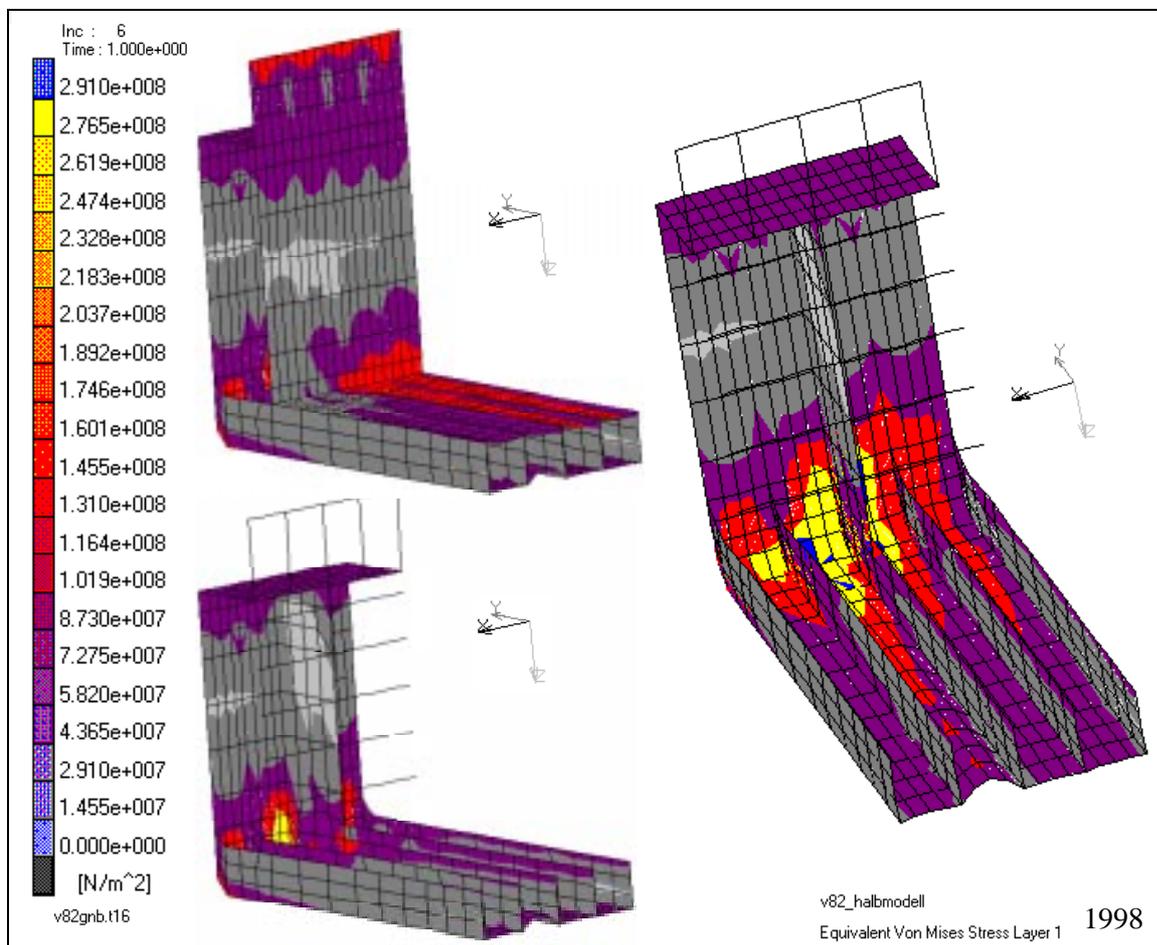


Abb. 7-12: Spannungen am Modell E (ld2) - Detailansicht

Fig. 7-12: Stresses for the model E (ld2) - detail view

Anzumerken ist noch, daß in der Farbskala der Maximalwert $291 \frac{N}{mm^2}$ beträgt. Dieses entspricht der Streckgrenze des Materials. Die in Abb. 7-12 gelb dargestellten Bereiche befinden sich somit knapp unterhalb der Grenze zur Plastizierung.

7.2.4 Auswertung der Ergebnisse

Der Vergleich der berechneten Tiefgänge hat gezeigt, daß diese für den starren Körper kaum von den Angaben der Werft abweichen. Die Annahmen bezüglich der Randbedingungen am FE-Modell können somit als korrekt angesehen werden. Der Vergleich der FE-Ergebnisse für den starren und den verformbaren Körper verdeutlicht den nicht unerheblichen Einfluß der Verformungen. Für den hier betrachteten Ladefall 2 sind diese zwar relativ gering, es steht aber zu erwarten, daß sie für den Ladefall 3 und 4 zunehmen werden.

Die Verformungsergebnisse für den Dennebaum zeigen die abnehmende Querfestigkeit des Leichters mit zunehmenden Imperfektionen (Abb. 7-9). Sehr deutlich tritt in den dargelegten Diagrammen die erhöhte Quersteifigkeit an den Stellen mit einem Schott heraus. Die in Kapitel 3 beschriebene Vorgehensweise bei der Berech-

nung und Auswertung eignet sich somit hervorragend für die Untersuchung zukünftiger Konstruktionsänderungen. So läßt sich z.B. die Wirksamkeit von zusätzlichen Schotten oder Rahmenspannten sehr einfach nachweisen.

Die Auswertung der Spannungen für den Neubauzustand haben gezeigt, daß diese mit ca. 60 N/mm^2 absolut harmlos sind. Mit zunehmenden Imperfektionen (Abschnitt 3.7.3) liegen diese aber schon für den recht unkritischen Beladungsfall 2 knapp unterhalb der Streckgrenze. Schon eine kleine Verlagerung der Beladung verursacht einen Anstieg der Beanspruchung und somit Zonen mit Plastizierungen. Das Fließen des Materials ist als eine bleibende Schädigung der Struktur zu deuten, wodurch die Längssteifigkeit der Struktur zusätzlich abnimmt.

Zusammenfassend läßt sich sagen, daß im Id2 die Imperfektionen (Abschnitt 3.7.3) auf die Verformungen des Schubleichters nur einen relativ geringen Einfluß haben. Bei den Spannungen hingegen ist am vorgeschädigten Modell an einer lokalen Stelle ein deutlicher Anstieg des Spannungsniveaus zu verzeichnen. Eine Überschreitung der Streckgrenze und somit Plastizierungen im Material ist nicht ausgeschlossen.

7.3 Berechnungsergebnisse für den Ladefall 3

Die Untersuchungen für den Schubleichter im Ladefall 3 (Id3) erfolgt für zwei unterschiedliche Ladungszustände. In beiden Fällen wird die Ladung jeweils zur Hälfte in einen vorderen und achteren Bereich eingebracht. Die Unterschiede liegen in der Verteilung der Ladung, woraus sich zwei unterschiedliche Biegemomente ergeben. Die Variablen der Belastung (Abb. 7-2) für das kleine und das sehr große Biegemoment werden wie folgt festgelegt:

Kleines Biegemoment:

$$\begin{array}{ll} x_c = 3,5 \text{ m} & x_d = 27,5 \text{ m} \\ x_g = 43,1 \text{ m} & x_h = 67,1 \text{ m} \end{array}$$

Großes Biegemoment:

$$\begin{array}{ll} x_c = 3,5 \text{ m} & x_d = 15,5 \text{ m} \\ x_g = 55,1 \text{ m} & x_h = 67,1 \text{ m} \end{array}$$

In der Abb. 7-13 sind die sich daraus ergebenden Biegemomente eingetragen. Ebenfalls ist in dieser Darstellung das maximal zulässige Biegemoment nach den Vorschriften des Germanischen Lloyd /GL1/ enthalten. Dieses ermittelt sich wie folgt:

Hoggingfall H:

$$(+M)_{\min} = \lambda_2 B H L^2 \quad [\text{kNm}]$$

$$\lambda_2 = 0,105; B = 11,40 \text{ m}; H = 4,00 \text{ m}; L = 76,5 \text{ m} \Rightarrow (+M)_{\min} = \underline{28021 \text{ kNm}}$$

Die dargestellten Kurven für den Biegemomentenverlauf sind auf der Basis eines elastisch gebetteten Balkens ermittelt. Die Dokumentation der hierfür erstellten Software und die Verifizierung anhand eines einfachen Kastenträgers ist /V08/ zu entnehmen.

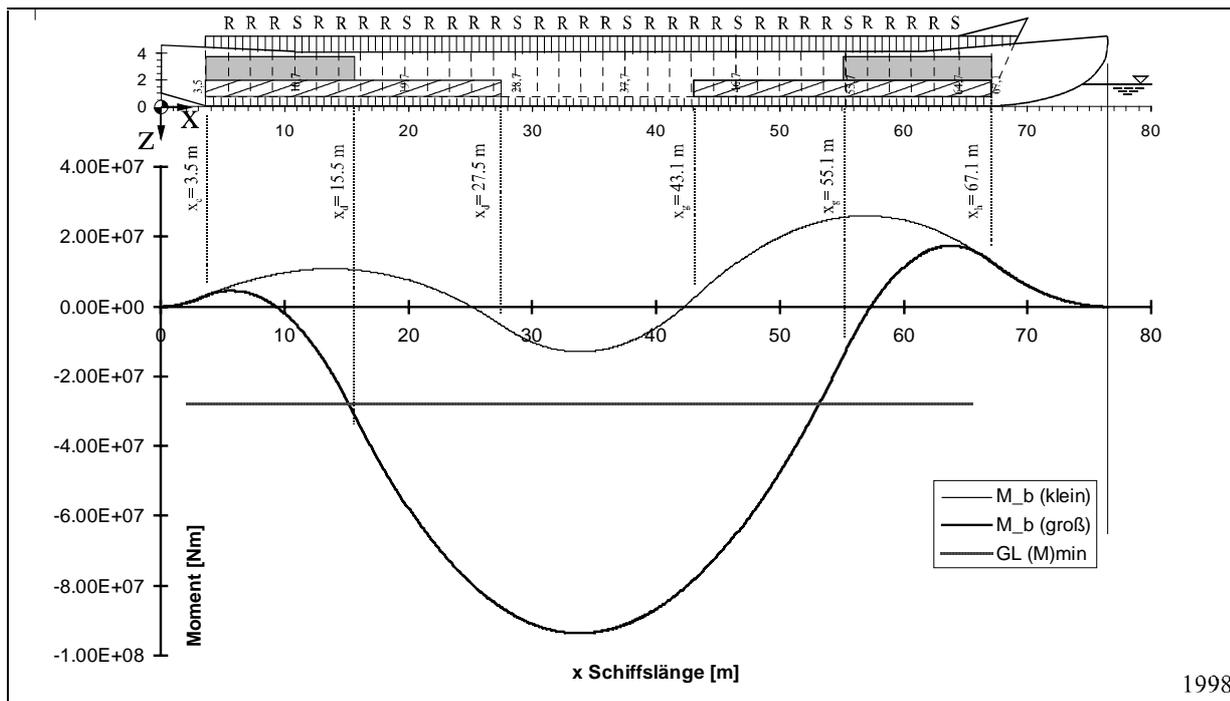


Abb. 7-13: Biegemomentenverlauf für den Ladefall 3

Fig. 7-13: Bending moment of loadcase 3

Wie sehr gut zu erkennen ist, überschreitet das größere der beiden Biegemomente den zulässigen GL-Wert. Dieses wurde bewußt so gewählt, um das Verhalten des Schiffes unter extremer Belastung zu untersuchen. Das kleine Biegemoment liegt unterhalb der zulässigen Grenze. Wie sich aber noch zeigen wird, treten schon für diese relativ kleine Beanspruchung Plastizierungen im Material auf.

Bevor die eigentlich FE-Analyse für diese beiden Biegemomente erfolgt, ist es sinnvoll, zunächst wieder eine Voruntersuchung durchzuführen.

7.3.1 Berechnungsergebnisse der Voruntersuchungen

Im Gegensatz zum Id2 erfolgt für diesen Ladefall keine Eigenwertuntersuchung und keine Betrachtung als starrer Körper mehr, da die Verifizierung des FE-Netzes und der Randbedingungen als abgeschlossen angesehen wird. Statt dessen wird auf einige "Eigenarten" der nichtlinearen FE-Analysen eingegangen, welche bei Nichtbeachtung zu numerischen Problemen führt.

In der Abb. 7-14 werden die Verformungen des Dennebaums in y-Richtung über der Schiffslänge abgetragen. Ein positiver v_D Wert bedeutet eine Verschiebung der Knoten nach außen. In den hier dargestellten Untersuchungen an dem Grobmodell wird die Belastung in 3 Berechnungsschritten aufgebracht.

Bei der max. Beladung (2817 t) fällt im Verformungsverlauf bei $x = 42$ m eine Unstetigkeit auf. Dies ist darauf zurückzuführen, daß in diesen Analysen die Fehlerschranke für die Gleichgewichtsiteration zu grob angesetzt wurde. Dieser Wert ist somit zu senken. Da nun davon ausgegangen werden kann, daß kein Gleichgewicht (innerhalb der vorgegebenen Toleranz) gefunden wird, ist das Netz an dieser Stelle zu verfeinern und es sind kleinere Lastschritte zu wählen.

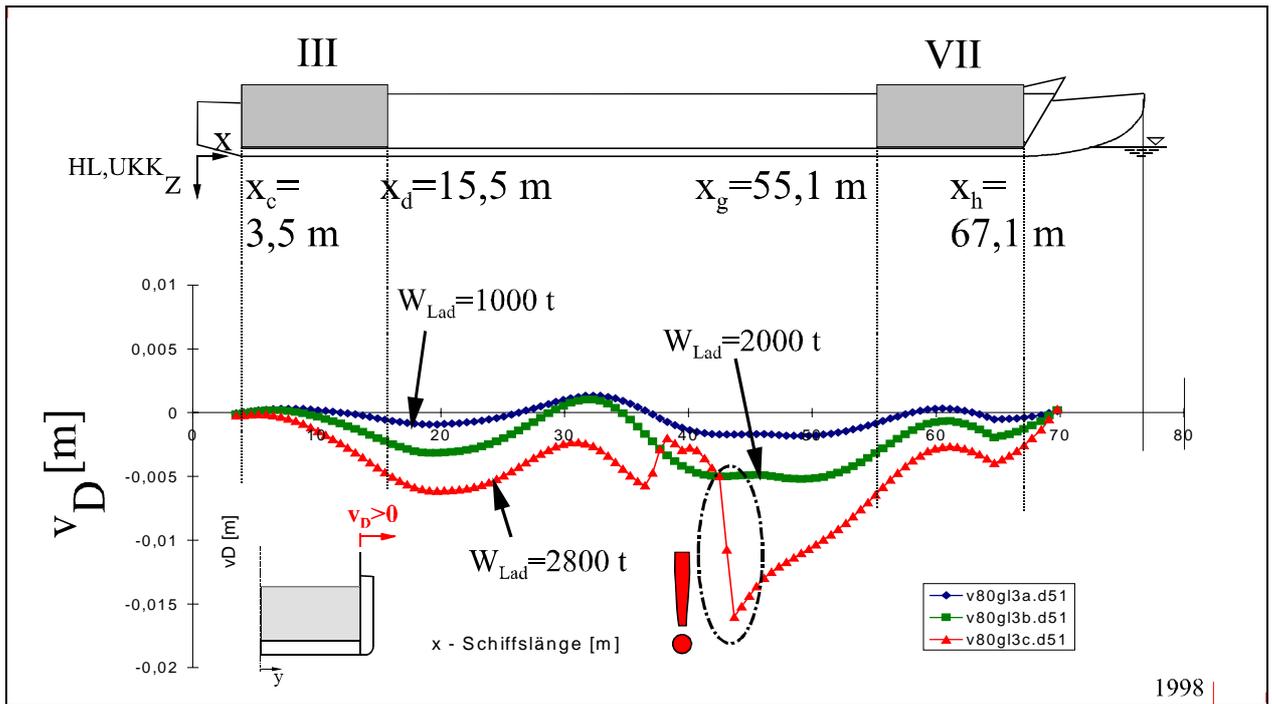


Abb. 7-14: Einbiegung des Dennebaums (ld3) - Grobmodell

Fig. 7-14: Deformation of the hatch coaming (ld3) - coarse model

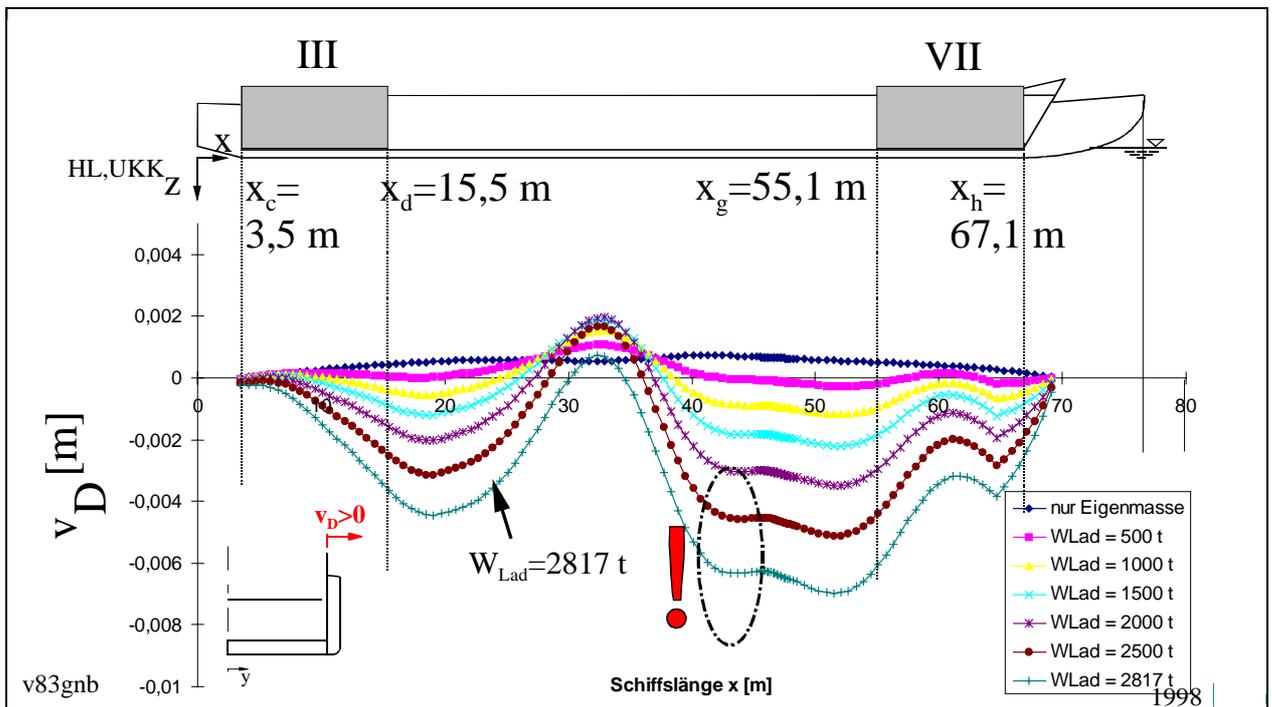


Abb. 7-15: Einbiegung des Dennebaums (ld3) - Feinmodell

Fig. 7-15: Deformation of the hatch coaming (ld3) - fine model

Nach einer Überarbeitung der Vernetzung und einer kleineren Schrittweite kann die Fehlerschranke der Gleichgewichtssituationen herabgesetzt werden. Die Werte für die Dennebaumverformungen zeigt die Abb. 7-15. Vergleicht man diese Ergebnisse mit der Abb. 7-14, so verdeutlicht dies die guten Ergebnisse in der "Problemzone" nach der Verfeinerung des FE-Netzes und der Berechnungsparameter.

7.3.2 Verformungen für das kleine Biegemoment

Die Berechnungsergebnisse dieses Abschnittes basieren auf einem fein vernetzten FE-Modell in dem physikalische und geometrische Nichtlinearitäten berücksichtigt werden. Die Beladung wird in inkrementellen Schritten bis zur maximalen Tragfähigkeit gesteigert. Bei extrem großen Belastungen verursachen die auftretenden Nichtlinearitäten erhebliche numerische Probleme, so daß in diesem Abschnitt das angesetzte Moment zunächst noch relativ klein gewählt wird.

Das Diagramm in Abb. 7-16 zeigt wieder die Verformungen des Dennebaums für den Neubauzustand des Schiffes. Die Wellenform ist im wesentlichen auf zwei Effekte zurückzuführen. Im belasteten Bereich des Innenbodens ($x_c < x < x_d$ und $x_g < x < x_h$) ist der Flächendruck durch die Last deutlich größer als der durch den Wasserdruck. Der Dennebaum verformt sich mit zunehmender Beladung nach innen. Für den unbelasteten Bereich des Innenbodens ($x_d < x < x_g$) verläuft die Krümmung des Dennebaums nach außen. Dies ist wieder auf den sich nach oben verformenden Doppelboden zurückzuführen. Berücksichtigt man diese Erläuterungen, so wird deutlich, warum sich zwischen den Schotten eine konkave oder eine konvexe Krümmung ergibt. Ausführlicher erläutert werden diese Zusammenhänge in Abschnitt 8.3.1 (Abb. 8.5).

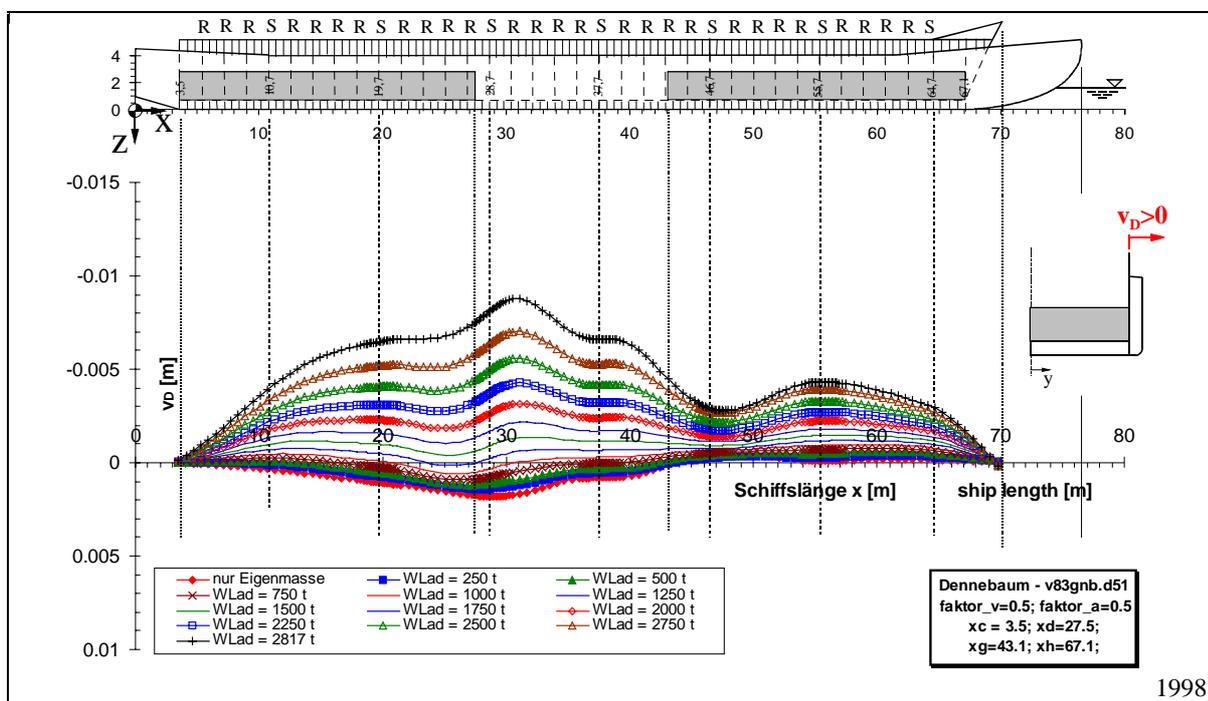


Abb. 7-16: Einbiegung des Dennebaums (ld3: Modell B)

Fig. 7-16: Deformation of the hatch coaming (ld3: model B)

Ein Vergleich der Berechnungsergebnisse für die vier Modelle zeigt kaum Unterschiede bei den Deformationen des Dennebaum. Dies ist auch nicht weiter bemerkenswert, da dieser im ld3 unter Zugbelastung steht.

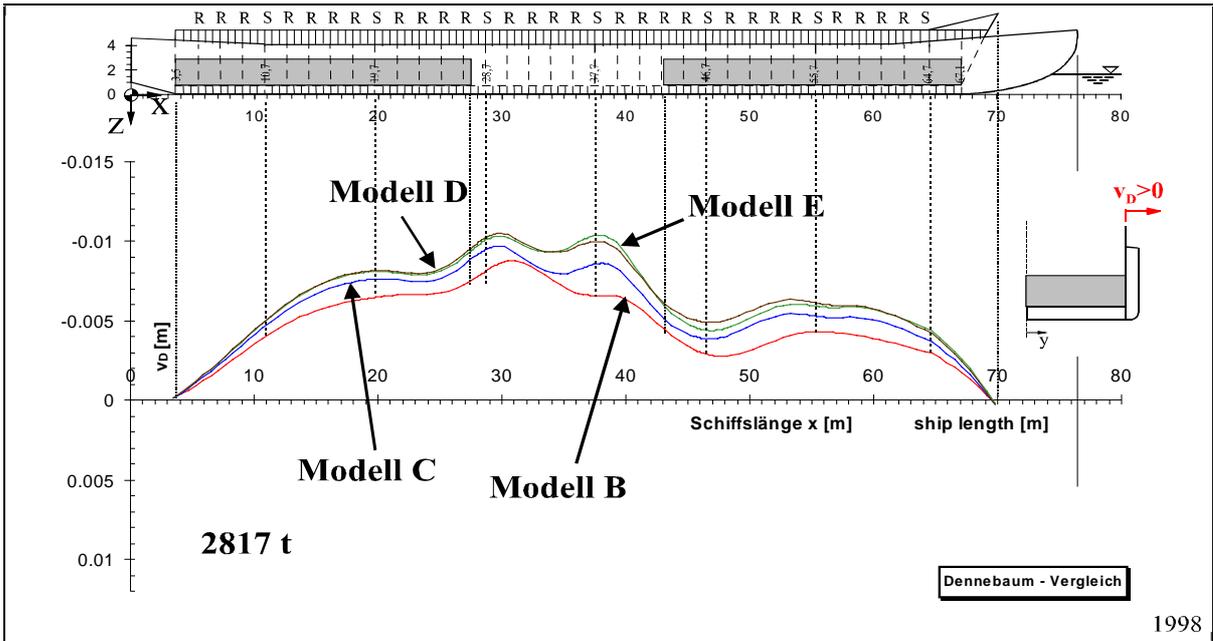


Abb. 7-17: Einbiegung des Dennebaums (ld3: Modell B-E)

Fig. 7-17: Deformation of the hatch coaming (ld3: model B-E)

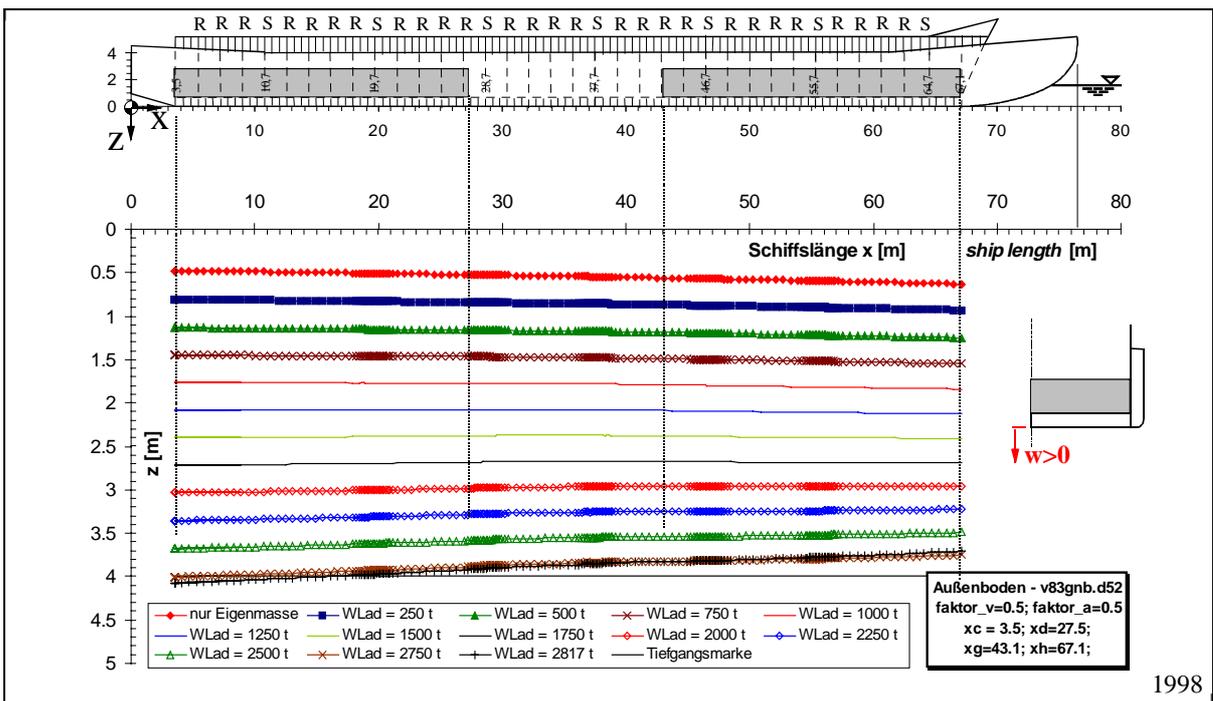


Abb. 7-18: Tiefgang, Trimm und Verformung des Außenbodens (ld3: Modell B)

Fig. 7-18: Immersion, trim and deformation of the outer bottom (ld3: model B)

In der Abb. 7-18 ist die Schwimmelage des Leichters während der Beladung beschrieben. Es stellen sich keine nennenswerte Verformungen am Schiffskörper ein.

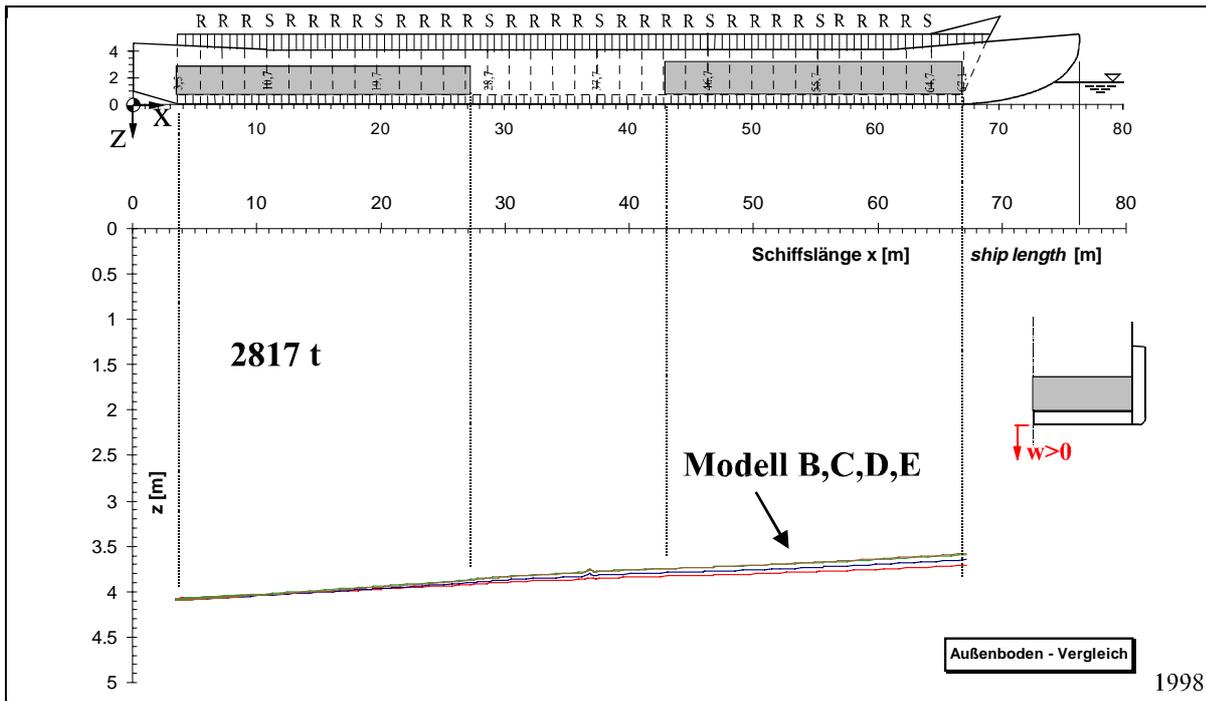


Abb. 7-19: Tiefgang, Trimm und Verformung des Außenbodens (ld3: Modell B-E)

Fig. 7-19: Immersion, trim and deformation of the outer bottom (ld3: model B-E)

Auch ein Vergleich der 4 Modelle zeigt kaum nennenswerte Differenzen. Dies liegt daran, daß das angetragene Moment keine ernsthafte Beanspruchung der Struktur darstellt.

7.3.3 Spannungen für das kleine Biegemoment

In der globalen Betrachtung (Abb. 7-20 und Abb. 7-21) der Spannungsergebnisse sind kaum Unterschiede im Spannungsverlauf zu erkennen. Demnach unterscheiden sich die Ergebnisse für das gealterte Schiff nur unwesentlich vom Neubauzustand.

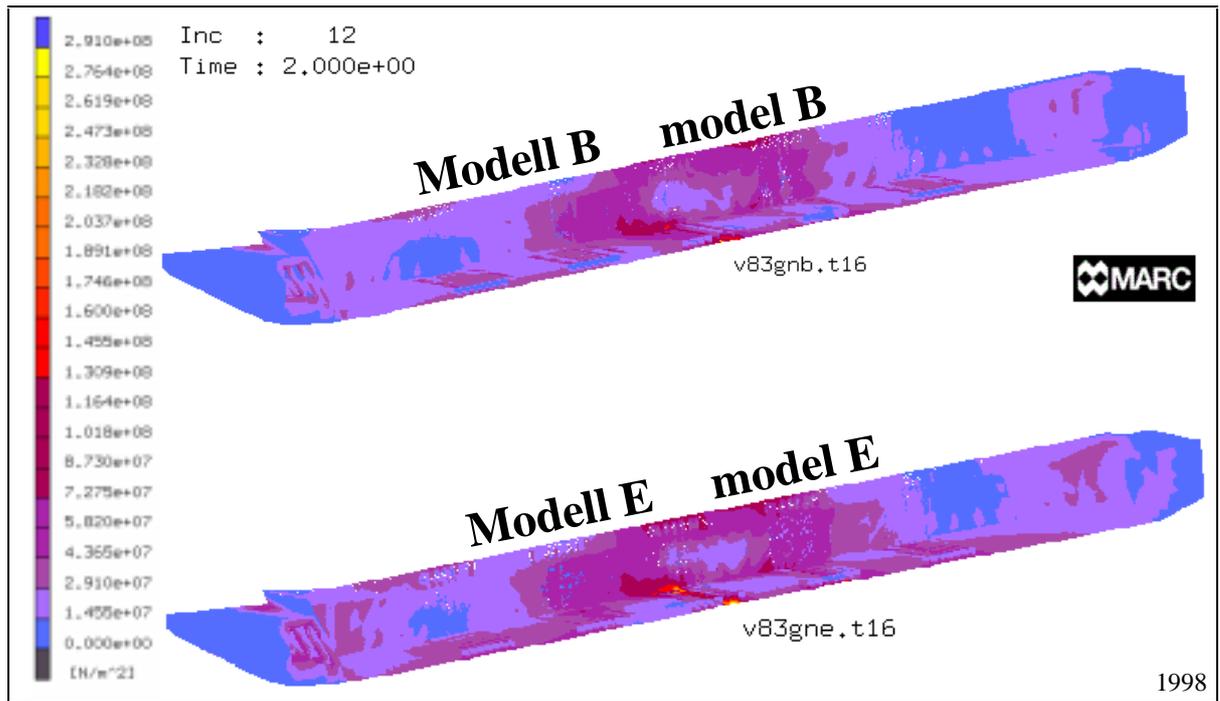


Abb. 7-20: Mises Spannungen des globalen Modells (Id3: Modell B,E)

Fig. 7-20: Mises stress of the global model (Id3: model B,E)

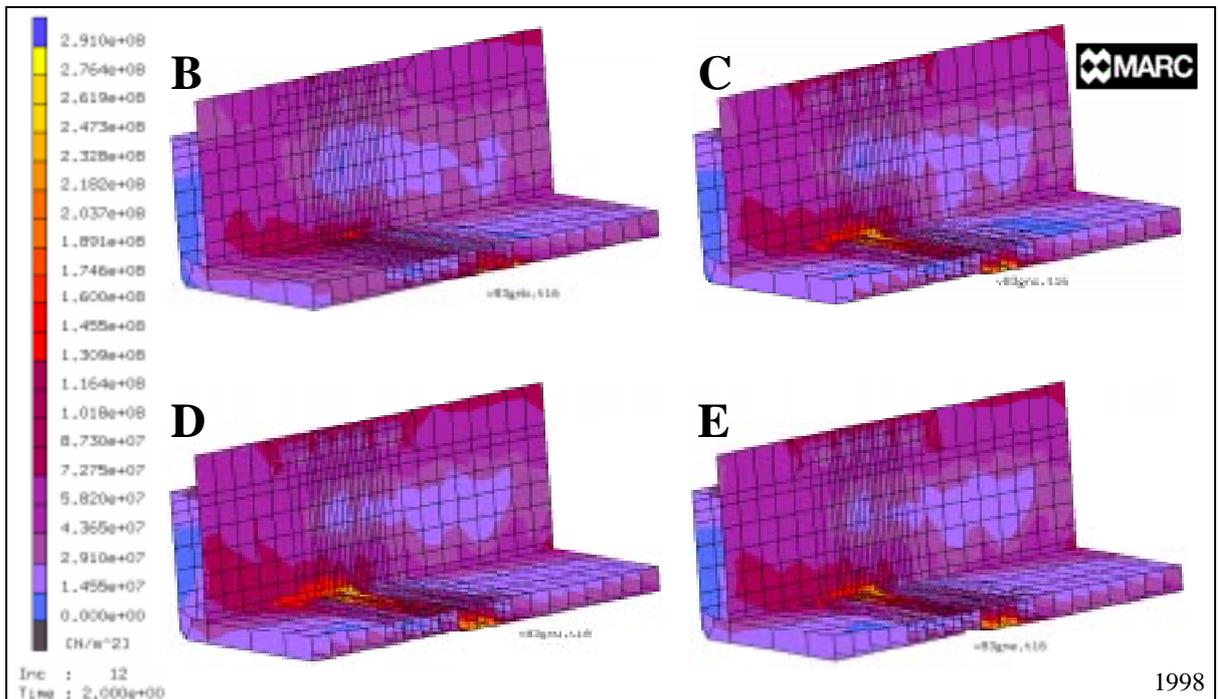


Abb. 7-21: Mises Spannungen des Laderaumsegmentes (Id3: Modell B-E)

Fig. 7-21: Mises stress of the cargo hold section (Id3: model B-E)

Die Abb. 7-22 zeigt die Spannungen für den Detailausschnitt in Schiffsmitte. Die Elemente für Trogwand und Innenboden sind ausgeblendet. Es wird nun deutlich, daß schon im Neubauzustand die Streckgrenze des Materials ($R_m = 291 \text{ N/mm}^2$) an einer lokalen Stelle fast erreicht wird. Mit zunehmenden Imperfektionen wird diese dann überschritten und es treten Plastizierungen im Material auf.

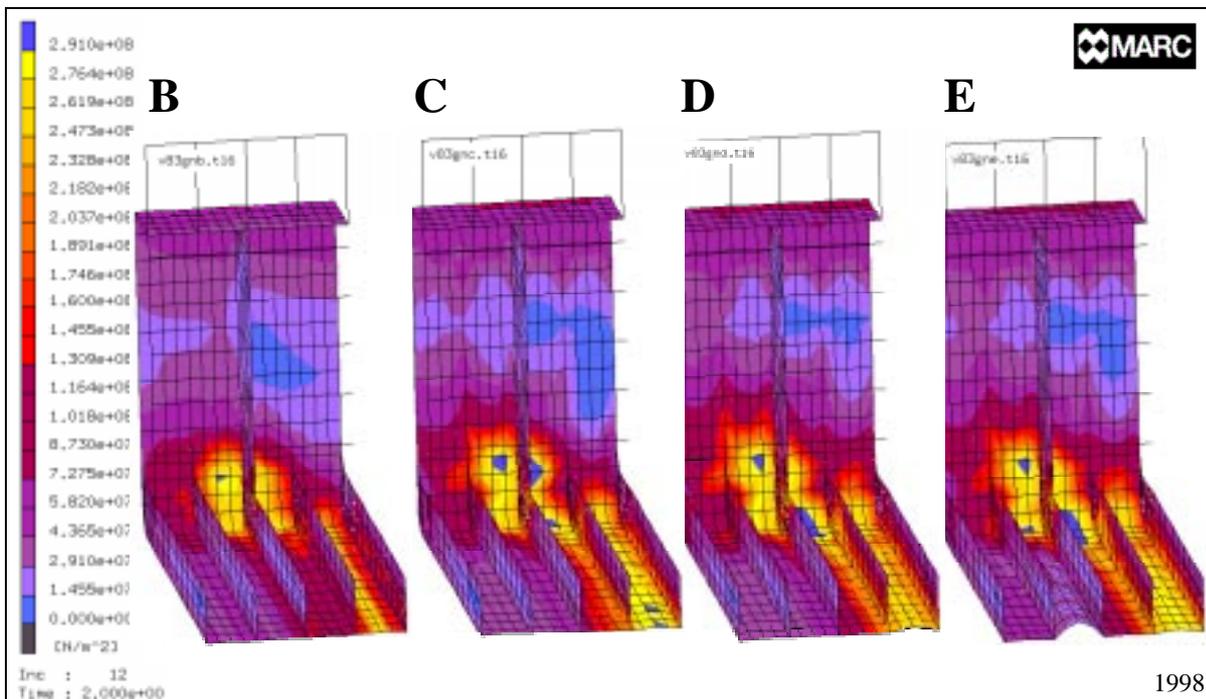


Abb. 7-22: Mises Spannungen des Detailausschnittes (Id3: Modell B-E)

Fig. 7-22: Mises stress of the detail (Id3: model B-E)

Die erwähnte lokale Stelle befindet sich an einem Schott in Schiffsmitte ($x = 37,7 \text{ m}$). Daß diese Stelle im Vergleich zur Umgebung so hoch belastet wird, hat mehrere Ursachen. Zum einen wird die Längsbiegefestigkeit des Schubleichters durch keinen Längsträger unterstützt. Da sich der Doppelboden in einer Längsbeanspruchung somit sehr weich verhält, wird die Beanspruchung auf den Kimmbereich verlagert. Das an dieser Stelle auch noch ein Schott sitzt, führt zu einem Steifigkeitsprung in der Querbiegefestigkeit (siehe Abb. 7-16). Hieraus folgt ein weiterer Anstieg der Spannungen.

7.3.4 Verformungen für das große Biegemoment

In diesem Abschnitt werden die Berechnungsergebnisse für die extreme Belastung (Abb. 7-13) wiedergegeben. Da der Dennebaum in diesem Ladefall unter Zugbelastung steht, ist ein Beulen nicht zu befürchten. Aus diesem Grund werden die Deformationen dieses Bauteils im folgenden nicht betrachtet.

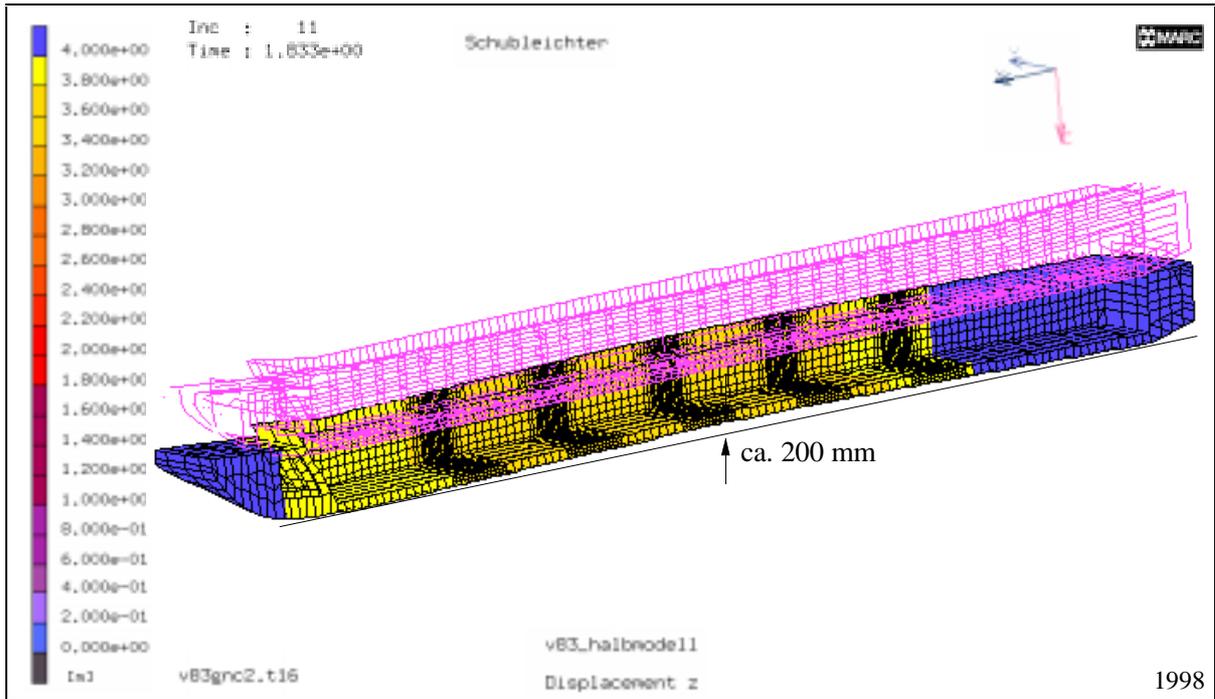


Abb. 7-23: Tiefgang, Trimm und Verformung des globalen Modells (Id3: Modell B)

Fig. 7-23: Immersion, trim and deformation of the global model (Id3: model B)

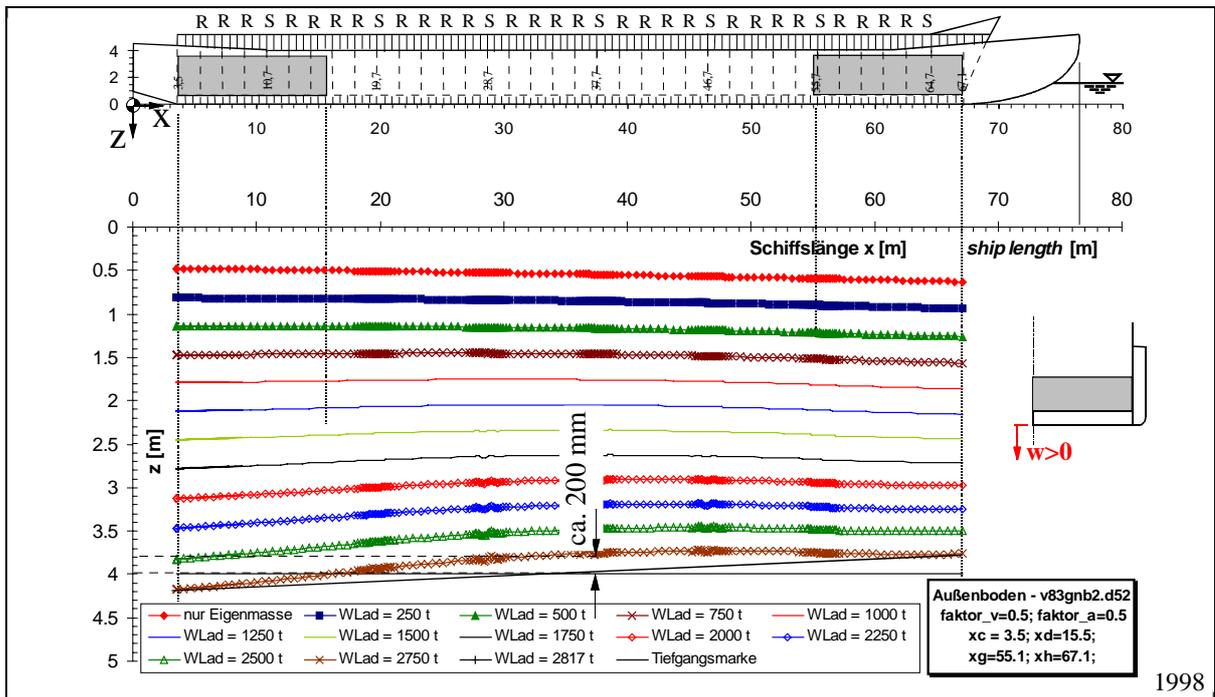


Abb. 7-24: Tiefgang, Trimm und Verformung des Außenbodens (Id3: Modell B)

Fig. 7-24: Immersion, trim and deformation of the outer bottom (Id3: model B)

Im dem Plot der Abb. 7-23 wird die Durchbiegung des Schiffes schon am globalen FE-Modell deutlich. Diese beträgt in Schiffsmittle ca. 200 mm. Besser zu erkennen ist dies in der Abb. 7-24. Diese gibt den Tiefgang, den Trimm und die Verformungen des Außenbodens über der Schiffslänge wieder. Im Leerzustand und zu Beginn der

Beladung liegt der Schubleichter unvertrimmt im Wasser. Mit zunehmender Beladung entsteht eine leichte Vertrimmung.

Im Vergleich zu den Ergebnissen des Modell B fällt am Modell C die Ausbildung von Arbeitsfalten auf. Diese sind in der Abb. 7-25 mit einer strichpunktierten Linie gekennzeichnet. Zu beachten ist, daß diese jeweils in den Plattenfeldern neben den Schotten entstehen.

In den letzten Berechnungsincrementen ist ein sehr starker Zuwachs der Verformungen zu beobachten. Die maximale Beladung kann nicht erreicht werden, da sich die Struktur bei einer Beladung von 2750 t übermäßig verformt. Die Durchbiegung des Leichters überschreitet mit mehr als 500 mm jede zulässige Grenze. Wie sich noch zeigen wird, befindet sich das Material in großflächigen Bereichen im plastischen Bereich, so daß von starken bleibenden Schäden ausgegangen werden muß. Dieser kann als Kollaps der gesamten Schiffskonstruktion bewertet werden.

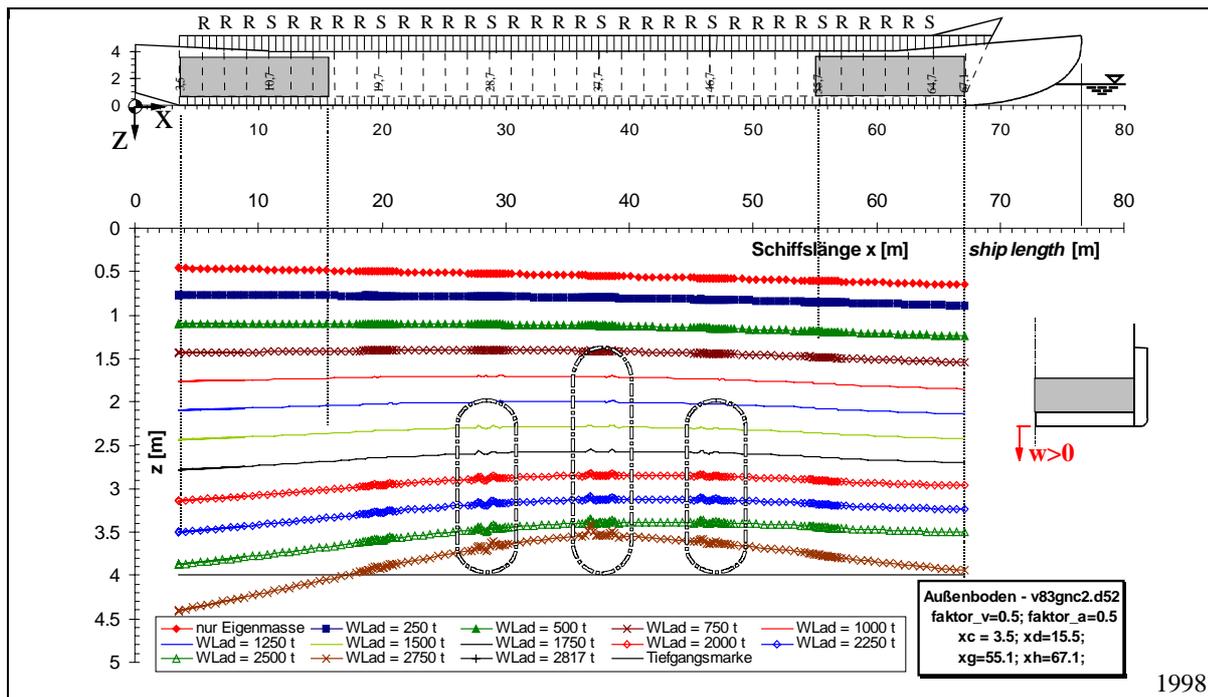


Abb. 7-25: Tiefgang, Trimm und Verformung des Außenbodens (ld3: Modell C)

Fig. 7-25: Immersion, trim and deformation of the outer bottom (ld3: model C)

Da sich die Berechnungsergebnisse der Modelle D und E nicht grundsätzlich von denen des Modell C unterscheiden wird auf eine detaillierte Wiedergabe verzichtet. Allerdings ist eine deutliche Reduzierung der Kollapslast zu beobachten. Ein gemeinsamer Vergleich ist Abb. 7-26 zu entnehmen.

Demnach erträgt der Leichter im Neubauzustand (Modell B) eine Beladung mit 2750 t. Nach 10 Jahren (Modell C) treten bei der gleichen Belastung Arbeitsfalten und eine globale Aufbiegung auf. Diese Arbeitsfalten sind in den Kurvenverläufen als "Zacken" erkennbar. Ein globaler Kollaps wird beim Modell D schon bei 2600 t und beim Modell E bei 2300 t erreicht. Es läßt sich somit feststellen, daß durch die Imperfektionen eine deutliche Reduzierung der Kollapslast eintritt.

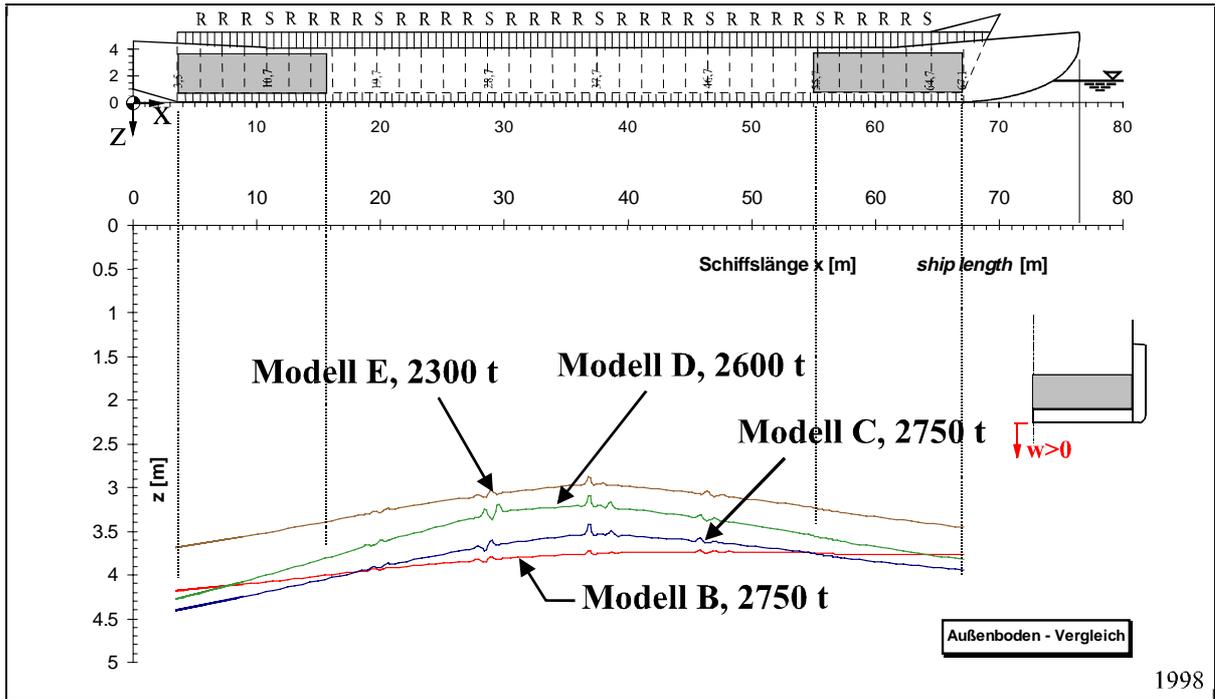


Abb. 7-26: Tiefgang, Trimm und Verformung des Außenbodens (ld3: Modell B-E)

Fig. 7-26: Immersion, trim and deformation of the outer bottom (ld3: model B-E)

7.3.5 Spannungen für das große Biegemoment

In den nachstehenden Plots wird der Mises Spannungsverlauf für die 4 untersuchten Modelle wiedergegeben. Für das Modell B wird im zugbelasteten Dennebaum eine Spannung erreicht, welche knapp unterhalb der Streckgrenze liegt. Plastizierungen treten nur in einem sehr kleinen Bereich des Dennebaumprofils auf.

Nach 10 Betriebsjahren (Modell C) sind deutlich größere Plastizierungszone zu beobachten. Diese weiten sich im Modell D merkbar aus, was in der lokalen Darstellung des mittleren Laderaumsegmentes (Abb. 7-29) gut sichtbar wird.

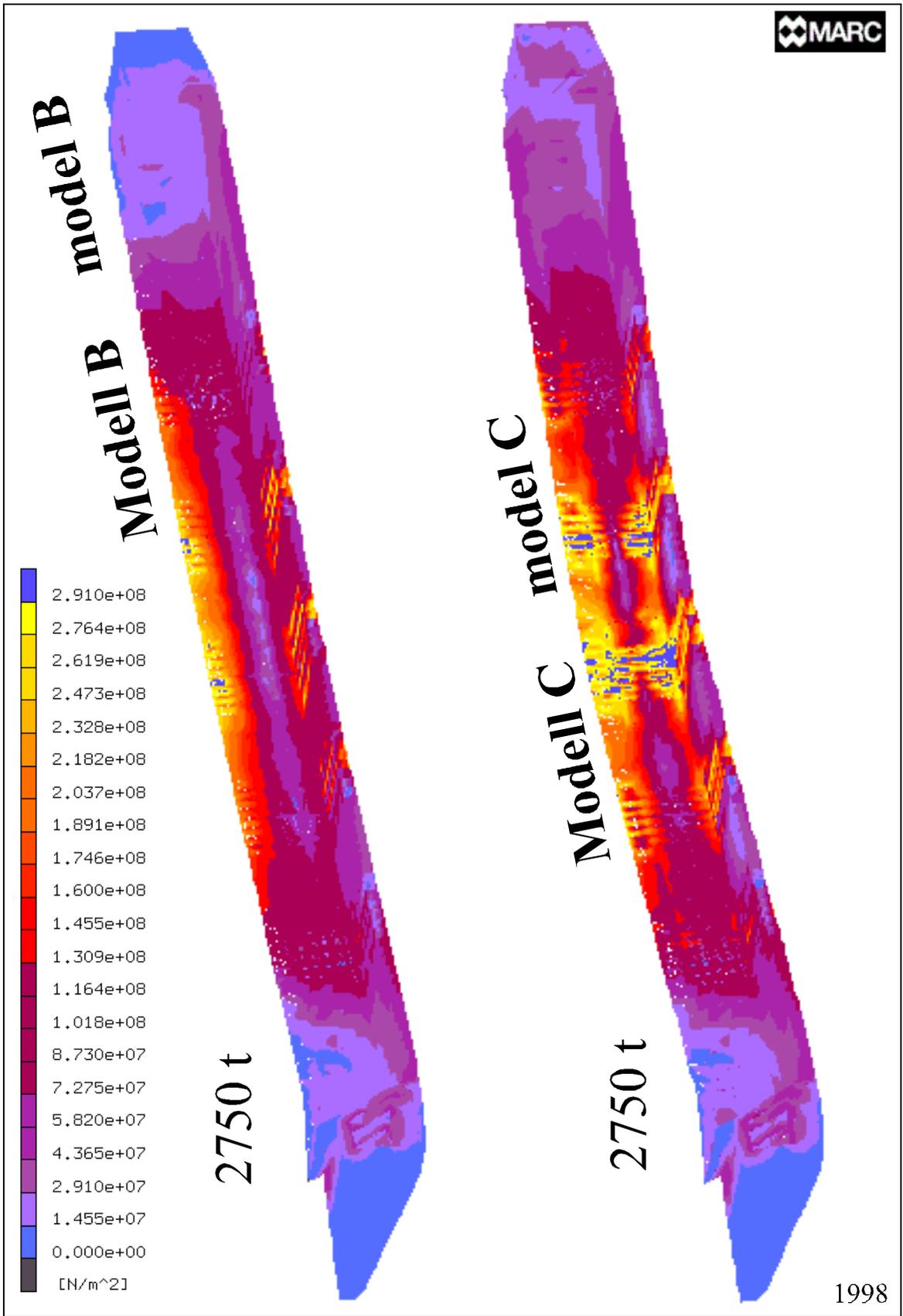


Abb. 7-27: Mises Spannungen des globalen Modells (ld3: Modell B,C)

Fig. 7-27: Mises stress of the global model (ld3: model B,C)

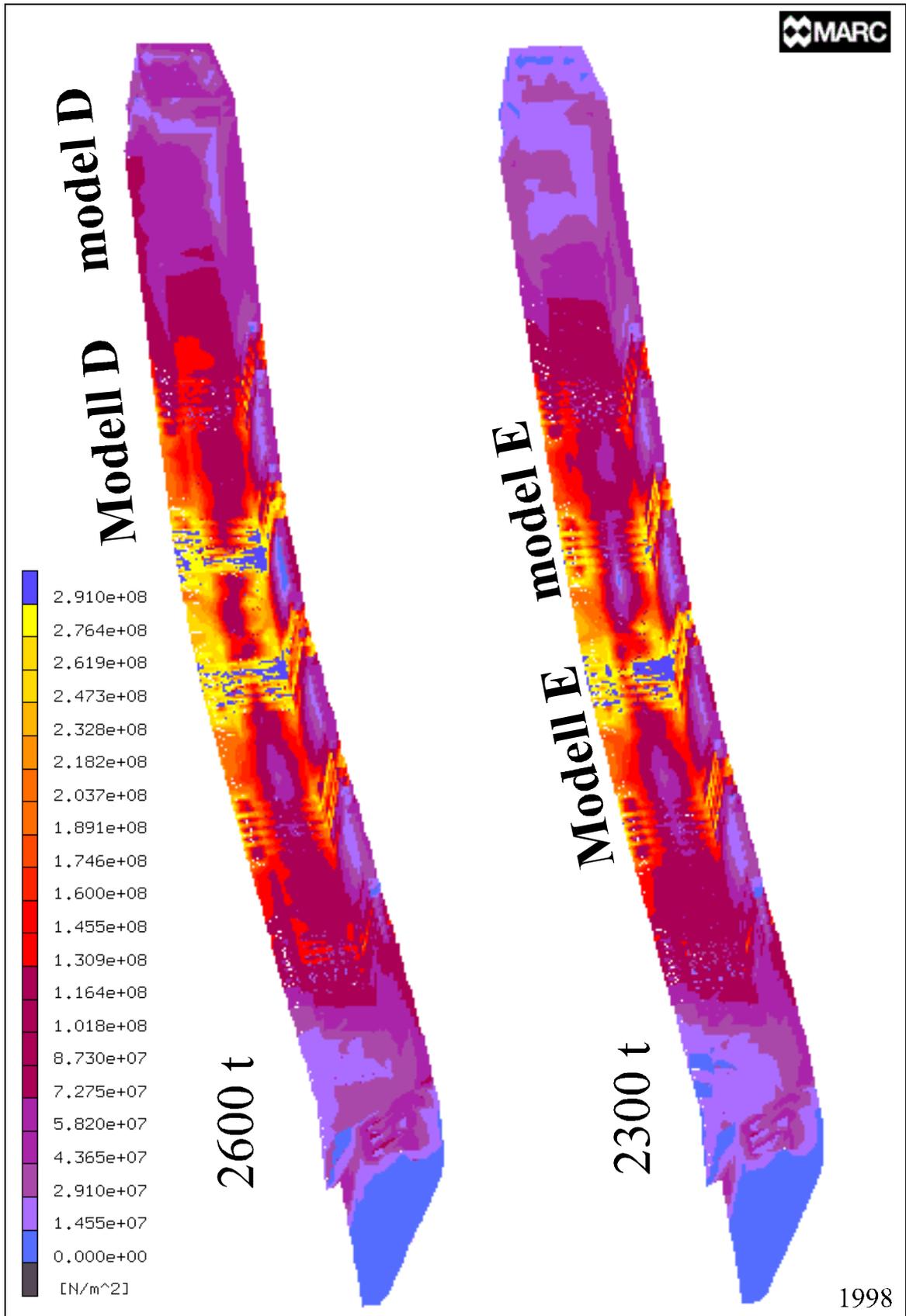


Abb. 7-28: Mises Spannungen des globalen Modells (Id3: Modell D,E)

Fig. 7-28: Mises stress of the global model (Id3: model D,E)

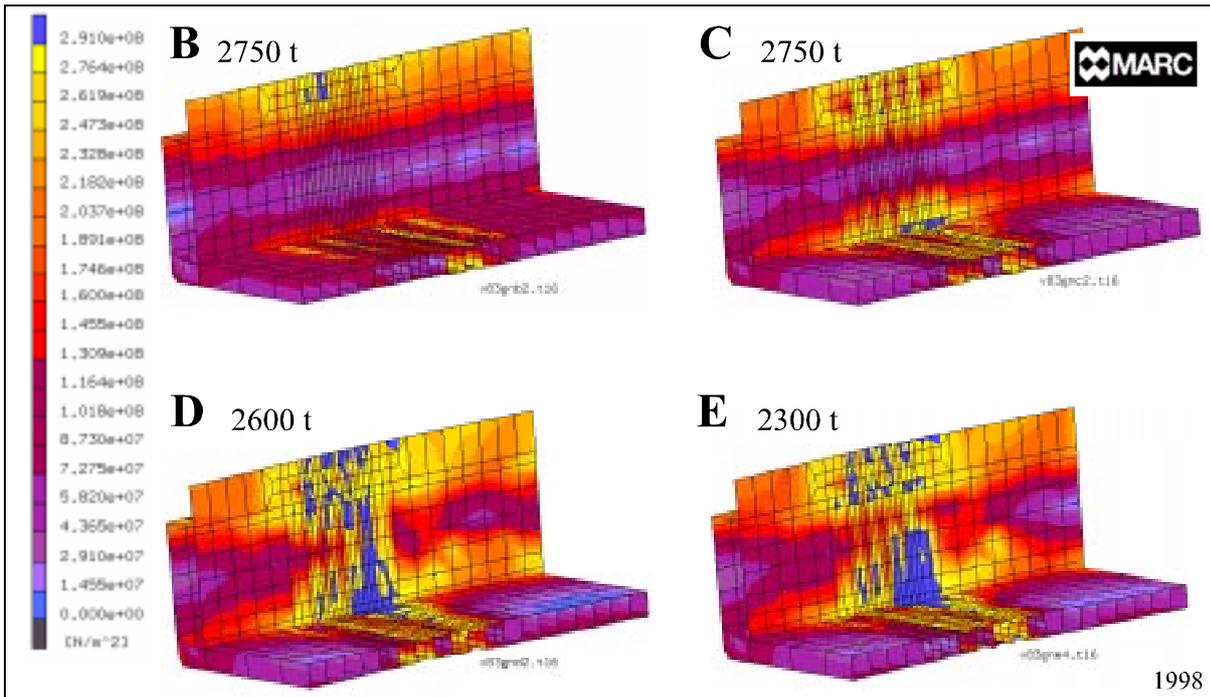


Abb. 7-29: Mises Spannungen des Laderaumsegmentes (ld3: Modell B-E)

Fig. 7-29: Mises stress of the cargo hold section (ld3: model B-E)

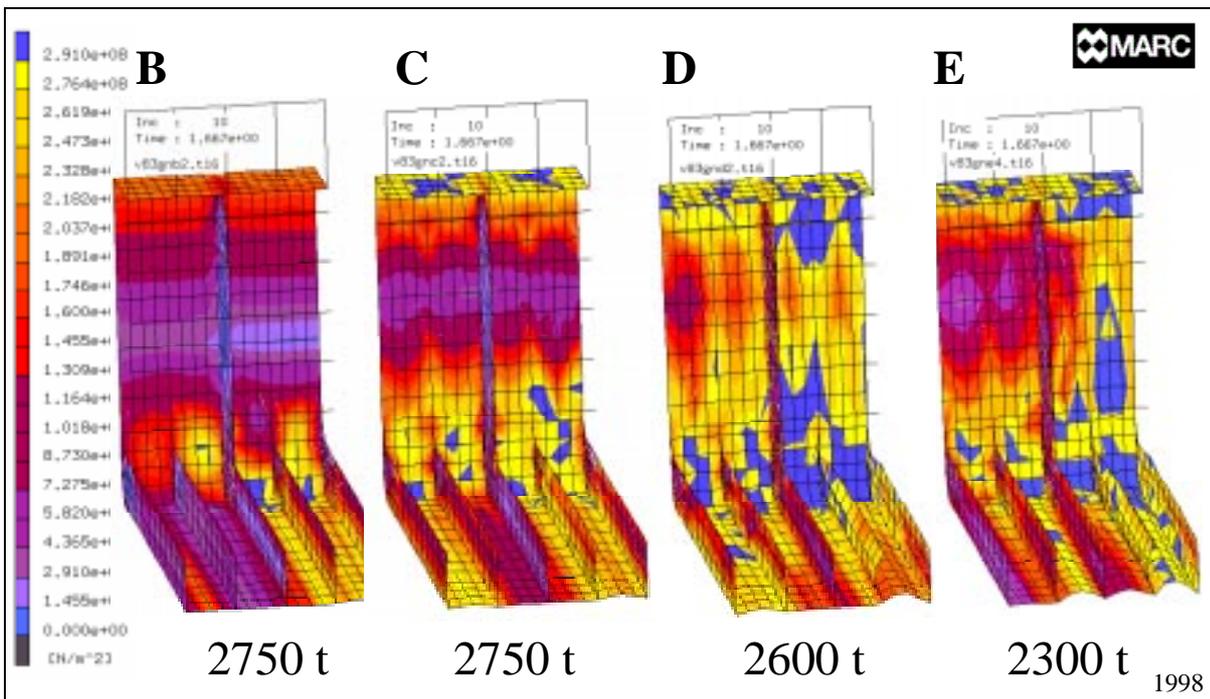


Abb. 7-30: Mises Spannungen des Detailausschnittes (ld3: Modell B-E)

Fig. 7-30: Mises stress of the detail (ld3: model B-E)

Es folgt eine Auswertung der Ergebnisse auf der Basis der berechneten Spannungen. Als Kriterium für ein "Versagen" der Konstruktion dient die erstmalige Überschreitung der Streckgrenze im Dennebaum. Für die vier Modelle sind im Dennebaumprofil die folgenden Spannungen ermittelt worden.

V83	Erreichen der Streckgrenze
Modell B	298,0 N/mm^2 bei 2250 t
Modell C	297,6 N/mm^2 bei 1750 t
Modell D	299,1 N/mm^2 bei 1500 t
Modell E	294,5 N/mm^2 bei 1250 t

Tabelle 7-1: Die ermittelten Spannungen des Schubleichters (Id3: Modell B-E)

Table 7-1: The calculated stress of the pusher barge (Id3: model B-E)

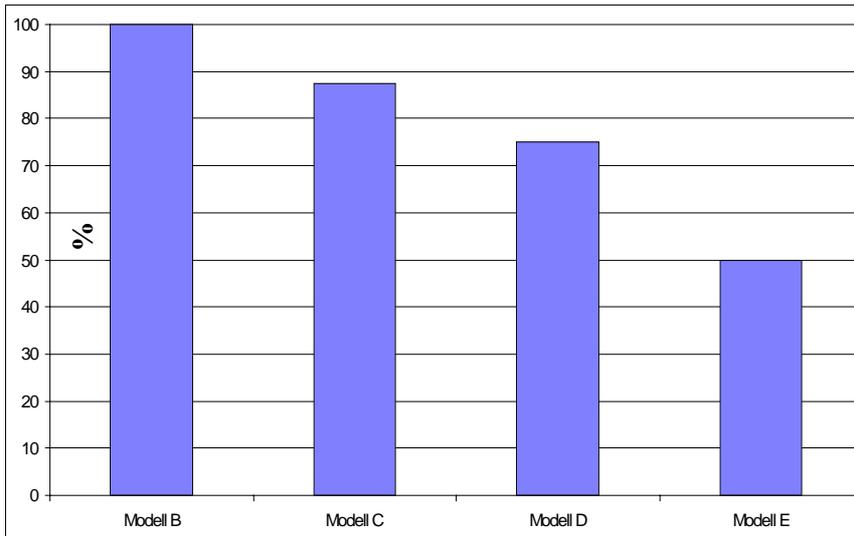


Abb. 7-31: Einfluß der Imperfektionen im prozentualen Vergleich (Id3)

Fig. 7-31: Influence of the imperfections in a percentage comparison (Id3)

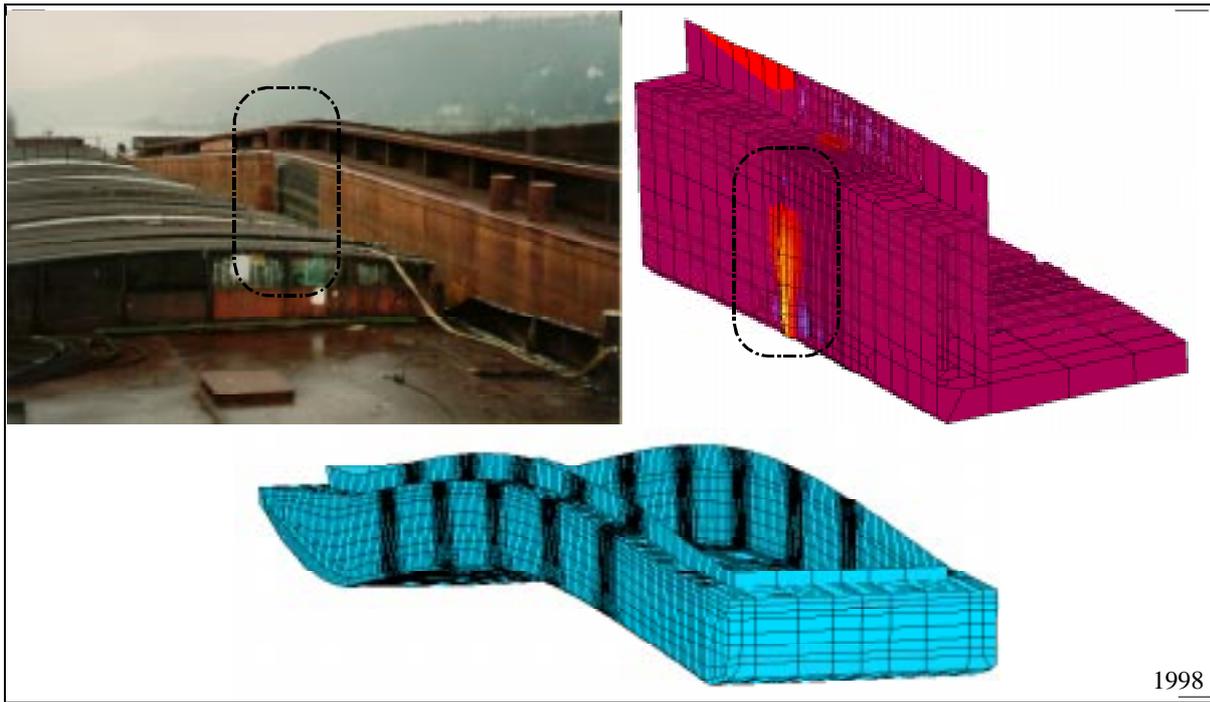
In dem Säulendiagramm ist prozentualer Vergleich der maximalen Beladung ohne Plastizierungen für das große Biegemoment enthalten. Bezogen ist dieser Vergleich auf den Neubauzustand. Die Grafik zeigt, daß nach einer Betriebszeit von 10 Jahren eine Abnahme der maximalen Belastbarkeit (ohne Plastizierungen) von ca. 12 % erfolgt. Nach weiteren 10 Jahren erfolgt eine weitere Reduzierung.

Bemerkenswert ist der drastische Abfall der Tragfähigkeit wenn noch eine Arbeitsfalte berücksichtigt wird.

7.3.6 Auswertung der Ergebnisse

Die Darstellungen dieses Abschnitts bieten einen qualitativen Vergleich der Berechnungsergebnisse mit einem Schadensfall. Unverkennbar auf dem Foto und den FE-Plot der Abb. 7-32 ist die globale Aufbiegung des Leichters. Bemerkenswert ist auch, daß sowohl in dem Praxisbeispiel als auch in der Berechnung an der Außenwand des Leichters eine lokale Faltung zu beobachten ist.

Deutlich sind in beiden Darstellungen der Abb. 7-33 die plastizierenden Bereiche des zugbelasteten Dennebaum und der Trogwand zu erkennen. Diese wirken wie eine Gelenk, wodurch sich die gesamte Struktur entsprechend verformt. Beide Darstellungen zeigen noch einmal deutlich, daß der globale Kollaps des Schubleichters auf eine lokale Überbeanspruchung zurückzuführen ist.



1998

Abb. 7-32: Globale Aufbiegung eines Schubleichters

Fig. 7-32: Global bending of a pusher barge



1998

Abb. 7-33: Plastisches Gelenk im Schubleichter

Fig. 7-33: Plastic joint in the pusher barge

7.4 Berechnungsergebnisse für den Ladefall 4

Die Untersuchungen für den Schubleichter im Ladefall 4 erfolgen ebenfalls für zwei Biegemomente. Aus der Größe und der Verteilung der Ladung in Abb. 7-34 ergibt sich das beanspruchende Biegemoment. Die Variablen x_e und x_f für das gemäßigte und das sehr große Biegemoment werden wie folgt festgelegt:

Gemäßigte Biegemoment:

$$\begin{aligned}x_e &= 11,3 \text{ m} \\x_f &= 60,5 \text{ m}\end{aligned}$$

Große Biegemoment:

$$\begin{aligned}x_e &= 22,1 \text{ m} \\x_f &= 53,3 \text{ m}\end{aligned}$$

Weiter ist in der Grafik das maximal zulässige Biegemoment nach den Vorschriften des Germanischen Lloyd /GLI/ enthalten. Dieses ermittelt sich aus der nachstehenden Gleichung:

Saggingfall S:

$$(-M)_0 = \lambda_3 B H L^2 (1,37 \frac{T}{H} - 0,37) \quad [\text{kNm}]$$

$$\lambda_3 = 0,133; B = 11,40 \text{ m}; H = 4,00 \text{ m}; L = 76,5 \text{ m}, T = 3,98 \text{ m} \quad \Rightarrow (-M)_0 = 35250 \text{ kNm}$$

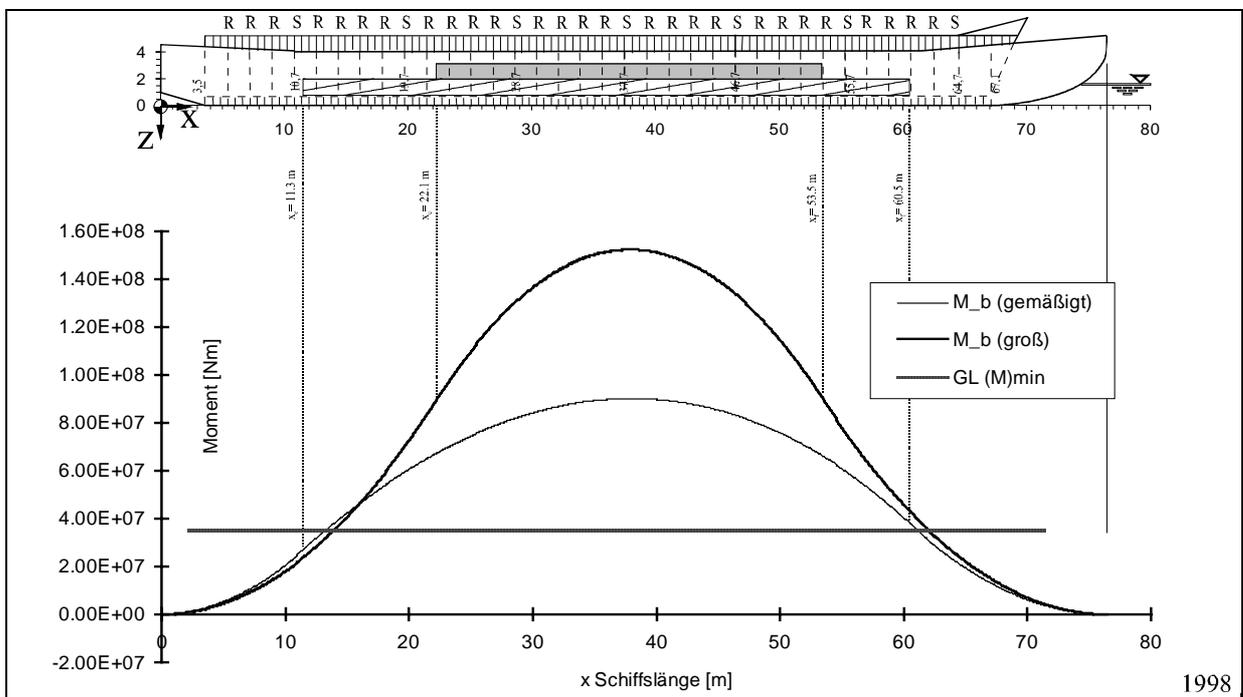


Abb. 7-34: Biegemomentenverlauf für den Ladefall 4

Fig. 7-34: Bending moment of loadcase 4

Wie sehr gut zu erkennen ist, überschreiten beide Biegemomente deutlich (2,56 und 4,3-fache) den zulässigen GL-Wert. Dieses wurde bewußt so gewählt, um das Verhalten des Schiffes unter extremer Belastung zu untersuchen. Bevor die eigentlich FE-Analyse für diese Biegemomente erfolgt, ist zunächst wieder eine Voruntersuchung durchzuführen.

7.4.1 Berechnungsergebnisse der Voruntersuchungen

Für diesen Ladefall erfolgt wieder keine Eigenwertuntersuchung und keine Betrachtung als starrer Körper mehr, da die Verifizierung des FE-Netzes und der Randbedingungen als abgeschlossen angesehen werden kann. Im folgenden wird statt dessen auf einige "Eigenarten" des nichtlinearen FE-Modells eingegangen, welche bei Nichtbeachtung zu numerischen Problemen führt.

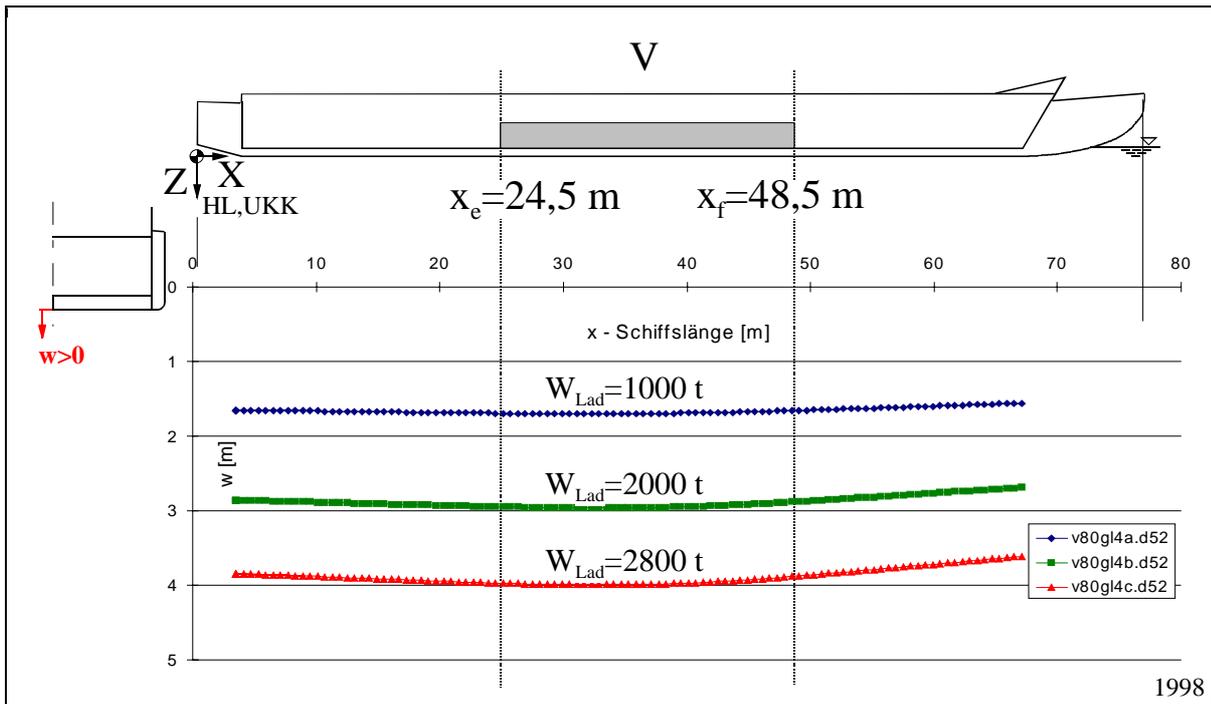


Abb. 7-35: Tiefgang, Trimm und Verformung des Außenbodens (ld4)

Fig. 7-35: Immersion, trim and deformation of the outer bottom (ld4)

In den Voruntersuchungen an dem Grobmodell wird die Belastung in 3 Berechnungsincrementen aufgebracht. In der Darstellung für die Durchbiegung des Außenbodens (Abb. 7-35) wird für die maximale Belastung ein Tiefgang von ca. 4 m erreicht. Dieses entspricht den Angaben der Werft. Die Massenverteilung und die angesetzten Randbedingungen können somit als korrekt angesehen werden.

In der Abb. 7-36 werden die Verformungen des Dennebaums in y-Richtung über der Schiffslänge abgetragen. Ein positiver v_D Wert bedeutet eine Verschiebung der Knoten nach außen. Bis auf den ersten Belastungszustand mit 1000 t können die Ergebnisse als unbrauchbar angesehen werden. Während des Berechnungslaufes traten erhebliche numerische Probleme auf, die auf eine unzureichende Vernetzung zurückzuführen sind. Die dargestellten Ergebnisse konnten nur durch Anhebung der Fehlerschranke in der Gleichgewichtsiteration ermittelt werden. Um brauchbare Ergebnisse zu erhalten, ist ein verfeinertes Modell mit kleineren Lastschritten zu wählen. Der Wert für die Fehlerschranke ist dann wieder auf einen vernünftigen Wert zu senken.

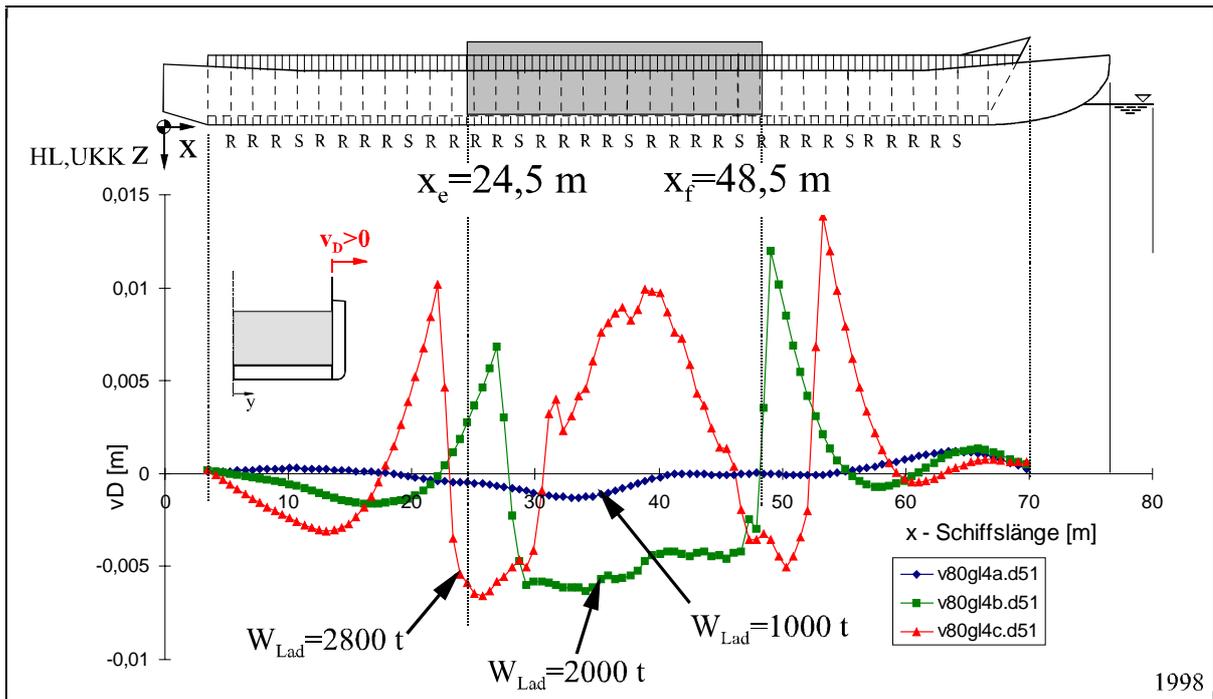


Abb. 7-36: Einbiegung des Dennebaums (ld4)

Fig. 7-36: Deformation of the hatch coaming (ld4)

7.4.2 Verformungen für das gemäßigte Biegemoment

Die Berechnungsergebnisse dieses Abschnittes basieren auf einem FE-Modell in dem physikalische und geometrische Nichtlinearitäten berücksichtigt werden. Die Belastung wird in inkrementellen Schritten bis zur maximalen Tragfähigkeit gesteigert. Das entstehende Biegemoment überschreitet das zulässige GL-Biegemoment um den 2,56 Wert. Dieses wurde so gewählt, um einerseits eine Überbeanspruchung in der Struktur hervorzurufen. Andererseits sind die Belastungen nicht so groß, daß sich ein vorzeitiger Kollaps ergibt. Der Einfluß der Imperfektionen läßt sich sonst nicht mehr betrachten.

In diesem Ladefall 4 ergibt sich für den Doppelboden eine Zug- und für den Dennebaum eine Druckbelastung. In den anschließenden Betrachtungen ist somit den Verformungen des stabilitätsgefährdeten Dennebaums besondere Beachtung zu schenken.

In der Abb. 7-37 sind die Verformungen des Dennebaums über der Schiffslänge abgetragen. Für das leere Schiff ist dieser leicht nach außen geneigt, bei zunehmender Beladung verformt er sich nach innen. Da dieser Effekt bereits erläutert wurde, soll an dieser Stelle nicht weiter darauf eingegangen werden. Mit zunehmender Beladung zeichnet sich im Verformungsverlauf des Dennebaums eine Wellenform ab. Diese Wellenform verdeutlicht die erhöhte Quersteifigkeit an den Stellen mit einem Schott. Deren Position ist in der Grafik wieder durch senkrechte Linien und ein S markiert.

Das Diagramm in der Abb. 7-38 gibt Tiefgang, Trimm und die Verformungen des Außenbodens wieder. Der leere Leichter hat einen Tiefgang von ca. $0,45 \text{ m}$ und biegt sich leicht auf. Mit zunehmender Beladung taucht das Schiff tiefer ein und biegt sich durch. Die Zuladung der letzten beiden Berechnungsinkremente ist relativ klein, da wegen der zunehmenden physikalischen Nichtlinearitäten eine kleinere Schrittweite gewählt werden mußte. Aus diesem Grund liegen die Kurven relativ dicht beieinander. Die Durchbiegung des Leichters beträgt für die maximale Beladung ca. 200 mm .

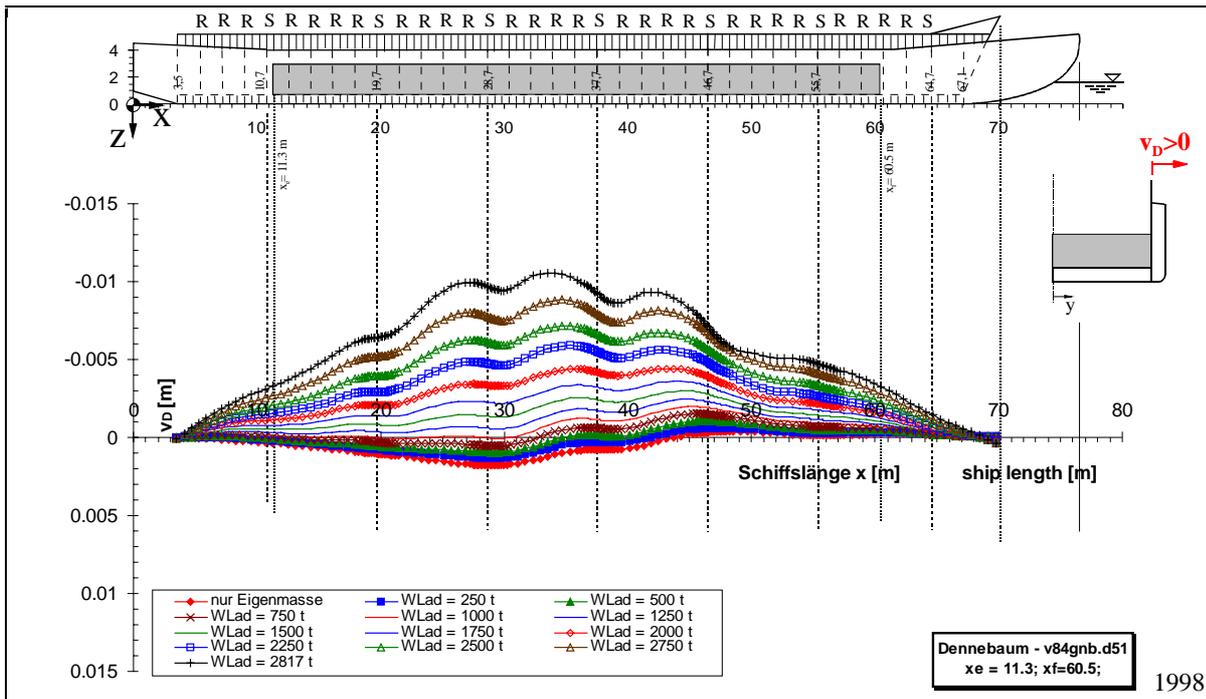


Abb. 7-37: Einbiegung des Dennebaums (ld4: Modell B)

Fig. 7-37: Deformation of the hatch coaming (ld4: model B)

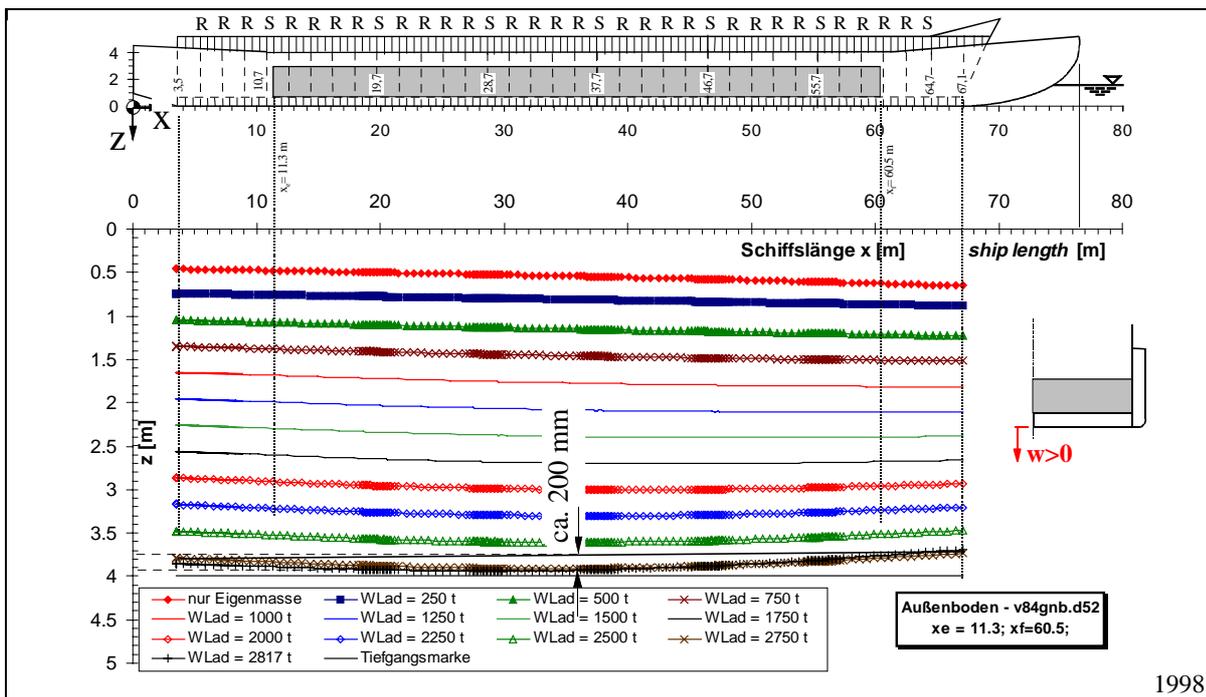


Abb. 7-38: Tiefgang, Trimm und Verformung des Außenbodens (ld4: Modell B)

Fig. 7-38: Immersion, trim and deformation of the outer bottom (ld4: model B)

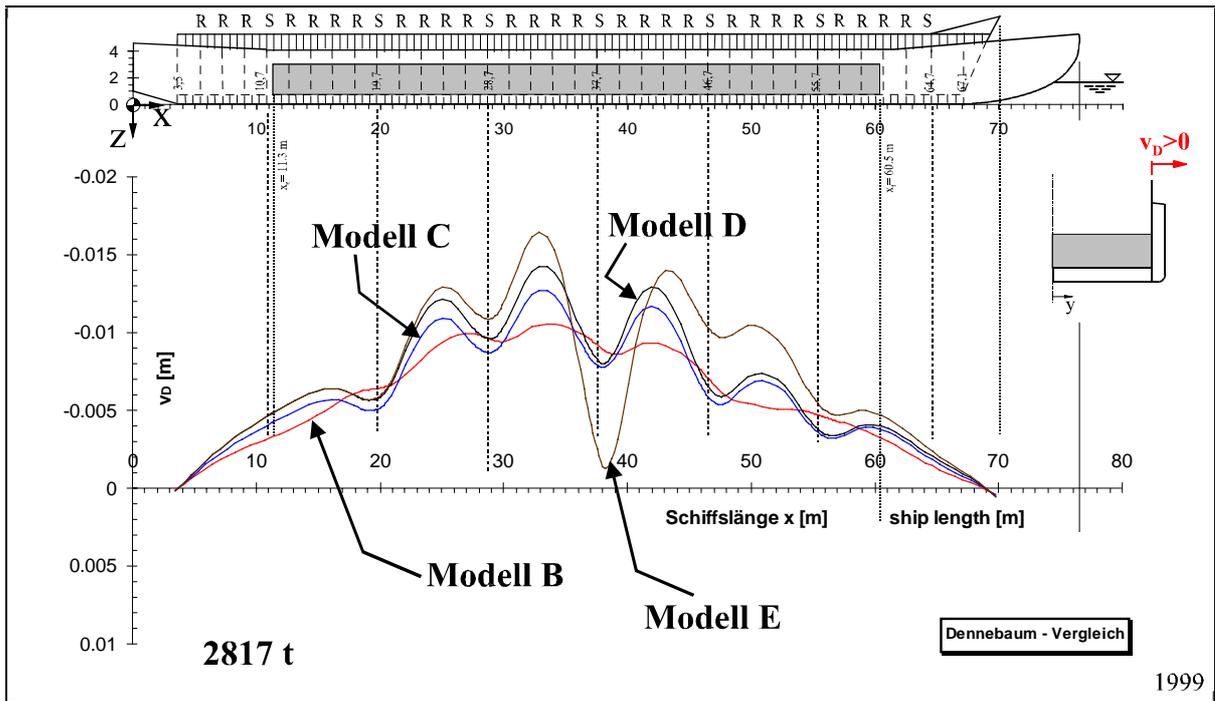


Abb. 7-39: Einbiegung des Dennebaums (ld3: Modell B-E)

Fig. 7-39: Deformation of the hatch coaming (ld3: model B-E)

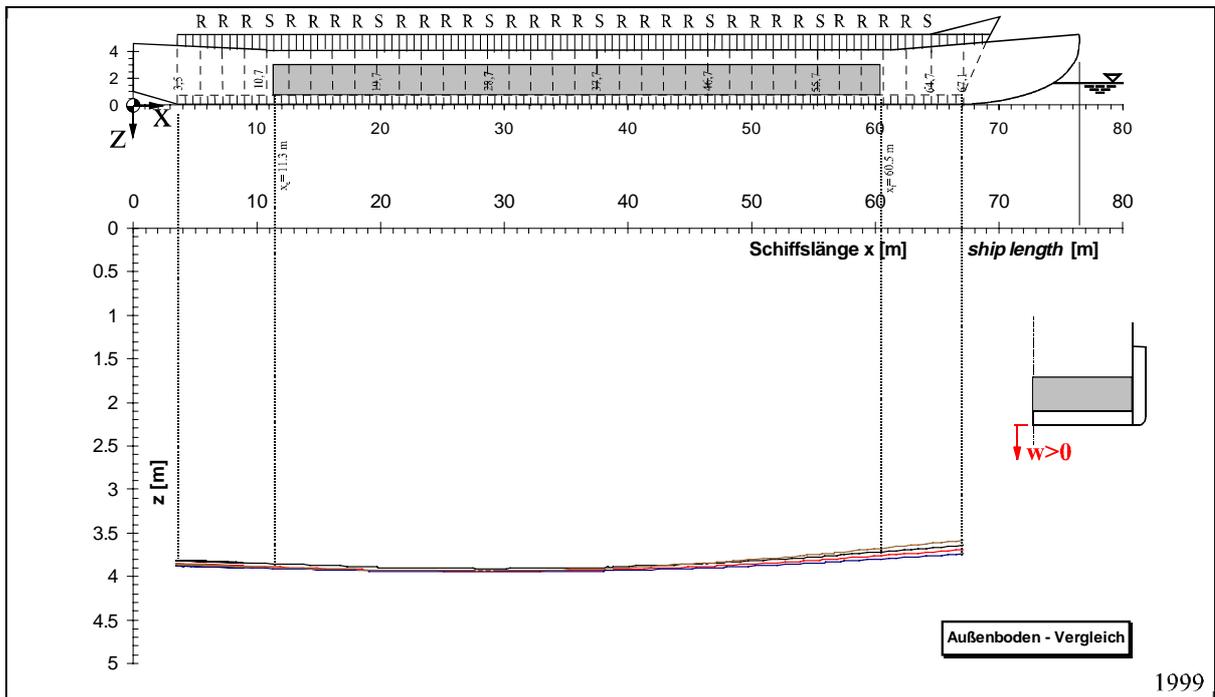


Abb. 7-40: Tiefgang, Trimm und Verformung des Außenbodens (ld3: Modell B-E)

Fig. 7-40: Immersion, trim and deformation of the outer bottom (ld3: model B-E)

Die Grafik der Abb. 7-39 vergleicht die Verformungen des Dennebaums für die Modelle B-E. Mit zunehmenden Alter des Schiffes wird die Wellenform des Dennebaums immer ausgeprägter. Wie sich später noch zeigen

wird, befinden sich die Spannungen bereits im plastischen Bereich. Die Deformationen sind somit (teilweise) bleibende Verformungen. Diese stellen für eine spätere Druckbelastung ungünstige Vorverformungen dar. Im Modell E werden neben den betriebsbedingten Imperfektionen nach 20 Jahren auch noch außergewöhnlich starke Schäden wie z.B. eine starke Vorverformung des Dennebaums berücksichtigt. Dem Kurvenverlauf ist zu entnehmen, daß die Schäden am Modell E im Laufe der Druckbelastung immer weiter anwachsen. Dieses wird am starken Einknicken der Kurve erkennbar. Wie sich für das große Biegemoment noch zeigen wird, können solche lokalen Vorschädigungen zu einem globalen Strukturversagen führen.

Die Abb. 7-40 zeigt wieder die Verformungen des Außenbodens. Verglichen mit den Ergebnissen für das Modell B sind kaum Unterschiede zu erkennen. Es läßt sich daraus folgern, daß die Längsbiegefestigkeit des Schiffes durch die Imperfektionen nur unwesentlich abgenommen hat.

7.4.3 Spannungen für das gemäßigte Biegemoment

Bei dem Vergleich der Spannungsergebnisse sind am globalen Modell und am Laderaumsegment (Abb. 7-41, Abb. 7-42) für die Modelle B,C und D kaum Unterschiede festzustellen. Bei der Betrachtung des Detailausschnittes (Abb. 7-43) fällt allerdings mit zunehmenden Imperfektionen eine deutliche Ausweitung der Gebiete mit hohen Spannungswerten auf. Insbesondere für das vorgeschädigte Modell E erreichen diese in der Kimm und im betroffenen Plattenfeld die Streckgrenze des Materials.

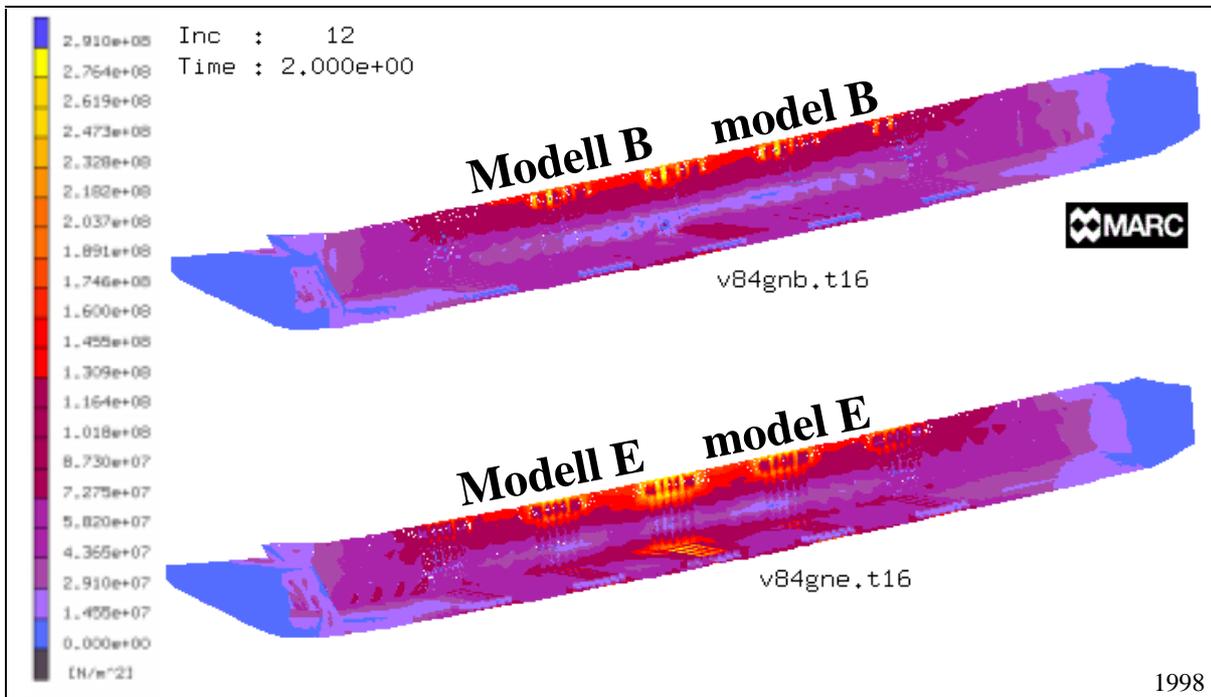


Abb. 7-41: Mises Spannungen des globalen Modells (Id4: Modell B,E)

Fig. 7-41: Mises stress of the global model (Id4: model B,E)

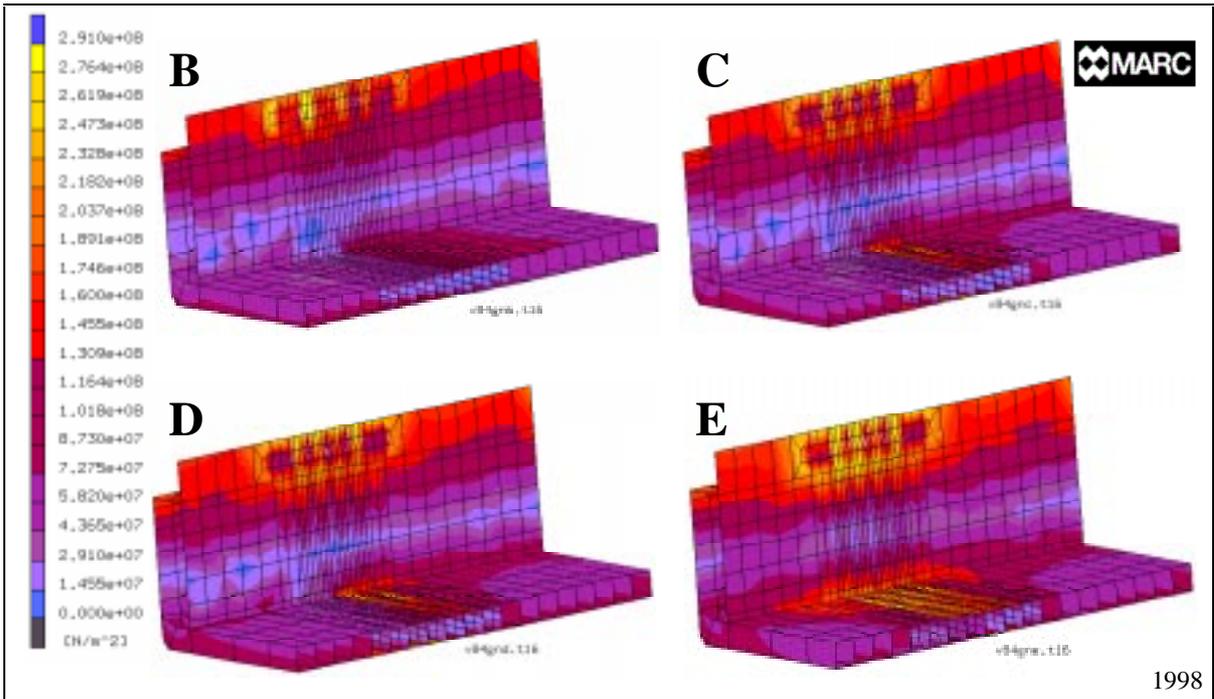


Abb. 7-42: Mises Spannungen des Laderaumsegmentes (ld4: Modell B-E)

Fig. 7-42: Mises stress of the cargo hold section (ld4: model B-E)

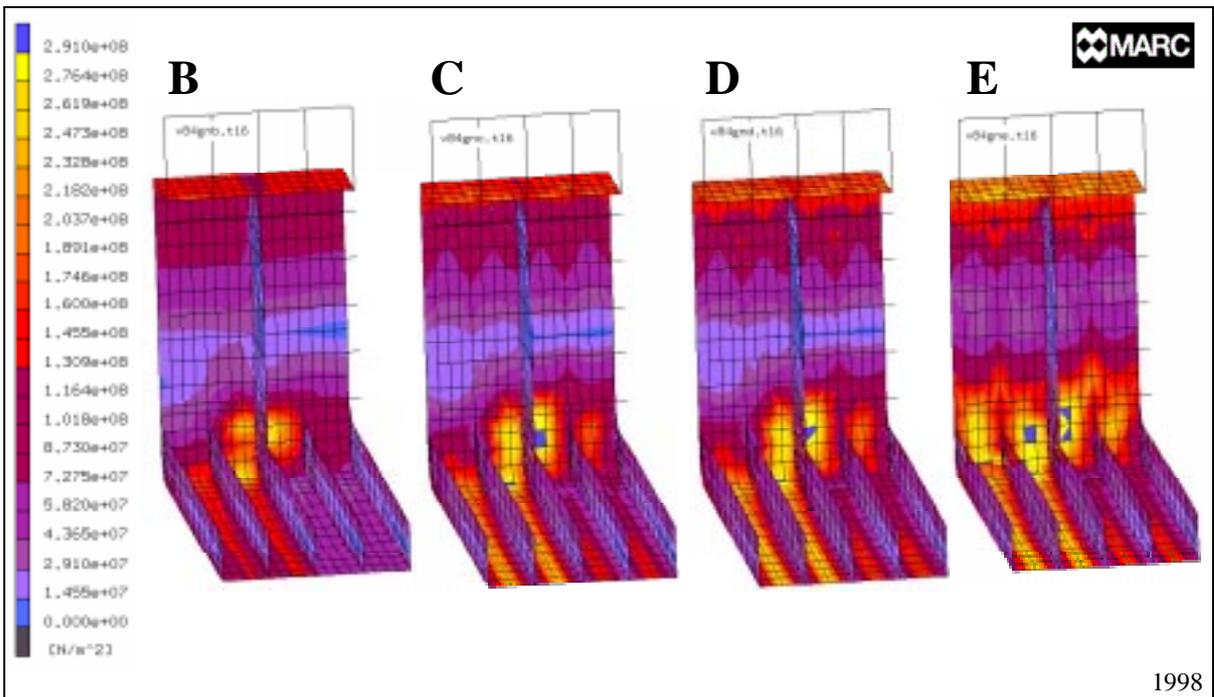


Abb. 7-43: Mises Spannungen des Detailausschnittes (ld4: Modell B-E)

Fig. 7-43: Mises stress of the detail (ld4: model B-E)

7.4.4 Verformungen für das große Biegemoment

Die Berechnungen dieses Abschnittes beruhen auf einem Biegemoment, bei der die zulässige Grenze nach den GL-Vorschriften um den 4,3-fachen Wert überschritten wird. Ein Kollaps der Struktur wird bewußt provoziert.

Die Abb. 7-44 zeigt das Strukturverhalten des Leichters für diese extreme Belastung im Neubauzustand und für das vorgeschädigte Modell. Deutlich wird sichtbar, daß diese Belastung in den ersten Betriebsjahren noch zu keinem globalen Kollaps führt. Für das Modell E ist allerdings ein Versagen der Struktur nicht mehr zu vermeiden.

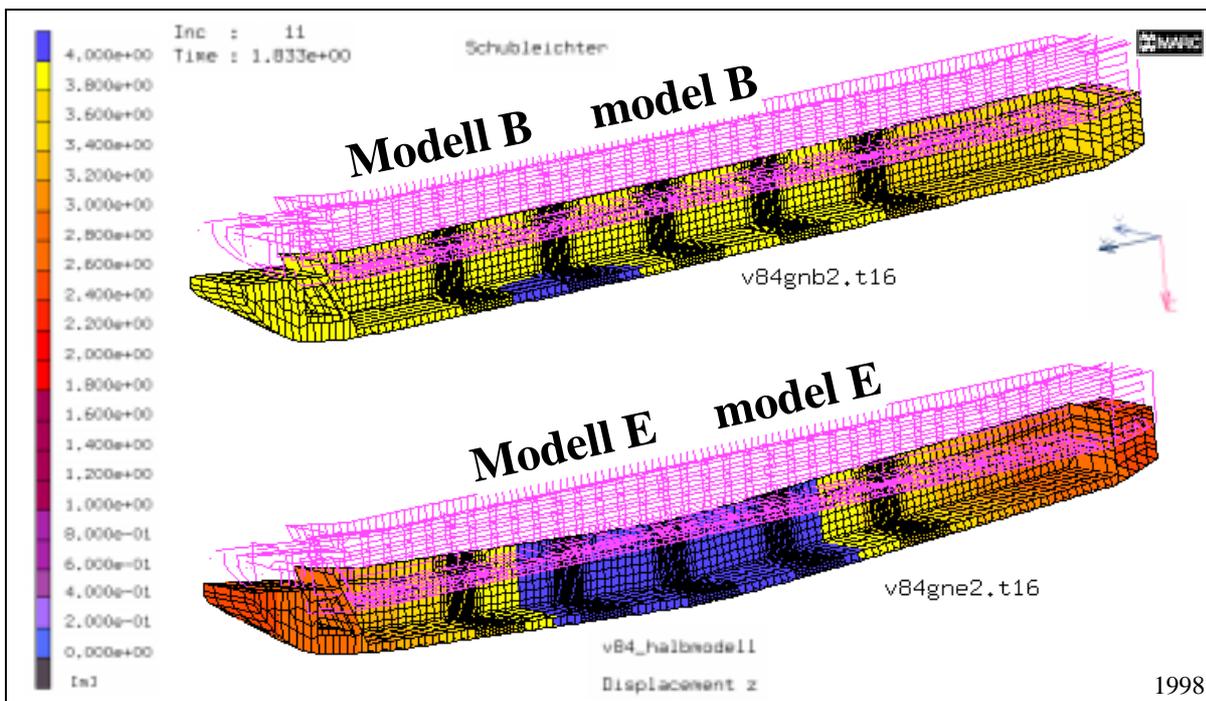


Abb. 7-44: Tiefgang, Trimm und Verformung des globalen Modells (ld4: Modell B,E)

Fig. 7-44: Immersion, trim and deformation of the global model (ld4: model B,E)

Schon im Neubauzustand hat diese extreme Belastung eine entsprechende Auswirkung auf die Durchbiegung des Schiffes. Diese beträgt bei maximaler Beladung für das Schiff ca. 300 mm (Abb. 7-45). Mit zunehmenden Alter wächst aus dieser Belastung die Gefahr des globalen Kollaps.

Das Modell E in Abb. 7-46 repräsentiert neben den Imperfektionen nach 20 Betriebsjahren zusätzlich schwere Schäden an der Struktur. Diese äußern sich im ld4 in lokalen Verformungen des Dennebaums. Da für dieses Modell bei der großen Belastung erhebliche numerische Schwierigkeiten auftraten, mußte die Vernetzung ein weiteres Mal überarbeitet werden. Zusätzlich wurde eine kleinere Schrittweite bei der Belastungssteigerung gewählt. Um das lokale Versagen des Dennebaumprofil erfassen zu können, wurden für dieses Bauteil Schalen- anstatt der sonst üblichen Balkenelemente verwendet (siehe Abb. 7-54).

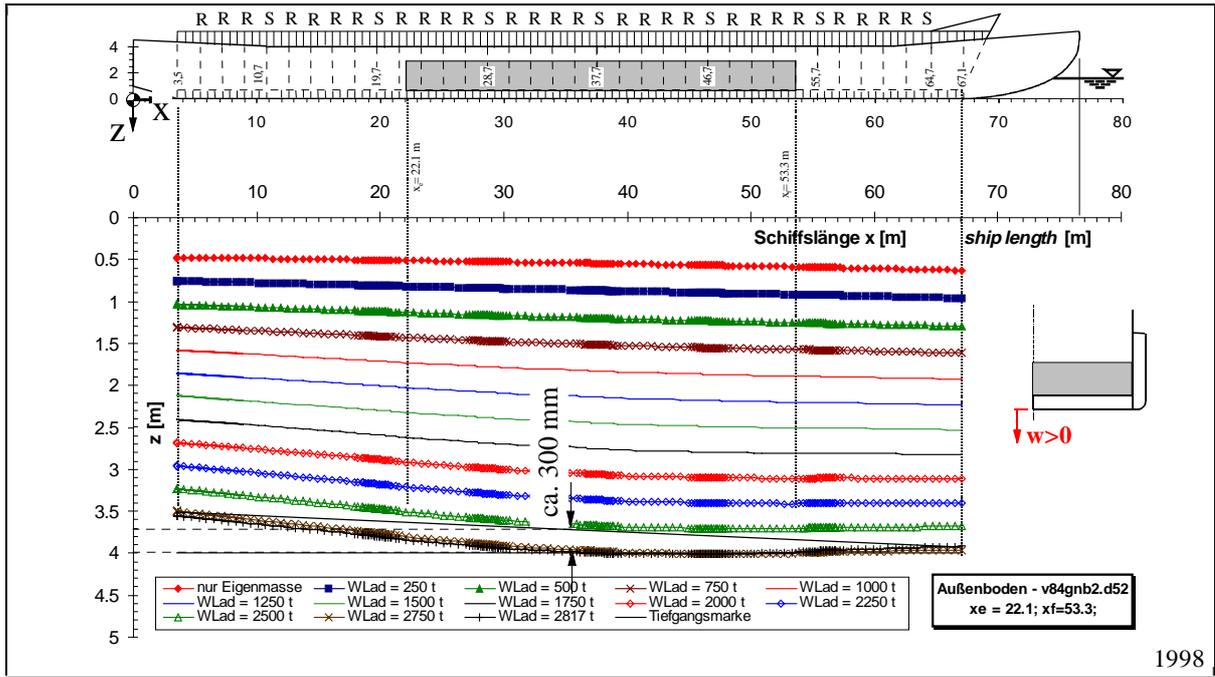


Abb. 7-45: Tiefgang, Trimm und Verformung des Außenbodens (ld4: Modell B)

Fig. 7-45: Immersion, trim and deformation of the outer bottom (ld4: model B)

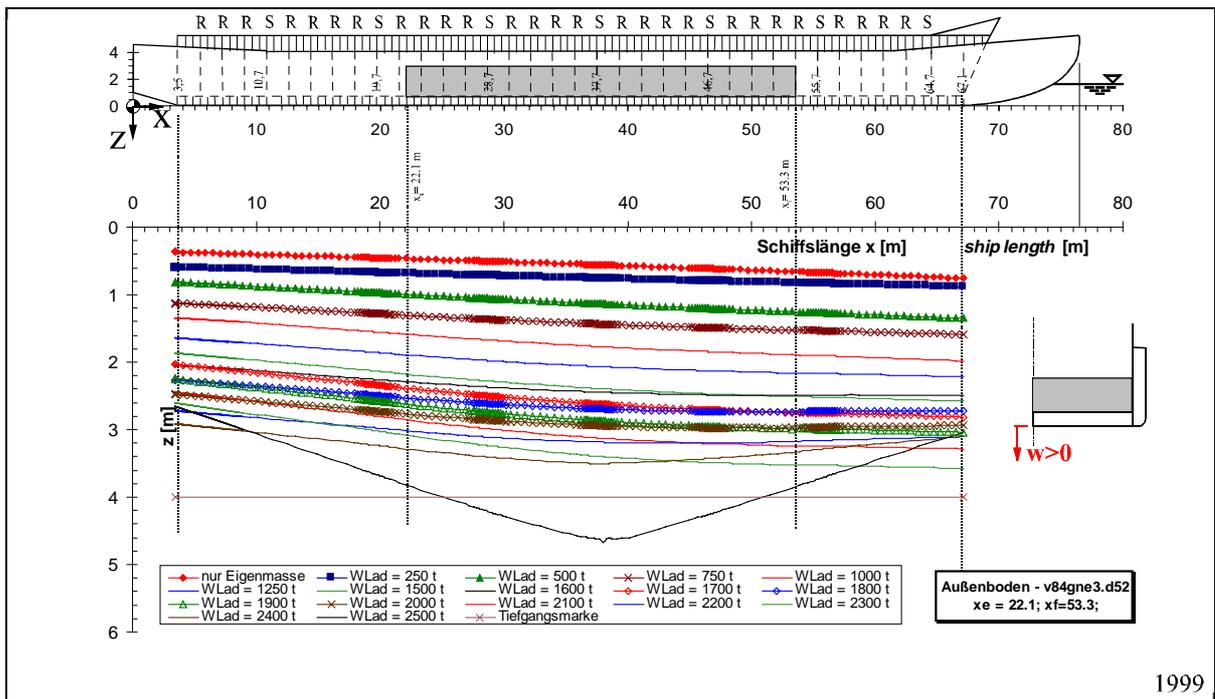


Abb. 7-46: Tiefgang, Trimm und Verformung des Außenbodens (ld4: Modell E)

Fig. 7-46: Immersion, trim and deformation of the outer bottom (ld4: model E)

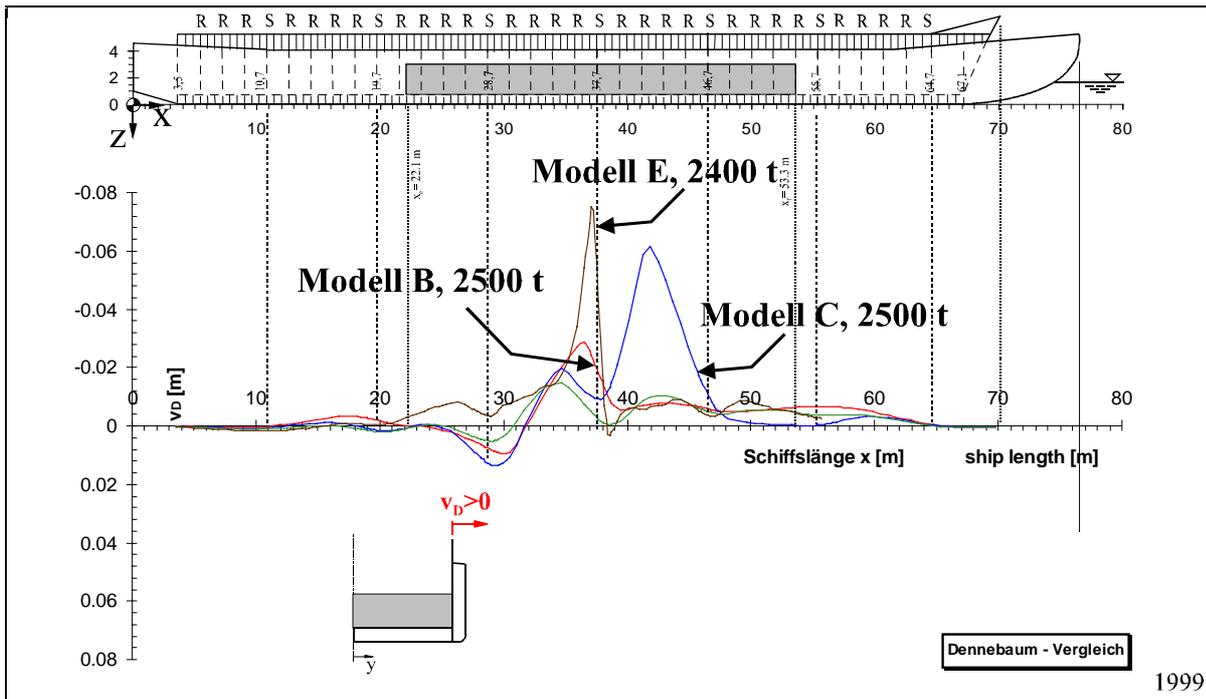


Abb. 7-47: Einbiegung des Dennebaums (ld4: Modell B-E)

Fig. 7-47: Deformation of the hatch coaming (ld4: model B-E)

Der erkennbare globale Kollaps des Leichters wird von einem lokalen Versagen des druckbelasteten Dennebaum begleitet. Die großen Verformungen des Dennebaums in der Abb. 7-47 sind als Versagen der Strukturstabilität zu deuten. Sehr gut zu erkennen ist dies ebenfalls in der Abb. 7-50 und Abb. 7-51.

Bei genauerer Betrachtung der Dennebaumverformungen fällt allerdings auf, daß diese auch für den Neubauzustand nicht unerheblich sind. Sie erreichen in der Schiffsmitte einen Wert von ca. 30 mm. Nach 10 Jahren steigt dieser Wert auf 60 mm. Die Spannungen befinden sich zum Teil im plastischen Bereich (Abb. 7-48), so daß mit bleibenden Verformungen zu rechnen ist.

7.4.5 Spannungen für das große Biegemoment

In den Abb. 7-48 bis Abb. 7-51 ist die Mises Vergleichsspannung am Schubleichter für das große Biegemoment dargestellt. In diesen Farbplots wird der Einfluß der Imperfektionen sehr deutlich. Die gelbe Farbe signalisiert das Erreichen der Streckgrenze des Materials. Die blauen Gebiete stehen für eine Überschreitung dieser Spannung, so daß hier Plastizierungen auftreten.

Im Neubauzustand (Modell B) kann die Schiffskonstruktion die enormen Belastungen noch relativ gut verkraften. Die Spannungen erreichen zwar an einigen Stellen (Sitz der Schotte) das Niveau der Streckgrenze, ein augenfälliges Versagen einzelner Bauteile ist jedoch nicht zu beobachten.

Bei gleicher Belastung entwickeln sich nach einer Betriebszeit von 10 Jahren (Modell C) größere Bereiche mit Plastizierungen. Auf den ersten Blick ist es vielleicht überraschend, daß diese nicht im Dennebaum sondern am Übergang von Trogwand zum Gangbord auftreten. Dieses liegt daran, daß der Dennebaum seitlich ausweicht und daher etwas "weicher" als der Wallgang wird.

Besonders deutlich wird dies bei der Betrachtung des Zustandes nach 20 Jahren. Zwar weiten sich auch die Plastizierungszone im Dennebaum aus, besonders großflächig gilt dies aber für Gangbord und Außenwand (Abb. 7-51 Modell D).

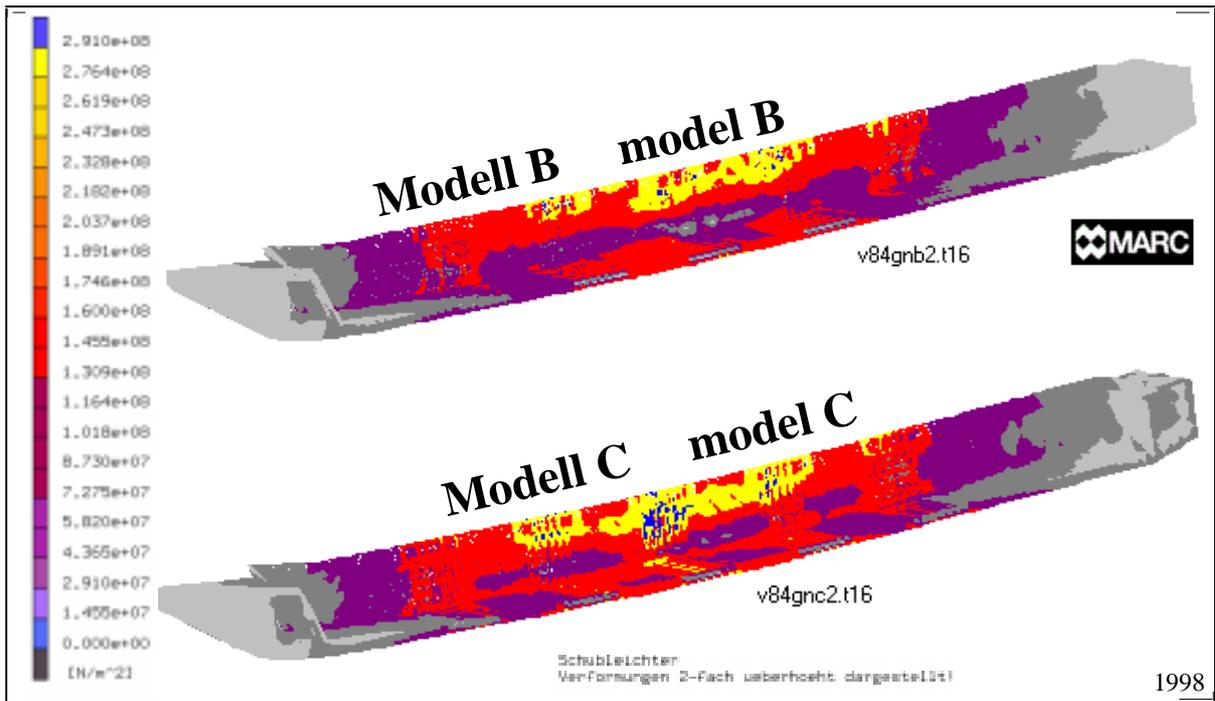


Abb. 7-48: Mises Spannungen des globalen Modells (Id4: Modell B,C)

Fig. 7-48: Mises stress of the global model (Id4: model B,C)

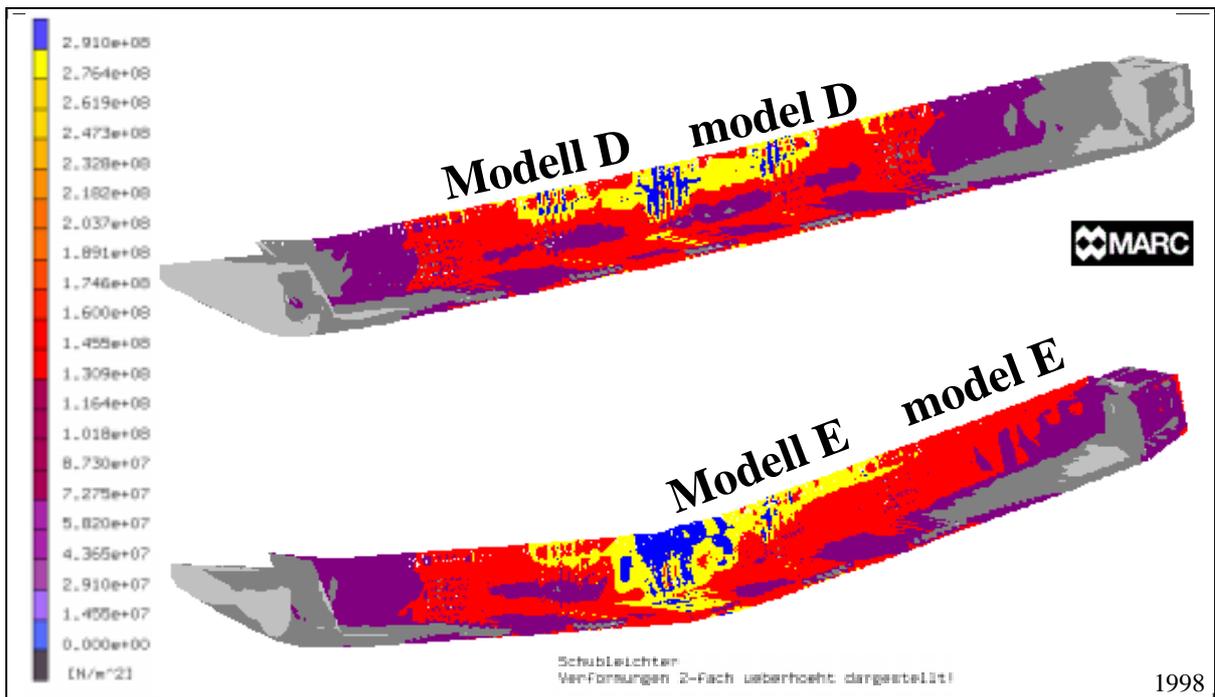


Abb. 7-49: Mises Spannungen des globalen Modells (Id4: Modell D,E)

Fig. 7-49: Mises stress of the global model (Id4: model D,E)

Zu einem völligen Versagen der Konstruktion fehlt nur noch eine lokale Bauteilschädigung, wie diese am Dennebaum im Modell E enthalten ist. Dergleichen führt zu einem Ausweichen des Dennebaum (Abb. 7-50) sowie Beulen im Gangbord (Abb. 7-51) und der Außenwand. Da somit im Mittschiffsbereich kaum noch eine Längs-

biegesteifigkeit vorhanden ist, versagt die komplette Struktur. Deutlich ist in der Abb. 7-49 zu erkennen, daß in Schiffsmitte der komplette Wallgang durchplastiziert ist.

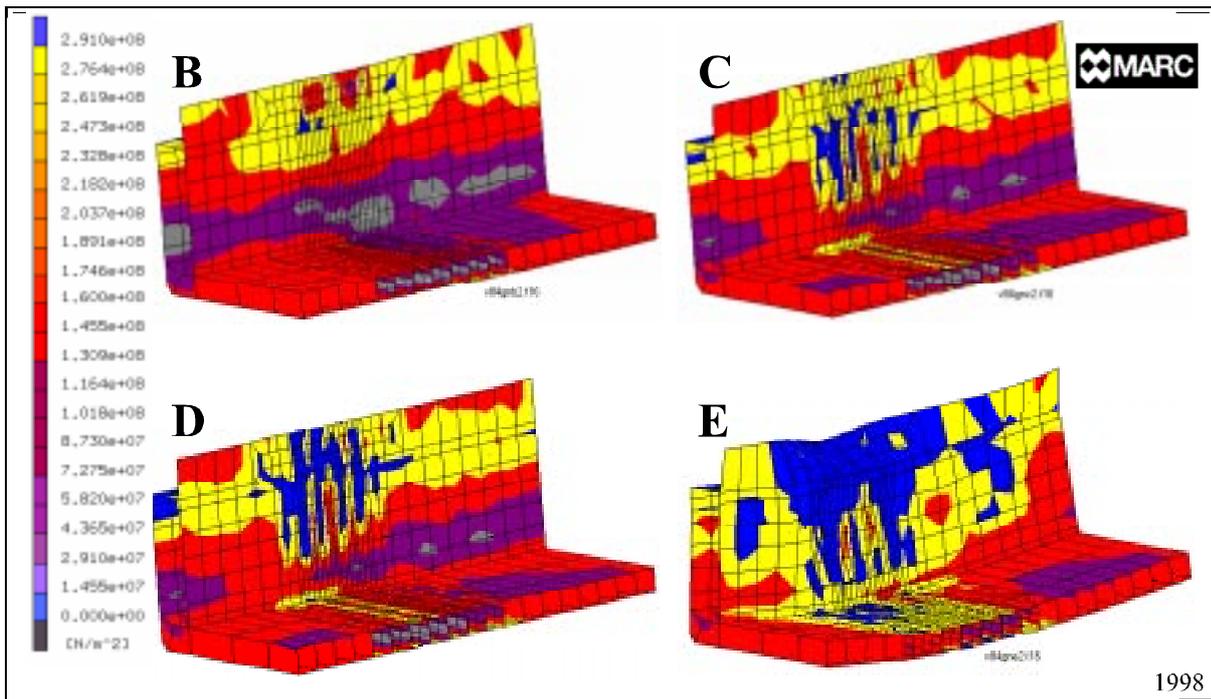


Abb. 7-50: Mises Spannungen des Laderaumsegmentes (Id4: Modell B-E)

Fig. 7-50: Mises stress of the cargo hold section (Id4: model B-E)

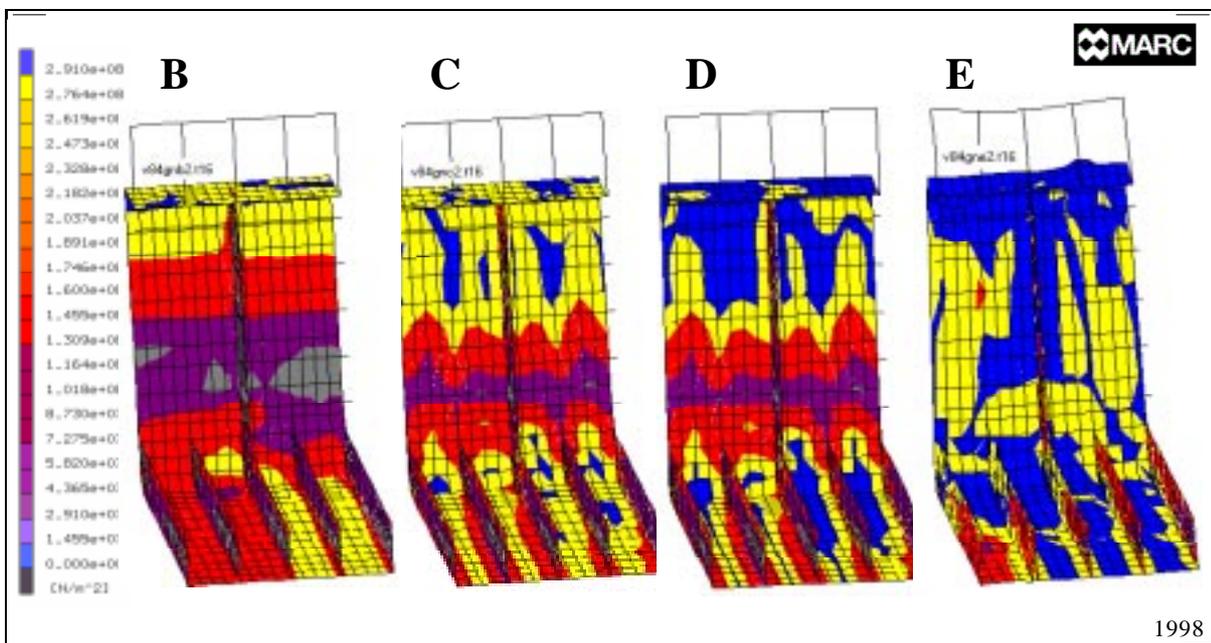


Abb. 7-51: Mises Spannungen des Detailausschnittes (Id4: Modell B-E)

Fig. 7-51: Mises stress of the detail (Id4: model B-E)

Die Auswertung der Ergebnisse erfolgt auf der Basis der berechneten Spannungen. Als Kriterium für ein "Versagen" der Konstruktion dient wieder die erstmalige Überschreitung der Streckgrenze im Dennebaum. Für die vier Modelle sind im Dennebaumprofil die folgenden Spannungen ermittelt worden.

V84	Erreichen der Streckgrenze
Modell B	294,3 N/mm^2 bei 2000 t
Modell C	308,2 N/mm^2 bei 1750 t
Modell D	296,1 N/mm^2 bei 1500 t
Modell E	301,8 N/mm^2 bei 1500 t

Tabelle 7-2: Die ermittelten Spannungen des Schubleichters (ld4: Modell B-E)

Table 7-2: The calculated stress of the pusher barge (ld4: model B-E)

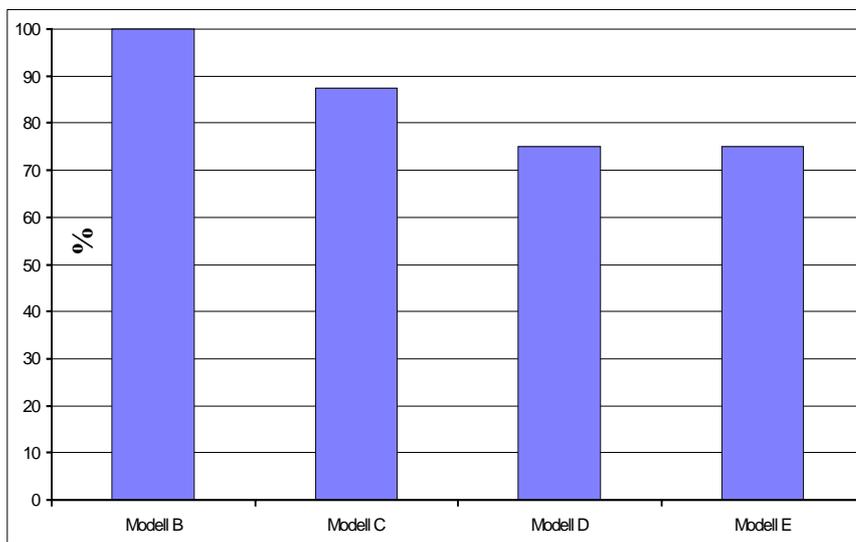


Abb. 7-52: Einfluß der Imperfektionen im prozentualen Vergleich (ld3)

Fig. 7-52: Influence of the imperfections in a percentage comparison (ld3)

In dem Säulendiagramm ist ein prozentualer Vergleich der maximalen Beladung ohne Plastizierungen für das große Biegemoment enthalten. Bezogen ist dieser Vergleich auf den Neubauzustand. Die Grafik zeigt, daß nach einer Betriebszeit von 10 Jahren eine Abnahme der maximalen Belastbarkeit (ohne Plastizierungen) von ca. 12 % erfolgt.

Für das Modell E werden zusätzlich starke Deformationen des Dennebaum berücksichtigt. Diese Vorverformungen verursachen keine vorzeitigen Plastizierungen im Dennebaum,

dafür aber einen deutlichen Verlust der Reserven oberhalb der Grenze zur Plastizierung.

7.4.6 Auswertung der Ergebnisse

In den weiteren Abbildungen erfolgt der direkte Vergleich eines Schadensfalles aus der Praxis mit den entsprechenden Berechnungsergebnissen. So ist in der Abb. 7-53 der globale Kollaps eines Schubleichters dargestellt. Das Foto wurde von einem Leichter gemacht, der sich durch schwere Stückgutladung in der Mitte zusammengefaltet hat und gesunken ist. Die Ähnlichkeit der Berechnungsergebnisse an dem Schubleichter im Ladefall 4 mit dem Foto ist unverkennbar.

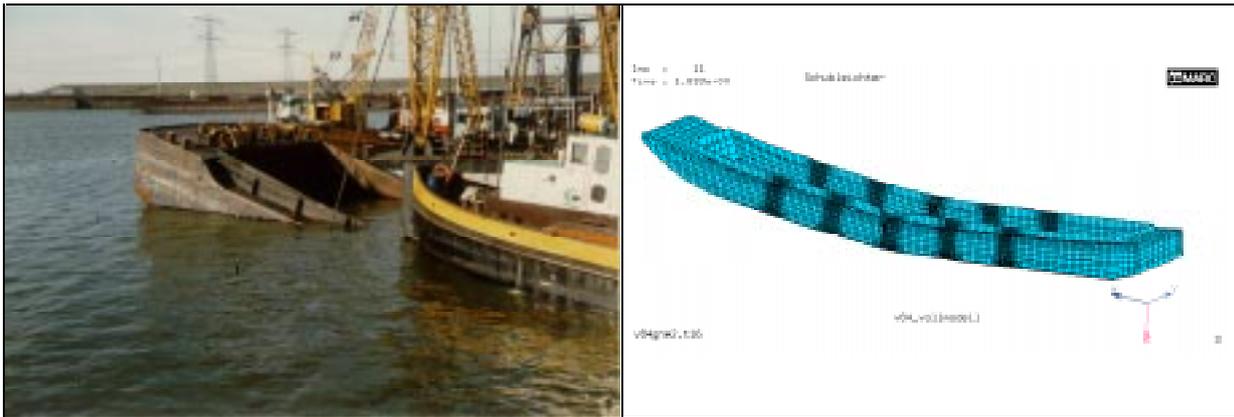


Abb. 7-53: Sagging Kollaps eines Schubleichters

Fig. 7-53: Sagging collapse of a pusher barge

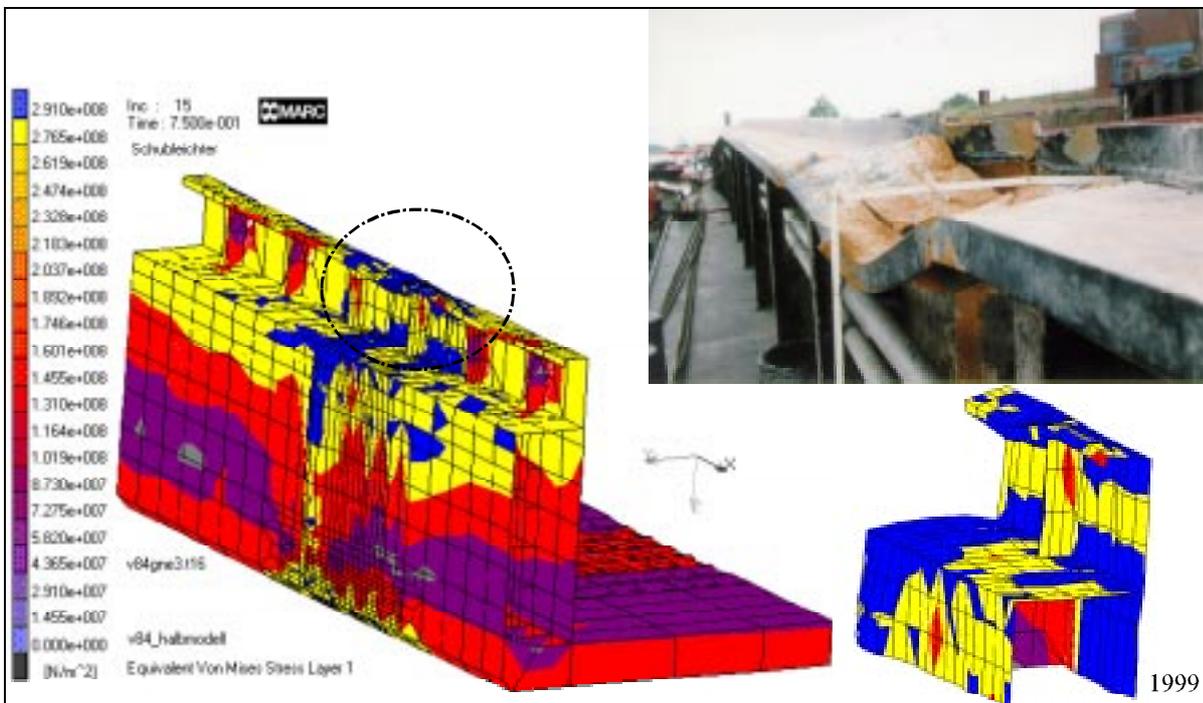


Abb. 7-54: Strukturschäden am Dennebaum

Fig. 7-54: Structure damages at the hatch coaming

Die Abb. 7-54 zeigt den Dennebaum und das Dennebaumprofil nach einer Überbelastung. Das Ausknicken des Dennebaum ist auf dem Foto und auf dem FE-Plot deutlich zu erkennen. Das lokale Ausweichen des Dennebaumprofils konnte in der FE-Rechnung erst erfaßt werden, nachdem dieser über Schalenelemente modelliert wurde.

Ein weiterer lokaler Schaden bezieht sich auf die Verformungen des Gangbords in der Abb. 7-55. Um für zukünftige Berechnungen das auf dem Foto erkennbare Einreißen der Außenwand erfassen zu können, sind für den FE-Code noch entsprechende Weiterentwicklungen zu betreiben.

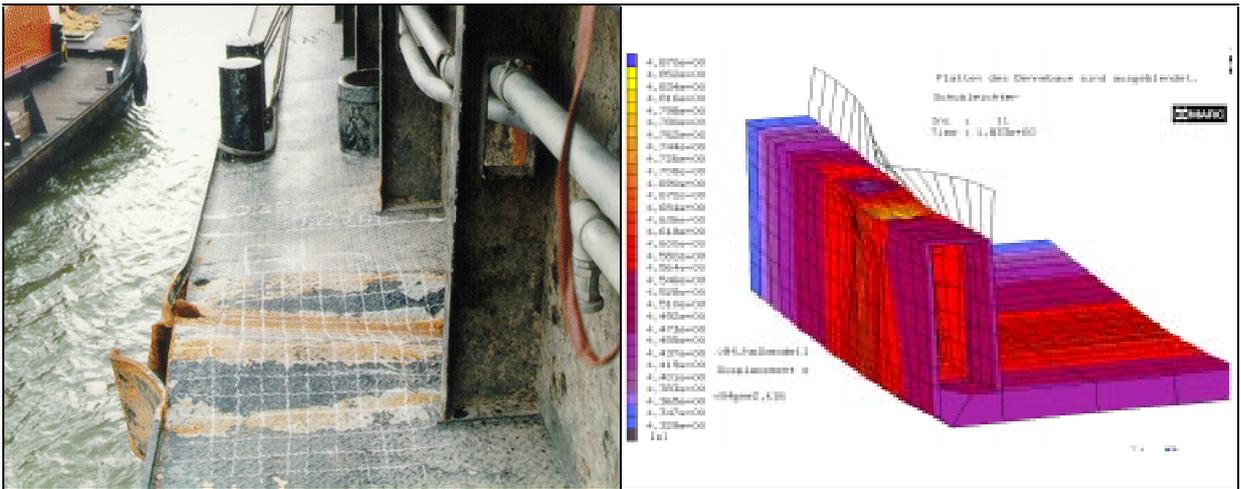


Abb. 7-55: Strukturschäden im Gangbord

Fig. 7-55: Structure damages at the gangway

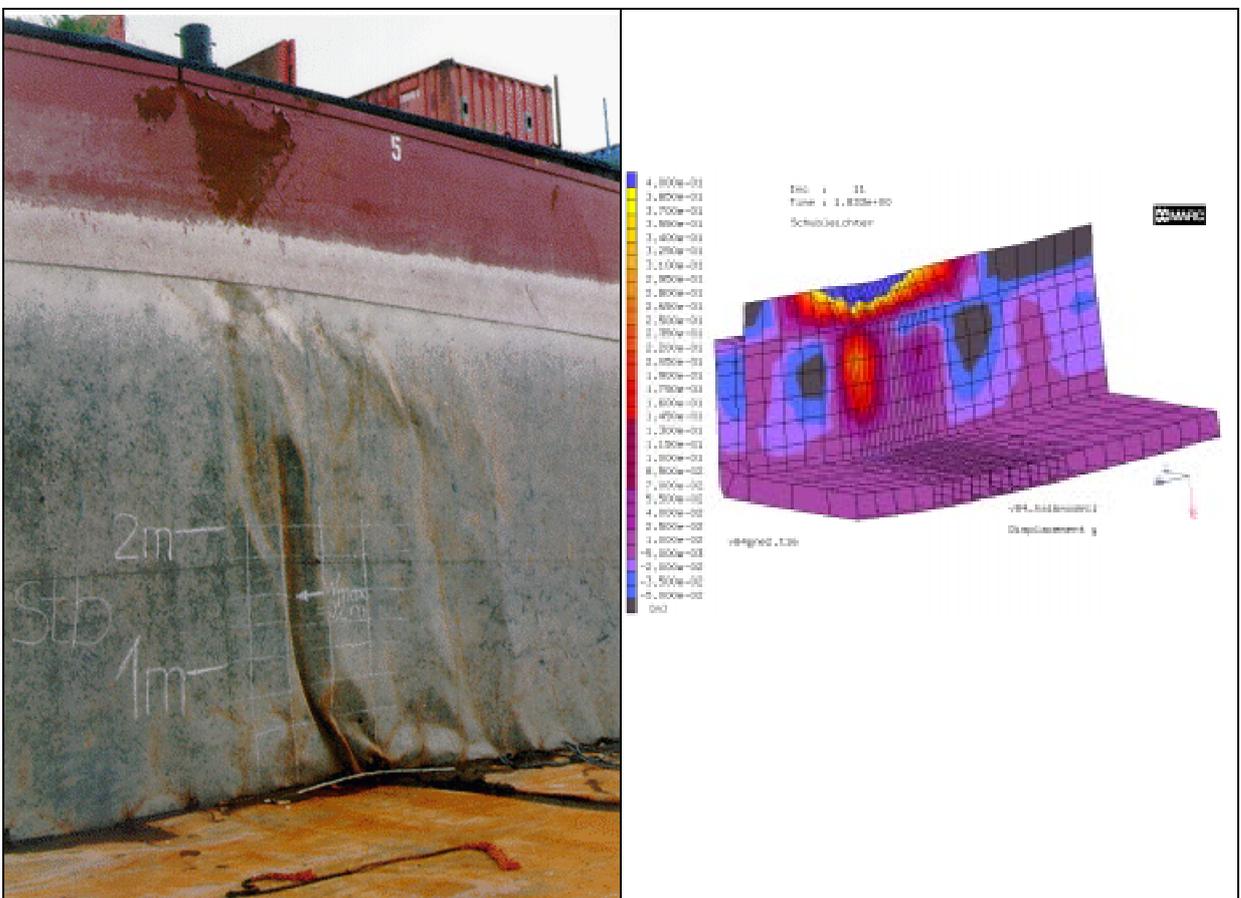


Abb. 7-56: Strukturschäden in der Trogwand

Fig. 7-56: Structure damages at the trough side

Die Abb. 7-56 zieht Parallelen zwischen den plastischen Deformationen der Trogwand anhand eines Praxisbeispiels und der numerischen Ergebnisse. Auch hier ist eine Gleichartigkeit nicht zu übersehen.

7.5 Berechnungsergebnisse für den Ladefall 5

Wie schon in Kapitel 3 erwähnt, ist für Schubleichter die Ladung von Schüttgut nicht selten. In dem nun behandelten Abschnitt werden die Belastungen einer Erzladung untersucht.

Da die Beanspruchungen durch eine Kiesladung (ld6) deutlich geringer sind, wird auf deren Behandlung in dieser Arbeit verzichtet.

7.5.1 Verformungen

In den Farbplots der Abb. 7-57 werden der Tiefgang, der Trimm und die globalen Verformungen des Schiffskörpers maßstabsgerecht wiedergegeben. Auf dem Innenboden wird die Druckverteilung für diesen Ladefall 5 im Laderaum erkennbar. Dargestellt sind 3, 6, 9 und 12 Erzkegel. Deutlich ist zu erkennen, wie sich die Schwimmelage des Leichters der eingebrachten Beladung anpaßt.

In der Abb. 7-58 werden die Verformungen des Dennebaums in y-Richtung über der Schiffslänge abgetragen. Ein positiver v_D Wert bedeutet eine Verschiebung der Knoten nach außen. Der Dennebaum des leeren Leichters ist wieder leicht nach außen geneigt. Mit dem Einbringen der Ladung verformt sich der Dennebaum zunehmend nach innen. Bei maximaler Beladung ist der Dennebaum mit einer Auslenkung von ca. 13 mm nach innen versetzt.

Analog zur Abb. 7-57 werden in der Abb. 7-59 Tiefgang, Trimm und die Verformungen des Außenbodens eingetragen. Deutlich ist zu erkennen, wie sich die Schwimmelage des Leichters den Berechnungsincrementen der Beladung anpaßt. Die eingebrachte Masse der Beladung ist mit 2500 t so ausgelegt, so daß während des Beladungsvorganges die Tiefgangsmarke von 4 m nicht unterschritten wird.

Die Ergebnisse der Erzladung für den 20 Jahre alten Leichter sind der Abb. 7-60 wiedergegeben. Während für den Neubauzustand noch keine besondere Auffälligkeiten zu erkennen sind, wird hier die Ausbildung einer Arbeitsfalte deutlich (siehe auch Abb. 7-63). Diese entsteht in der Mitte des Leichters schon für eine relativ geringe Zuladung. Ursache hierfür ist sicherlich die unvorteilhafte Beladungsverteilung, wodurch in den ersten Schritten ein großes Moment entsteht.

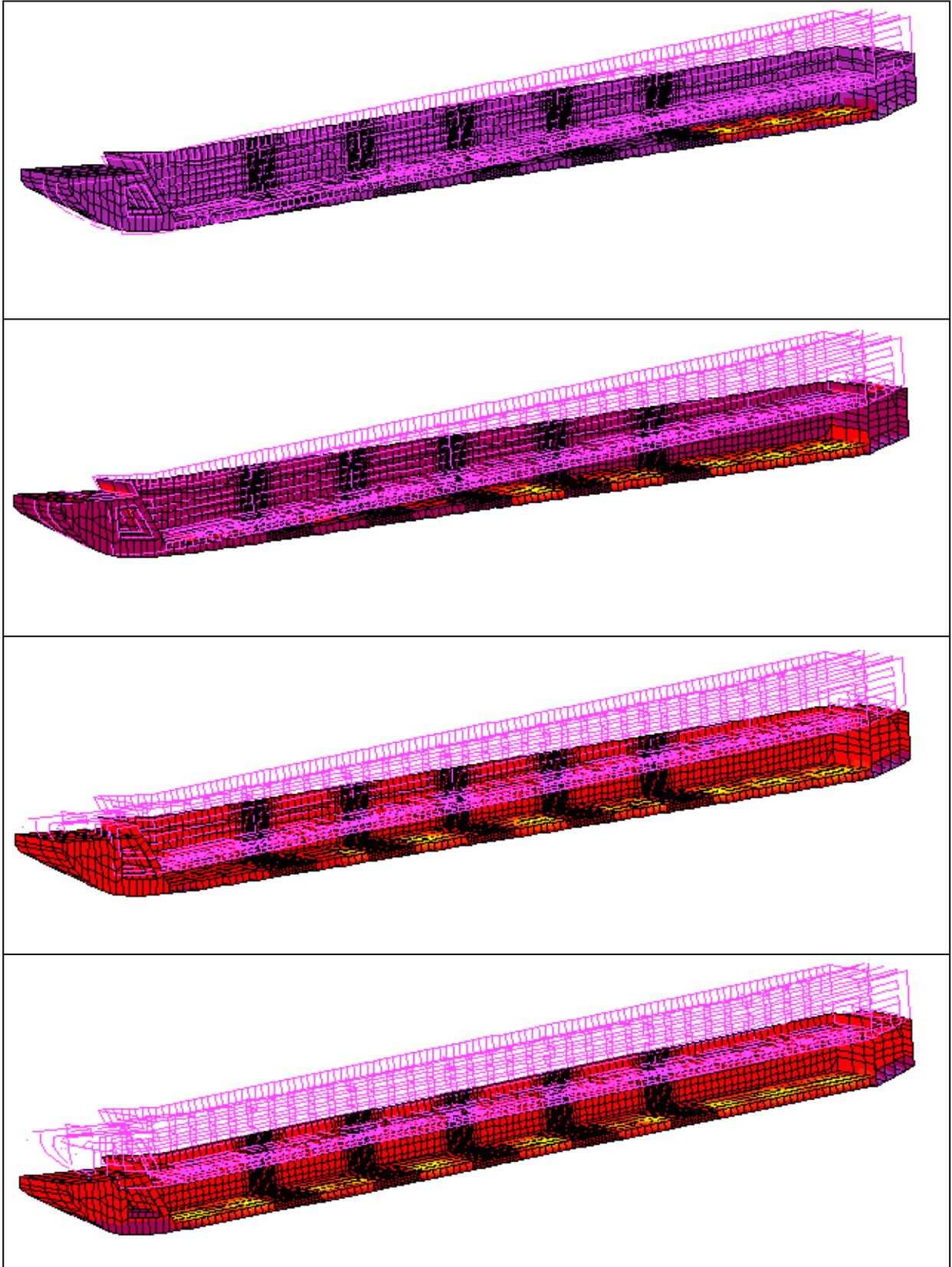


Abb. 7-57: Verteilung des Erz auf dem Innenboden

Fig. 7-57: Distribution of the ore on the inner bottom

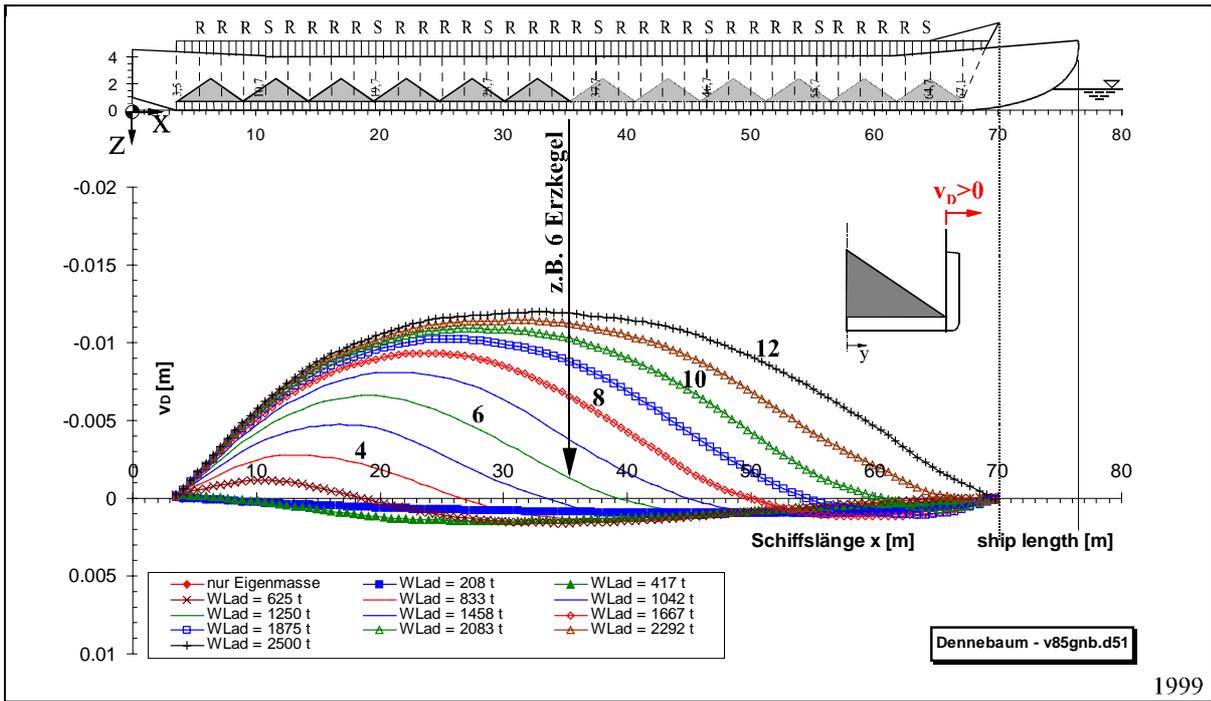


Abb. 7-58: Einbiegung des Dennebaums (ld5)

Fig. 7-58: Deformation of the hatch coaming (ld5)

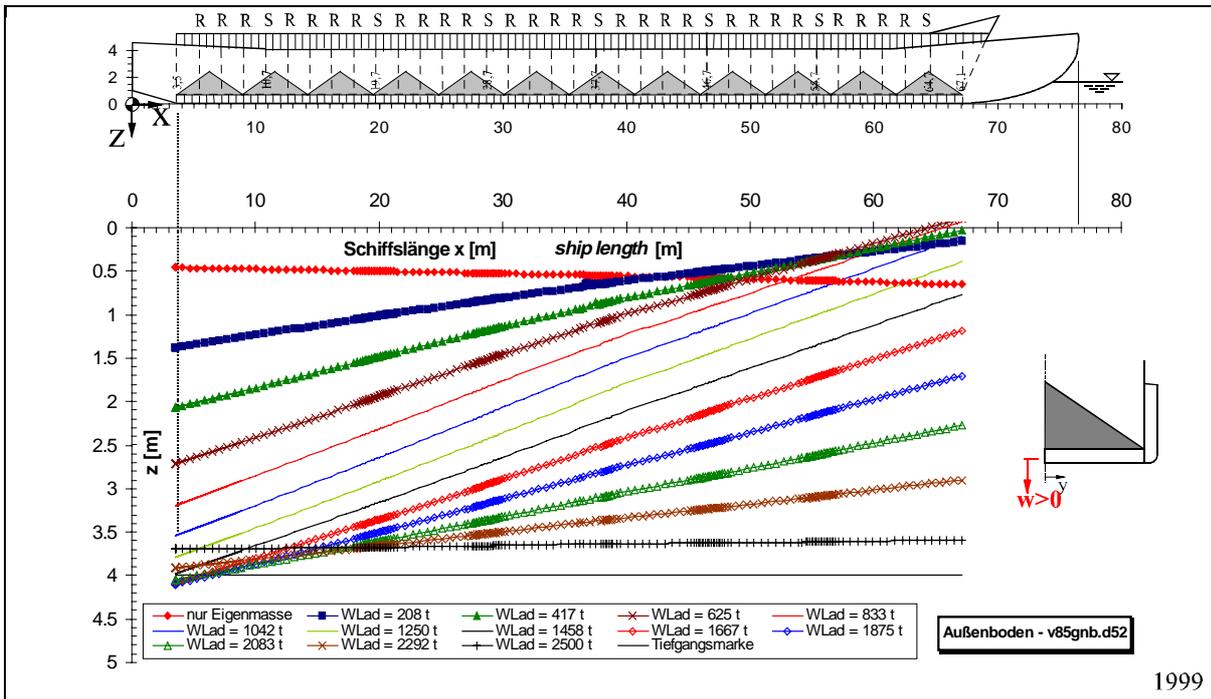


Abb. 7-59: Tiefgang, Trimm und Verformung des Außenbodens (ld5: Modell B)

Fig. 7-59: Immersion, trim and deformation of the outer bottom (ld5: model B)

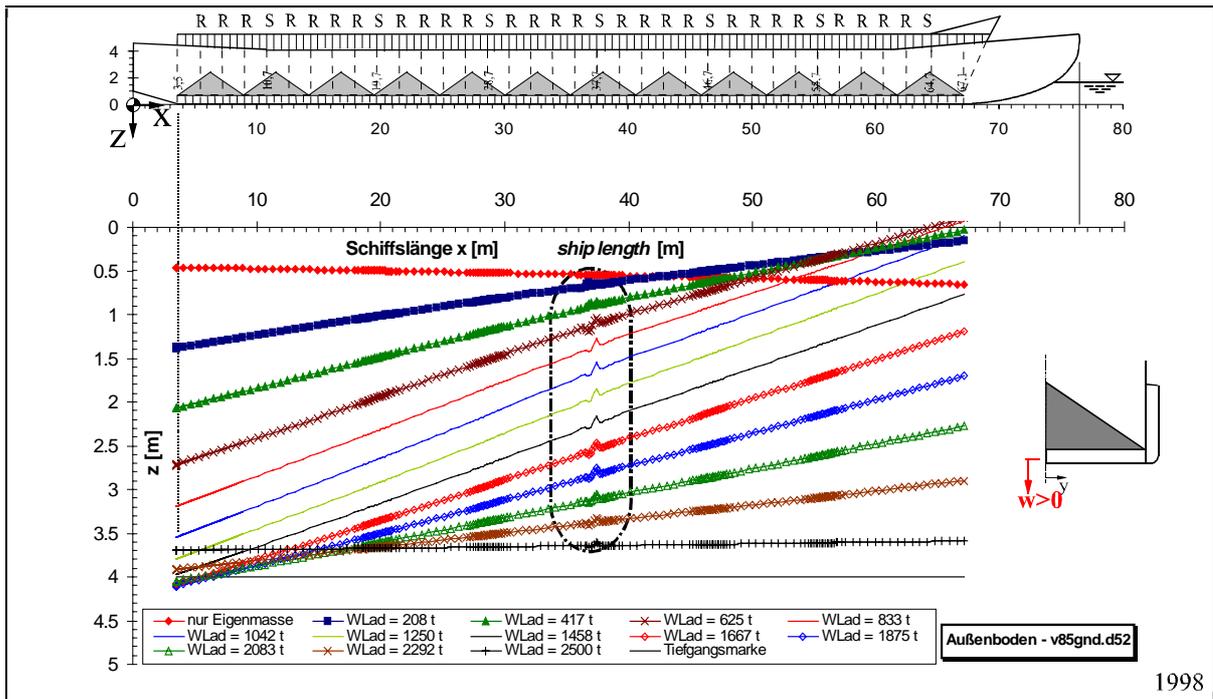


Abb. 7-60: Tiefgang, Trimm und Verformung des Außenbodens (ld5: Modell D)

Fig. 7-60: Immersion, trim and deformation of the outer bottom (ld5: model D)

7.5.2 Spannungen

Die Darstellungen in der Abb. 7-61 zeigen die Veränderungen im Spannungsverlauf während des Beladevorganges am Modell B.

Die Mises Spannung bezieht sich auf die Schicht 1 der Elemente (Außenschicht). Deutlich ist zu sehen, daß die Bereiche mit den hohen Spannungen im Dennebaum während des Beladevorganges von achtern nach vorne wandern. Zu beachten ist, daß sich die dargestellte Plots auf unterschiedliche Spannungsniveaus beziehen. Es ist aber festzuhalten, daß die maximale Spannung von ca. 210 N/mm^2 im Dennebaum lediglich an einigen Dennebaumstützen erreicht wird. Ansonsten erscheint das Spannungsniveau in der globalen Betrachtung harmlos.

Die Plots der Abb. 7-63 zeigen einen Ausschnitt des hochbelasteten Mittschiffbereiches am Modell D. Während im Neubauzustand kein lokales Versagen der Bodenplatten zu beobachten ist, treten nach einer Betriebszeit von 20 Jahren die mehrfach erwähnten Bodenfallen auf. In den Farbplots ist die Ausbildung der Arbeitsfalte im Außenboden bei wachsender Belastung gut zu erkennen.

7.5.3 Auswertung der Ergebnisse

In den vorangegangenen Berichten wurden "Schwachpunkte" am Schiff ausgewertet, woraus dann in Kapitel 9 Vorschläge zur konstruktiven Änderung erarbeitet werden. Dieser Abschnitt zeigt, daß ggf. auch über die Vorgehensweise bei der Beladung des Schubleichters nachgedacht werden muß.

Da der Leichter zunächst nur achtern beladen wird, taucht er am Bug relativ weit aus, wodurch der Doppelboden unter Druckbelastung gesetzt wird. Dies führt dazu, daß nach einer Betriebszeit von ca. 20 Jahren Arbeitsfallen im Außenboden entstehen. Sinnvoller ist eine Beladung mit Schüttgut, die zunächst im mittleren Teil des Leichters begonnen wird und dann nach achtern bzw. nach vorne fortgeführt wird.

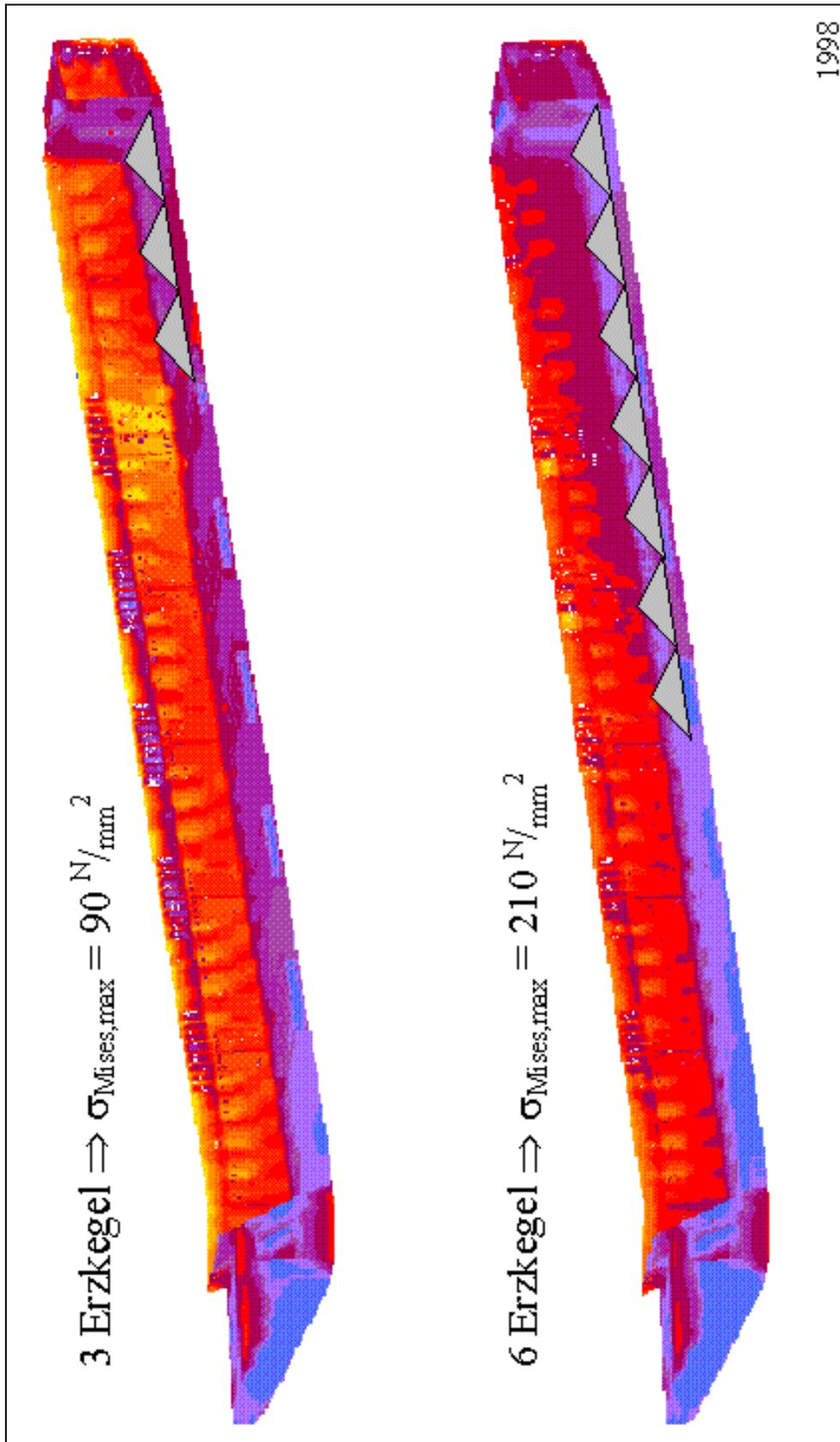


Abb. 7-61: Globalen Mises Spannungen für den Ladefall 5 (3 und 6 Erzkegel)

Fig. 7-61: Global Mises stress for the loadcase 5 (3 and 6 ore cone)

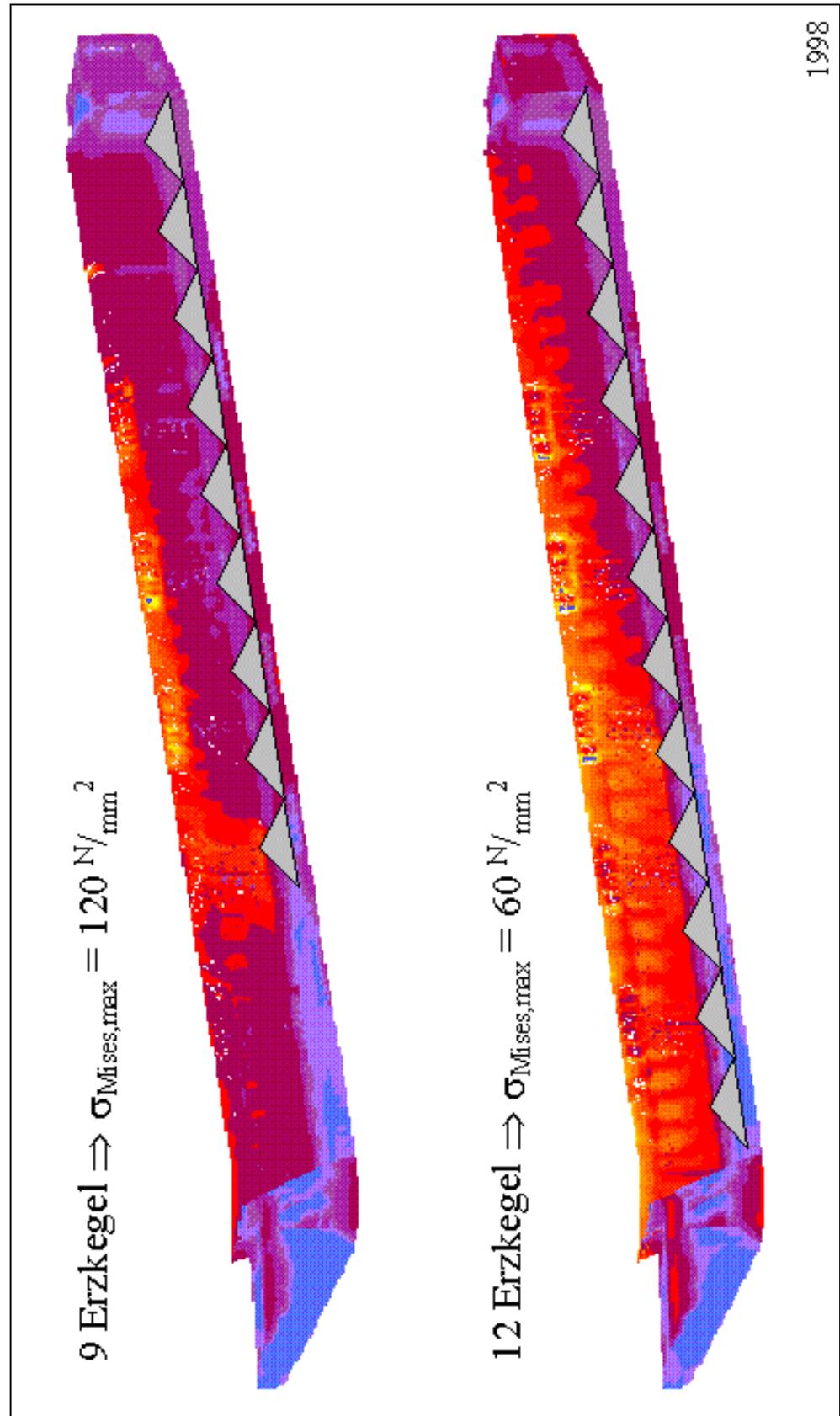


Abb. 7-62: Globalen Mises Spannungen für den Ladefall 5 (9 und 12 Erzkegel)

Fig. 7-62: Global Mises stress for the loadcase 5 (9 and 12 ore cone)

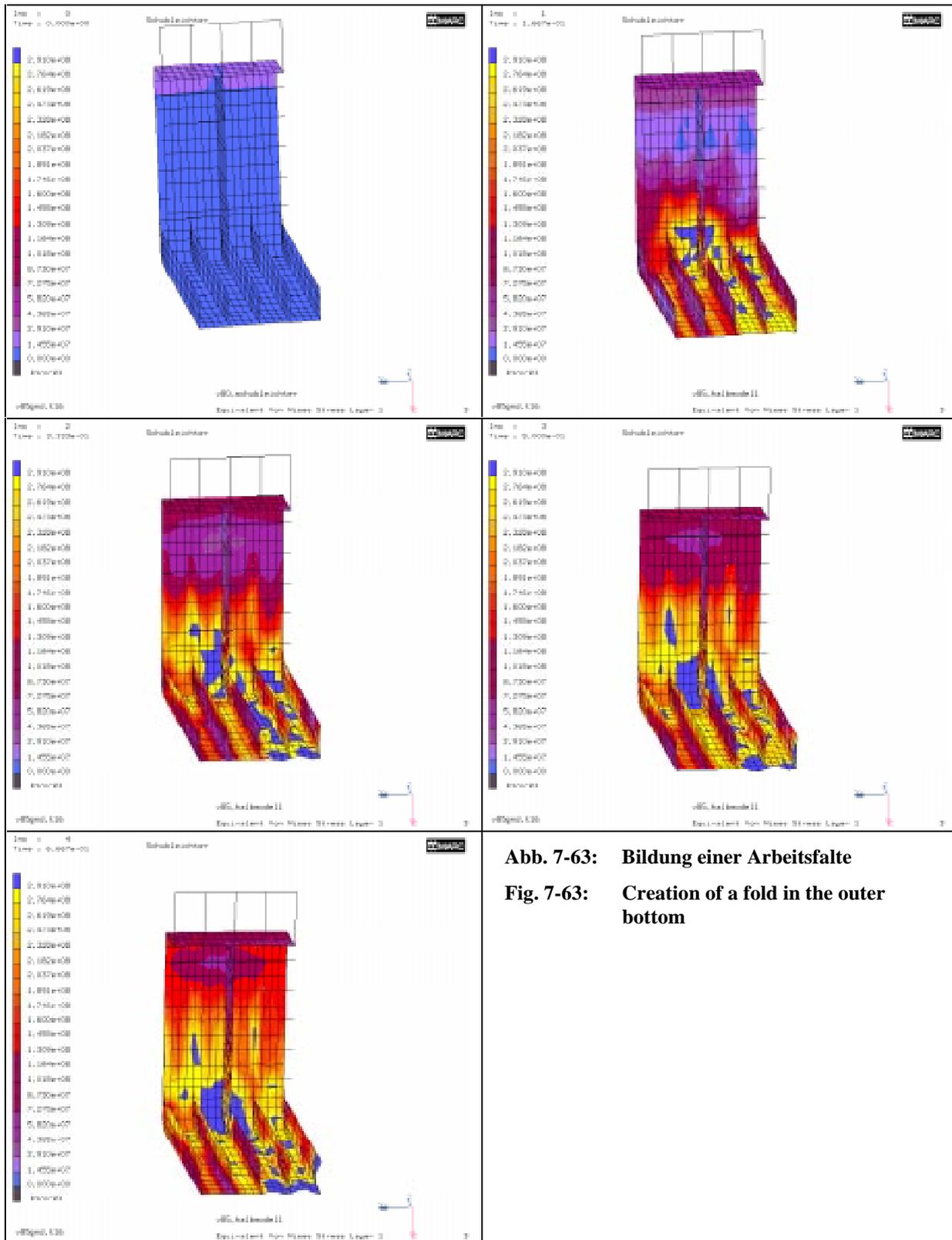


Abb. 7-63: Bildung einer Arbeitsfalte
Fig. 7-63: Creation of a fold in the outer bottom

7.6 Zusammenfassende Betrachtung

Das Kapitel 7 beinhaltet die gründliche FE-Analyse eines Schubleichters für unterschiedliche Ladefälle. Diese sind eine gleichmäßige Belastung auf dem Innenboden (ld2), der Hogging- (ld3) und Saggingfall (ld4) durch schwere Stückgüter sowie eine Beladung mit Erz (ld5) nach dem GL-Vorgang B. Betrachtet wird der Leichter im Neubauzustand, nach 10 und 20 Betriebsjahren sowie mit starken Vorschädigungen am Dennebaum und Außenboden.

Es zeigt sich, daß mit Hilfe der erstellten Software solche Analysen auch unter Berücksichtigung von physikalischen und geometrischen Nichtlinearitäten möglich sind. Es können große Verformungen sowie Plastizierungen im Material berücksichtigt werden. Die ermittelten Ergebnisse geben detailliert Auskunft über den Spannungsverlauf in den Bauteilen sowie die Deformationen der einzelnen Baugruppen. Besonders die Auswertung der Verformungsergebnisse für den Dennebaum zeigt deutlich die erhöhte Querfestigkeit des Schiffes am Sitz der Schotte (z.B. Abb. 7-9).

Für eine gleichmäßig verteilte Ladung auf dem Innenboden (ld2) ergibt sich eine harmlose Beanspruchung des Schubleichters im Neubauzustand und für auch für 10 und 20 Betriebsjahre. Die Berücksichtigung einer Arbeitsfalte im Außenboden zeigt den massiven Einfluß einer solchen Imperfektion. Es ergeben sich lokale Spannungsspitzen, die bis an die Streckgrenze des Materials gehen können (Abb. 7-12).

Für die untersuchte Konstruktionsweise des Schubleichters ist bei den zulässigen Biegemomenten im Hogging (ld3) und Saggingfall (ld4) keine ernstzunehmende Gefährdung der Struktur zu befürchten. Bei einer Überschreitung dieser Biegemomente ergibt sich für die druckbelasteten Bauteile die Gefahr des Versagens durch Beulen. Während die Belastungen im Neubauzustand noch recht gut ertragen werden, sind schon nach 10 Betriebsjahren Bauteile starke lokale Schädigungen zu beobachten (siehe z.B. Abb. 7-24 und Abb. 7-25). Weiter ist zu beobachten, daß im Neubauzustand die Spannungen nur lokal die Streckgrenze überschreiten, während nach einigen Jahren der Querschnitt zunehmend durchplastiziert, bis es zu einem völligen Versagen kommt (siehe Abb. 7-29 und Abb. 7-30 bzw. Abb. 7-48 und Abb. 7-49). Dies zeigt den sehr starken Einfluß der Abrostung.

Eindrucksvoll ist die gute Übereinstimmung der Berechnungsergebnisse mit tatsächlichen Strukturschäden aus der Praxis (Abb. 7-32, Abb. 7-33, Abb. 7-54, Abb. 7-55 und Abb. 7-56).

Es konnte auch nachgewiesen werden, daß die häufig vorzufindenden Arbeitsfalten im Doppelboden eines Schubleichters nicht nur aus einer Überschreitung der nach GL zulässigen Biegemomente resultieren. Sie können ebenfalls während einer "alltäglichen" Beladung mit Erz an Stellen einer örtlichen Überbelastung auftreten.

Die Auswertung der Berechnungsergebnisse ergab, daß es sich bei dem Schubleichter um eine recht schwere, massive Konstruktion handelt, welche aber recht empfindlich auf Imperfektionen reagiert. Eine Ausarbeitung von entsprechenden Konstruktionsvorschlägen ist in Kapitel 9 enthalten.

