

8 FE-Analyse eines Containerbinnenschiffes

Wie schon in Kapitel 3 erwähnt, wird angestrebt bei Containerbinnenschiffen im Laderaum 4 Containerstapel statt bisher 3 nebeneinander zu fahren (siehe Abb. 3-17). Da eine Verbreiterung der Schiffe wegen der maximalen Schleusenbreite nicht möglich ist, muß die seitliche Doppelhülle schmaler gebaut werden. Dies führt zu Konflikten mit bestehenden Sicherheitsvorschriften und zum anderen zu einer Reduzierung der ohnehin geringen Querbiege- und Torsionssteifigkeit dieser offenen Schiffe.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde als Grundlage der Untersuchungen die Konstruktion ein modernes Containerbinnenschiffes ausgewählt, welches seit ca. 10 Jahren (mit Sondergenehmigung) im Einsatz ist. Anhand vorliegender Konstruktionszeichnungen ist für das Schiff ein FE- und CAD-Modell erstellt /B11/, /B13/ worden. Die anschließenden Abschnitte enthalten eine zusammengefaßte Beschreibung der Struktur und des FE-Modells sowie die wichtigsten Berechnungsergebnisse. Weitergehende Informationen sind /V90/, /V92/, /V93/, /V94/ und /V97/ zu entnehmen.

8.1 Strukturbeschreibung

Der Wallgang des Schiffes ist in Längsspantenbauweise und der Doppelboden in einer kombinierten Bauweise gebaut. Der Abstand zwischen den Bodenwrangen beträgt 1,5 m. Es befinden sich 3 interkostale Längsträger im Doppelboden. Die Rahmenspannten sind sich auf jedem dritten Bauspant (1,5 m), auf jedem 27. Bauspant ist ein Schott (13,5 m) im Wallgang. In der Abb. 8-1 sind die wichtigsten Daten enthalten.

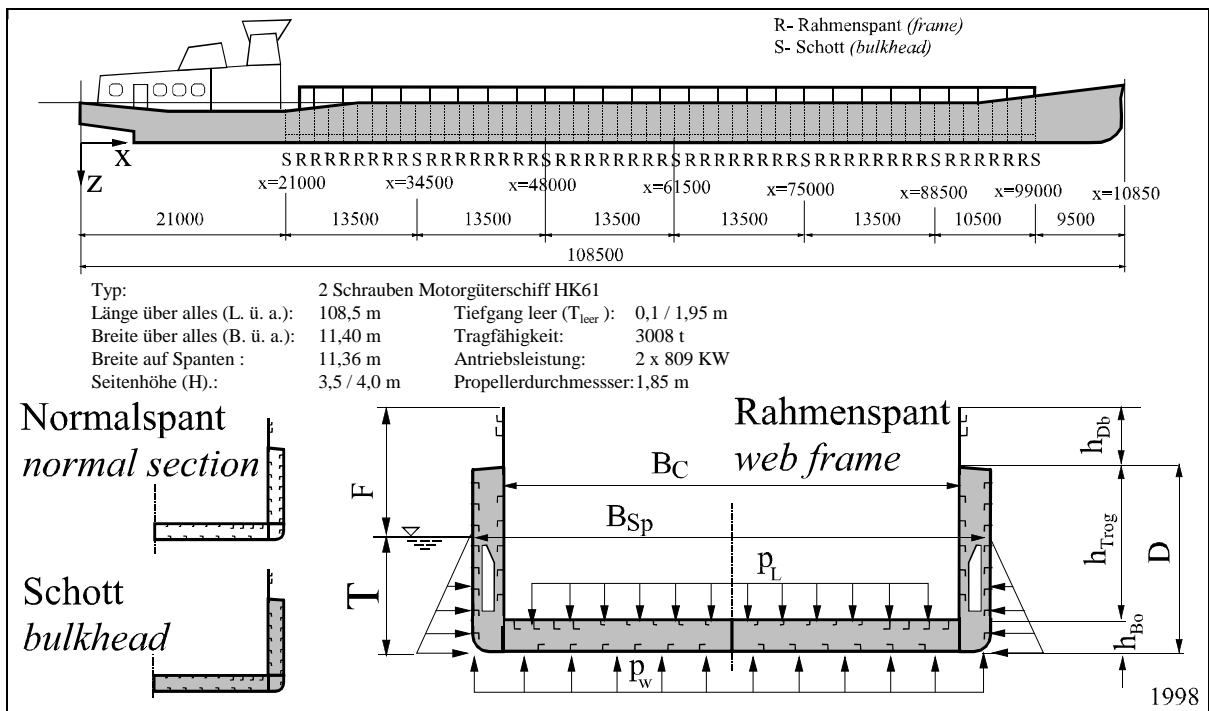


Abb. 8-1: Hauptdaten des Containerschiffes

Fig. 8-1: Main data of the container inland vessel

8.2 Modellbeschreibung

Die grundlegenden Eigenschaften (Elementtypen, Randbedingungen etc.) des Modells entsprechen im wesentlichen denen des Schubleichters. Die Abmessungen des Containerschiffes sind natürlich anders.

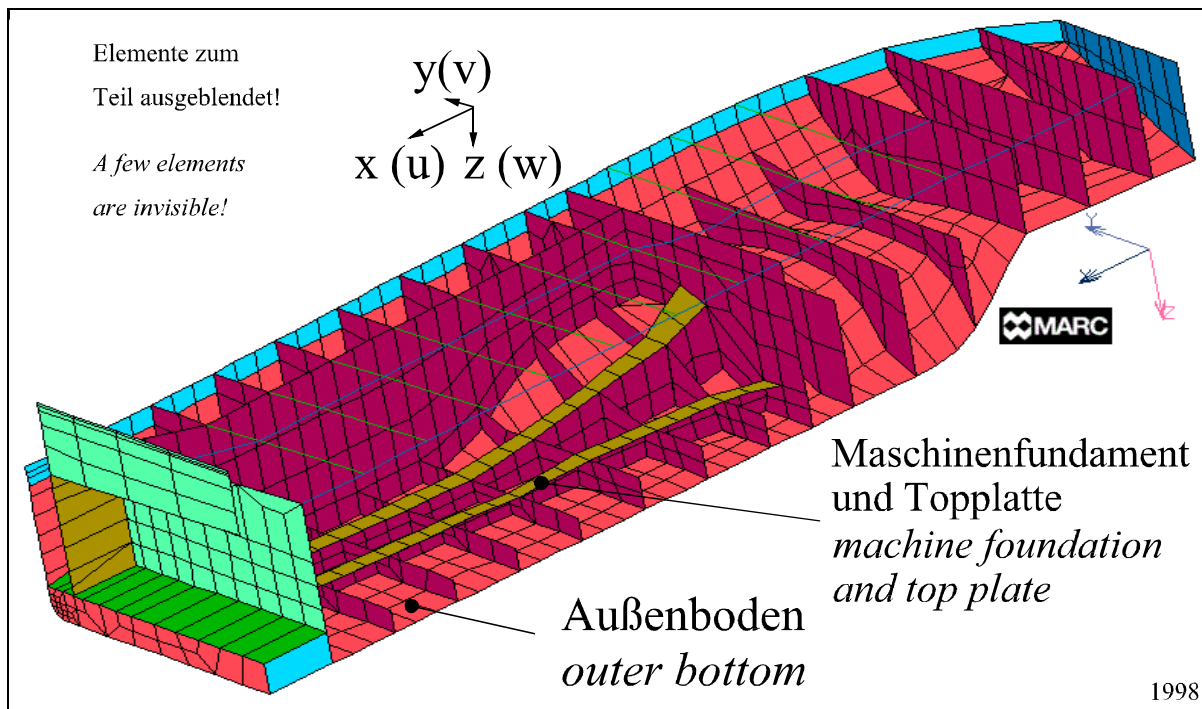


Abb. 8-2: FE-Modell des Maschinenraumes

Fig. 8-2: FE-model of the engine room

In Abb. 8-2 ist das Achterschiff des Containerschiffes dargestellt, wobei die Elemente des Decks ausgeblendet sind. Die Vernetzung ist recht detailliert ausgeführt, um eine realitätsnahe Verteilung der Belastungen durch Hauptmaschine, Getriebe etc. erreichen zu können. Diese werden als Flächenlast auf der Topplatte des Maschinenfundamentes aufgebracht. Sichtbar werden auch die Tanks für das Ballastwasser, die zwischen den Bodenwangen liegen.

Die Abb. 8-3 zeigt das FE-Netz eines Laderaumsegmentes. Entgegen der sonst üblichen Vorgehensweise sind die Dennebaumstützen und das Dennebaumprofil nicht mit Balkenelementen vernetzt. Die Modellierung mit Schalenelementen und die feine Vernetzung ist notwendig, um das Versagen dieser Bauteile ausreichend genau beschreiben zu können.

Zur Modellierung werden die Materialwerte des St37-2 verwendet. Lediglich für das Dennebaumprofil wird St52-3 genutzt (siehe Abb. 3-20).

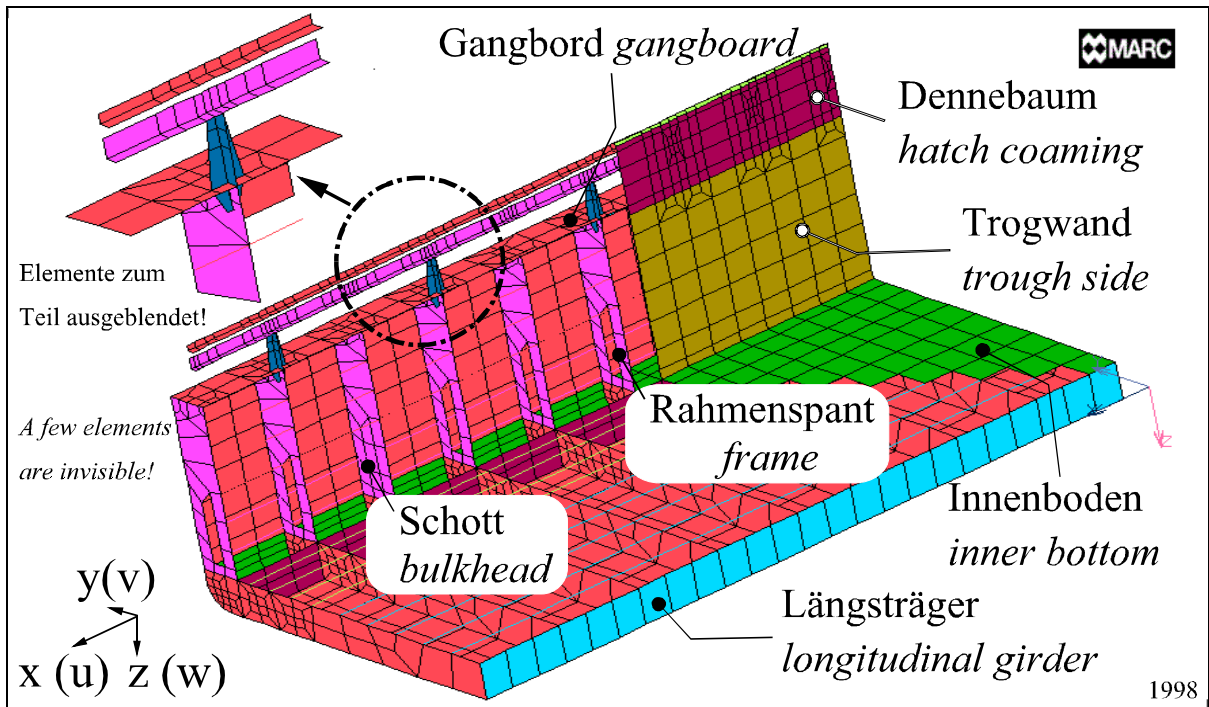


Abb. 8-3: FE-Modell eines Laderaumsegmentes

Fig. 8-3: FE-model of a cargo hold section

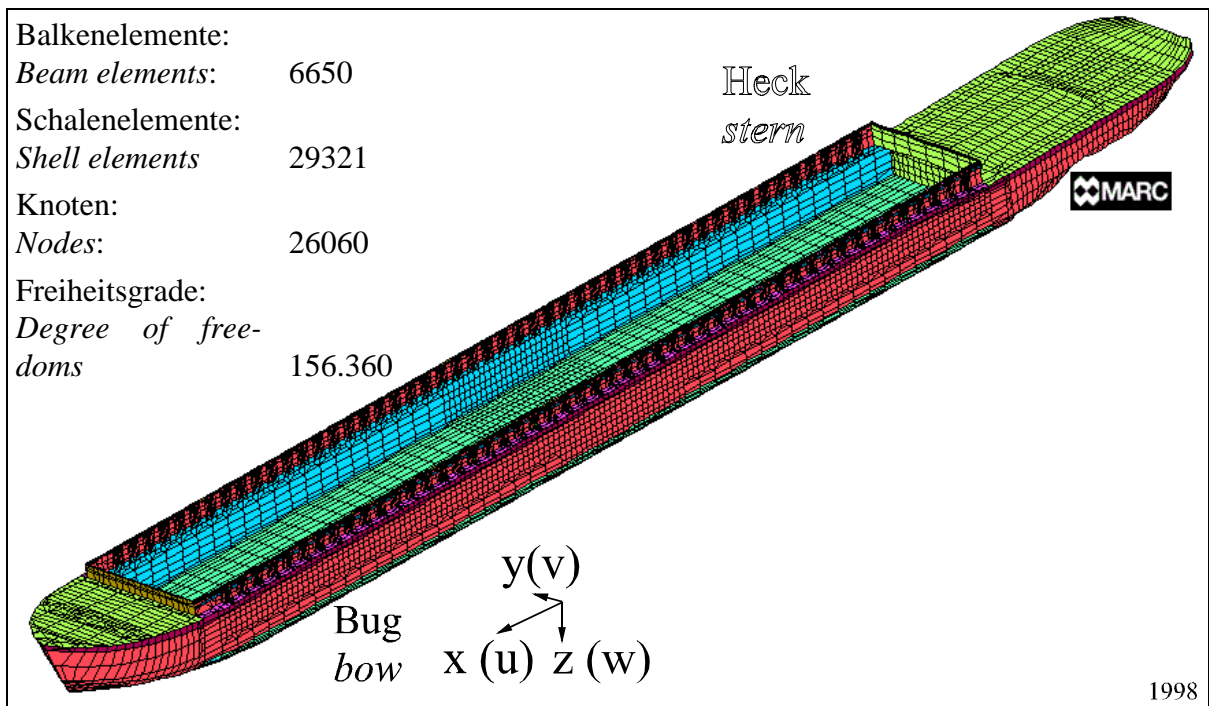


Abb. 8-4: FE-Vollmodell des Containerbinnenschiffes

Fig. 8-4: FE-model of the container inland vessel

8.3 Berechnungsergebnisse für den Ladefall 3

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 Daten des verwendeten Halbmodells sind:

- ◆ 81210 Freiheitsgrade
- ◆ 13535 Knoten
- ◆ 18591 Elemente (Schalen- und Balkenelemente)

Wie der Abb. 8-3 zu entnehmen ist, ist die Vernetzung besonders im Bereich des stabilitätsgefährdeten Dennebaums sehr detailliert.

8.3.1 Verformungen

In Abb. 8-6 ist zu erkennen, daß mit zunehmender Beladung für die Verformungen des Dennebaums im vorderen und achteren Bereich ein anderes Vorzeichen einzusetzen ist als mittschiffs.

Im unbeladenen Zustand verformt sich der Wallgang bzw. der Dennebaum des Containerbinnenschiffes nach außen. Dies erscheint auf den ersten Blick vielleicht unerwartet, da man vermuten könnte, daß der Wasserdruck auf der Außenwand diesen nach innen verformt. Der Wasserdruck unter dem Außenboden des leeren Laderaums drückt den Doppelboden jedoch nach oben (linke Darstellung in Abb. 8-5), wodurch der Wallgang nach außen bewegt wird. Der seitliche Wasserdruck wirkt zwar dieser Bewegung entgegen, ist vom Betrag her kleiner und greift an einer kleineren Fläche an. Dieses gilt auch für den mittleren Teil des Schiffes bei zunehmender Beladung.

Wie sich im vorderen und achteren Teil des Schiffes zeigt, verformen sich Doppelboden und Wallgang nach innen, da eine hohe Flächenlast auf dem Innenboden wirkt. In diesem Fall biegt sich der Doppelboden nach unten durch und der Wallgang mit Dennebaum deformiert nach innen ($v_D < 0$ - rechte Darstellung in Abb. 8-5).

Berücksichtigt man diese Erläuterungen, so verlaufen die Verformungen des Dennebaums im Id3 erwartungsgemäß. Entsprechend der Abb. 8-6 neigen sich Wallgang und Dennebaum in den Bereichen mit den hohen Flächenlasten nach innen. Der mittlere Teil des Laderaums bewegt sich zunehmend nach außen.

Bei der maximalen Beladung von 3008 t ist eine Auslenkung des Dennebaums von ca. 10 mm zu beobachten, welche sich auch mit zunehmenden Alter des Schiffes nur unwesentlich steigert. Die maximale Verformung nach innen hat einen Betrag von ca. 5 mm. Da dieser Wert nur für eine Schiffshälfte gilt, ist am realen Schiff eine Reduzierung der lichten Laderaumbreite von ca. 10 mm einzukalkulieren.

In der Abb. 8-7 sind Tiefgang, Trimm und Verformung des Außenbodens über der Schiffslänge abgetragen. Bei der Aufbiegung des Schiffes sind die Verformungen nicht vernachlässigbar. Wie der Abb. 8-7 zu entnehmen ist, ergibt sich für eine Maximalbeladung eine Aufbiegung von ca. 300 mm des Schiffes. Diese ändert sich mit zunehmenden Alter (Abb. 8-8) zwar kaum noch, ist aber für das Binnenschiff nicht unbedeutend, da sie auch Einfluß auf das hydrodynamische Verhalten haben.

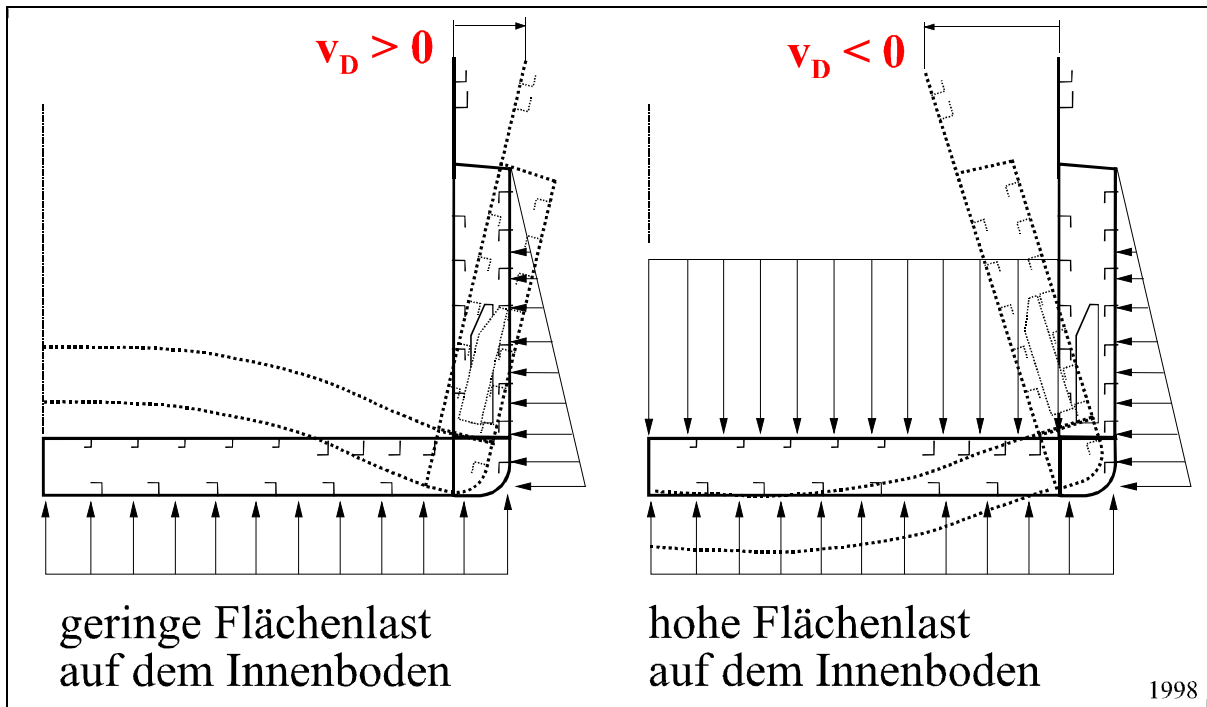


Abb. 8-5: Neigung des Wallgangs nach innen und außen

Fig. 8-5: Tendency of the wing the wing passage towards inside and outside

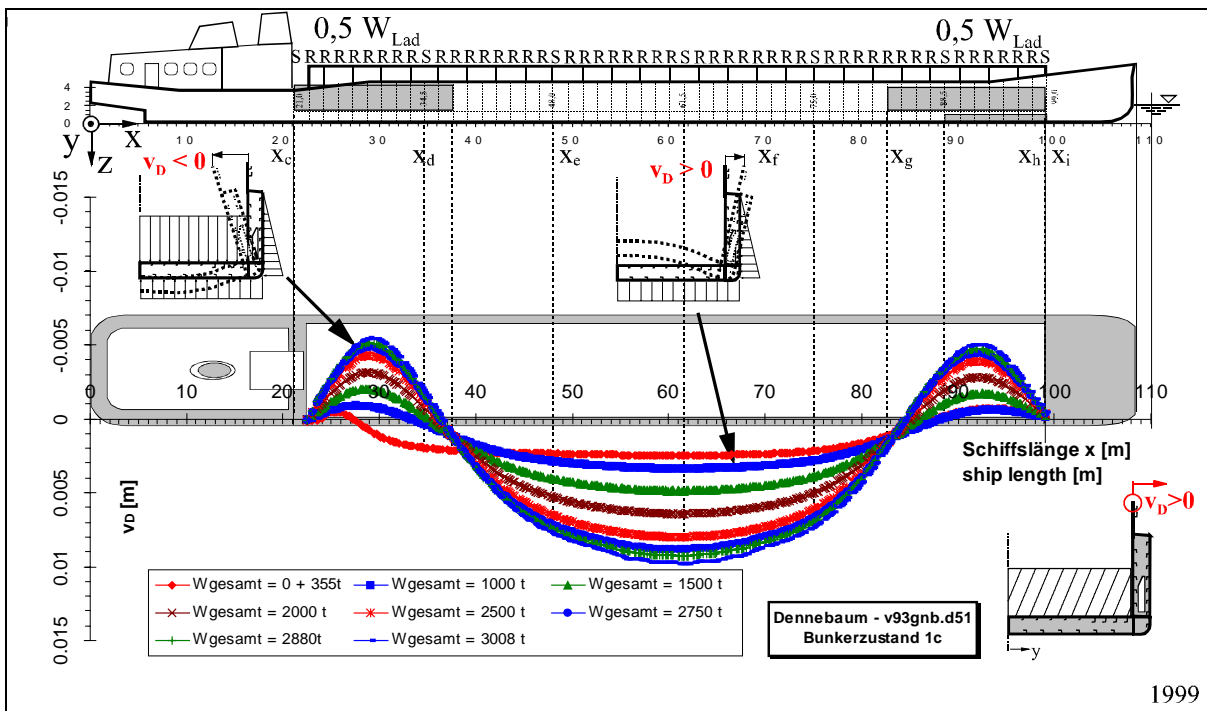


Abb. 8-6: Einbiegung des Dennebaums (ld3: Modell B)

Fig. 8-6: Deformation of the hatch coaming (ld3: model B)

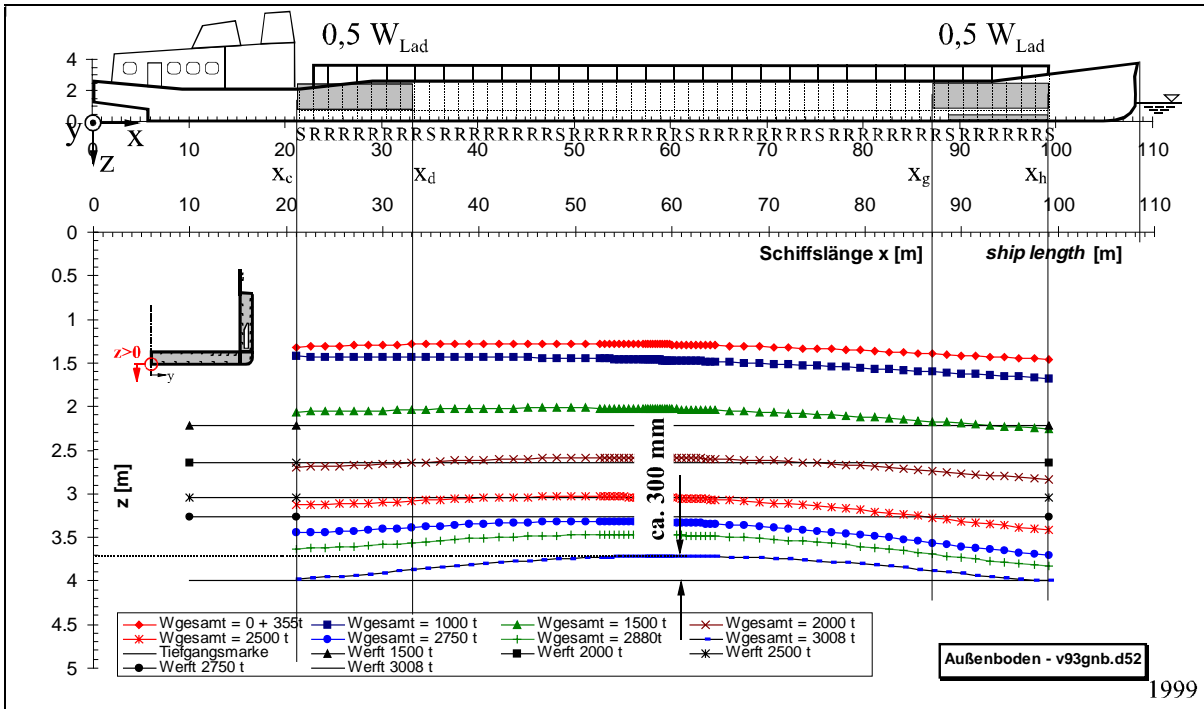


Abb. 8-7: Tiefgang, Trimm und Verformung des Außenbodens (Id3: Modell B)

Fig. 8-7: Immersion, trim and deformation of the outer bottom (Id3: model B)

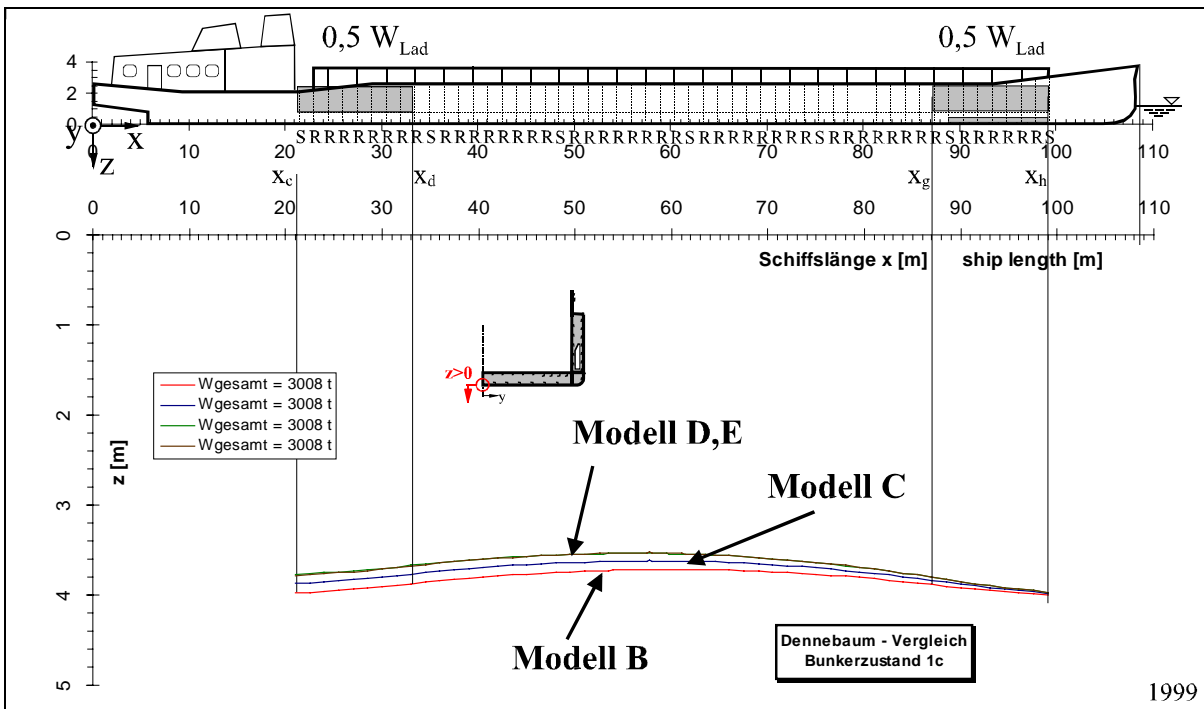


Abb. 8-8: Vergleich des Tiefgang, Trimm und Verformung des Außenbodens (Id3: Modell B-E)

Fig. 8-8: Comparison of immersion, trim and deformation of the outer bottom (Id3: model B-E)

8.3.2 Spannungen

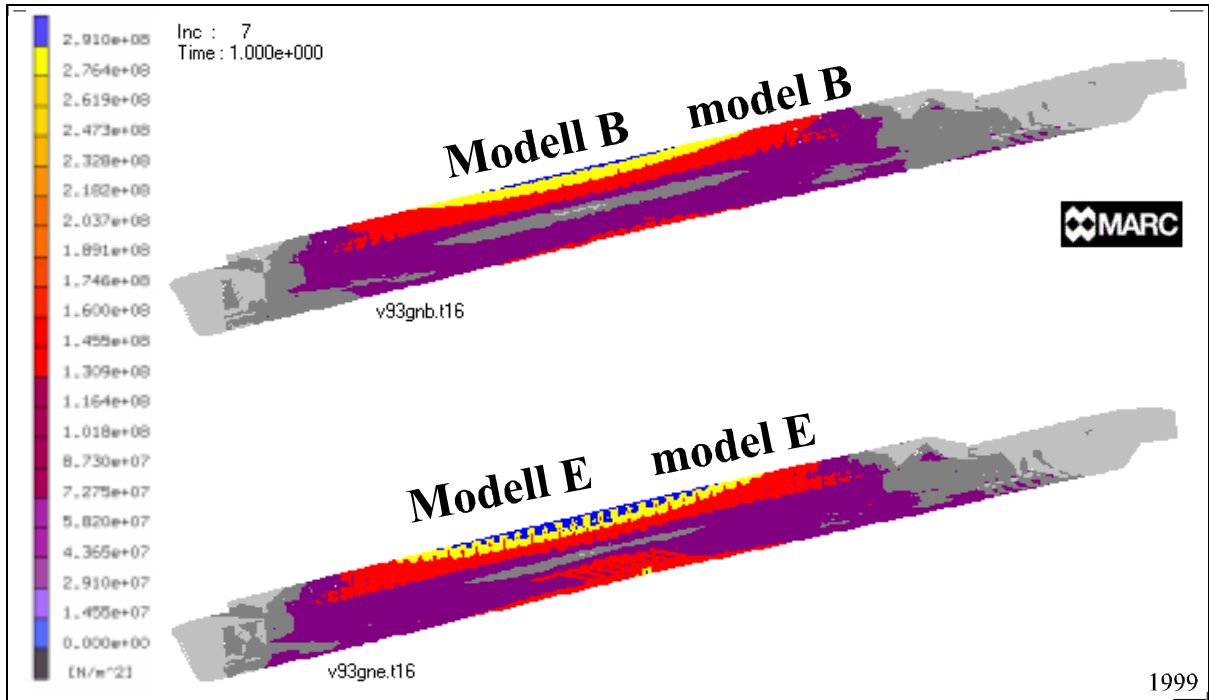


Abb. 8-9: Mises Spannungen des globalen Modells (Id3: Modell B,E)

Fig. 8-9: Mises stress of the global model (Id3: model B, E)

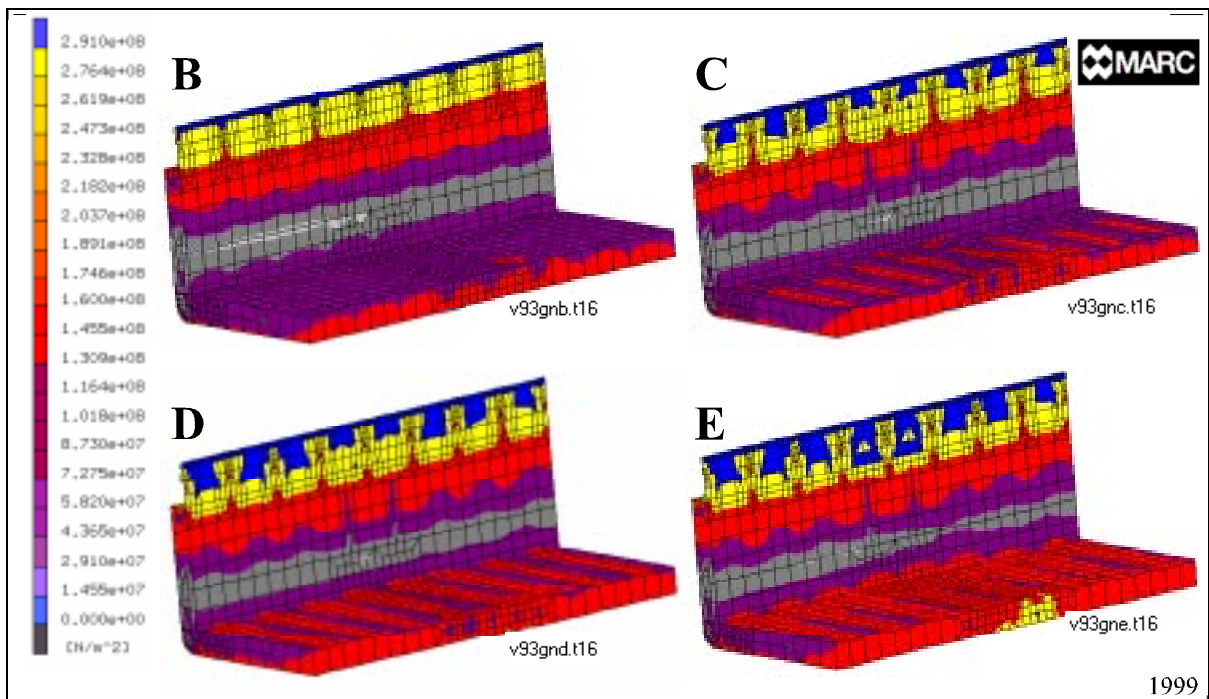


Abb. 8-10: Mises Spannungen des lokalen Modells (Id3: Modell B-E)

Fig. 8-10: Mises stress of the local model (Id3: model B-E)

Die Betrachtung der Spannungen für das Containerbinnenschiff im Ladefall 3 zeigt die höchsten Spannungen im Dennebaum. Diese resultieren aus den Zugbelastungen des Bauteils in diesem Ladefall. Für das Modell B

wird die Spannung von 291 N/mm^2 lediglich im Dennebaumprofil überschritten. Die Verwendung von St52-3 für dieses Bauteil ist hiermit als äußerst sinnvoll bestätigt. Mit zunehmenden Alter des Schiffes wird diese Grenze auch im darunter liegenden Dennebaum übertroffen. Da für dieses Bauteil St37-2 gewählt wurde, sind somit Plastizierungen im Material vorhanden.

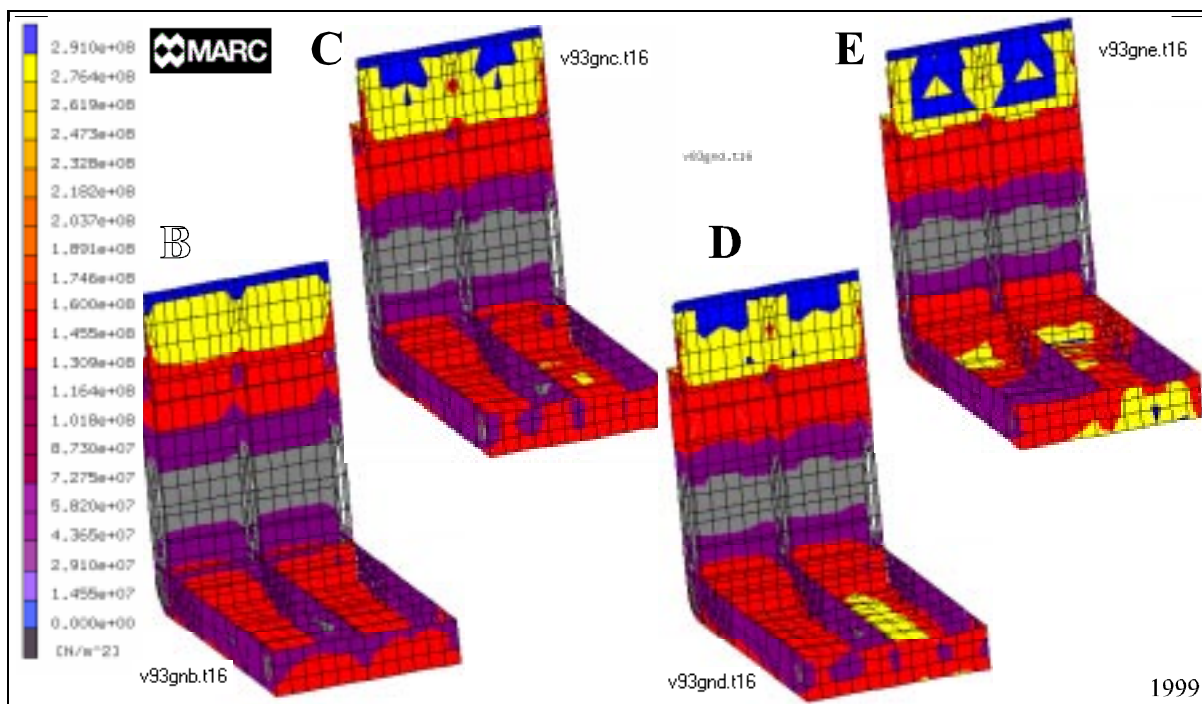


Abb. 8-11: Mises Spannungen des Detailausschnittes (Id3: Modell B-E)

Fig. 8-11: Mises stress of the detail (Id3: model B-E)

Die Auswertung der Ergebnisse bezüglich des Kollaps erfolgt wieder auf Basis der berechneten Spannungen. Als Kriterium für ein "Versagen" der Konstruktion dient die erstmalige Überschreitung der Streckgrenze im Dennebaum.

V93	Maximale Mises Spannung	Erreichen der Streckgrenze
Modell B	340 N/mm^2 bei 3008 t	292 N/mm^2 bei 2880 t
Modell C	419 N/mm^2 bei 3008 t	281 N/mm^2 bei 2000 t 315 N/mm^2 bei 2500 t
Modell D	440 N/mm^2 bei 3008 t	305 N/mm^2 bei 2000 t 327 N/mm^2 bei 2500 t
Modell E	442 N/mm^2 bei 3008 t	314 N/mm^2 bei 2000 t 341 N/mm^2 bei 2500 t

Tabelle 8-1: Die ermittelten Spannungen des Containerbinnenschiffes (Id3: Modell B-E)

Table 8-1: The calculated stress of the container inland vessel (Id3: model B-E)

In dem Säulendiagramm ist der prozentuale Vergleich der maximalen Beladung ohne Plastizierungen 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. 9 % erfolgt ist. In den nächsten 10 Jahren findet eine weitere Reduzierung statt. Auffällig ist die sehr geringe Anfälligkeit für Schäden im Außenboden.

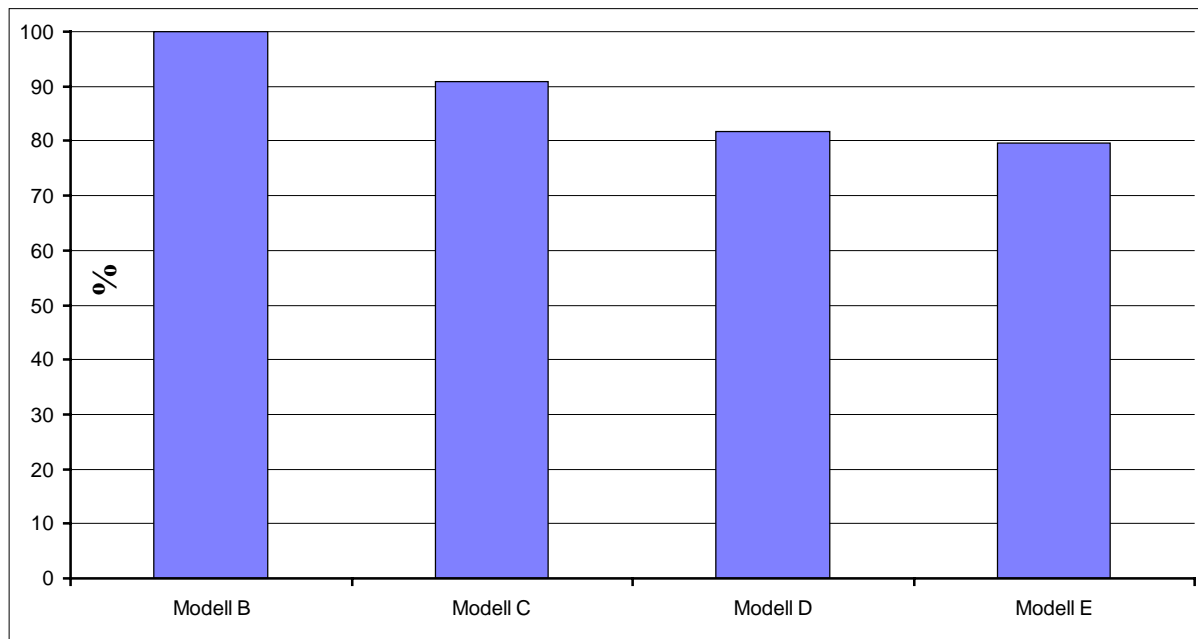


Abb. 8-12: Einfluß der Imperfektionen im prozentualen Vergleich (Id3)

Fig. 8-12: Influence of the imperfections in a percentage comparison (Id3)

8.3.3 Auswertung der Ergebnisse

Bei dem Containerschiff handelt es sich um eine Konstruktion, welche auch bei extremen Belastungen im Hoggingfall ein gutmütiges Verhalten zeigt. Obwohl die Aufbiegung des Schiffes recht groß wird, sind die Überschreitungen der Streckgrenze relativ gering. Die Zugfestigkeit des Dennebaum gewinnt durch den höherfesten Stahl (St52-3) beträchtlich. Dieser wirkt wie ein "eingelegetes" Zugband, wodurch die Anteile der plastischen Verformungen relativ gering ausfallen.

Wie groß der Anteil der bleibenden Verformungen nach der Entlastung ist, läßt sich durch eine Erweiterung des Berechnungskonzeptes ermitteln. Diese ist Gegenstand eines anschließenden Forschungsvorhaben in der die zyklische Be- und Entlastung betrachtet wird.

8.4 Berechnungsergebnisse für den Ladefall 4

Die Belastungen des Ladefall 4 beschreiben den Saggingfall für das Schiff, wie er im Kapitel 3 erläutert wird. Da in diesem Ladefall der Dennebaum unter Druckbelastung steht, ist für dieses Bauteil die Betrachtung der Strukturstabilität von primärer Bedeutung.

8.4.1 Verformungen

Im unbeladenen Zustand verformt sich der Wallgang bzw. der Dennebaum wieder nach außen. Mit zunehmender Beladung im Id 4 zeichnen sich wieder die nach außen und innen geneigten Verformungsanteile ab. Für den Neubauzustand (Abb. 8-13) ergibt sich eine maximale Verformung nach innen von ca. 3 mm. Somit ist lediglich eine Reduzierung der lichten Laderaumbreite von ca. 6 mm zu beachten.

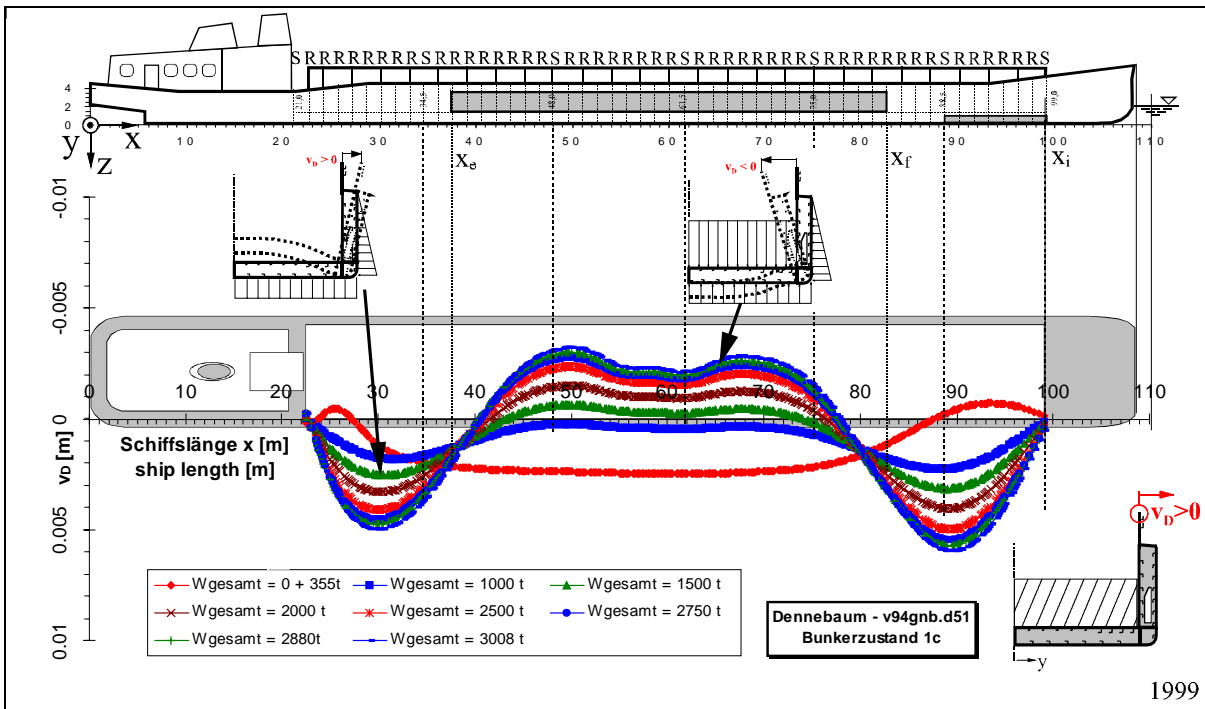


Abb. 8-13: Einbiegung des Dennebaums (ld4: Modell B)

Fig. 8-13: Deformation of the hatch coaming (ld4: model B)

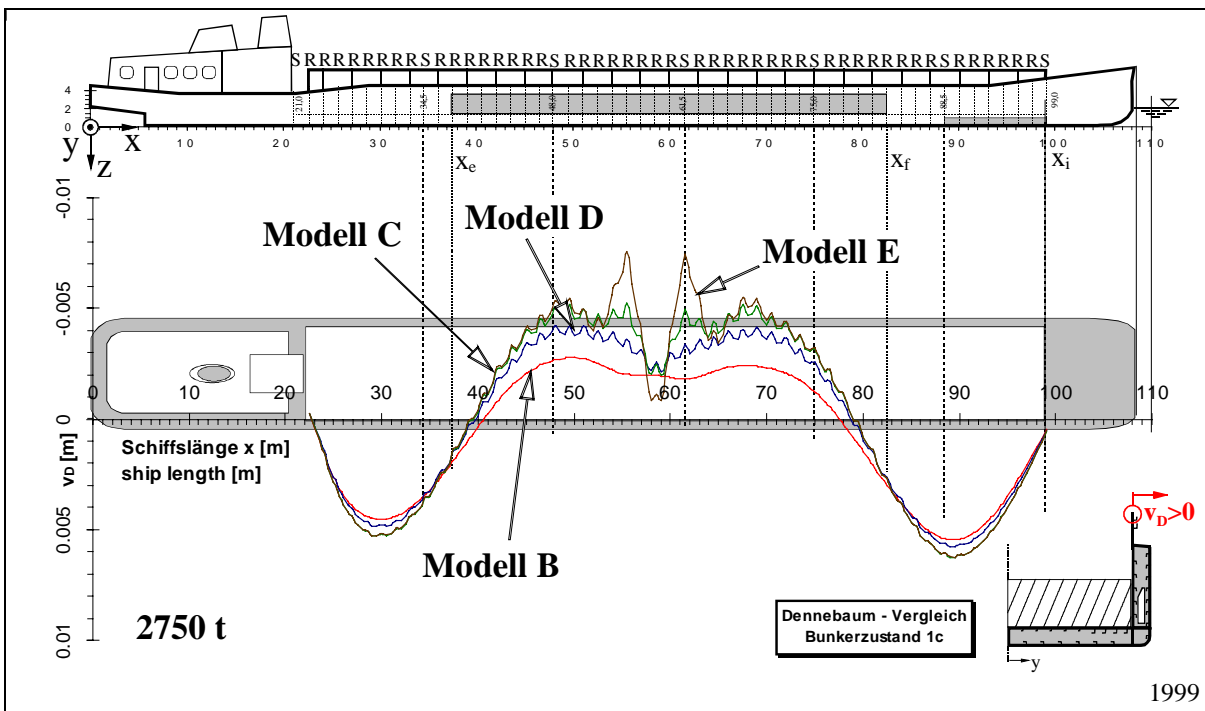


Abb. 8-14: Einbiegung des Dennebaums (ld4: Modell B-E)

Fig. 8-14: Deformation of the hatch coaming (ld4: model B-E)

Mit zunehmenden Imperfektionen des Schiffes (Modell C, D in Abb. 8-14) treten zwischen den Dennebaumstützen lokale Ausbeulungen auf. Diese sind vom Betrag her zwar sehr gering, liegen aber schon im plastischen Bereich (Abb. 8-18). Für das Modell E ist am Dennebaum ein größeres seitliches Ausweichen (Abb. 8-14) zu be-

obachten. Für eine spätere Druckbelastung kann der plastische Anteil dieser Vorverformung als Vorstufe eines kompletten Versagens betrachtet werden.

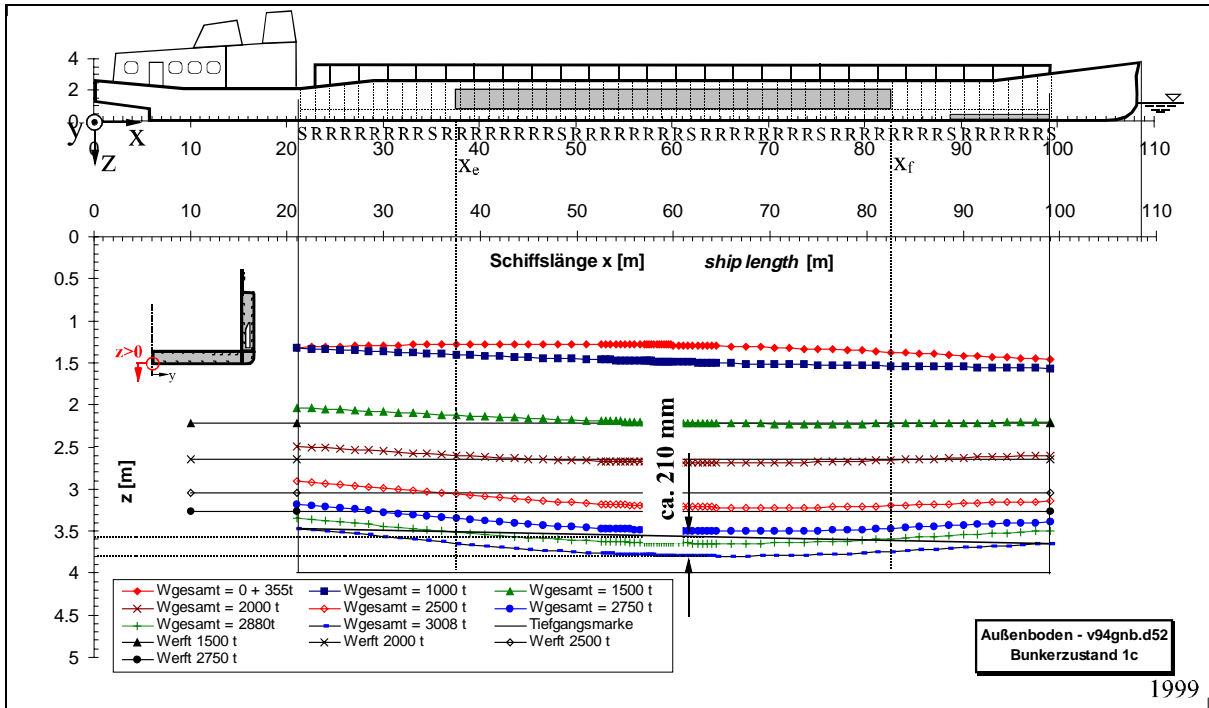


Abb. 8-15: Tiefgang, Trimm und Verformung des Außenbodens (ld4: Modell B)

Fig. 8-15: Immersion, trim and deformation of the outer bottom (ld4: model B)

In der Abb. 8-15 sind Tiefgang, Trimm und Verformung des Außenbodens über der Schiffslänge abgetragen. Mit ansteigender Beladung taucht das Schiff immer weiter ein, wobei der Anteil der Tauchung für 1500 t, 2000 t, 2500 t und 2750 t ziemlich genau den Angaben der Werft entspricht. Die maximale Durchbiegung des Schiffskörpers bei einer Zuladung von 3008 t beträgt ca. 210 mm für den Laderaumbereich.

Der Vergleich der Längssteifigkeit für die 4 Modelle (Abb. 8-16) zeigt, daß das Schiff durch die Imperfektionen etwas weicher wird. Dies liegt im wesentlichen an der Reduzierung der Plattendicke. Die Gegenüberstellung bezieht sich auf eine Beladung mit 2750 t, da der Berechnungslauf für das Modell E an diesem Punkt abgebrochen wurde. Die fehlende Konvergenz in der Gleichgewichtsiteration ist auf die starken Deformationen des Debnbaum (siehe Modell E Abb. 8-14) zurückzuführen. Beheben läßt sich dieses numerische Problem durch entsprechend kleine Lastschritte. Da aber grundsätzlich keine neuen Erkenntnisse zu erwarten sind, wurde auf den zusätzlichen Berechnungsaufwand verzichtet.

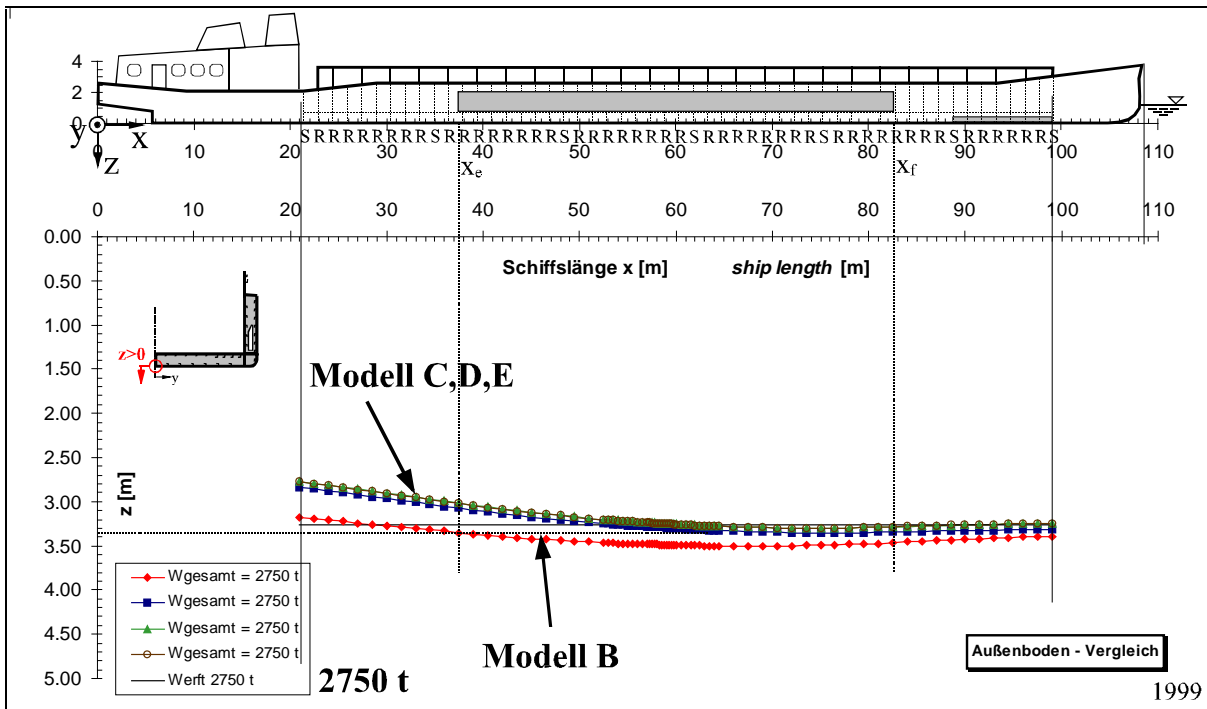


Abb. 8-16: Vergleich des Tiefgang, Trimm und Verformung des Außenbodens (ld4: Modell B-E)

Fig. 8-16: Comparison of immersion, trim and deformation of the outer bottom (ld4: model B-E)

8.4.2 Spannungen

Bei der Betrachtung der Spannungen im Ladefall 4 für das Containerbinnenschiff zeigt sich ein recht hoher Einfluß der Imperfektionen am Dennebaum. In der globalen Betrachtung der Abb. 8-17 wird deutlich, daß trotz der großen Beanspruchung die Mises Vergleichsspannung für das Modell B unterhalb der Streckgrenze bleibt. Mit zunehmenden Alter werden jene im Mittschiffsbereich des Dennebaums lokal überschritten. In diesen Bereichen ist mit Plastizierungen und somit bleibenden Verformungen zu rechnen.

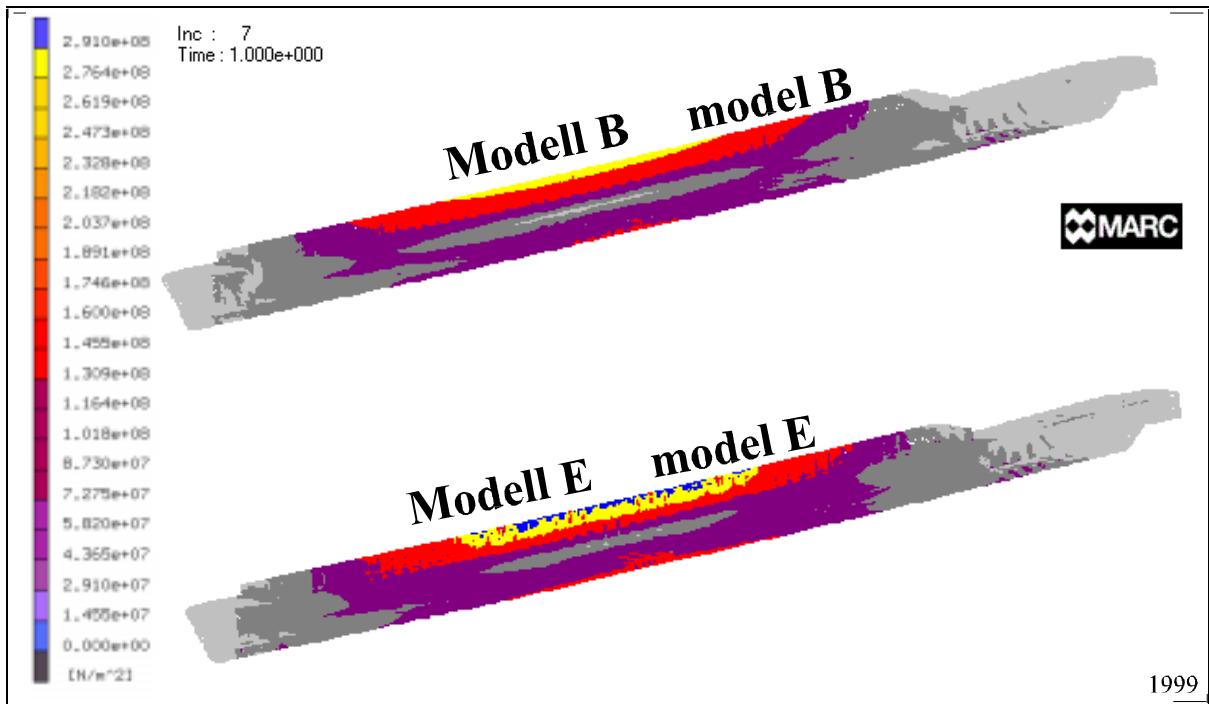


Abb. 8-17: Mises Spannungen des globalen Modells (Id4: Modell B,E)

Fig. 8-17: Mises stress of the global model (Id4: model B, E)

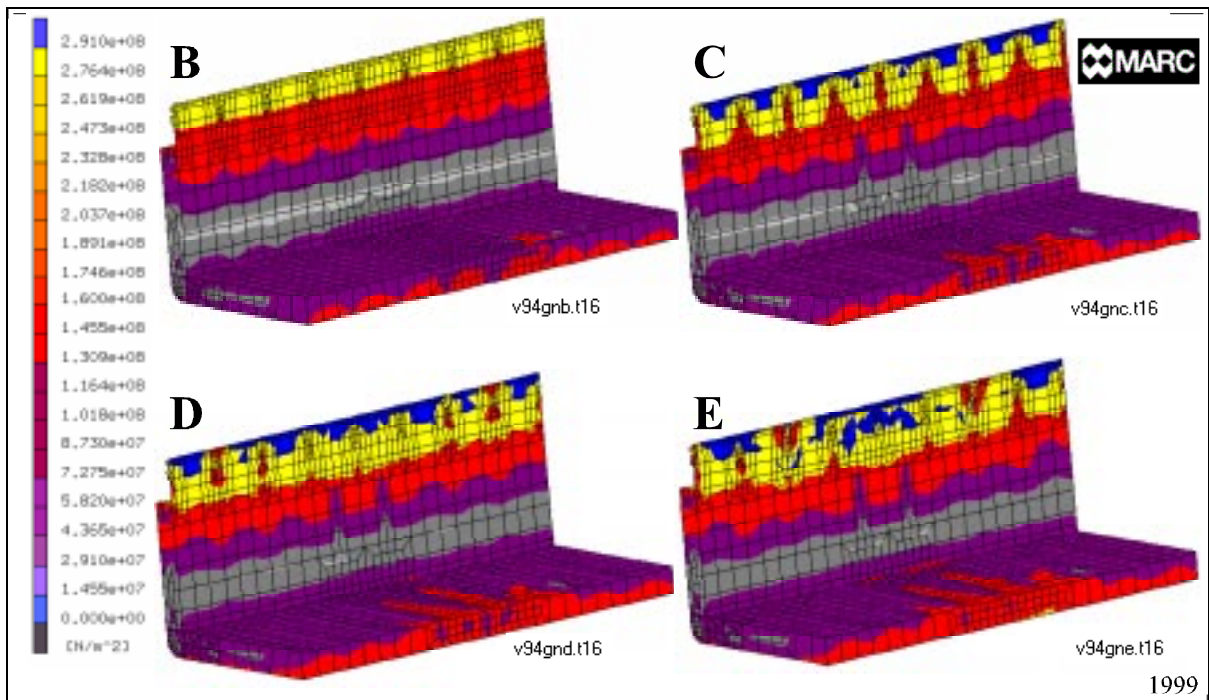


Abb. 8-18: Mises Spannungen des Laderaumsegmentes (Id4: Modell B-E)

Fig. 8-18: Mises stress of the cargo hold section (Id4: model B-E)

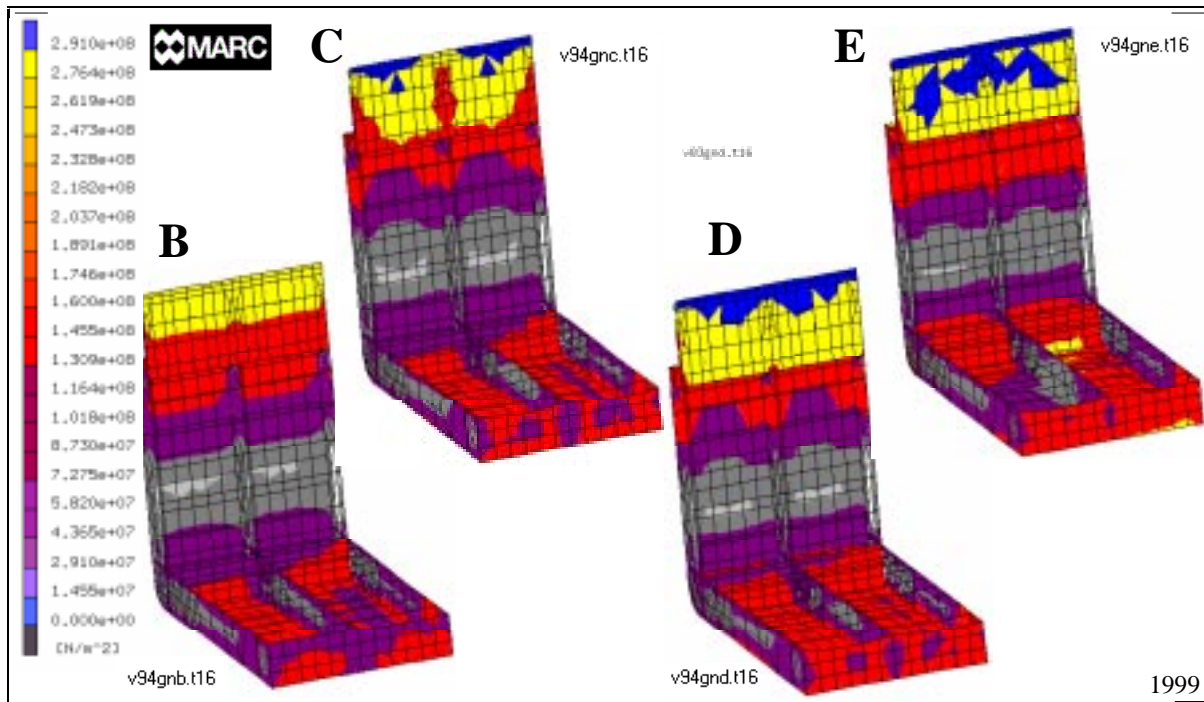


Abb. 8-19: Mises Spannungen des Detailausschnittes (Id4: Modell B-E)

Fig. 8-19: Mises stress of the detail (Id4: model B-E)

Die Auswertung der Ergebnisse auf der Basis der berechneten Spannungen benutzt als Kriterium für ein "Versagen" der Konstruktion wieder die erstmalige Überschreitung der Streckgrenze.

V94	Maximale Mises Spannung	Erreichen der Streckgrenze
Modell B	289 N/mm^2 bei 3008 t	Knapp darunter bei 3008 t
Modell C	353 N/mm^2 bei 3008 t	231 N/mm^2 bei 2000 t 319 N/mm^2 bei 2500 t
Modell D	436 N/mm^2 bei 3008 t	254 N/mm^2 bei 2000 t 322 N/mm^2 bei 2500 t
Modell E	440 N/mm^2 bei 2880 t	257 N/mm^2 bei 2000 t 326 N/mm^2 bei 2500 t

Tabelle 8-2: Die ermittelten Spannungen des Containerbinnenschiffes (Id4: Modell B-E)

Table 8-2: The calculated stress of the container inland vessel (Id4: model B-E)

In dem nachstehenden Säulendiagramm ist der prozentuale Vergleich der maximalen Beladung ohne Plastizierungen 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. 18 % erfolgt ist. In den nächsten 10 Jahren findet eine weitere Reduzierung statt.

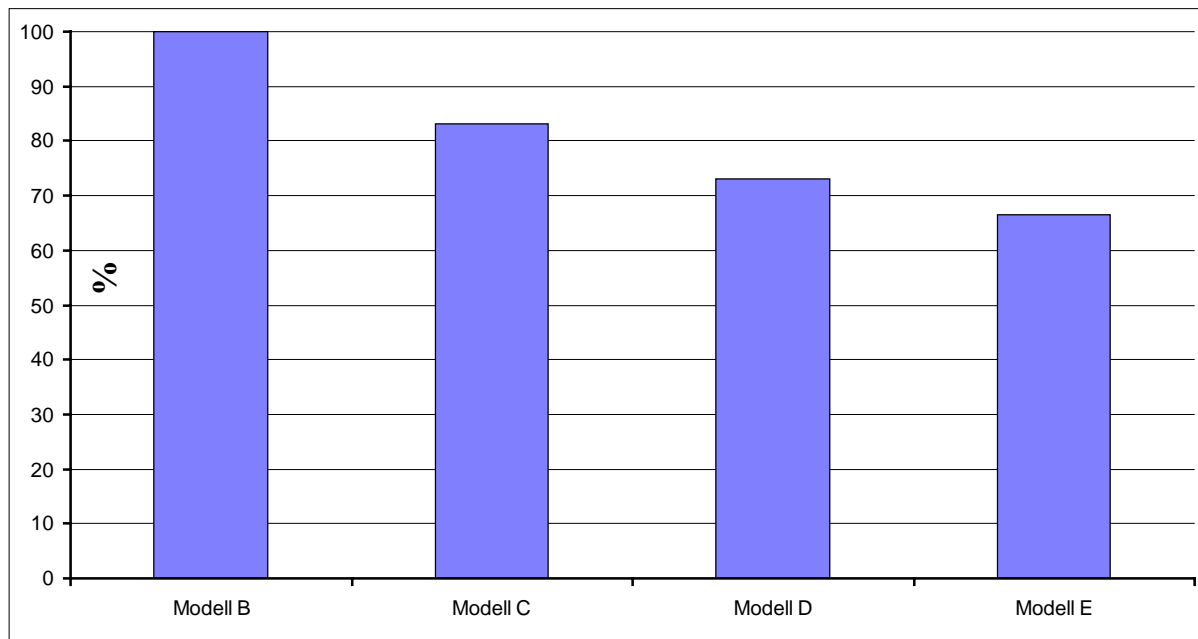


Abb. 8-20: Einfluß der Imperfektionen im prozentualen Vergleich (Id3)

Fig. 8-20: Influence of the imperfections in a percentage comparison (Id3)

8.4.3 Auswertung der Ergebnisse

Bei dem Containerschiff handelt es sich um eine Konstruktion, welche bei extremen Belastungen im Saggingfall Ansätze für ein Versagen zeigt. Obwohl die Durchbiegung des Schiffes recht groß wird, sind die Überschreitungen der Streckgrenze auf den Dennebaum begrenzt. Der Anteil der plastischen Verformungen ist demnach relativ gering.

Für den Ladefall 4 zeigt die Konstruktion insgesamt ein gutartiges Verhalten. Möglichkeiten einer konstruktiven Verbesserung sind aber vorhanden, wobei der Schwachpunkt der druckbelastete Dennebaum ist. Bevor dieser seitlich ausweicht, beginnen zwischen den Dennebaumstützen einzelne Plattenfelder lokal auszubeulen. Um das Schiff auch für solche Belastungen auszulegen, ist die Konstruktion eines neuartigen Hauptspantquerschnitt denkbar. Dessen Erarbeitung ist in Kapitel 9 enthalten.

8.5 Berechnungsergebnisse für den Ladefall 7

Wie schon in Abschnitt 3.4.7 erläutert, soll im Id7 eine kombinierte Betrachtung von Biege- und Torsionsbelastungen erfolgen. Betrachtet wird dies durch eine ungünstige Verteilung der Container. So wird angenommen, daß sich auf der Backbordseite des achteren Containerstapels 24 der 20' Container befinden, welche alle das zulässige Gesamtgewicht (24 t) erreichen. Diese 576 t werden ebenfalls für den vorderen Containerstapel auf der Steuerbordseite angenommen (siehe Abb. 3-17). Der Rest des Laderaums ist mit leeren 40' Container gefüllt. Die Gesamtbelastung erreicht damit 1291,2 t.

8.5.1 Verformungen

Die Belastung am Modell werden im Id 7 in inkrementellen Schritten bis zur maximalen Ladung von 1291 t gesteigert. An dieser Stelle soll vorweggenommen werden, daß sich die Berechnungsergebnisse für die vier Mo-

delle B,C,D und E kaum unterscheiden. Auf den direkten Vergleich der Deformationen kann daher im folgenden verzichtet werden.

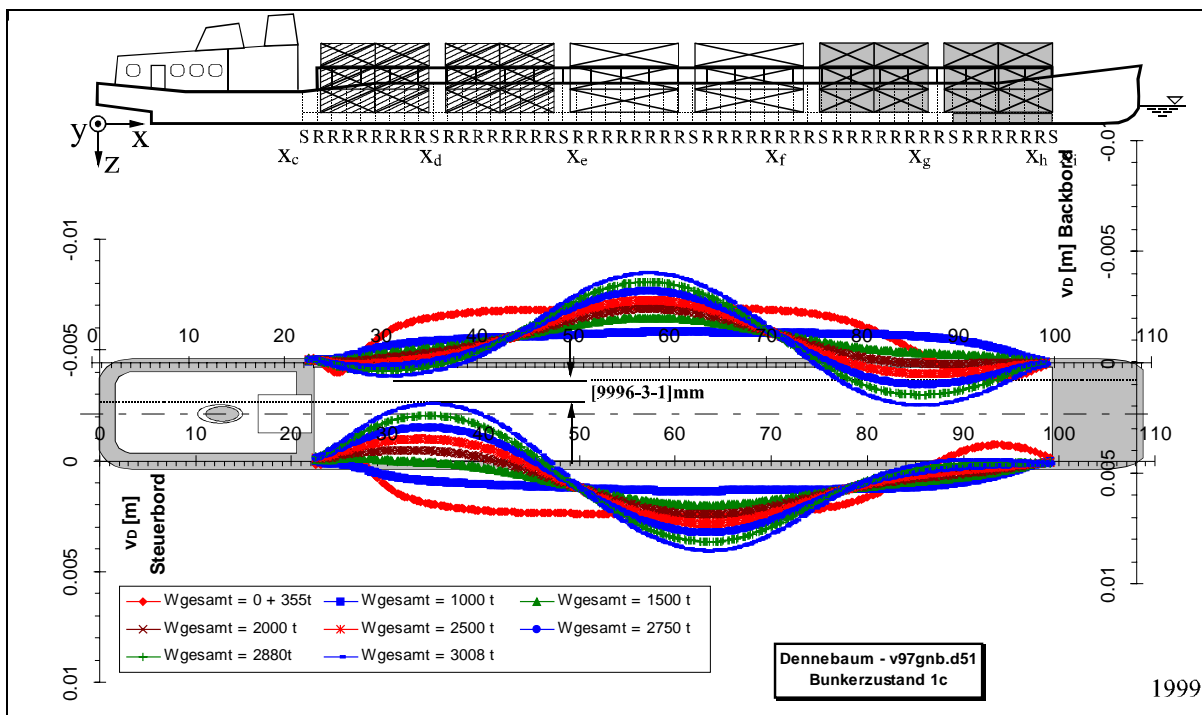


Abb. 8-21: Einbiegung des Dennebaums (ld7: Modell B)

Fig. 8-21: Deformation of the hatch coaming (ld7: model B)

Die Abb. 8-21 zeigt die Verformungen des Dennebaum auf der Steuerbord- und der Backbordseite. Mit unterschiedlichen qualitativen Ausprägungen verformt sich dieser im höher belasteten vorderen und achteren Bereich nach innen. Der schwach belastete Mittschiffsbereich dagegen bewegt sich nach außen. Da die Verformungen relativ gering sind, ergibt sich an der engsten Stelle des Laderaums eine lichte Breite von 9,992 m. Ein Einklemmen der Container ist trotz des geringen Spiels nicht zu befürchten (siehe Abb. 3-18).

Bezüglich des Tiefgang, Trimm und der Längsverformung (Abb. 8-22) läßt sich feststellen, daß diese den Erwartungen entsprechen. Mit zunehmender Beladung stellt sich eine leichte Aufbiegung des Schiffskörpers ein, welche aber absolut unkritisch ist.

Auch die Verwindung des Schiffskörpers durch die Torsionsbelastung ist sehr gering. In der Abb. 8-23 ist die Verdrehung zweier Laderaumsegmente vergrößert gegenübergestellt. Die betrachteten Segmente sind aus dem vorderen und achteren Teil des Laderaum in der Skizze grau unterlegt.

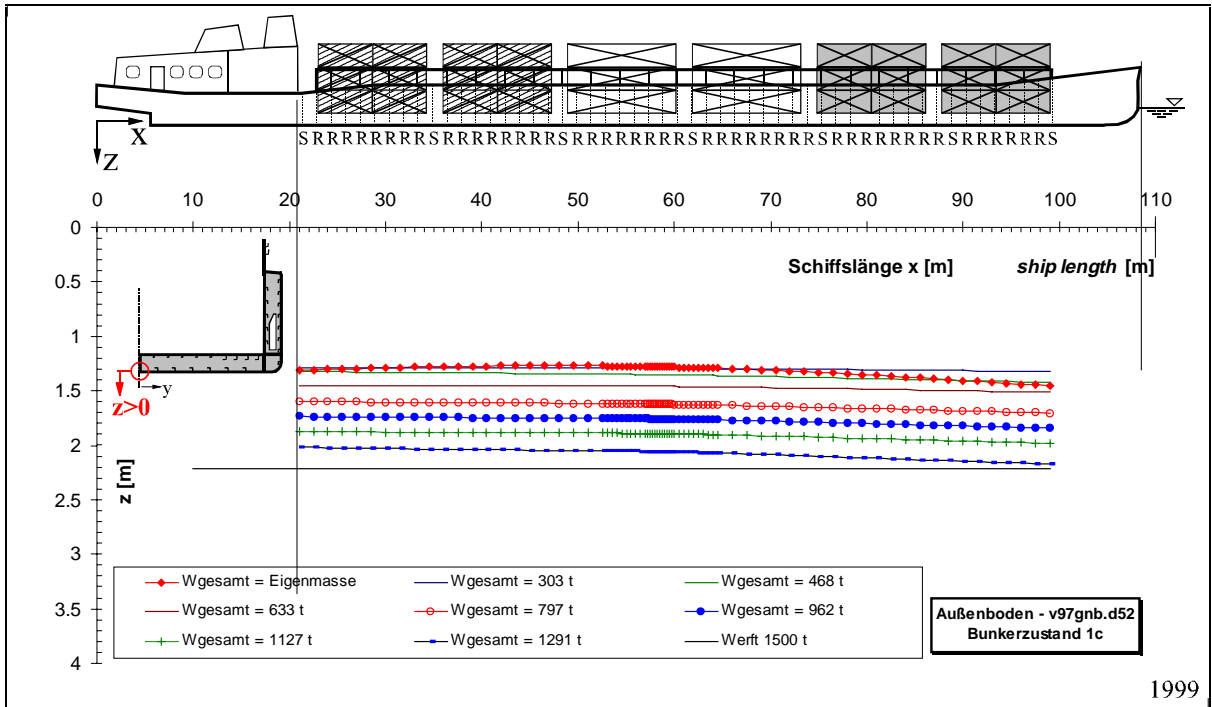


Abb. 8-22: Tiefgang, Trimm und Verformung des Außenbodens (ld7: Modell B)

Fig. 8-22: Immersion, trim and deformation of the outer bottom (ld7: model B)

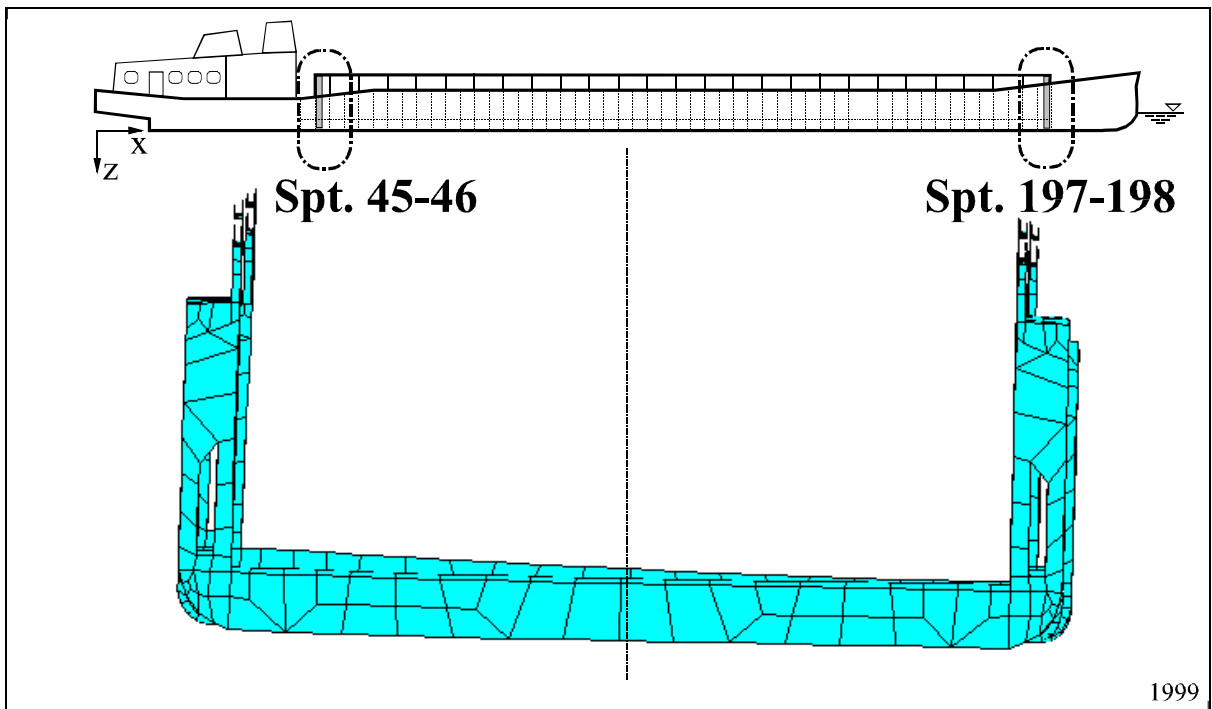


Abb. 8-23: Verwindung des Schiffskörpers (ld7: Modell B)

Fig. 8-23: Skewness of the ship hull (ld7: model B)

8.5.2 Spannungen

Die Abb. 8-24 legt den Spannungsverlauf am globalen Modell dar. Deutlich zeigt sich, daß die primäre Beanspruchung der Struktur aus der Längsbiegung resultiert. Dies ergibt sich aus dem erhöhten Spannungsniveau des Dennebaums im Mittschiffsbereich. Die Belastung aus der Torsion scheint vernachlässigbar. Selbst an den Luke-
necken zeichnet sich keine besondere Beanspruchung ab (siehe auch Abb. 8-27 und Abb. 8-28).

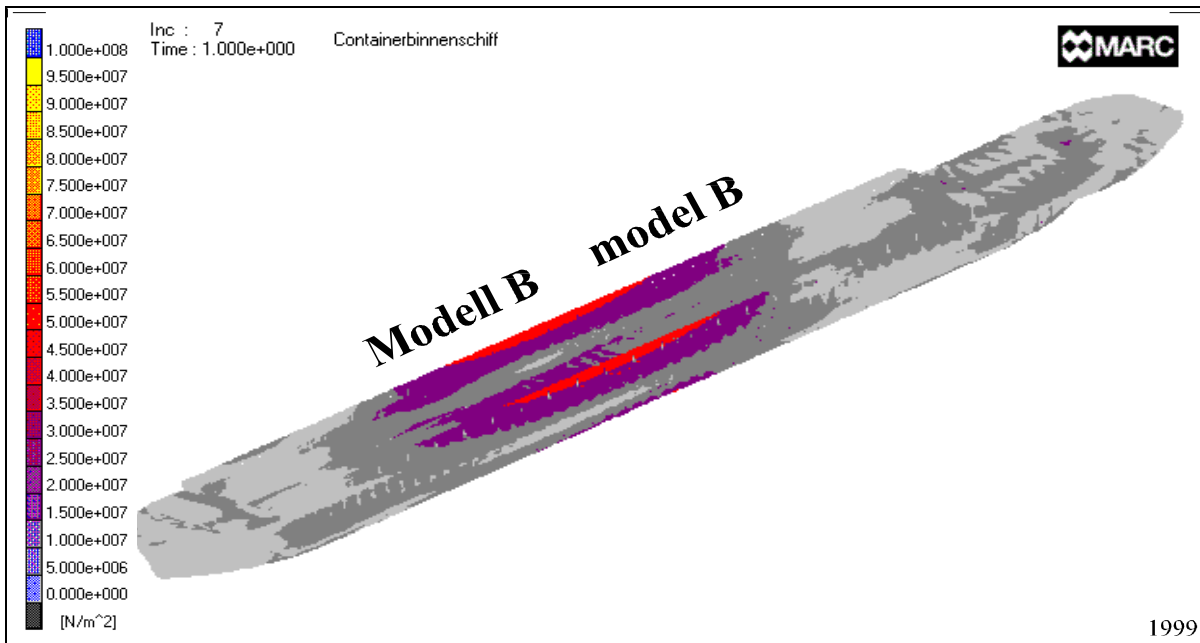


Abb. 8-24: Mises Spannungen des globalen Modells (Id7: Modell B)

Fig. 8-24: Mises stress of the global model (Id7: model B)

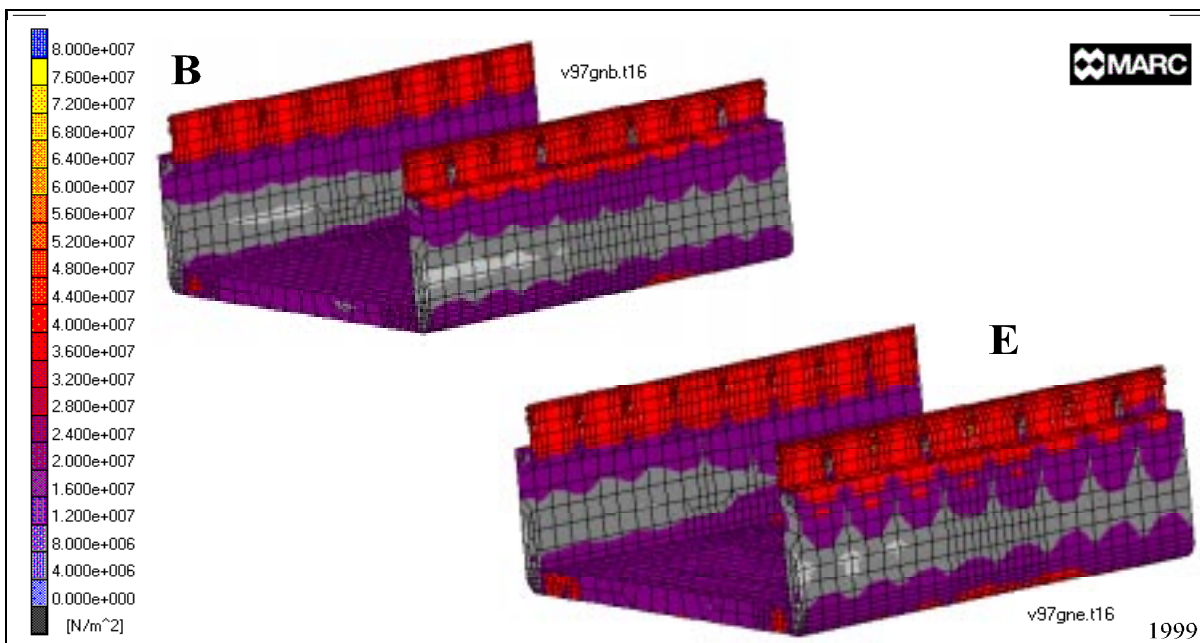


Abb. 8-25: Mises Spannungen des Laderaumsegmentes (Id7: Modell B,E)

Fig. 8-25: Mises stress of the cargo hold section (Id7: model B,E)

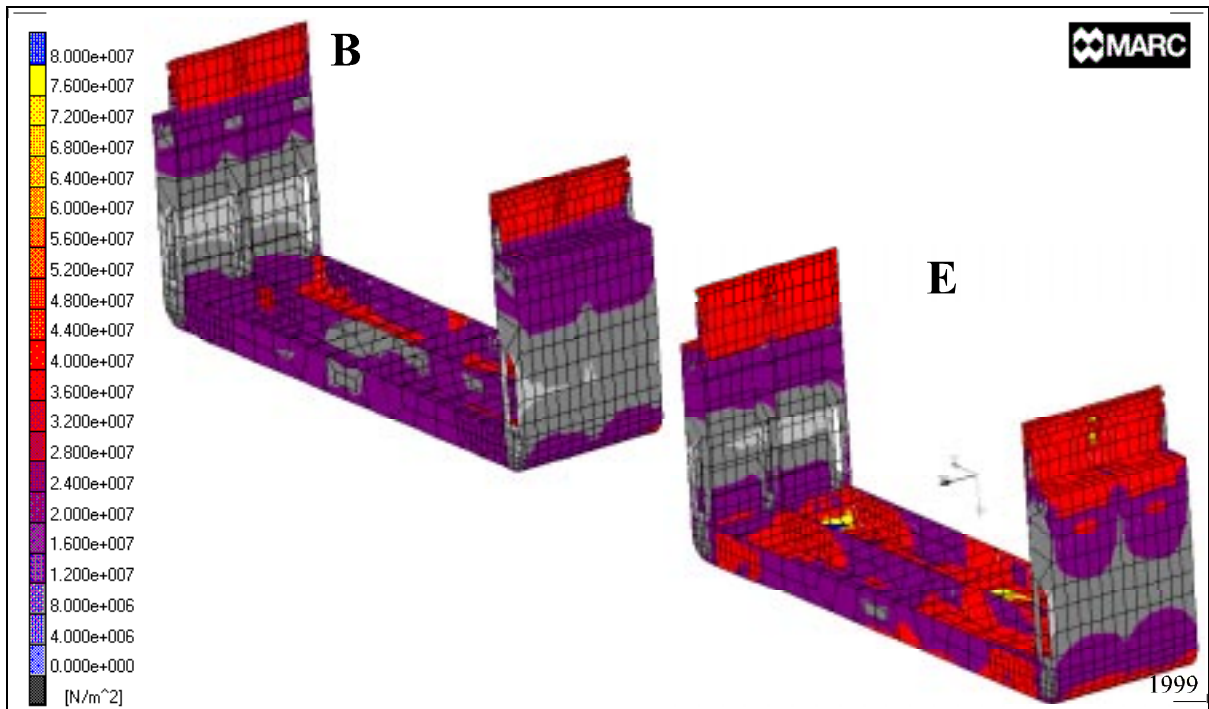


Abb. 8-26: Mises Spannungen des Detailausschnittes (Id7: Modell B,E)

Fig. 8-26: Mises stress of the detail (Id7: model B,E)

Die Darstellungen zeigen eine Gegenüberstellung der Mises Spannungen im mittleren Laderaumsegment für das Modell B und E. Wie zuvor erwähnt, zeigen sich kaum Unterschiede in den Berechnungsergebnissen. Der Einfluß der Imperfektionen ist somit als äußerst gering einzustufen. Ein leichter Anstieg der Spannungen ist für das Modell E lediglich an der Verbindung des Längsträgers zum Außenboden und den Bodenwrangen festzustellen (Abb. 8-26).

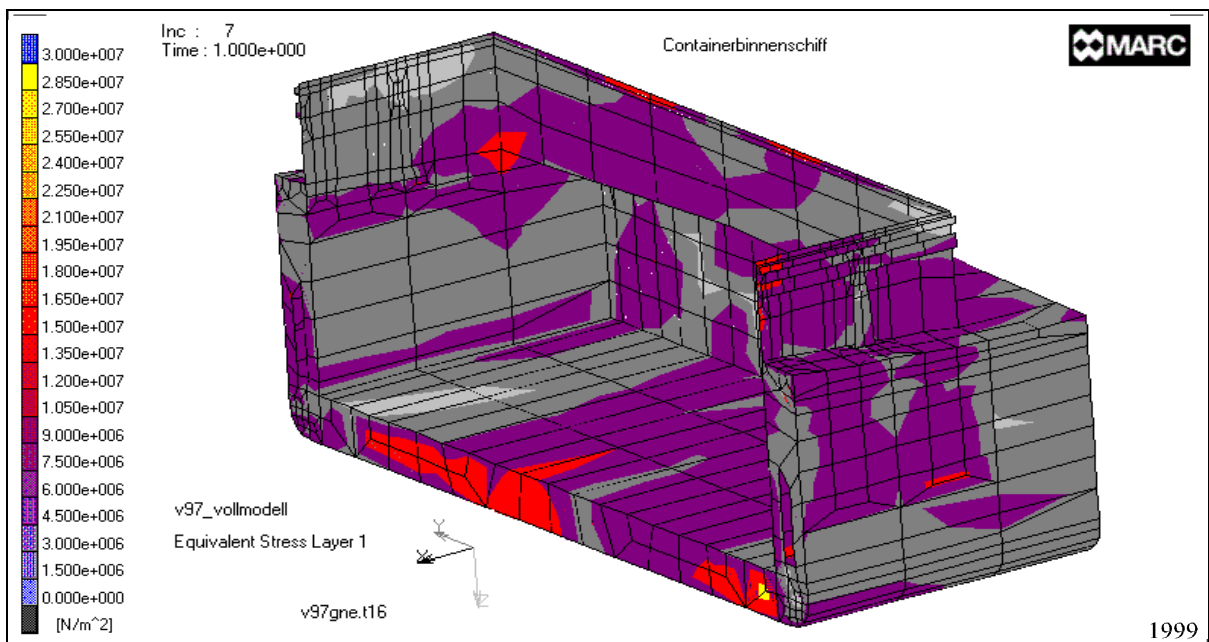


Abb. 8-27: Mises Spannungen an der achteren Lukenecke (Id7: Modell E)

Fig. 8-27: Mises stress at the aft hatch corner (Id7: model E)

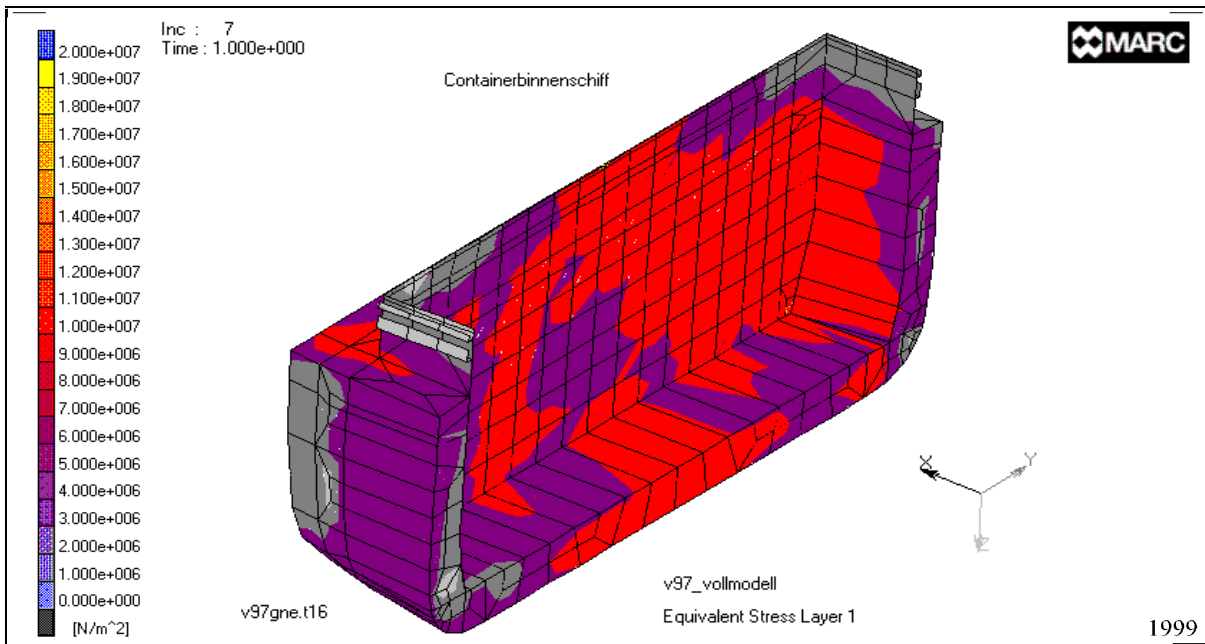


Abb. 8-28: Mises Spannungen an der vorderen Lukenecke (Id7: Modell E)

Fig. 8-28: Mises stress at the front hatch corner (Id7: model E)

Die nachstehenden Plots zeigen in einer detaillierten Betrachtung, daß sich aus der Torsionsbelastung keine besondere Beanspruchung der Lukenecken ergibt. Weder für den achteren (Abb. 8-27) und vorderen (Abb. 8-28) Laderaumabschluß zeigen sich außergewöhnliche Spannungen.

8.5.3 Auswertung der Ergebnisse

Insgesamt läßt sich feststellen, daß die Beanspruchung des Schiffskörpers durch eine Containerladung relativ belanglos ist. Daß die Spannungen und Verformungen aus der Längsbiegung so gering ausfallen, war zu erwarten, da die Belastungen des Id7 kaum mit denen des Id3 und Id4 zu vergleichen sind. Ein wenig überraschend ist allerdings die Tatsache, daß auch in den Lukenecken geringe Spannungen ($< 30 \text{ N/mm}^2$) auftreten. Verglichen mit den Erfahrungen des Seeschiffbaus sind diese als absolut harmlos einzustufen. Dies ist darauf zurückzuführen, daß wegen der relativ geringen Masse der Container das Volumen des Laderaums die einschränkende Größe ist und nicht die maximale Tragfähigkeit des Schiffes. Auch bleibt das Torsionsmoment wegen der geringen Breite und dem damit verbundenen kurzem Hebelarm unbedeutend.

8.6 Zusammenfassende Betrachtung

Das Kapitel 8 beinhaltet die ausführliche FE-Analyse eines Containerbinnenschiffes. Belastet wird dieses im Hogging- (Id3) und Saggingfall (Id4) durch schwere Stückgüter sowie eine Beladung mit Container (Id7). Verglichen mit dem Schubleichter zeigt an der Konstruktion ein eher geringer Einfluß der Imperfektionen. Lediglich im Saggingfall ergibt sich eine nennenswerte Reduzierung der Tragfähigkeit durch Plastizierungen im Dennebaum. Ein wenig überraschend ist die geringe Verwindung des Schiffskörpers bei einer Torsionsbelastung.

Bei den Imperfektionen hat die Abrostung den größten Einfluß. Je nach Ladefall ergibt sich nach 10 Jahren eine Reduzierung der Tragfähigkeit von 9% bis 18%. Deutlich geringer ist die Wirkung von starken Struktur­schäden am Dennebaum oder am Außenboden (3% bis 6%). Dies ist auf den Einbau der interkostalen Längsträger zurückzuführen. Eine detaillierte Bearbeitung von Konstruktionsvorschlägen für das Containerbinnenschiff ist in Kapitel 9 enthalten.