

6 FE-Analyse eines Kastenträgers

Als ein weiteres Beispiel aus der Literatur ist in der Diplomarbeit von Rüdiger Plum /B15/ der verrippte Kastenträger von Ostapenko /Osta81/ untersucht worden. Von besonderem Interesse sind hier der Einfluß der Vorverformungen, der Schweißspannungen und die Wirkung einer realitätsnahen Lagerung auf die Qualität der Ergebnisse.

6.1 Strukturbeschreibung

Im Jahr 1981 untersuchte A. Ostapenko das Modell eines Kastenträgers anhand eines Experimentes, um den Einfluß von Biegemomenten, Schubkräften und Torsionsmomenten zu bestimmen /Osta81/. Er stellte eine analytische Berechnungsmethode auf, um das nichtlineare Verhalten zu berechnen. Um seine eigenen Ergebnisse zu verifizieren, ist ein 1:1 Modell des Kastenträgers gefertigt worden.

Der Kasten wird aus mehreren Platten zusammengeschweißt, so daß sich ein geschlossener rechteckiger Querschnitt ergibt. Die Seitenwände sowie Ober- und Untergurt ändern in Längsrichtung die Plattenstärke. In der Mittelsektion wird die Blechdicke der Seitenwände auf die Hälfte, die der Gurte auf ein Viertel reduziert. Um die Strukturschwächung in diesem Bereich zu kompensieren, werden mehrere Längssteifen (Stringer) aufgeschweißt und mit den dickeren Plattenstärken an den Enden verbunden. Zusätzlich wird die Gesamtstruktur durch insgesamt sechs Ringsteifen verstärkt, die an den Enden zur Lagerung des Modells und in der Mitte zur Unterstützung der Stringer dienen. Dadurch wird die Mittelsektion in drei Bereiche unterteilt (siehe Abb. 6-1). Die Dimensionierung der Platten und die Abstände der Steifen sind so gewählt, daß vor dem Überschreiten der Mindestzugfestigkeit typische Strukturschädigungen, wie z.B. Beulen und Plastizieren auftreten.

Das Modell des Kastenträgers wird durch eine seitlich angreifende Kraft belastet. Durch die Anordnung der Lagerung und der Last ergibt sich eine Druckspannung im oberen und eine Zugbelastung im unteren Gurt.

In der Abb. 6-1 ist das FE-Modell mit Lager und Lastangriff dargestellt. Gelagert wird das Modell an den äußeren Ringsteifen, welche über die gesamte Breite gestützt werden. Im Experiment wird eine momentenfreie Lagerung durch Walzenelemente an beiden Lagerstellen gewährleistet. Folglich kann sich das Modell an den äußeren Enden frei drehen.

Der im Experiment verwendete Werkstoff ASTM A36 entspricht in etwa dem europäischen Schiffbaustahl ($R_{eh} = 250 \text{ N/mm}^2$, $R_m = 430 \text{ N/mm}^2$). Ausführlichere Angaben zur Struktur sind /Osta81/ zu entnehmen.

6.2 Experimentelle Ergebnisse

In der Abb. 6-2 ist das Kraft-Verformungs-Diagramm des Kastenträgers dargestellt. Die Kurven beziehen sich auf den Referenzpunkt X in der Abb. 6-1. Eine der dargestellten Kurven beschreibt das Strukturverhalten der experimentellen Untersuchung. Die maximal auftretende Belastung liegt bei $F_{\max} \approx 268 \text{ kN}$, wobei der Hydraulikstempel um 7,75 mm ausgefahren wird.

Die dargestellte Kurve für die experimentellen Ergebnisse kann grob in vier Bereiche aufgeteilt werden:

- 1) Bis zu einer Belastung von ca. $0,6 F_{\max}$ ($\approx 160 \text{ kN}$) ist das Strukturverhalten rein elastisch und somit vollständig reversibel.
- 2) Nach Überschreitung dieses Punktes tritt im Bauteil allmählich lokales Bauteilversagen auf, indem der auf Druck beanspruchte Obergurt und die aufgeschweißten Stringer beginnen

auszubeulen. Erste bleibende plastische Verformungen treten auf (Abb. 6-3); die Steifigkeit nimmt langsam ab, bis die maximale Belastung F_{\max} aufgebracht ist.

- 3) Sobald die Belastung den Höchstpunkt F_{\max} erreicht, tritt das Totalversagen der Struktur ein. Durch starkes Beulen im Seitenbereich und im oberen Gurt (Abb. 6-4), sowie durch übermäßiges Plastizieren der Steifen kann der Belastung kein Widerstand mehr entgegengebracht werden. Aufgrund der wenigen vorhandenen Meßpunkte, kann davon ausgegangen werden, daß der Steifigkeitsverlust relativ schnell abläuft.
- 4) Nach dem Bruch der Konstruktion sinkt die Kraft auf null.

Als Besonderheit muß erwähnt werden, daß sich aufgrund der hohen Belastung und dem plötzlichen Totalversagen der Struktur, die oberen Stringer vom Blech ablösen (siehe Abb. 6-6). Die sehr starke Kompression des oberen Bleches führt durch die geringe Materialstärke ($t=1,6$ mm) zu einem extremen Ausbeulen, bzw. Verwellen. Die doppelt so dicken Stege der Stringer können sich nicht übermäßig verformen, so daß ihre Schweißnähte den hohen Materialbeanspruchung nicht mehr standhalten und brechen.

6.3 Beschreibung des FE-Modells

Die Modellierung des FE-Modells erfolgt ausnahmslos mit universellen Schalenelementen. Insbesondere die Bereiche der aufgeschweißten Rippen werden sehr detailliert nachgebildet, um das Versagen der Steifen und den Einfluß der Schweißeigenspannungen ausreichend genau erfassen zu können.

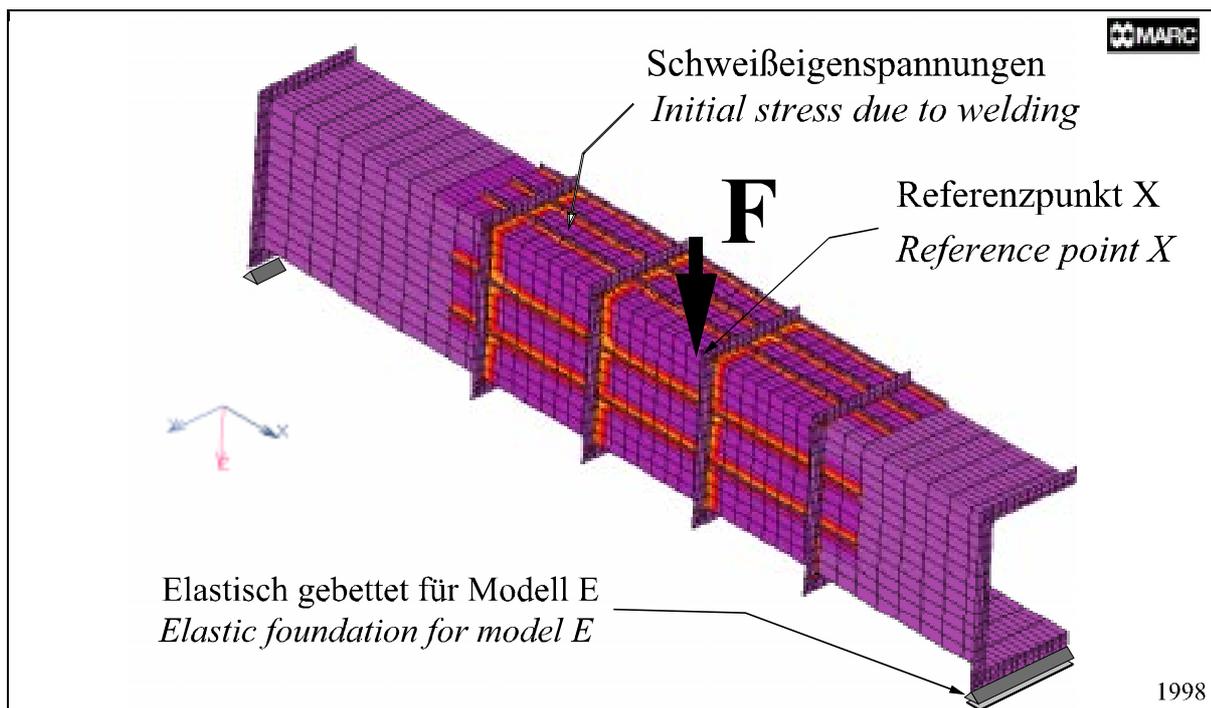


Abb. 6-1: FE-Modell des Kastenträgers

Fig. 6-1: FE-model of the box girder

Aus Symmetriegründen kann ein Halbmodell mit den entsprechenden Randbedingungen verwendet werden. Die Abb. 6-1 zeigt das FE-Halbmodell des Kastenträgers mit den Schweißeigenspannungen an den Rippen und die Krafteinleitung.

Die geometrischen Imperfektionen werden in **MARC** durch eine programmierte Subroutine in das Modell eingebracht. Die Seitenwand wird durch eine doppelte Sinuswelle in Längs- und Querrichtung vorverformt. Der Obergurt erfährt seine Vorverformung durch eine doppelte Sinuswelle in Längsrichtung und einer halben Sinus-

welle in Querrichtung. Die Annahmen bezüglich der Schweißspannungen entsprechen denen des Abschnitt 3.7.1.1 (siehe auch Abb. 6-1)

Wie sich in den numerischen Ergebnissen schon früh zeigt, muß der Lagerung bei diesem Modell eine besondere Aufmerksamkeit geschenkt werden. Deren korrekte Modellierung trägt wesentlich dazu bei, inwieweit numerische und experimentelle Ergebnisse übereinstimmen.

Entsprechend der experimentellen Anordnung werden die äußeren Enden frei drehbar gelagert. Mit diesen Randbedingungen sind die ersten Berechnungen durchgeführt worden, welche im elastischen Bereich ein zu steifes Verhalten zeigen (Modell B, C, D in Abb. 6-2). Die lineare Anfangsverformung des FE-Modells war gegenüber dem Experiment zu steil. Ursache dieses Verhaltens war die Annahme einer ideal steifen Lagerung in der FE-Analyse. Bei dem Experiment bestehen die Lagerstellen aber aus realem Material, mit den entsprechen (elastischen) Nachgiebigkeiten. Um diesen Fehler zu beheben wird die Lagerung des FE-Modells an den äußeren Ringsteifen elastisch gebettet. Der Bettungskoeffizient wird so variiert, bis sich die gleiche Steigung wie im Experiment ergibt.

6.4 Berechnungsergebnisse

Die Berechnungen werden in Form einer Parameteruntersuchung durchgeführt. Hierbei wird der Einfluß der Schweißspannungen, der Vorverformungen und der Lagerung untersucht.

Modell B:	Vorverformung ohne Eigenspannung,	ideal steife Lagerung
Modell C:	Eigenspannung ohne Vorverformung,	ideal steife Lagerung
Modell D:	Vorverformung und Eigenspannung,	ideal steife Lagerung
Modell E:	Vorverformung und Eigenspannung,	elastische Lagerung

Die Meßwerte aus dem Experiment werden mit den Ergebnissen der obigen vier Modelle verglichen. Als Indikator für das Strukturverhalten des Kastenträgers wird ein Diagramm erstellt, bei dem die Absenkung des obersten Knotens (Referenzpunkt X) des Kraftangriffes in z-Richtung aufgezeichnet werden.

6.4.1 Verformungen

Die Abb. 6-2 gibt den Kraft-Verformungsverlauf für den Punkt X des Kastenträgers wieder. Eine Kurve zeigt dabei die Meßdaten aus dem Experiment. Auffallend ist, daß zu Beginn der Messungen relativ viele Meßpunkte vorhanden sind. Nach dem Kollaps nimmt deren Anzahl deutlich ab. Dies ist darauf zurückzuführen, daß der Autor /Osta81/ das Experiment im Jahr 1981 durchführte. Man kann davon ausgehen, daß zu diesem Zeitpunkt die Meßtechnik noch nicht über die heutigen Möglichkeiten der schnellen, computergestützten Sensoren verfügte. Deshalb war das Aufnehmen von Meßwerten bei schnellen Vorgängen relativ schwierig. Somit sind die wenigen Meßwerte nach dem Kollaps und der daraus resultierende (ungenau) Kurvenverlauf kritisch zu bewerten.

Wie schon erwähnt, beginnt das Kraft-Verformungs-Diagramm für die Modelle B, C und D im Vergleich mit den experimentellen Ergebnissen mit einer zu großen Steigung. Dieser Effekt war auch schon bei der versteiften Platte in Kapitel 5 zu beobachten. Ursache sind die vernachlässigten Verformungen der Auflager. Wird dieses im Modell E berücksichtigt, ergibt sich die gleiche Steigung wie im Experiment. Zu erwähnen ist noch, daß wieder die Berücksichtigung der Vorverformungen die größte Reduzierung der maximal möglichen Last bringt. Der Einfluß der Schweißspannungen ist eher gering.

Bei der Betrachtung der Kurven fällt auf, daß die Berechnungen mit den Schweißspannungen (Modell C) eine höhere Kollapslast ausweisen. Dieses ist darauf zurückzuführen, daß die Zugspannungen an der Ringsteife (siehe Abb. 6-1) die auftretenden Druckspannungen aus der Krafteinleitung kompensieren.

Für den Bereich der großen Verformungen verlaufen die numerischen Ergebnisse annähernd gleich. Unterschiede sind allerdings im Bereich der Kollapslast zu beobachten. Der Abb. 6-2 ist zu entnehmen, daß für die aufwendigste Berechnungen (Schweißspannungen, Vorverformungen und elastische Lagerung) eine sehr

gute qualitative Annäherung an die experimentellen Ergebnisse erreicht wird. Im Vergleich zum Experiment stabilisiert sich die Konstruktion in den Berechnungen im überkritischen Bereich etwas, da daß Reißen im Material nicht erfaßt wird. Das "vorzeitige" Abknicken des experimentellen Kurvenverlaufs ist auf Plastizierungen im Material zurückzuführen, wodurch der kleinere Tangentenmodul für die Steifigkeit maßgeblich wird. Das dieser Effekt nicht ausreichend genau nachgebildet werden konnte, ist mit unzureichend bekannten Materialdaten des Experimentes zu begründen. Hinzuweisen ist auch auf die Tatsache, daß erst durch die Berücksichtigung einer realitätsnahen, (elastischen) Lagerung die Anfangssteigungen der numerischen und der experimentellen Untersuchung gleich sind. Dies veranschaulicht die extrem wichtige Bedeutung einer guten Nachbildung der Randbedingungen.

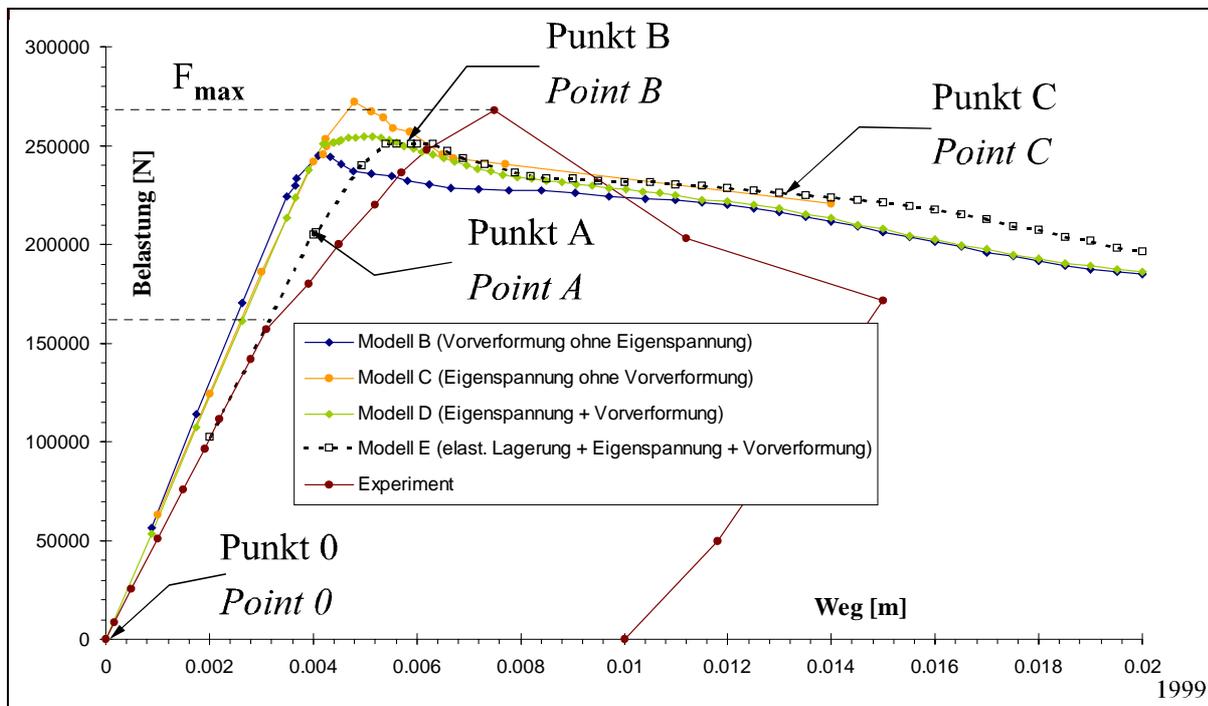


Abb. 6-2: Kraft-Verformungs-Diagramm

Fig. 6-2: Load -deformation diagram

6.4.2 Spannungen

Bei der Betrachtung der Spannungen fällt auf, daß diese bei Erreichen des Punktes A (siehe Abb. 6-2) noch unterhalb der Streckgrenze liegen. Lediglich am Kraftangriffspunkt und an den Auflagern werden diese lokal überschritten. Die globalen Verformungen der Struktur (Abb. 6-3) entsprechen der zu erwartenden Durchbiegung. Außer einem leichten Ausbeulen der Seitenwände ist ein übermäßiges, lokales Bauteilversagen nicht zu erkennen.

Wird im Kraft-Verformungs-Diagramm der Punkt B (Abb. 6-4) erreicht, kann von einem Steifigkeitsverlust der Gesamtstruktur gesprochen werden. An diesem Punkt wird die Kollaps erreicht und bei weiterer Belastung überschritten. Auffallend ist aber, daß an den längslaufenden Versteifungen kein lokales Ausweichen zu beobachten ist. Dieses ist damit zu begründen, daß die Blechdicken der Gurte und der Seitenwand hier sehr dünn sind und so ein Beulen provozieren.

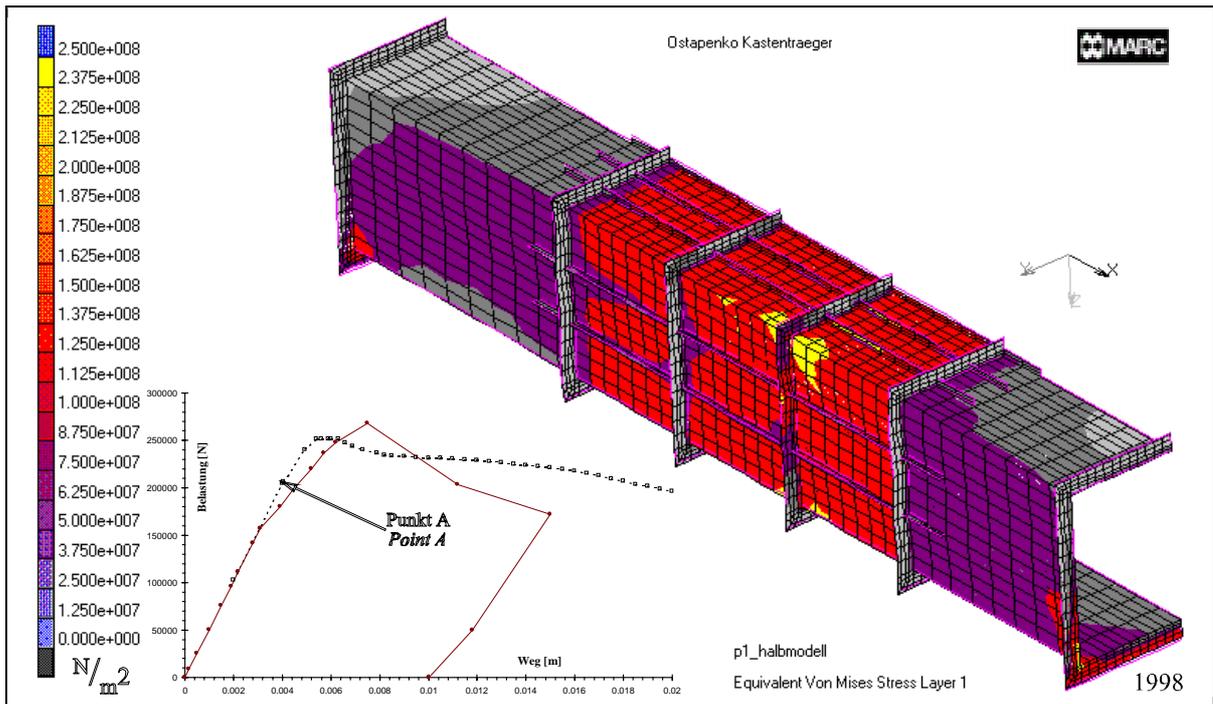


Abb. 6-3: Verformungen am Punkt A

Fig. 6-3: Deformations at point A

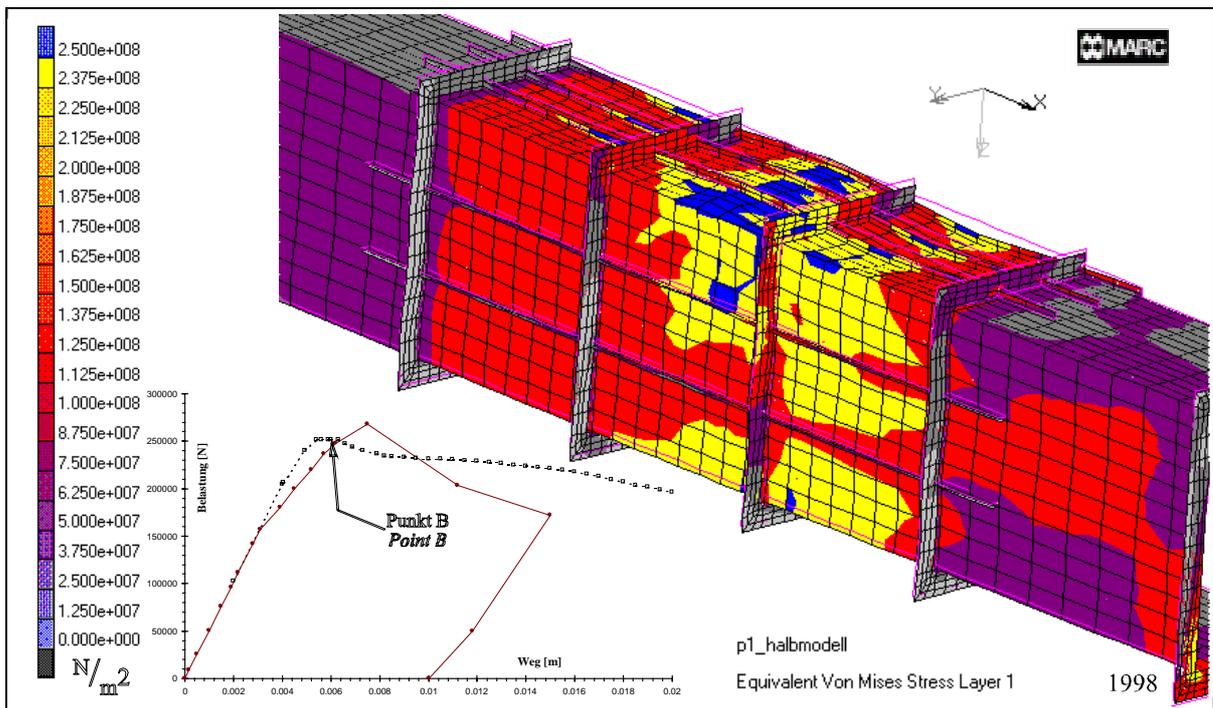


Abb. 6-4: Verformungen am Punkt B

Fig. 6-4: Deformations at point B

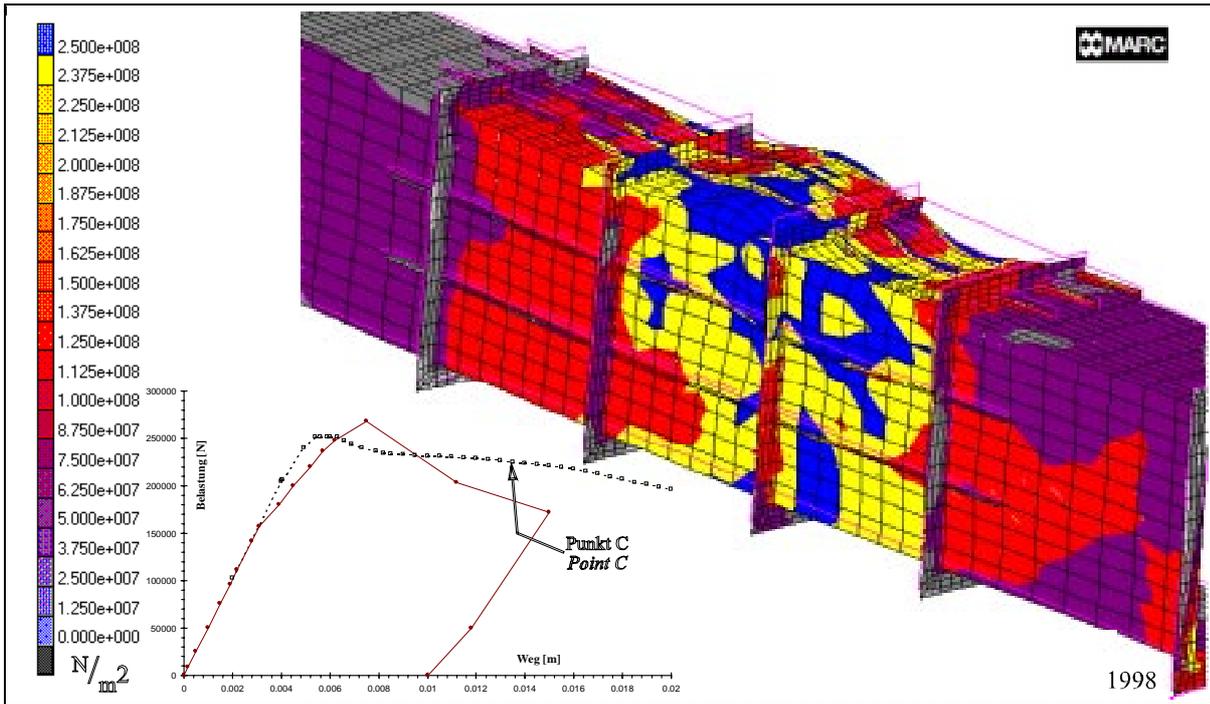


Abb. 6-5: Verformungen am Punkt C

Fig. 6-6: Deformations at point C



Abb. 6-6: Foto des Experimentes

Fig. 6-5: Photo of the experiment

Bei einer weiteren Verfolgung des Kraft- Verformungsverlaufes ergibt sich eine abnehmende Kraft. In der Abb. 6-5 ist die Strukturverformung für den Punkt C wiedergegeben. Die auftretenden Spannungen erreichen dabei die Mindestzugfestigkeit des Materials. Starke plastische Verformungen der Gurte und der Seitenwand bestimmen das Verhalten der Struktur.

Anzumerken ist noch, daß die in den vorangegangenen Abbildungen gezeigten Deformationen eine gute Übereinstimmung zu den Fotos des Experimentes (Abb. 3-6) /Osta81/ zeigen.

Das ebenfalls dort erkennbare Ablösen der Stringer konnte in den numerischen Untersuchungen noch nicht nachgebildet werden, da ein entsprechendes Rißkriterium noch entwickelt und implementiert werden muß.

6.5 Auswertung der Ergebnisse

Ziel dieses Kapitels war es, die Möglichkeiten einer FE Simulation im unter- und überkritischen Bereich unter Beweis zu stellen. In diesem Beispiel wird die Software auf das Kollapsverhalten einer komplizierten Struktur angewendet. Zur Verifizierung der Ergebnisse diente der *Ostapenko* Kastenträger, welcher in einem Experiment ausführlich untersucht wurde.

Es zeigt sich, daß die für den Schädigungsvorgang wichtigen Anfangsbedingungen in Form von Schweißspannungen und Vorverformungen der Blechstrukturen einen wesentlichen Einfluß auf das Strukturverhalten haben. Dazu werden alle Versteifungen (Ringsteifen und Stringer) mit idealisierten Schweißspannungen beaufschlagt, die für ein frühzeitiges Fließen des Materials sorgen. Allerdings ist ihr Einfluß auf das Festigkeitsverhalten eher gering, da wegen der recht schwachen Dimensionierung der Bauteile zuvor ein Versagen aufgrund starker Ausbeulungen provoziert wird. Die dickeren Stege der Steifen sind auf dünnen Blechen verschweißt, so daß vor dem Plastizieren der Stringer die Struktur lokal und später global durch Ausbeulen der Gurte und des Seitenbleches versagt.

Während die Wirkung von Imperfektionen auf Konstruktionen unter Belastung bereits in Kapitel 5 untersucht wurde, ist in dieser Studie der Einfluß von realen Lagerungsbedingungen in die Analyse miteinbezogen worden. Es stellte sich heraus, daß der Unterschied zwischen einer üblicherweise in der FE Simulation genutzten ideal steifen Lagerung und der im Experiment realen, nachgiebigen Unterstützung des Modells nicht vernachlässigbar ist. Selbst geringe Verformungen der Lagerstellen (0,15 mm), die in der FE Simulation nachgebildet werden, sorgen für ein Absinken der Gesamtsteifigkeit bereits im elastischen Gebiet.

In dieser Analyse konnte das Verhalten des Kastenträgers im überkritischen Bereich nur bedingt wiedergegeben werden. Für das schnelle Absinken der Steifigkeit während des Experimentes ist das Abreißen der Stringer von der Beplattung im Kompressionsbereich verantwortlich. Leider werden darüber in der Literatur keine Aussagen gemacht, so daß nicht eindeutig geklärt werden kann, an welchen Stellen und zu welchem Zeitpunkt dieser Versagensmechanismus auftritt. Zum derzeitigen Zeitpunkt kann das Abreißen der Steifen noch nicht nachgebildet werden. Dessen Ergänzung ist Ziel einer anschließenden Arbeit.

Eine weitere Neuerung in diesen Analysen ist die Nutzung modernster Rechenanlagen und -techniken. Die Vorteile im Multiprozessorbetrieb sind in den hier durchgeführten Berechnungen sehr deutlich geworden worden. Die parallele Strukturanalyse wird aufgrund des enormen Zeitvorteils in absehbarer Zeit das serielle Rechnen mit nur einem Prozessor verdrängen. Die Nachteile in der Handhabung des Modells während des Preprocessings dürfen jedoch nicht außer Betracht bleiben.

Fazit:

Anhand dieses Beispiels zeigte es sich, daß eine gute quantitative Übereinstimmung zwischen Experiment und FE-Ergebnissen erzielt werden kann. Die qualitativen Abweichungen lassen sich durch einen erhöhten Aufwand bei der Beschreibung der Randbedingungen, der Imperfektionen und des Materials verbessern. Verbleibende Diskrepanzen sind auf unbekannte Daten aus den Experimenten zurückzuführen.

Die numerischen Ergebnisse zeigten aber auch, daß für eine weitere Verbesserung die Implementierung eines geeigneten Rißkriteriums notwendig wird. Dies wird Teil einer anschließenden Forschungsarbeit sein.

