

IB 131-2015/60

**Simulation von Bauweisen-Konzepten eines
AKE Luftfrachtcontainers und deren
Bodenplatte**

Lennart Weiß, Olaf Mierheim, Ivonne Bartsch



**Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik
Braunschweig**

Oktober/2015

Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt e.V.
in der Helmholtzgemeinschaft
Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik

IB 131-2015/60

**Simulation von Bauweisen-Konzepten eines AKE
Luftfrachtcontainers und deren Bodenplatte**

Braunschweig, Oktober, 2015

Der Bericht umfasst:

26 Seiten

Institutsleiter:
Prof. Dr.-Ing. M. Wiedemann



Leiter der Abteilung FLB:
Prof. Dr.-Ing. C. Hühne



Verfasser:
Lennart Weiß



Olaf Mierheim



Ivonne Bartsch



Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abbildungsverzeichnis	II
Formelverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	IV
Bezeichnungen	V
1. Einleitung.....	6
2. Allgemeines	7
3. Konzepte	11
3.1. Bauweisen-Konzept Rahmen.....	11
3.2. Bauweisen-Konzept Box	11
4. Simulation Luftfrachtcontainer AKE	13
4.1.1. Base Deflection Test	15
4.1.2. Bridging and Cresting Test	15
4.1.3. Racking Test	16
4.1.4. Horizontal Load Test	19
5. Simulation der Bodenplatte.....	22
5.1. Ergebnisse	25
6. Literaturverzeichnis	26

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Maximalabmessungen AKE Container	7
Abbildung 2: Horizontal Load Test.....	9
Abbildung 3: Upward Load Test	9
Abbildung 4: Base Strength Test.....	9
Abbildung 5: Cycling Test.....	9
Abbildung 6: Racking Test.....	9
Abbildung 7: Bridging and Cresting Test	9
Abbildung 8: Water Tightness Test.....	9
Abbildung 9: Base Deflection Test.....	9
Abbildung 10: Rollen- und Kugeltest	10
Abbildung 11: Bauweisen-Konzept Rahmen	11
Abbildung 12: Bauweisen-Konzept Box.....	12
Abbildung 13: FE-Modell Rahmen-Konzept mit Profildarstellung der Balkenelemente an der Bodenplatte	14
Abbildung 14: FE-Modell Box-Konzept mit Profildarstellung der Balkenelemente an der Bodenplatte	14
Abbildung 15: Base Deflection Test - Aufbau und Ergebnisse für Rahmen- (links) und Box-Konzept (rechts).....	15
Abbildung 16: Bridging and Cresting Test - Aufbau und Ergebnisse für Rahmen- und Box-Konzept.....	16
Abbildung 17: Racking Test lateral - Aufbau und Ergebnisse für Rahmen- und Box-Konzept	17
Abbildung 18: Racking Test longitudinal - Aufbau und Ergebnisse für Rahmen- und Box-Konzept.....	18
Abbildung 19: Horizontal Load Test positiv longitudinal - Aufbau und Ergebnisse für Rahmen- und Box-Konzept	19
Abbildung 20: Horizontal Load Test negativ longitudinal - Aufbau und Ergebnisse für Rahmen- und Box-Konzept	20
Abbildung 21: Horizontal Load Test negativ lateral - Aufbau und Ergebnisse für Rahmen- und Box-Konzept	21
Abbildung 22: Schematisches Modell.....	22
Abbildung 23: Verformungsbild bei kleinem Verhältnis von Hautbiegesteifigkeit B und Kerndrucksteifigkeit E.....	23
Abbildung 24: Verformungsbild bei großem Verhältnis von Hautbiegesteifigkeit B und Kerndrucksteifigkeit E.....	23
Abbildung 25: Variation der Hautsteifigkeit: Druckspannung im Schaum	24
Abbildung 26: Variation der Schaumsteifigkeit: Druckspannung im Schaum	24
Abbildung 27: Verhältnis aus Biegesteifigkeit der Haut und Schaumsteifigkeit	25



Formelverzeichnis

Formel 1: Berechnung der Nutzmasse 7

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht der Testverfahren aus dem IATA ULD Regulations..... 9

Bezeichnungen

Lateinische Buchstaben

Symbol	Einheit	Bedeutung
B	Nmm ²	Biegesteifigkeit
E	N/mm ²	E-Modul/Steifigkeit
EI	Nmm ²	Biegesteifigkeit
K	Nmm	Plattensteifigkeit
I	mm ⁴	Flächenträgheitsmoment
t	mm	Dicke

Griechische Buchstaben

Symbol	Einheit	Bedeutung
μ	-	Querkontraktionszahl-
ρ	g/cm ³	Dichte

Abkürzungen

ALU	Aluminium
AKE	Containertyp
DLR	Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt (e. V.)
e. V.	Eingetragener Verein
IATA	International Air Transportation Association
ULD	Unit Load Device
UTM	ULD Technical Manual

1. Einleitung

Um neue Werkstoffen und Bauweisen für Luftfrachtcontainer einsetzen zu können, müssen diese qualifiziert werden. Hierfür stehen entweder Tests oder Simulationen zur Verfügung. Für Luftfrachtcontainer sind empfohlene Tests aus ULD Regulations [3] (ehemals dem IATA ULD Technical Manual [2]) bekannt. Da teilweise der komplette Luftfrachtcontainer als ein Bauteil getestet wird, sind nicht alle geforderten Tests umsetzbar. Eine FEM-Simulation ist hier die kostengünstigere und schnellere Alternative.

Zunächst werden in Kapitel 2 die allgemeinen Angaben bezogen auf einen Luftfrachtcontainer und die vorgeschriebenen Tests beschrieben. Kapitel 3 zeigt die Bauweisen-Konzepte, welche in darauf folgenden Kapitel zum Tragen kommen. In Kapitel 4 sind die Ergebnisse der FEM-Simulation beschrieben, welche die Tests des gesamten Luftfrachtcontainers betreffen. Unterschiedliche Bauweisen-Konzepte werden hier untersucht. Als Material wurde ausschließlich Aluminium betrachtet. Die so gewonnenen Erkenntnisse können für weitere Betrachtungen heran gezogen werden. Kapitel 5 betrachtet die Bodenplatte eines Luftfrachtcontainers und simuliert hier ebenfalls einen für das Bauteil relevanten Test. Das betrachtete Material ist hier ein Sandwich, bei dem der Kern und die Deckschicht variiert werden.

2. Allgemeines

Im Folgenden wird der Luftfrachtcontainer vom Typ AKE, der im Folgenden kurz AKE genannt wird, beschrieben. Grundsätzlich unterscheiden sich andere Typen von Luftfrachtcontainern hinsichtlich Abmessungen und maximalem Abfluggewicht. Die Maximalabmessungen eines AKE sind Abbildung 1 zu entnehmen. Die Fläche des Bodens beträgt 1,534 m mal 1,562 m (K-Größe). Die Höhe misst maximal 1,626 m und die Breite des Dachs beträgt 2,007 m.

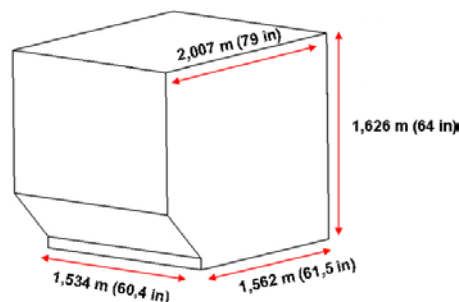


Abbildung 1: Maximalabmessungen AKE Container

Das maximale Abfluggewicht beträgt 1.588 kg und darf nicht überschritten werden. Die Nutzmasse (m_N) ergibt sich aus Abflugmasse (m_A) und Leermasse (m_L). Dies spiegelt sich in Formel 1 wieder.

$$m_N = m_A - m_L$$

Formel 1: Berechnung der Nutzmasse

Dies bedeutet, je kleiner die Leermasse, desto mehr Nutzmasse kann transportiert werden. Die Nutzmasse ist der einzige Faktor, mit dem ein Anwender wie Lufthansa Cargo Geld verdienen kann. Die Leermasse verursacht im Gegensatz dazu Kosten (z. B. Kerosin, Reparaturen) und sollte daher möglichst gering gehalten werden. Ein geringeres Leergewicht hat einen geringeren Kraftstoffverbrauch und ein damit einhergehender geringerer CO₂-Ausstoß zufolge.

In den IATA ULD¹ Regulations [3] sind grundlegende Anforderungen an Luftfrachtcontainer beschrieben, welche im Folgenden auszugsweise erläutert werden. In Tabelle 1 sind die verschiedenen Testverfahren abgebildet, die ein Luftfrachtcontainer für die Zulassung bestehen muss. Beim Horizontal Load Test, welcher auf Abbildung 2 zu sehen ist, wird der Container bis zu seinem maximalen Abfluggewicht beladen. Die gleiche Last wird zusätzlich auf die Seitenwand aufgebracht. Die Testlast beträgt horizontal und vertikal 15.580 N. Die Deformation der Seitenwand darf dabei nicht mehr als 38 mm betragen oder permanent sein. Abbildung 3 zeigt den Upward Load Test, bei dem eine vertikale Last von ebenfalls 15.580 N aufgebracht wird. Auch hier darf keine permanente Deformation auftreten.

¹ Unit Load Device: Oberbegriff für Luftfrachtcontainer und -paletten

Beim Base Strength Test von Abbildung 4 wird der Container auf ein Transportladesystem gestellt und mit der dreifachen maximalen Beladung belastet. Auch hier dürfen keine permanenten Deformationen auftreten und die Tür muss sich öffnen und schließen lassen. Abbildung 5 zeigt den Cycling Test. Hierbei wird der mit der maximalen Zuladung beladene Container mit einer Geschwindigkeit von 0,3 m/s 100 Mal über das Transportladesystem geschoben. Wie beim vorherigen Test dürfen keine permanenten Deformationen auftreten. Beim Racking Test von Abbildung 6 wird der Container bis zu seinem maximalen Abfluggewicht beladen. An einer Seite wird der Container eingespannt und dann mit einer Testlast von 9.600 N am oberen Rand auf der gegenüberliegenden Seite belastet. Permanente Deformationen sind nicht erlaubt. Abbildung 7 zeigt den Bridging and Cresting Test. Der Container wird auch hier bis zu sein maximales Abfluggewicht beladen. Die Masse wird im Schwerpunkt ausgerichtet. Der Container wird so über zwei Transportladesysteme mit einen Höhenunterschied von 152 mm geschoben. Der Container soll so mindestens 5 s balancieren. Beim Water Tightness Test wird der Container auf seine Dichtigkeit getestet. Dabei wird der Container mit einem Wasserschlauch bespritzt. Die Düse hat einen Durchmesser von 12,7 mm und soll einen Abstand von 1,5 m zum Container haben. Der Druck beträgt 1 bar, sodass eine Geschwindigkeit des Wasserstroms von 102 mm/s entsteht. Nach dem Test muss das Innere des Containers trocken geblieben sein. Der letzte Test in der Tabelle ist der Base Deflection Test. Dieser ist in Abbildung 9 veranschaulicht. Wieder wird der Container bis zu seinem maximalen Abfluggewicht beladen.

Die Testlasten sind u. a. abhängig von der jeweiligen Bodenfläche des Luftfrachtcontainers, da diese das maximale Abfluggewicht festlegt. Die in Tabelle 1 gezeigten Lasten müssen für einen anderen Luftfrachtcontainertyp neu definiert werden.

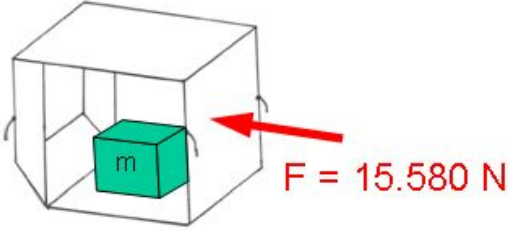
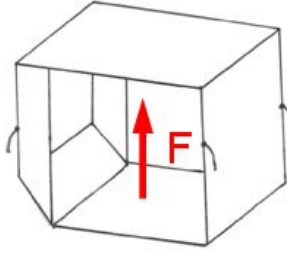
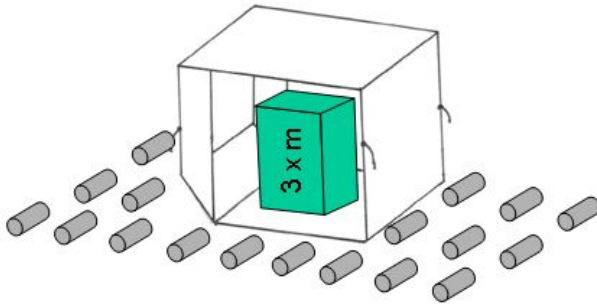
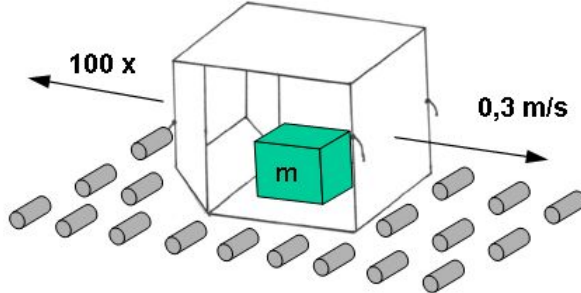
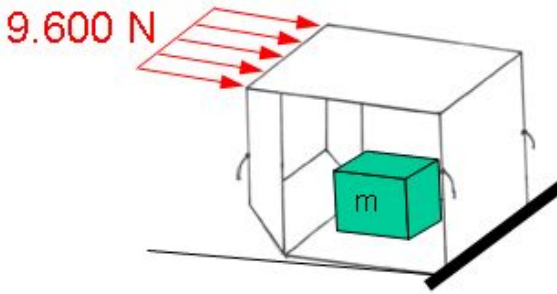
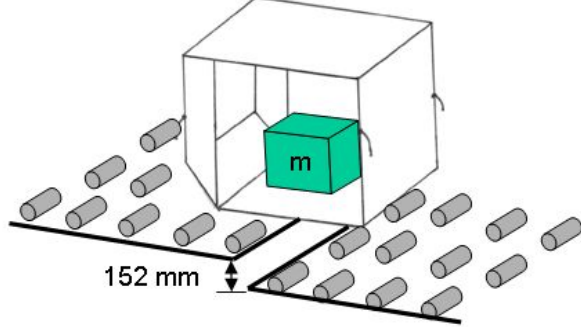
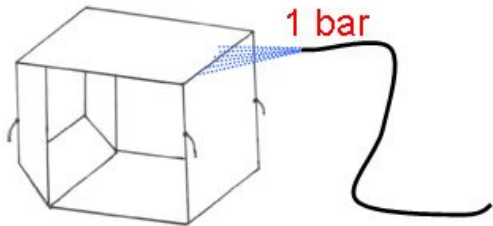
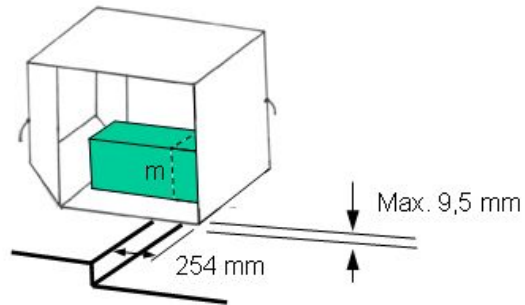
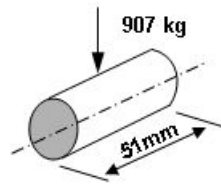
 <p>Abbildung 2: Horizontal Load Test</p>	 <p>Abbildung 3: Upward Load Test</p>
 <p>Abbildung 4: Base Strength Test</p>	 <p>Abbildung 5: Cycling Test</p>
 <p>Abbildung 6: Racking Test</p>	 <p>Abbildung 7: Bridging and Cresting Test</p>
 <p>Abbildung 8: Water Tightness Test</p>	 <p>Abbildung 9: Base Deflection Test</p>

Tabelle 1: Übersicht der Testverfahren aus dem IATA ULD Regulations

Für den Boden werden ergänzend zu den eben beschriebenen Tests noch zwei weitere Versuche gefordert, welche in Abbildung 10 veranschaulicht sind. Beim Rollentest wird eine Rolle aus Stahl mit einem Durchmesser von 25,4 mm und einer Länge von 50,8 mm mit 907 kg belastet. Die permanente Deformation darf nicht mehr als 0,25 mm betragen. Beim Kugeltest wird der Boden mit einer Kugel aus Stahl mit einem Durchmesser von 25,4 mm mit einem Gewicht von 40 kg belastet.

Die permanente Deformation darf nicht mehr als 0,5 mm betragen. Hierbei sei angemerkt, dass dieser Test für alle Bodenplatten bzw. Paletten gilt. Ein K-Size Boden hat eine Dicke von 2,5 mm und ein A-Size Boden eine Dicke von 4 mm.

Roller test



Ball test

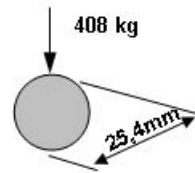


Abbildung 10: Rollen- und Kugeltest

3. Konzepte

Die im folgenden Kapitel betrachteten Bauweisen-Konzepte werden in diesem Kapitel kurz beschrieben, vergleiche auch IB 131-211-51 [1].

3.1. Bauweisen-Konzept Rahmen

Beim Design Konzept Rahmen (siehe Abbildung 11) findet der Lastabtrag primär über den biegesteifen Rahmen statt. Die biegeweichen Seitenwände dienen vor allem der Verkleidung und können hauptsächlich Schubbelastungen übertragen. Das hier betrachtete Konzept hat den Vorteil, dass die Seitenwände ein geringes Gewicht haben und die Komponenten eine einfache Geometrie haben. Allerdings gibt es viele Verbindungselemente. Der erforderliche Rahmen trägt zum Gewicht bei.

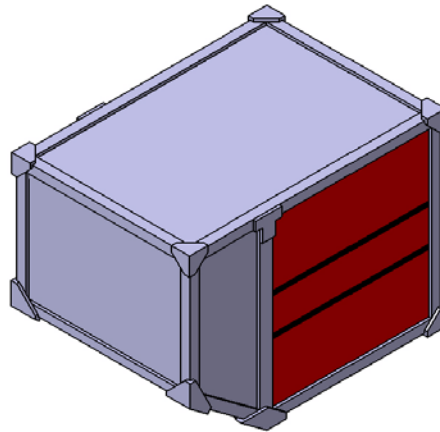


Abbildung 11: Bauweisen-Konzept Rahmen

3.2. Bauweisen-Konzept Box

Abbildung 12 zeigt das Bauweisen-Konzept Box. Hier findet der Lastabtrag primär über die beulsteifen Seitenwände statt. Die Struktur wird aus ebenen Platten zusammengefügt. Ein Rahmen wie beim Bauweisen Konzept-Rahmen gibt es nicht. Vielmehr gelten die Stöße der Seitenwände als Verbindung zueinander. Es gibt auch hier nur ebene Komponenten. Nachteilig sind ebenfalls die vielen Verbindungselemente sowie die dickwandigeren Seitenwände.

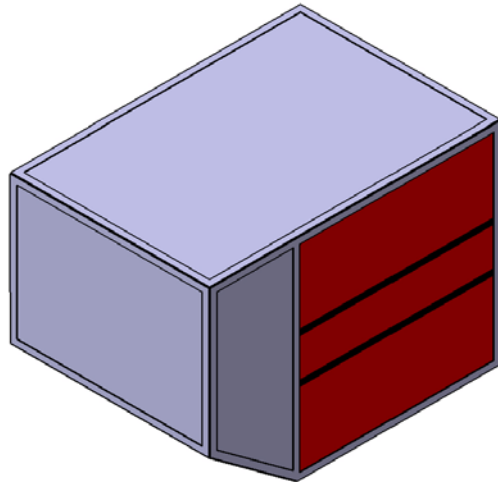


Abbildung 12: Bauweisen-Konzept Box

4. Simulation Luftfrachtcontainer AKE

Diese Simulation wurde von Lennart Weiß durchgeführt. Für die aussagekräftige Untersuchung verschiedener Konstruktionskonzepte ist die numerische Abbildung der Tests aus dem IATA ULD Regulations anhand eines globalen FE-Modells eines AKE-Containers nötig. Zur Anwendung kamen die Softwaretools Patran und Nastran.

Die Modellierung mittels finiter Elemente in Patran basiert auf den Abmessungen des AKE-Containers (Abbildung 1) sowie ausgewählten Lastfällen aus Tabelle 1. Für das globale Verformungsverhalten des Containers sind die folgenden Lastfälle relevant:

- Horizontal Load Test (dimensionierend)
- Racking Test
- Bridging and Cresting Test
- Base Deflection Test

Um dem Rahmen- und Box-Konzept, vergleiche Kapitel 3, gerecht zu werden, besteht das FE-Modell aus Schalen (CQUAD4) und Balkenelementen (CBAR). Randbedingungen wie Einspannungen und Lasten wirken direkt auf die entsprechenden Knoten. Folgende Materialparameter (MAT1) kommen für alle Schalen- und Balkenelemente zum Einsatz:

- Steifigkeit: $E=70$ GPa
- Querkontraktion: $\mu=0,33$
- Dichte: $\rho=2,78$ g/cm³
- Streckgrenze: 300 MPa

Ausgenommen sind die Balkenelemente, welche Zugseile im Modell repräsentieren. Diese besitzen folgende Materialparameter (MAT2):

- Steifigkeit: $E=210$ GPa
- Querkontraktion: $\mu=0,3$
- Dichte: $\rho=7,80$ g/cm³

Ziel der Konzeptstudien ist die Ermittlung von Steifigkeiten für Flächen und Profile, deshalb sind Parameter wie Wandstärke, Flächenträgheitsmoment der Profile sowie Durchmesser der Seile zunächst variabel. Laut IATA ULD Regulations bestehen für einige Dimensionen Mindestanforderungen. Das sind:

- Flächenträgheitsmoment der Rahmenprofile um den Türausschnitt:
 $I=20000$ mm⁴
- Kantenprofile der Bodenplatte: 80,0x20,0mm bei $t=3,0$ mm
- Stärke der Bodenplatte: $t=2,7$ mm.

Alle Berechnungen mittels Nastran sind nicht-lineare statische Analysen (SOL106), wobei sich die Nichtlinearität nur auf große Verformungen bezieht. Nicht-lineares Materialverhalten bzw. nicht-lineare Randbedingungen (Kontakt) bleiben unberücksichtigt.

Bei dem Rahmen-Konzept sind die Dachfläche sowie die Schrägwand jeweils 1,6 mm stark. Alle horizontalen Profile benötigen ein Flächenträgheitsmoment von $I=20000\text{mm}^4$ und alle vertikalen Rahmenprofile ein Flächenträgheitsmoment von $I=50000\text{mm}^4$. Zusätzlich versteifen Seile mit 4 mm Durchmesser die Struktur. Teilweise sind Seile nicht ausreichend und es wird eine flächige Versteifung (Wandstärke 0,5 mm) nötig. Die Position der einzelnen Versteifungen wird für den jeweiligen Lastfall separat erklärt.

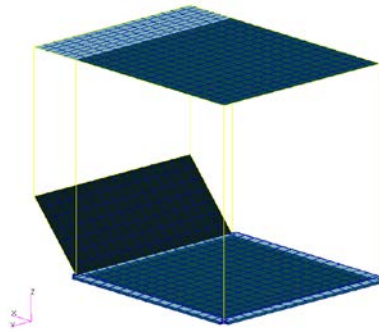


Abbildung 13: FE-Modell Rahmen-Konzept mit Profildarstellung der Balkenelemente an der Bodenplatte

Für das Box-Konzept sind bis auf den Türausschnitt alle Flächen geschlossen und ohne weitere Kantenprofile verstärkt. Mit einer Wandstärke von 1,6 mm für alle Flächen (ausgenommen der Bodenplatte) sind keine weiteren Versteifungen durch Seile nötig.

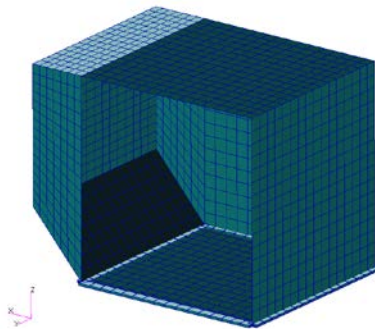


Abbildung 14: FE-Modell Box-Konzept mit Profildarstellung der Balkenelemente an der Bodenplatte

Das Strukturverhalten der beiden Konzepte unter den verschiedenen Lastfällen stellt sich wie folgt dar.

4.1.1. Base Deflection Test

Dieser Test wird im Wesentlichen durch die Steifigkeit der Bodenplatte und des umgebenden Bodenplattenprofils dominiert. Die Testlast ist mittels Druckrandbedingung auf die Elemente der Bodenplatte aufgebracht. Die Knoten der Bodenplatte sind, bis auf die überhängenden 254 mm, in Dickenrichtung fixiert. Zwei weitere Knoten sind zusätzlich so fixiert, dass eine Starrkörperbewegung ausgeschlossen werden kann. Im Versuch dürfen 9,5 mm elastische Verformung der Bodenplatte nicht überschritten werden.

Es ergeben sich für das Rahmen-Konzept (links) 7,56 mm und für das Box-Konzept (rechts) 2,83 mm elastische Verformung.

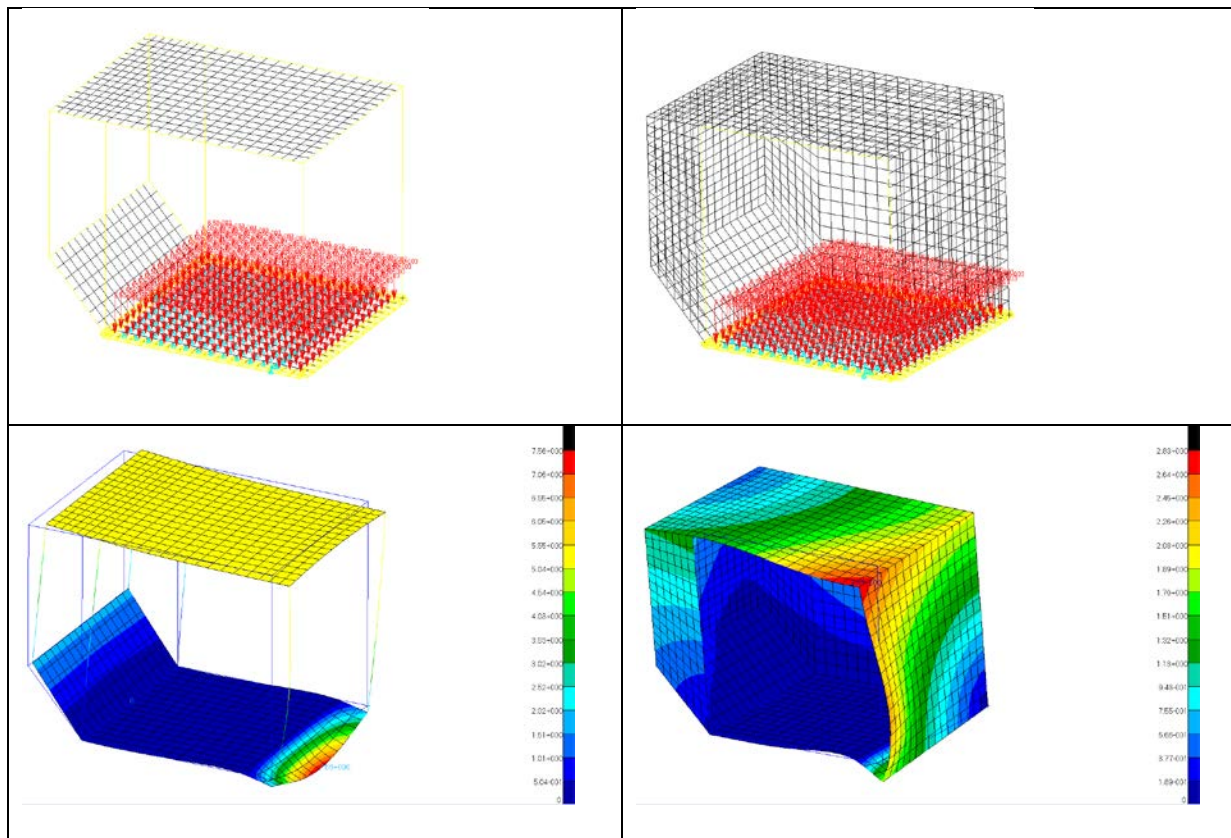


Abbildung 15: Base Deflection Test - Aufbau und Ergebnisse für Rahmen- (links) und Box-Konzept (rechts)

4.1.2. Bridging and Cresting Test

Dieser Test wird im Wesentlichen durch die Steifigkeit der Bodenplatte dominiert. Die Testlast ist mittels Druckrandbedingung auf die Elemente der Bodenplatte aufgebracht. Anhand der Dimensionen des Luftfrachtcontainers und Rollenabstände (245 mm) liegt die Bodenplatte immer auf mindestens 2 Rollen auf. Deshalb sind ausgewählte Knoten im Abstand einer Rollenbreite (51 mm) so fixiert, dass Krafteinleitung durch Auflage auf 2 Rollen gewährleistet werden kann. Um eine Starrkörperrotation auszuschließen ist ein weiterer Knoten entsprechend fixiert. Im Versuch sollten 152 mm elastische Verformung der Bodenplatte nicht überschritten

werden, um ein möglichst einfaches Verfahren der Container auch über Absätze der Rollenbahnen hinweg gewährleisten zu können.

Es ergeben sich für das Rahmen-Konzept (links) 75,0 mm und für das Box-Konzept (rechts) 72,1 mm elastische Verformung.

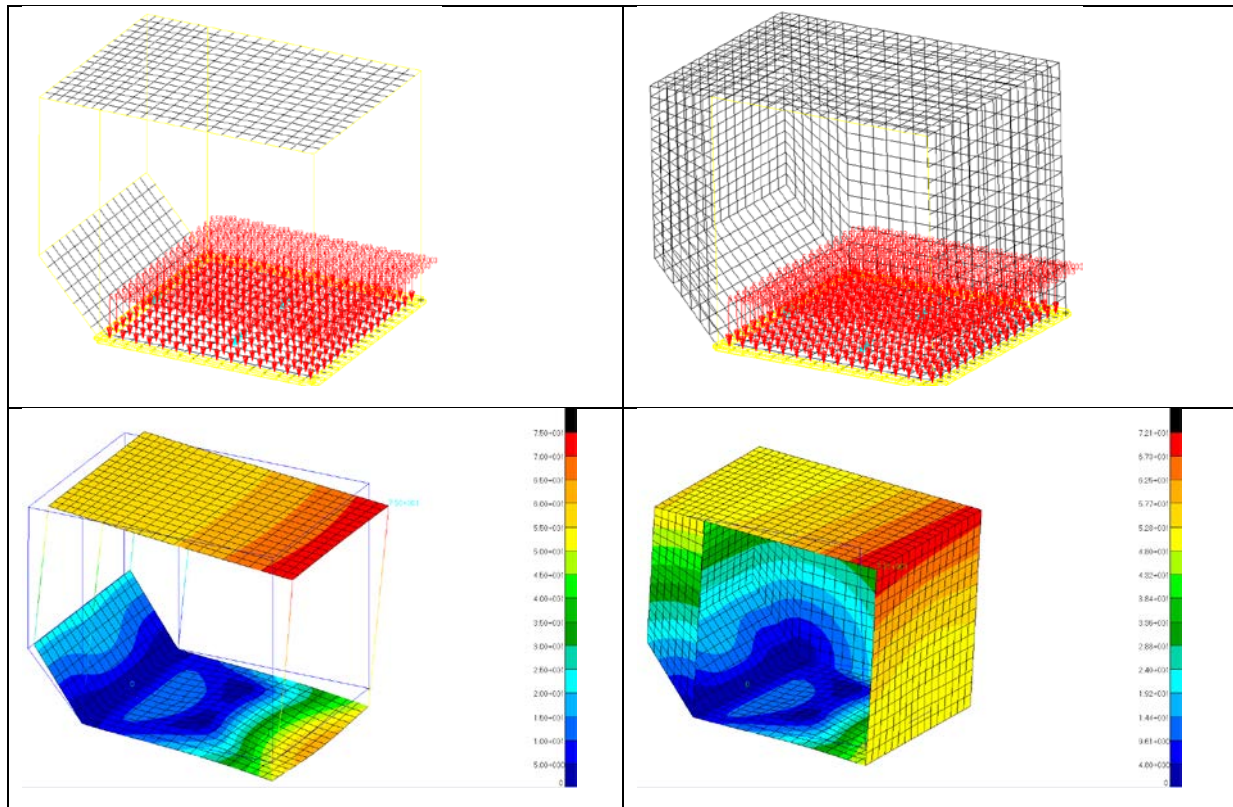


Abbildung 16: Bridging and Cresting Test - Aufbau und Ergebnisse für Rahmen- und Box-Konzept

4.1.3. Racking Test

In diesem Test wird ein mit Testlast beladener Luftfrachtcontainer gegen eine Kante gestützt und ausgehoben. Bei Schwerpunkt in Mitte des Luftfrachtcontainers ist eine Kraft von 7.500 N in lateraler Richtung bzw. eine Kraft von 9.600 N in longitudinaler Richtung aufzuwenden. Die Testlasten sind mittels Druckrandbedingung auf die Elemente der Bodenplatte und als Linienlast auf die Elemente der entsprechenden Dachkante aufgebracht. Die jeweils raumdiagonal gegenüberliegenden Knoten der Bodenplatte sind so fixiert, dass eine Rotation um die Kante möglich ist. Um eine Starrkörperrotation auszuschließen ist ein weiterer Knoten fixiert. Da nur elastische Verformung zulässig ist, wird die von Mises Vergleichsspannung ausgewertet. Es ergeben sich für das Rahmen-Konzept (links) und für das Box-Konzept (rechts) verschiedene elastische Verformungen, wobei die Streckgrenze von 300 MPa nicht überschritten wird.

Beim Rahmen-Konzept sind dafür konstruktive Maßnahmen wie Versteifung durch Zugseile und Schubwände (0,5 mm) bzw. auch die Versteifung druckbelasteter vertikaler I200000 Rahmenprofile am Türausschnitt nötig.

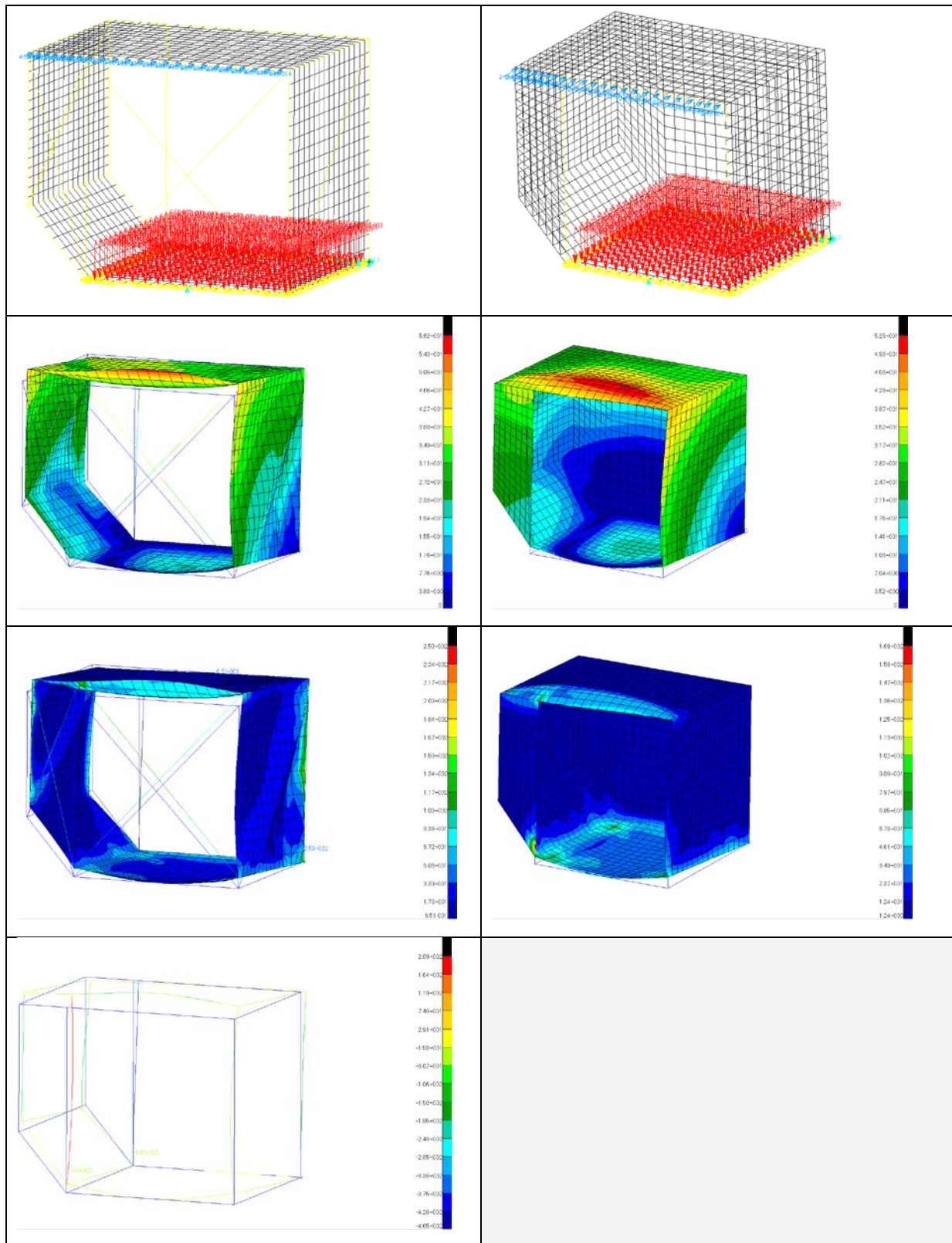


Abbildung 17: Racking Test lateral - Aufbau und Ergebnisse für Rahmen- und Box-Konzept

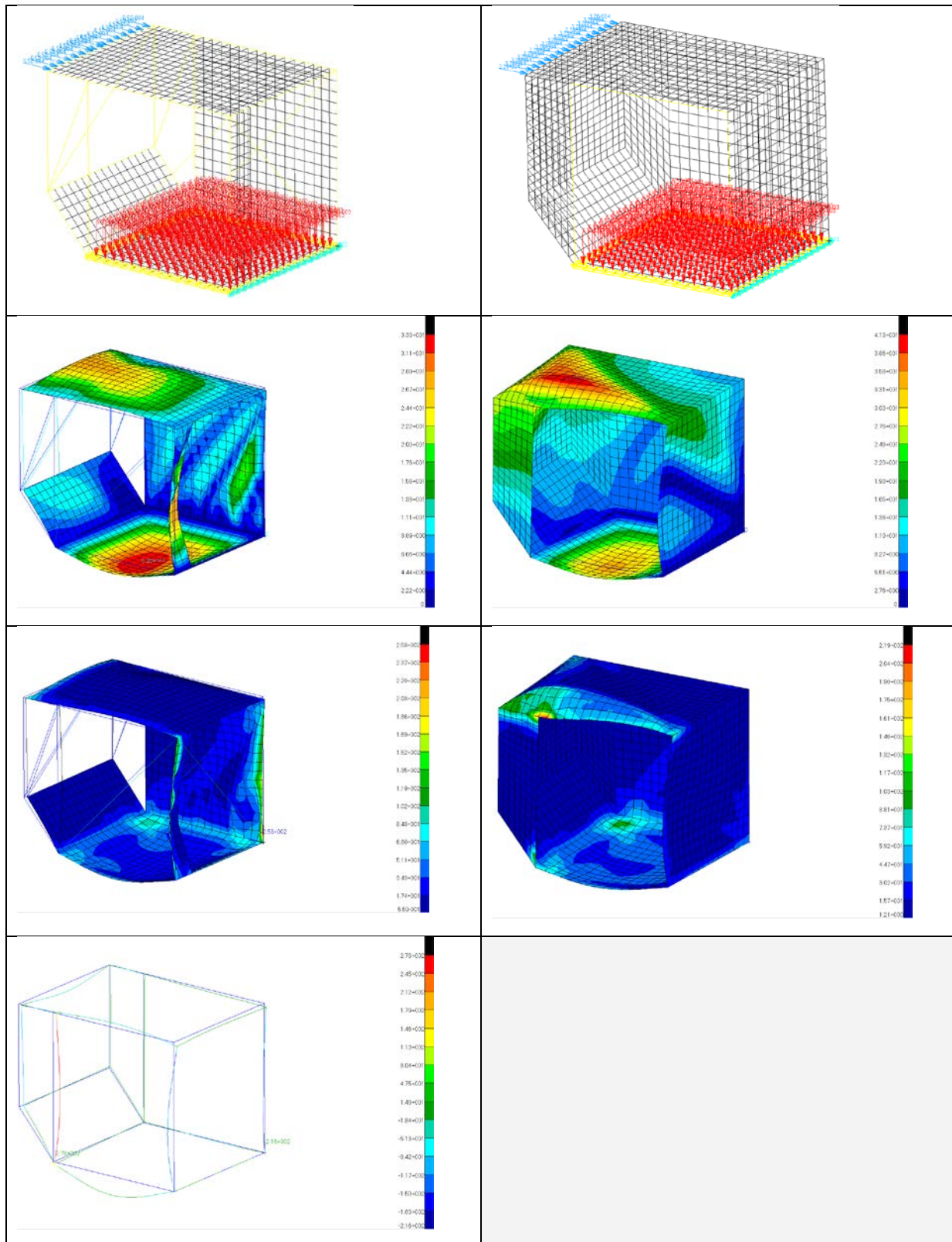


Abbildung 18: Racking Test longitudinal - Aufbau und Ergebnisse für Rahmen- und Box-Konzept

4.1.4. Horizontal Load Test

In diesem Test sind die Steifigkeitsanforderungen am höchsten und somit für die Konzeptideen dimensionierend. Da in den IATA ULD Regulations nicht eindeutig vorgegeben wird der Test in 3 Richtungen numerisch untersucht. Lediglich die Belastung der Seite mit Türausschnitt wird nicht weiter betrachtet, da diese entgegengesetzt der Flugrichtung im Laderraum positioniert wird, sodass in dieser Richtung geringere Beschleunigung und somit Belastung zu erwarten ist. Die horizontale Testlast ist je nach Konfiguration (Box oder Rahmen) als Flächenlast, Linienlast oder deren Kombination auf die Elemente der Seitenwände aufgebracht. Die Knoten der Bodenplatte sind so fixiert, dass sie vertikale Testlast repräsentieren und eine Starrkörperbewegung ausgeschlossen werden kann. Im Versuch dürfen 38,0 mm elastische Verformung der Dachkante nicht überschritten werden. Es ergeben sich für das Rahmen-Konzept (links) und für das Box-Konzept (rechts) verschiedene elastische Verformungen innerhalb des zulässigen Wertes. (Anmerkung: die Verformung der Fläche bzw. der Profile ist in einigen Fällen größer als 38 mm, jedoch wird in den IATA ULD Regulations explizit nach der Verformung der Dachkante bewertet.) Beim Rahmen-Konzept sind dafür konstruktive Maßnahmen wie Versteifung durch Schubwände (0,5 mm) und Zugseile insbesondere am Türausschnitt nötig.

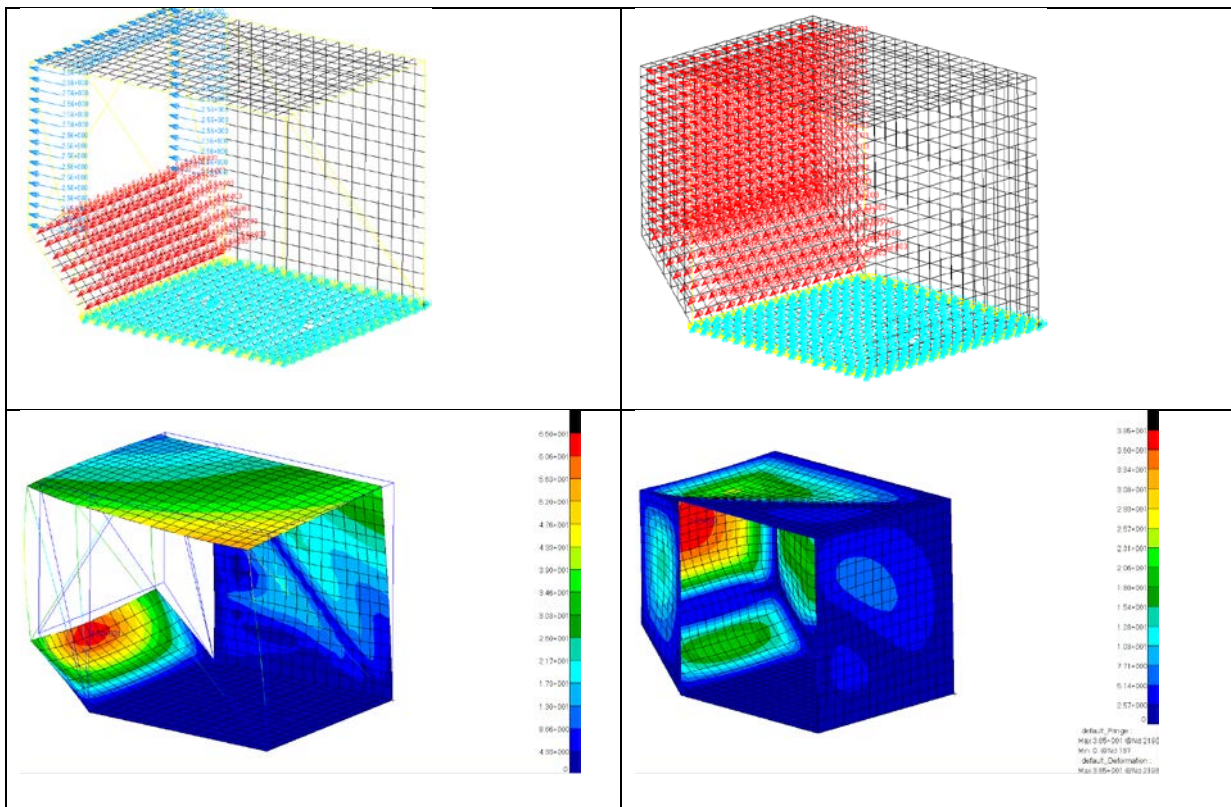


Abbildung 19: Horizontal Load Test positiv longitudinal - Aufbau und Ergebnisse für Rahmen- und Box-Konzept

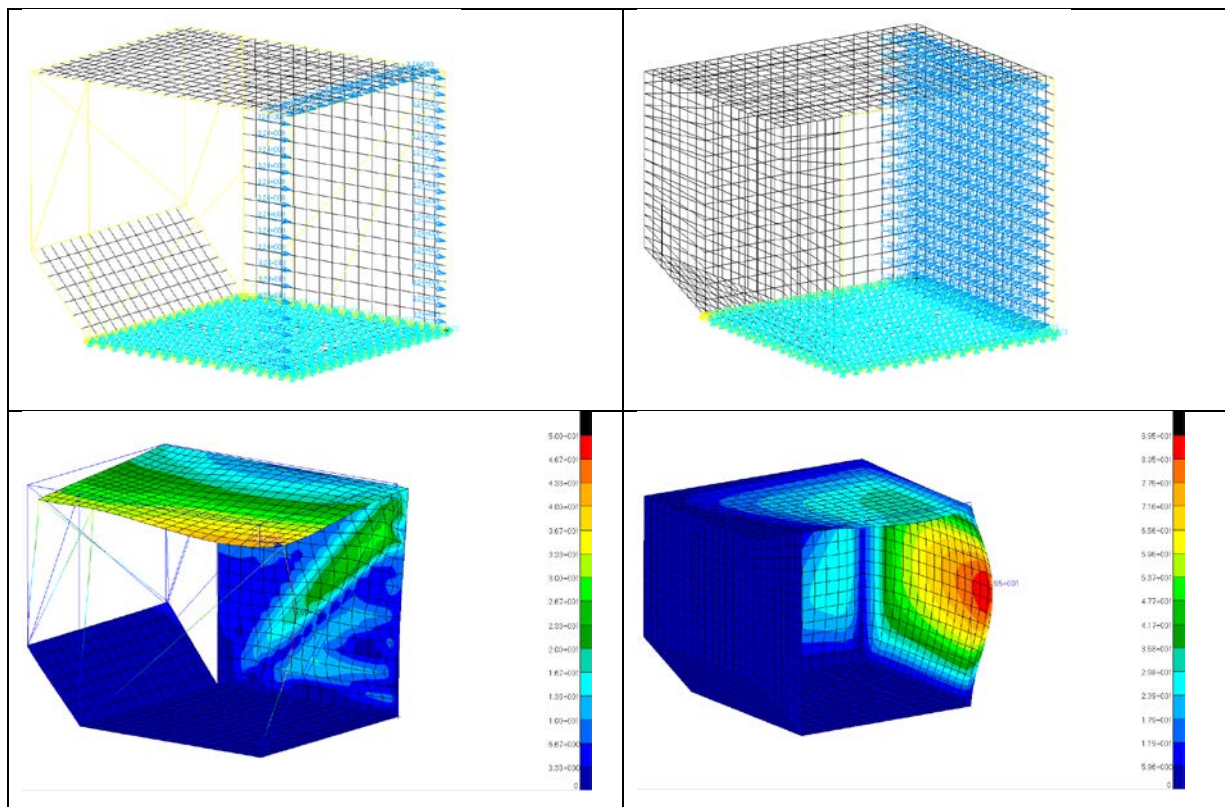


Abbildung 20: Horizontal Load Test negativ longitudinal - Aufbau und Ergebnisse für Rahmen- und Box-Konzept

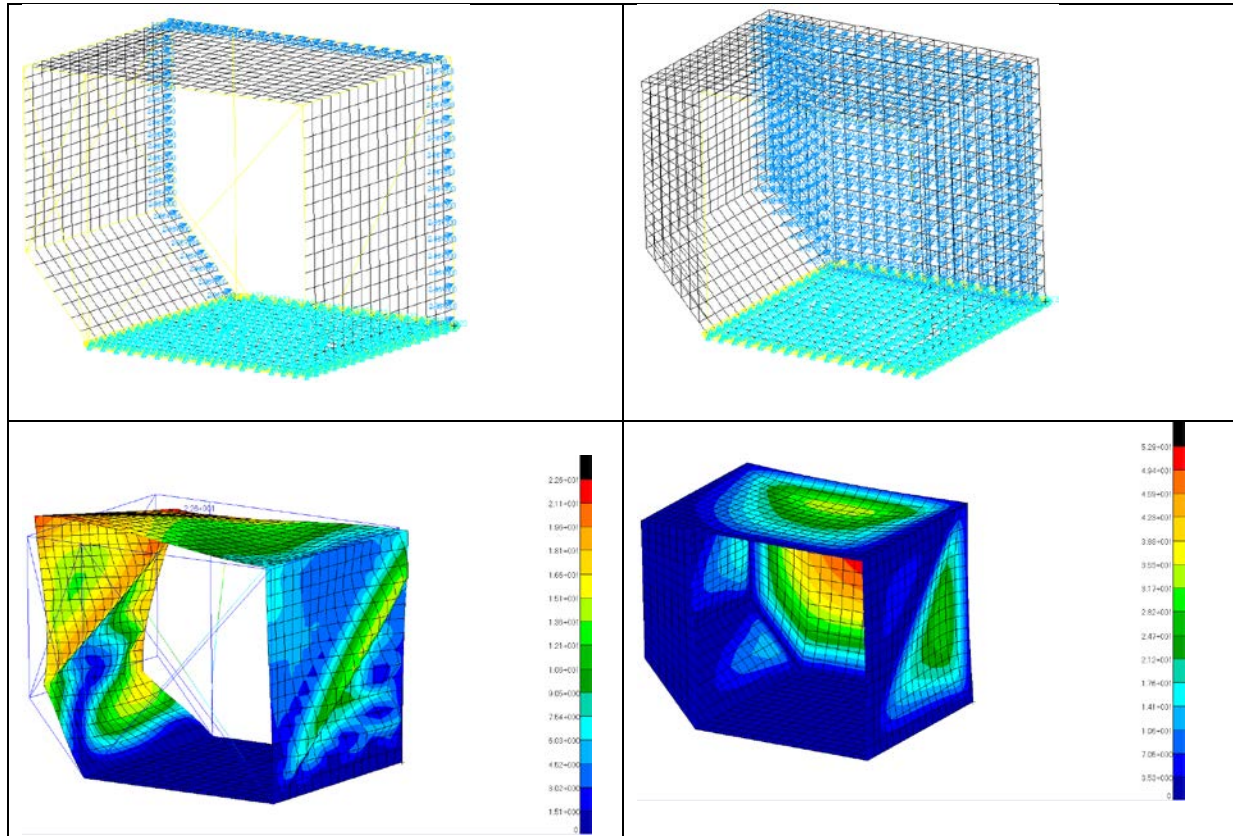


Abbildung 21: Horizontal Load Test negativ lateral - Aufbau und Ergebnisse für Rahmen- und Box-Konzept

Anhand der ermittelten Wandstärken für die jeweiligen Materialsteifigkeiten lassen sich dem Konstrukteur nun folgende Steifigkeitswerte zur Dimensionierung an die Hand geben:

- 2,7 mm Schalenelemente: $K=129000 \text{ Nmm}$
- 1,6 mm Schalenelemente: $K=26800 \text{ Nmm}$
- 0,5 mm Schalenelemente: $K=820 \text{ Nmm}$
- 120000 Balkenelemente: $EI=140 \text{ e6 Nmm}^2$
- 150000 Balkenelemente: $EI=350 \text{ e6 Nmm}^2$
- 4 mm Seil: $EA=2,6 \text{ e6 N}$.

Zusammenfassend stellt sich heraus, dass (i) eine Konzeptbewertung und Dimensionierung mittels FEM möglich ist. Dabei sind aufgrund (ii) großer Verformungen statische Analysen mit nicht-linearer Geometrie nötig. Der (iii) dimensionierende Lastfall ist Horizontal Load Test wobei (iv) die Ergebnisse der Lastfälle Bridging and Cresting Test sowie Base Deflection Test nur durch die Steifigkeit der Bodenplatte dominiert werden.

5. Simulation der Bodenplatte

Diese Simulation wurde von Olaf Mierheim für die Bodenplatte durchgeführt. Folgende Randbedingungen wurden für diese angenommen:

- 10 mm dickes Sandwich mit Haut
- Eine Seite eingespannt (Kiste auf Palette)
- Variation der Hautbiegesteifigkeit B und der Kerndrucksteifigkeit E
- Quasi 2-dimensionales Model (Alle Bauteile haben eine Tiefe von 1 mm)
- Die Einleitungsbreite wird nicht variiert (nichtlineares Model mit simulierter Rolle und Kontaktbedingung benötigt)

Abbildung 22 zeigt schematisch das Modell. Hierbei wird eine Streckenlast, verursacht von der Rolle, auf die Haut bzw. Deckschicht des Sandwichs von $p=1$ N/mm angenommen.

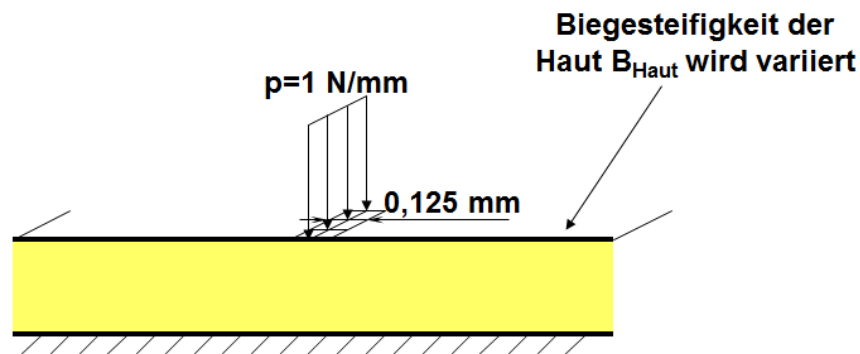


Abbildung 22: Schematisches Modell

Abbildung 23 und Abbildung 25 zeigen die Verformungsbilder für ein kleines und ein großes Verhältnis der Hautbiegesteifigkeit B zu Kerndrucksteifigkeit E .

B/E klein

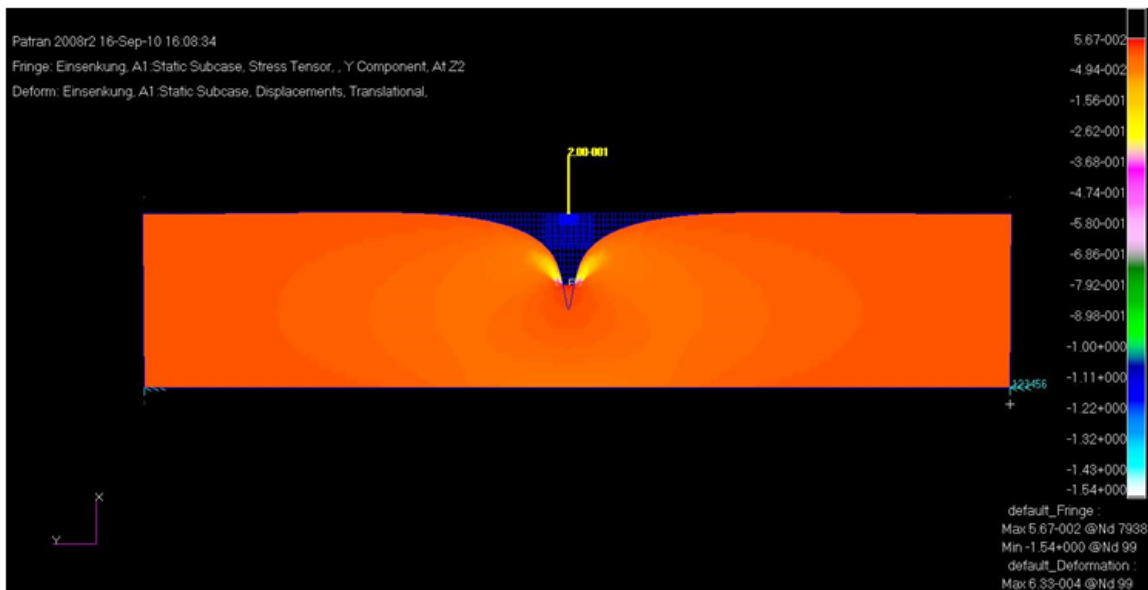


Abbildung 23: Verformungsbild bei kleinem Verhältnis von Hautbiegesteifigkeit B und Kerndrucksteifigkeit E

B/E groß

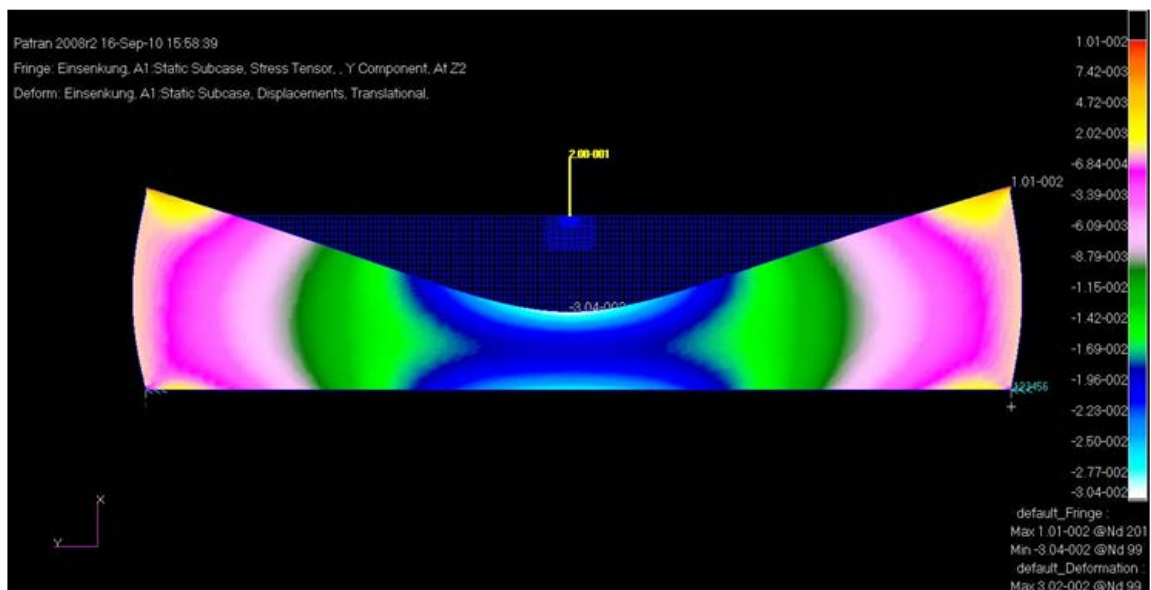


Abbildung 24: Verformungsbild bei großem Verhältnis von Hautbiegesteifigkeit B und Kerndrucksteifigkeit E

Bei einem großen Verhältnis von B/E ist die Verformung kleiner, gleichzeitig wird das Sandwich in einem größeren Bereich verformt.

Abbildung 25 zeigt die Druckspannung im Schaum bei einer Variation der Hautbiegesteifigkeit B_{Haut} . Der Kern hat eine Höhe von 10 mm hat hier eine Steifigkeit

von $E_{\text{Schaum}} = 100 \text{ N/mm}^2$. Die Druckspannung nimmt mit der Dicke der Deckschicht aufgrund der damit verbundenen höheren Biegesteifigkeit zu.

10mm Kern ($E=100 \text{ N/mm}^2$)

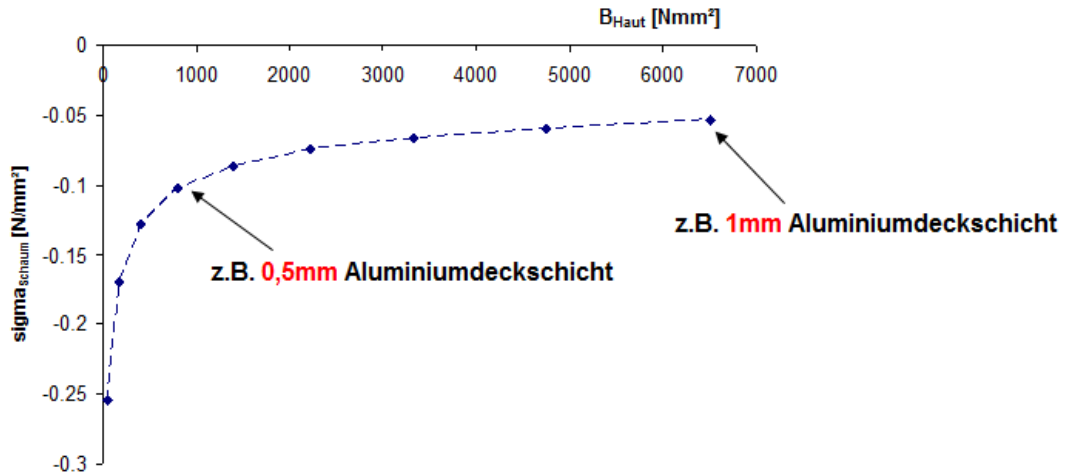


Abbildung 25: Variation der Hautsteifigkeit: Druckspannung im Schaum

Variiert man die Kernsteifigkeit E_{Kern} bei einer Deckschicht aus Aluminium der Dicke 1 mm ($B_{\text{Alu1mm}} = 6.500 \text{ Nmm}^2$) steigt die Spannung mit der Erhöhung der Kernsteifigkeit E_{Kern} , vergleiche Abbildung 26.

Ca. 1mm Aluminiumdeckschicht ($B=6.500 \text{ Nmm}^2$)

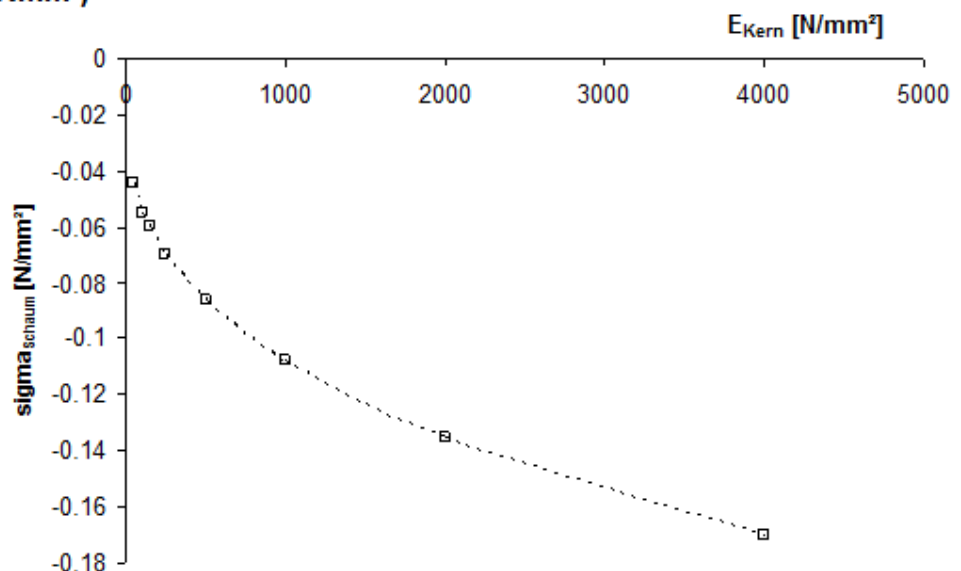


Abbildung 26: Variation der Schaumsteifigkeit: Druckspannung im Schaum

Abbildung 27 zeigt das Verhältnis von Hautbiegesteifigkeit zu Drucksteifigkeit des Schaums. Je höher das

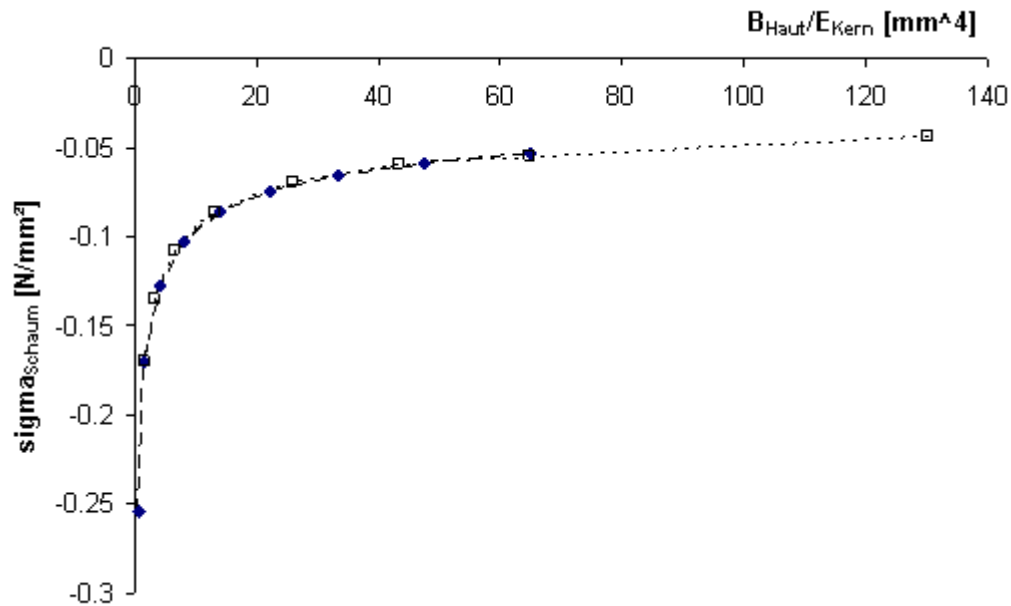


Abbildung 27: Verhältnis aus Biegesteifigkeit der Haut und Schaumsteifigkeit

5.1. Ergebnisse

Die Druckspannung im Kern hängt vom Verhältnis aus Hautbiegesteifigkeit und Kerndrucksteifigkeit ab. Ein weicher Kern mit hoher Festigkeit wäre zu bevorzugen. Bei Schäumen gibt es da keine gute Kombination. Eine Gummischicht unter der Decklage könnte die Verteilung verbessern. Wabenkerne erscheinen als ungeeignet.

6. Literaturverzeichnis

- [1] BARTSCH, Ivonne: *IB 131-2011/51 Untersuchungen zu Luftfrachtcontainern vom Typ AKE in Leichtbauweise*. 20.12.2011. INSTITUT FÜR FASERVERBUNDELEICHTBAU- UND ADAPTRONIK; STANDORT BRAUNSCHWEIG
- [2] International Air Transport Association *IATA ULD Technical Manual*. Montreal 2010
- [3] International Air Transport Association: *IATA ULD Regulations*. 1ST Edition. Montreal 2013