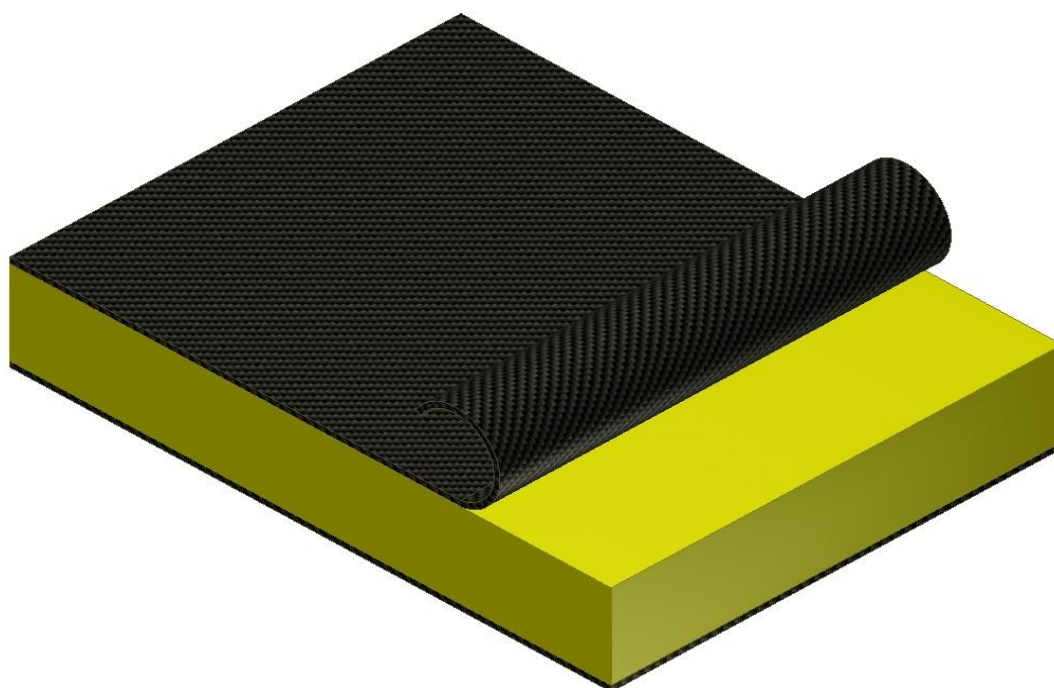




## Kompositer i bildäckspaneler – Konceptframtagning av framtida bildäck på RoRo-fartyg

Composite-based cardeckpanels

*Examensarbete för högskoleingenjörsexamen  
inom Maskiningenjörsprogrammet*

MARTIN MELKERSSON  
ERIK SAHLIN

Institutionen för Material- och tillverkningsteknik  
Avdelningen för Avancerad oförstörande provning  
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA  
Göteborg, Sweden, 2012  
Examinator: Gert Persson Examensarbete No. 68/2012



## **Abstract**

The object of the project is to examine, using finite element method based calculations, the deflections and stresses on car deck panels of various sizes, constructed in composite materials, instead of the current construction of laminated wood. These car deck panels are found on board transatlantic ships, loaded with new cars set to be exported. Calculations are based on the worst possible load case, depending on how the cars are parked on the ship. A selection of composite materials is examined, based on their mechanical properties and a final choice of materials is made. Using ANSYS PrepPost, the models are modeled as a shell and simulations are performed. The results showed that it is possible, from an engineering perspective, to design the car deck panels of composite materials, with a weight reduction of a little over 30 % and a lesser deflection than the previous design. Due to the change of material, from today's plywood design to a combination of FRP (fibre-reinforced plastic) and a foam core, a significant increase (743 % compared to the plywood design) in initial cost arises.

## Sammanfattning

Syftet med projektet är att med hjälp av beräkningar med finita elementmetoden undersöka nedböjningar och spänningar i bildäckspaneler av olika storlekar, konstruerade i kompositmaterial, istället för dagens trälaminatkonstruktion. Dessa bildäckspaneler återfinns ombord transatlantiska fartyg lastade med nyproducerade bilar för export. Beräkningarna baseras på värsta möjliga lastfall, beroende på hur bilarna parkeras ombord på fartyget. Ett urval av komposita material undersöks med bas i deras respektive mekaniska egenskaper och ett slutligt materialval görs. I ANSYS PrepPost modelleras modellerna upp som skal och simuleringar utförs. Resultatet visade att det är möjligt, ur ett rent konstruktionsmässigt perspektiv, att konstruera bildäckspanelerna i kompositmaterial, med en drygt 31 % viktbesparing och en lägre nedböjning än tidigare konstruktion. Dock visas att en markant initialkostnadsökning, nämligen 743 % jämfört med dagens konstruktion, uppstår på grund av det förändrade materialvalet, från plywood till en kombination av glasfiber och skumkärna.

## Förord

Detta examensarbete skrevs som en obligatorisk del av maskiningenjörsprogrammet under höstterminen 2011 och del av vårterminen 2012. Arbetet omfattar 15 högskolepoäng. Vi vill tacka handledaren och examinatorn univ. lektor Gert Persson samt handledaren på MacGregor Roro Johan Synnerö. Vi är också tacksamma för de råd och konstruktiva idéer som Christian Karlsson samt Peter Norlin på DIAB i Laholm bidrog med under vårt studiebesök samt under resten av processen. Tack också till EDR ANSYS för tillhandahållandet av licens för programvaran ANSYS PrepPost. Slutligen, tack till Ulf Arbin på Kockums för din vägledning inom komposita material samt till Ayres Lightweight Panel Systems för tillståndet att använda er figur.

Göteborg, mars 2012



Martin Melkersson



Erik Sahlin



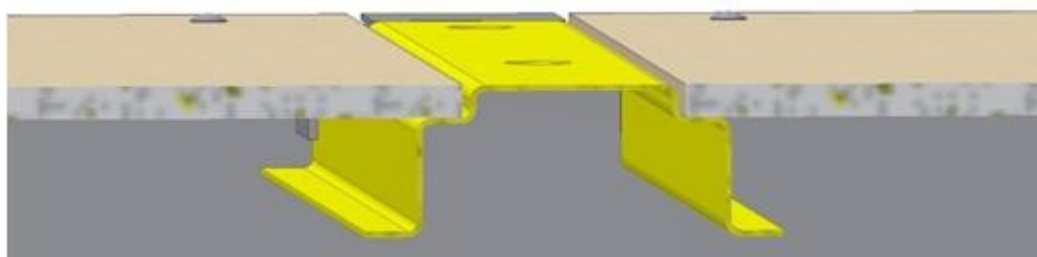
## Innehåll

|                                                                                |     |
|--------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Abstract.....                                                                  | I   |
| Sammanfattning.....                                                            | II  |
| Förord .....                                                                   | III |
| 1. Inledning.....                                                              | 1   |
| 1.1 Syfte.....                                                                 | 3   |
| 1.2 Avgränsningar .....                                                        | 3   |
| 2. Metod.....                                                                  | 4   |
| 2.1 Beräkning av en nuvarande cells sammanlagda vikt.....                      | 4   |
| 2.2 Utvärdering av tidigare samt befintliga bildäckspaneler .....              | 7   |
| 2.3 Sammandrag angående brandskyddsregler .....                                | 8   |
| 2.4 Materialundersökning.....                                                  | 9   |
| 2.5 Utgallring av kärntyperna.....                                             | 10  |
| 2.5.1 Kärntyp: Honeycomb .....                                                 | 10  |
| 2.5.2 Kärntyp: Balsa .....                                                     | 10  |
| 2.5.3 Kärntyp: Skum.....                                                       | 11  |
| 2.6 Reparation och sekundär laminering av kompositmaterial med skumkärna ..... | 12  |
| 2.7 Studie av lastfall på paneler med utökad storlek .....                     | 13  |
| 3. Resultat .....                                                              | 17  |
| 3.1 Resultat av simuleringar .....                                             | 17  |
| 3.2 Kostnadsjämförelse .....                                                   | 19  |
| 4. Diskussion och slutsats.....                                                | 20  |
| 4.1 Framtida rekommendationer .....                                            | 22  |
| Källförteckning.....                                                           | 25  |
| Figurförteckning .....                                                         | 25  |
| Bilagor .....                                                                  | 26  |
| Bilaga 1: Översiktlig presentation av däckslayouter .....                      | 26  |
| Bilaga 2: Sammanställning av kärnmaterial .....                                | 27  |
| Bilaga 3: Resultat efter viktning av kärnmaterial .....                        | 28  |
| Bilaga 4: MATLAB-kod för beräkning av optimal cellstorlek .....                | 29  |
| Bilaga 5: MATLAB-kod för beräkning av översta däckets placering.....           | 32  |
| Bilaga 6: Sammanställning av panelstorlekar och dess påverkan vid last .....   | 35  |

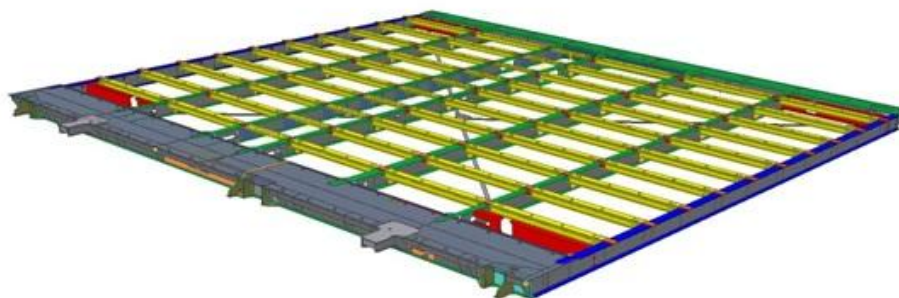


## 1. Inledning

Generellt inom varvsindustrin för transportfartyg, och speciellt inom MacGregor RoRo, används idag nästan uteslutande stål i konstruktioner för utrustningar och skrov. MacGregor kan dock sedan ett par år tillbaka, erbjuda hissbara bildäck konstruerade av plywood-paneler av trä med måtten (LxBxH) 2320x825x22 [mm], för att spara vikt och pris kontra en ren stålkonstruktion. Dessa plywood-paneler vilar på stålprofiler (så kallade "hattprofiler", namngivna efter dess hattliknande utformning, se Figur 1) där det integrerats lashinghål, för infästning av krokar, som via spännband håller fast de bilar som transporteras med fartyget. Vidare är ett antal av dessa paneler sammansatta i en stor rektangulär cell med transversella I-balkar och hattprofiler med innermåtten 14171x9884 [mm] med en ytterram av I-balkar, se Figur 2.



Figur 1: Hattprofil i genomskärning med 22 mm plywood monterat på vardera sidan

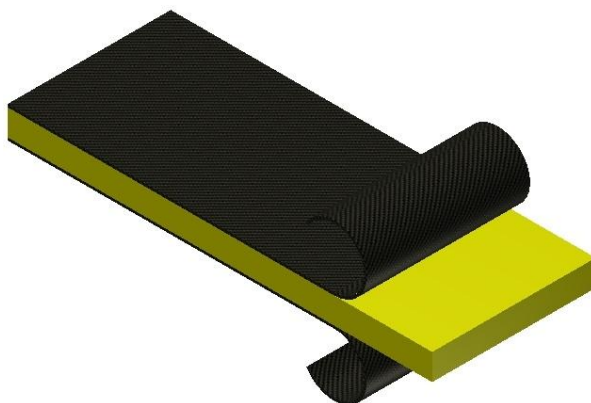


Figur 2: Modell av dagens konstruktionslösning

En självklar nackdel med att använda plywoodpaneler av trä inom den marina industrin, är att panelerna suger upp vatten och fukt. Detta leder till en expansion inom panelerna, vilket gör att de till slut kan spricka och/eller murkna. På grund av detta har redarindustrin på senare tid efterfrågat ytterligare alternativa material, som likt stål är starkt, men som likt plywood är lätt. Givetvis önskas det att dessa material skall vara fuktesistenta och tåla kontakt med vatten.

Inom den militära grenen av varvsindustrin har en markant ökning av användandet utav kompositmaterial märkts, framför allt i så kallade sandwichkonstruktioner som visas i Figur 3. Det innebär att materialet är en sammansättning bestående av två höljen (så kallade shell) utav ett styvt material (till exempel glasfiber eller kolfiber), samt ett kärnmaterial (så kallat core) av lättvikts trä, skum eller material med honeycombstruktur, mellan de båda ytskalen. Dessa delmaterial sätts därefter samman med hjälp av en stark epoxy eller polyester.

Panelen blir med en sådan uppbyggnad som i Figur 3 lätt, men även mycket stark. Kärnan bidrar med en stor flexibilitetstolerans och upptar eventuella skjuvspänningar samt energi vid stötar, medan ytskalen ger en stor styvhet och styrka. Den viktnedskningen som uppstår skulle kunna medföra ett flertal potentiella positiva effekter, såsom minskad bränsleförbrukning, lägre miljöpåverkan, ökad lastkapacitet samt eventuellt att resans tidsåtgång kan minskas (förutsatt att fartyget använder samma bränsleförbrukning, men på grund av den minskade vikten, ökar dess hastighet). Detta i kombination med ökad tolerans mot skjuvspänningar och temperaturpåverkan skulle göra kompositpaneler tämligen gynnsamma i rådande förhållanden.



Figur 3: Översiktsbild av över en sandwichpanel

Infästning av dagens paneler i hattprofilerna (vilka visas i Figur 4) sker med antingen lim eller en marinanpassad, enkomponents polyuretanbaserad tätningsmassa speciellt anpassad för däcksnåtning vid namn Sikaflex<sup>®</sup>, alternativt att de bultas fast. Båda dessa infästningar har nackdelar; om det vid monteringen av panelerna, stryks på en inkonsekvent mängd lim/tätningsmassa, uppstår en ojämn nivåskillnad mellan panelen och



Figur 4: Fotografi av dagens lösning

”hattprofilen”. Detta kan leda till en ökad skadegrad på både bilarnas däck, då de passerar över panelkanterna, samt på själva panelen då de kommer att nötas vid panelkanterna och därmed få högre förslitningsgrad. Om panelerna å andra sidan bultas fast, finns det en risk att dessa bultar skjuvas av i två olika fall; antingen att de skjuvas av på grund av att bilar, vid upprepade tillfällen svängt precis i det ögonblick då framhjulen står ovanpå bultens huvud, eller på grund av panelens svängningsrörelser som kan uppstå vid på- och avlastning. Vid dessa tillfällen lastas/lossas cirka 6000–8000 bilar, varav ett stort antal av dessa har samma transportväg ombord på sin väg upp till de övre däck. Detta gör att vissa paneler i ökad grad utsätts för stora påfrestningar, vilket leder till att panelerna kommer i svängning. Dessa svängningsrörelser övergår i spänningar i bultarna, varpå de till slut kan skjuvas av på grund av utmattningsbrott.

### **1.1 Syfte**

Syftet med projektet är att arbeta fram ett förslag till en utökad konstruktion med större paneler utformade i sandwichmaterial, alternativt dra slutsatsen att en sådan konstruktion ej kan rekommenderas. Oavsett så kommer det undersökas huruvida, och i sådana fall i vilken utsträckning, vikt kan besparas ombord på fartygen då ett utbyte av panelmaterial skulle införas. Som underlag till denna analys kommer kommersiella programvaror såsom AutoDesk AutoCAD, AutoDesk Inventor samt ANSYS (med tilläggsmodulen PrepPost) att användas för att utföra finita element metods beräkningar, FEM-beräkningar, på paneler både i nuvarande storlek samt i en utökad storlek, där framförallt nedböjning och säkerhetsfaktorn mot brott kommer studeras.

Vid beräkningarna av panelernas kraftpåkänningar kommer MacGregors givna lastfall att användas. De laster som skall tas hänsyn till är panelens egentygnd samt däckens tryck mot panelen. Beräkningar med FEM kommer att göras på ett flertal paneler i olika storlekar, med olika material och olika tjocklekar som väljs under en materialgranskning, där hänsyn tagits de klass- och nationella regler, gällande till exempel brandklassning. Resultaten kommer visa huruvida en ökad storlek på panelen är möjlig och gynnsam ur vikt- och kostnadsperspektiv.

Vidare kommer det studeras huruvida det är möjligt, att med större paneler, minska användandet utav hattprofilerna och på så sätt spara vikt genom en minskad mängd stål i fartygets konstruktion. Problemet som då behöver undersökas är om lashing kan möjliggöras direkt i panelen, alternativt att en omformning av sambandet panel-lashing konstrueras om på ett sådant sätt, så att en viktbesparing fortfarande är realiserbar.

### **1.2 Avgränsningar**

Projektet avser inte att behandla själva produktionen av en omkonstruerad panel. De materialpåkänningar som uppstår i panelerna under höjningen och sänkningen av däcken kan ha viss påverkan, men dessa kommer inte studeras. Ej heller de kraftpåverknar som skulle kunna uppstå på panelerna, då de täcks av tövatten på grund av snö från bilarna, kommer studeras då dessa anses vara för oförutsägbara.

Vidare kommer det ritningsunderlag som erhålls från MacGregor verka som bas i konstruktionsarbetet och en omkonstruktion av den stora cell, med innermått 14171x9884 [mm] (se Figur 2) där dagens paneler är sammansatta, är ej aktuell. Utöver detta kommer sammanfogningen mellan paneler och hattprofiler respektive hattprofiler och I-balkar inte att studeras i denna rapport.

## 2. Metod

De ritningar som fanns att tillgå från MacGregor användes som bas för att beräkna vikten för de ingående komponenterna i cellen i Figur 2, utan hänsyn till den yttre ramen, så att det tydligt skulle kunna framgå huruvida en viktbesparing har uppnåtts.

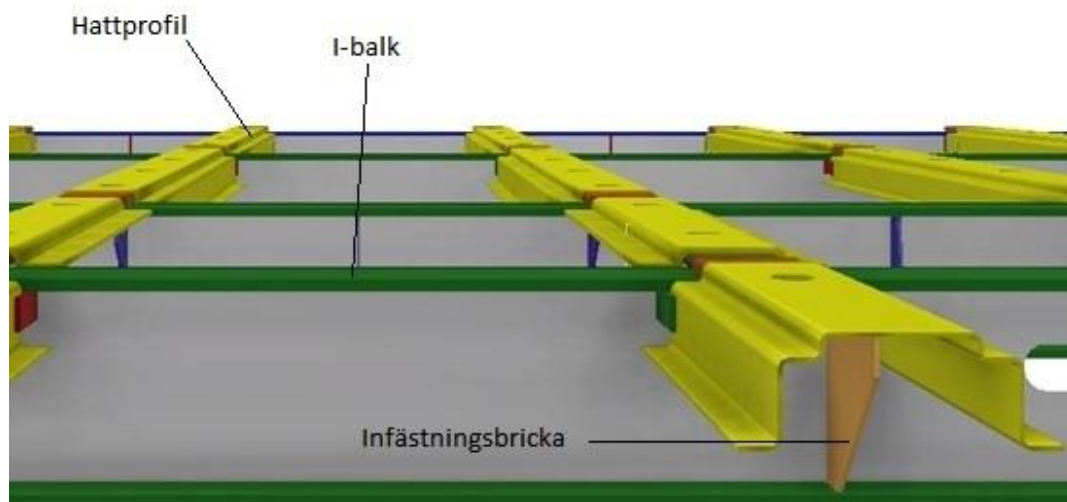
### 2.1 Beräkning av en nuvarande cells sammanlagda vikt

Med bas i ritningar som tillhandhålls av företaget, uppskattades samt beräknades vikten för de olika delarna som ingår, delarna visas i Figur 5 nedan samt plywoodpanelerna i Figur 1.

Baserat på givna uppgifter (för ett av de större däck) beräknades den sammanlagda vikten för de ingående delarna, bortsett från den yttre ramen enligt Tabell 1 nedan.

Tabell 1: Beräkning av vikterna för en cells beståndsdelar

| Dagens konstruktion (siffrorna avser en cell á 14171x9884 [mm]) |              |                            |                                  |                         |              |               |                   |
|-----------------------------------------------------------------|--------------|----------------------------|----------------------------------|-------------------------|--------------|---------------|-------------------|
|                                                                 | Längd<br>[m] | Volym<br>[m <sup>3</sup> ] | Densitet<br>[kg/m <sup>3</sup> ] | Längddensitet<br>[kg/m] | Vikt<br>[kg] | Antal<br>[st] | Totalvikt<br>[kg] |
| I-balkarna                                                      | 14,171       | N/A                        | N/A                              | 98,4                    | 1394         | 3             | 4183              |
| Hattprofilerna                                                  | 9,884        | N/A                        | N/A                              | 15,5                    | 153          | 17            | 2604              |
| Plywoodpanelerna (totalt)                                       | N/A          | 2,1416                     | 700                              | N/A                     | 1499         | 1             | 1499              |
| Brickor för hattprofilerna                                      | N/A          | 0,0003                     | 7850                             | N/A                     | 2,36         | 272           | 641               |
| SUMMA:                                                          |              |                            |                                  |                         |              |               | 8927              |

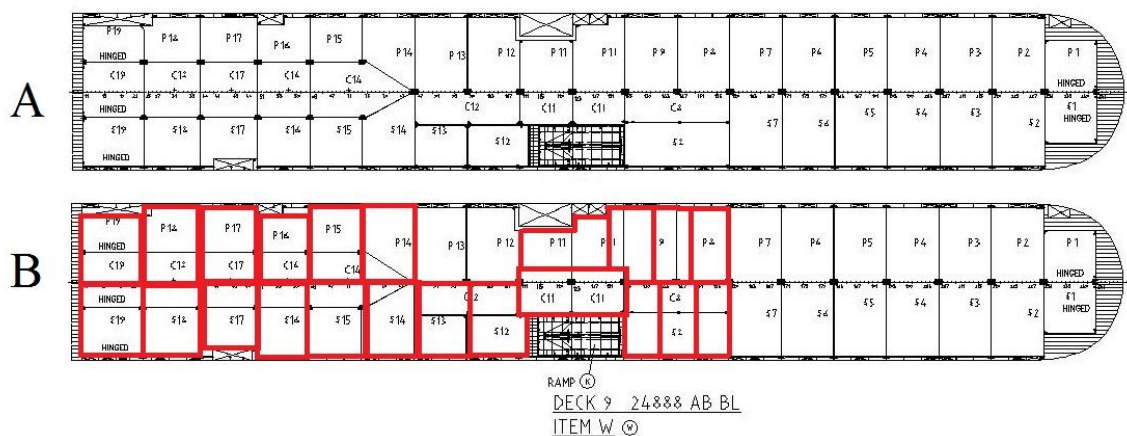


Figur 5: Inzoomad bild över de ingående delarna i cellen, utom panelerna

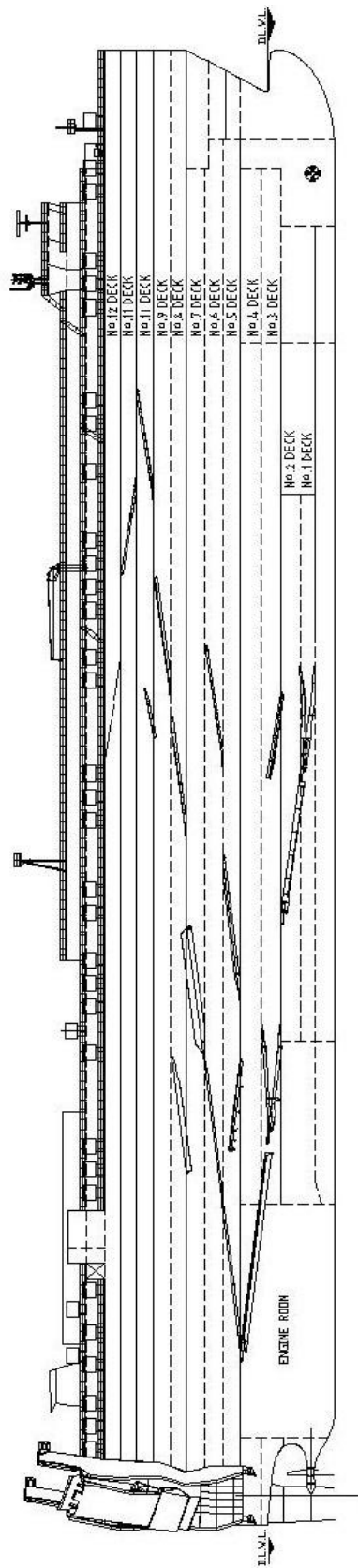
Vidare gäller resultaten i Tabell 1 ovan för en cell, medan ett däck består av ett stort antal sådana celler. Baserat på bilaga 1, där kompletta vyer av däckens visas, kan det utläsas ur den översta figuren (som även visas i ett modifierat tillstånd i Figur 6 nedan), att totalt så består däckets av 44 celler utav diverse oregelbundna geometriska former. Utifrån en ingenjörsmässig uppskattning omberäknas dessa 44 celler med oregelbundna former, till 38 rektangulära celler á 14171x9884 [mm]. Detta skulle i sådana fall resultera i att vikten för ett bildäcks totala "inre cellvikt" skulle uppgå till ungefär 340

ton. Beroende på de olika storlekarna som bildäcken har, relativt hur högt ovanför vattenlinjen de är placerade, så är antalet paneler inte konstant. Som exempel kan nämnas att de nedre däckerna endast skulle ha plats för nio celler á 14171x9884 [mm], medan bland de övre däckerna skulle det, som tidigare nämnts, rymmas upp till 38 celler.

Efter kontroll av de tillhandahållna ritningarna, se bilaga 1, uppgår det totala antalet nuvarande celler till 159, fördelat på fem stycken bildäck (de streckade däckerna i Figur 7 på nästa sida) av olika storlek och geometri. Efter en ingenjörsmässig uppskattning omberäknades de tidigare 159 oregelbundna celler till 138 rektangulära celler, för att underlätta beräkningarna. Som exempel visas i Figur 6 hur däck nio, ur ett areaperspektiv, har *uppskattats* till fyrkantiga celler (markerade med rött i däcksvyn märkt med "B") med tidigare nämnd storlek. Jämförelse kan göras med den ordinarie däcksvyn, markerad med "A" i figuren nedan. Efter antagandet att samtliga celler väger lika mycket, skulle detta resultera att den påverkningsbara vikten (det vill säga den "inre cellvikten") för hela fartyget skulle uppgå till cirka 1232 ton. Summeras den totala påverkningsbara arean som studeras, det vill säga de 138 fyrkantiga celler á 140 m<sup>2</sup>, så uppgår den till 19320 m<sup>2</sup>.



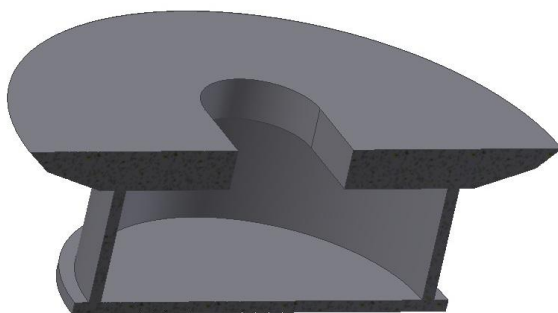
Figur 6: Däcksvy som visar hur uppskattning av fyrkantiga celler gjorts ur ett areaperspektiv



Figur 7: Översiktlig sidovy av ett RoRo-fartyg

## 2.2 Utvärdering av tidigare samt befintliga bildäckspaneler.

Ursprungligen, i slutet på 1950-talet tillverkades lastdäcken på fartyg i träplywood (härefter benämnt som endast plywood), men på grund av den markanta brandrisken övergavs detta material i mitten av 1960-talet, till förmån för bildäckspaneler i stål. Vid övergången 70/80-talet efterfrågades en minskad totalvikt på panelerna, varpå möjligheterna till alternativa material till stål undersöktes. Resultatet av undersökningen ledde fram till att topplåten (även kallad panel i denna rapport) i början på 1980-talet, byttes från stål till ett plywood laminat (som fortfarande idag är den konstruktion som används, dock ej på alla bildäck på fartygen), med tilläggisolering för ökat brandskydd. Genom att övergå från topplåt i stål till ett trämaterial, uppkom ett nytt problem; nämligen hur fordonen skall förankras under transporten. I den ursprungliga, stålbaserade konstruktionen, var detta inget problem, utan hål kunde enkelt stansas/skäras ut ur topplåten, med ett avstånd på mellan 650-850 [mm] C-C (hålcentrum till hålcentrum) mätt. Alternativt kunde "lashing-pots" utav stål enligt Figur 8, som är en variant av fästpunkt bestående av en över- och underdel som sammanfogas och bildar en fästpunkt som placeras ut med samma avstånd som ovan, svetsas fast. Detta för att fästpunkterna inte skall vara en begränsande faktor vid lastning och lossning.



Figur 8: Lashing pot i genomskärning

I och med att plywood är ett brännbart material så bör svetsning i dess närhet undvikas. Borras ett hål däremot i panelen, så påverkas hållfastheten negativt, vilket kan resultera i en ökad nedböjning. Utöver den påverkade hållfasthetsaspekten så uppkom det även sprickbildningar vid hålkanten, detta i och med att kroken som används för att surra fordonen har en såpass liten kontaktarea att den skar in i (och på sina ställen även igenom) plywooden.

Förutom de redan nämnda problemen, uppkom även en begränsande dimensionsstorleken på plywoodpanelen, genom att nedböjningen översteg de krav som ställts på grund av panelens egenvikt, då denna hade en area motsvarande hela cellens (det vill säga cirka 140 m<sup>2</sup>). Detta åtgärdades med kraftiga längsgående I-balkar. Summan av det hela resulterade i att hela konstruktionen blev tyngre än den ursprungliga strukturen i enbart stål. Denna viktökning löstes genom att begränsa panelstorleken samt placera en stålprofil, så kallade "hattprofil" (se Figur 1), mellan plywoodpanelerna. Hattprofilerna är tillverkade av valsat stål med utstansade hål, vilka tilläts svetsas in på de redan existerande I-balkarna och kunde då användas som fästpunkter, förutsatt att plywoodpaneler begränsades till relativt små bredder, i dagsläget mellan 650-800 [mm]. Genom användandet utav I-balkar och hattprofiler fås ett rutmönstrat stålskelett (se Figur 2), där de mindre plywoodskivorna placeras i hålrummen och på sätt har två problem lösts; det vill säga det tidigare med fästpunkter samt uppläggningsproblematiken med stödpunkter för plywoodskivorna.

## 2.3 Sammandrag angående brandskyddsregler

SOLAS (Eng. Safety Of Life At Sea) regel nummer 17 är till för att tillhandahålla ett tillvägagångssätt för framtagning av design av alternativa material.

Generellt skall designen och arrangemanget följa de normativa bestämmelser som ställts av SOLAS, däremot är det inte omöjligt att avvika från dessa bestämmelser förutsatt att arrangemanget möter de brand- och funktionskrav som ställts.

Vid en designavvikelse från bestämmelserna ur detta kapitel, skall en teknisk analys, utvärdering samt godkännande av avvikelsen och arrangemanget göras, vilken måste följa SOLAS regelverk.

Den tekniska analysen skall förberedas och skickas in till organisationen, baserad på de riktlinjer som ställts, där punkt fyra med underkapitel från regel 17 är av största vikt gällande alternativ design/material. Nedan följer ett utdrag ur dessa bestämmelser.

4. *Bestämmelse av den grad av brandskydd som krävs för skeppet.*
  - 4.1. *Specifikationerna skall baseras på brandsäkerhetsmål och funktionella krav som ställts av SOLAS*
  - 4.2. *Specifikationerna skall uppfylla samma säkerhetsgrad eller högre som uppnås genom användning av traditionella material/designer.*
  - 4.3. *Specifikationerna skall vara kvantifierbara och mätbara*

Det detta innebär är att vid ett eventuellt materialskifte, skall det nya materialet och dess eventuella konstruktionsförändring, motsvara samma prestanda som stål tillhandahåller ur brandsäkerhetssynpunkt.

## 2.4 Materialundersökning

Dagens sandwichpaneler består vanligtvis av tre lager; två ytterlager (shell) och ett kärnlager (core) av olika material, vilka sammanfogats med någon form av epoxy, polyester och/eller hartsmatris. Detta gör att det teoretiska antalet materialkombinationer är nästintill oändliga. Vanligen består dock ytterlagret av antingen glas- eller kolfiber där fibrerna endera ligger biaxialt ( $\pm 45^\circ$  eller  $0/90^\circ$ ), triaxialt ( $0^\circ$ ,  $\pm 45^\circ$  eller  $\pm 45^\circ$  och  $90^\circ$ ) eller fyraxligt ( $0^\circ$ ,  $\pm 45^\circ$  och  $90^\circ$ ).

Vidare kan kärnmaterialet vara uppbyggt på (i stort sett) tre olika sätt: honeycomb, skumkärna eller med en kärna av balsaträ. En omfattande materialundersökning utfördes där information om olika företag, deras produkter och dessa produkters egenskaper efterfrågades. Resultatet av denna undersökning redovisas i bilaga 2, där de olika kärnmaterialen presenteras tillsammans med de egenskaper som var tillgängliga. Denna sammanställning viktades därefter baserat på följande kriterier: densitet, kompressibilitet, skjuvbeständighet, skjuvmodul samt brottgräns. Då själva syftet med ett byte av material i panelerna är att minska vikten, gav kategorin densitet dubbel poäng. En sammanställning av viktningen visas i bilaga 3.

Som synes är balsakärnorna överlägset bäst, sett till mekaniska egenskaper, följt av ett antal olika sorters polymera skumkärnor och i den nedre halvan av tabellen syns ett antal honeycombkärnor. En avvägning mellan vikt och styrka gjordes inför valet av de material som skulle studeras vidare och de material som vidare skulle studeras presenteras i Tabell 2 nedan.

Tabell 2: Valda material för vidare studie

|   | Produkt namn    | Kärntyp   | Densitet [kg/m <sup>3</sup> ] | Tryckhållfasthet [MPa] | Elasticitetsmodul (E-modul) [MPa] | Skjuvhållfasthet [MPa] | Skjuvmodul (G-modul) [MPa] | Brottgräns [MPa] |
|---|-----------------|-----------|-------------------------------|------------------------|-----------------------------------|------------------------|----------------------------|------------------|
| 1 | ProBalsa LD7    | Balsa     | 90                            | 5,4                    | 1850                              | 1,6                    | 96                         | 7                |
| 2 | Divinycell H60  | Skum      | 60                            | 0,9                    | 70                                | 0,76                   | 20                         | 1,8              |
| 3 | Hexacor PP-8H   | Honeycomb | 80                            | 2,2                    | 97                                | 0,8                    | 19                         | 0,75             |
| 4 | Divinycell P150 | Skum      | 150                           | 2,3                    | 152                               | 1,25                   | 40                         | 2,45             |

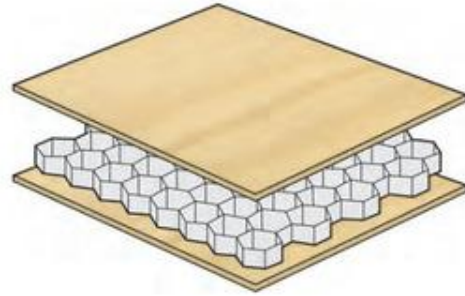
De fyra materialen som presenteras i Tabell 2 ovan studeras vidare, vilket ska leda till att ett slutgiltigt material väljs. Flera kriterier, utöver de styrkemässiga, skall uppfyllas, bland annat motståndskraftighet till vatten och fukt, minimal påverkan vid brand samt att materialen skall bibehålla sina egenskaper inom det temperaturspann som kan uppstå ( $-25^\circ\text{C} \rightarrow +40^\circ\text{C}$ ).

## 2.5 Utgallring av kärntyperna

I detta avsnitt ges en kort beskrivning av de olika kärntyperna som studerats. För- och nackdelar presenteras ytligt, varpå de olika kärnorna en efter en gallras bort.

### 2.5.1 Kärntyp: Honeycomb

Figur 9 visar en generell uppbyggnad av en panel utav *honeycombstruktur*, här bestående av aluminium med topp- och underplåt av plywood. Denna struktur är generellt väldigt lätt och styv, men har två förhållandevis stora nackdelar relaterade till sammanfogning av core och shell;



Figur 9: Generell uppbyggnad av en honeycombpanel  
(med tillstånd av Ayres Lightweight Panel System)

1. Då de skall sammanfogas appliceras ett visköst appliceringsmaterial, som dessvärre rinner ner i och fyller ut de (i det här fallet) sexkantiga cellerna, varpå panelens vikt ökar markant och därmed tappar en av fördelarna med konstruktionen
2. Risken för delaminering, det vill säga att komponenterna lossnar från varandra utmed panelens längd, är markant då kontaktytorna mellan honeycomb och shell är väldigt små kontra panelens totala storlek

Utöver detta är konstruktionen relativt komplex och används mestadels inom mycket krävande och avancerade industrier såsom flyg- och rymdindustrin. Baserat på dessa uppgifter anses en honeycombkärna inte vara passande för de ändamål som denna rapport behandlar, varpå den vidare studien av denna typ av kärna avslutas här.

### 2.5.2 Kärntyp: Balsa

Som redan nämnts och tydliggjorts i bilaga 3, är *balsakärnorna* överlägsna om man utgår ifrån de tillgängliga tekniska specifikationerna. Emellertid har balsakärnorna en klar nackdel; då balsakärnorna är en sammansättning av trästrukturer, så är de vatten- och fuktkänsliga. Även om balsakärnan skulle kläs i ett heltäckande lager av glas- eller kolfiber, så skulle det räcka med en liten skada på ytterlaminatet i en fuktig miljö för att riskera en fuktinträngning. Det räcker med en liten mängd fukt/väta för att hela panelen skulle ta skada i form av (under en längre tidsperiod) röta och/eller spricktillväxt. Då fuktresistans är ett väldigt viktigt kriterium att uppfylla, för att minimera risken att panelerna försvagas med ökad mängd innesluten fukt, elimineras därför balsakärnan, vilket gör att den enda kvarvarande kärntypen är skumkärnor.

### 2.5.3 Kärntyp: Skum

För att utöka kunskaperna angående *skumkärnan*, Divinycell H60, kontaktades DIAB i Laholm och ett möte bokades in. Frågeställningen presenterades för företagets representanter och ett mycket informativt och givande möte resulterade i att en rekommendation att byta material föreslogs. Detta ty de ingående komponenterna (vilka är konfidentiella) som krävs för att tillverka Divinycell H60, bland annat bildar giftig klorgas ( $\text{Cl}_2$ ) samt frätande saltsyra ( $\text{HCl}$ ) vid en eventuell brand. Då dessa båda restprodukter är så pass skadliga för både människor och transporterat gods, ansågs det vara av stor betydelse att inte vidare studera detta material, utan istället fokusera på en komponent vars beståndsdelar inte skapade farliga ämnen vid en eventuell brand. Efter rekommendation från DIAB undersöktes Divinycell P100, vars egenskaper motsvarar den tidigare studerade kärnan Divinycell H60. Simuleringar visade dock att säkerhetsfaktorn mot brott understeg de ställda kraven, varpå DIAB åter kontaktades för konsultation. Rekommendationen blev då Divinycell P150, eftersom detta material hade bättre egenskaper än H60 och P100. Undantaget är densiteten, H60 har en densitet på  $60 \text{ kg/m}^3$  medan P150s densitet ligger på  $150 \text{ kg/m}^3$  och då P150 är tätare, så leder det till att de övriga mekaniska egenskaperna ökar likväl. Oavsett skumkärna så uppfylls de temperaturkrav som ställts på konstruktionen, varpå en vidare studie av detta inte genomfördes.

## 2.6 Reparation och sekundär laminering av kompositmaterial med skumkärna

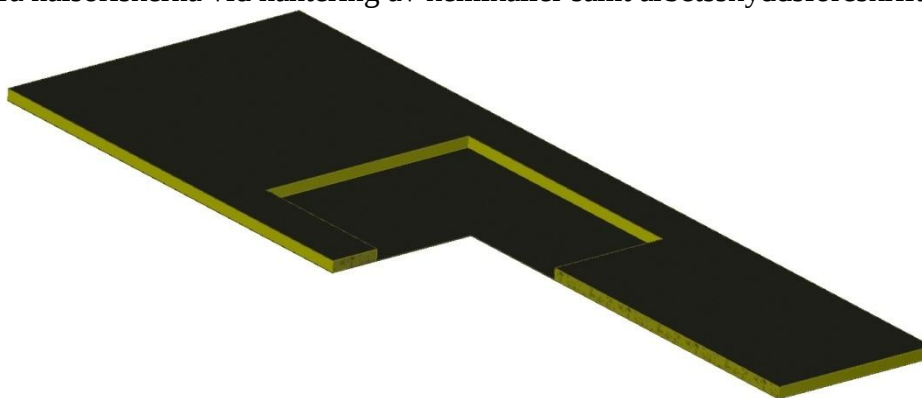
Skador som uppstått på sandwichstrukturer i bildäckspanelerna är möjliga att reparera, beroende på skadans omfattning och storlek. Vid endast repor och mindre intryckningar behövs det normalt ingen åtgärd. Däremot om ytterlaminatet har en krosskada på en yta med maximal storlek utav cirka 50x150 [mm], skall denna renskas, slipas och därefter spacklas upp med epoxy eller epoxyspackel, tills dess att det inte är någon nivåskillnad mellan den reparerade ytan och originalytan.

Handlar det däremot om en krosskada på en yta större än 50x150 [mm], renskäres, slipas och spacklas även denna upp likt tidigare, med skillnaden att vid behov byts även kärnan ut och ett nytt skikt av kärnan och ytterlaminat byggs upp, se Figur 10.

Det är även möjligt att utföra en reparation där skadan har nått igenom alla tre delar av sandwichen, det vill säga genom topplaminatet, kärnan och underlaminatet. Denna reparation utförs på samma sätt som för krosskador för paneler större än cirka 50x150 [mm], med skillnaden att uppbyggnaden påminner om fabriksstillverkningen, där allt görs som vid nyproduktion med nya fibermattor, ny kärna och hartsmatris.

Då det inträffat ett skjuvbrott i kärnmaterialet och/eller lokala delamineringar har inträffat mellan kärna och laminat, görs en bedömning i varje enskilt fall om det är nödvändigt att byta ut kärnan eller om det är fullt acceptabelt att enbart injicera nytt lim/epoxy i panelerna för att bibehålla fullgod hållfasthet.

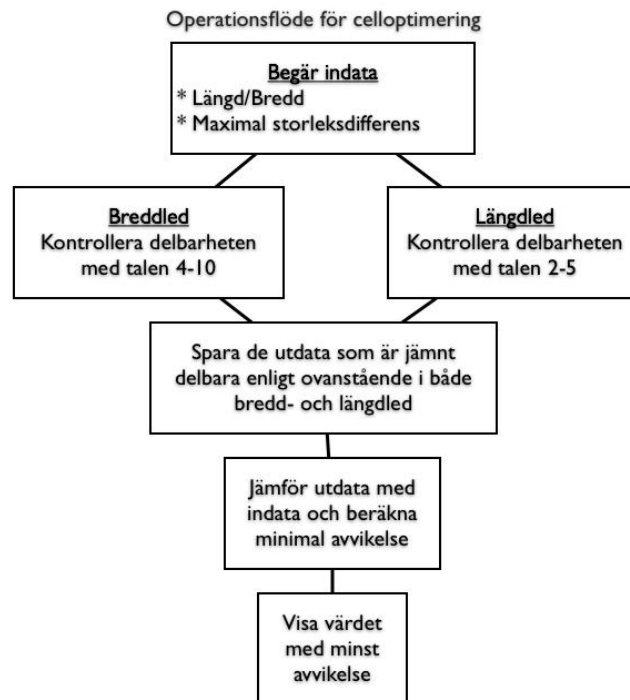
All reparation av den här typen av plaststrukturer skall huvudsakligen utföras inomhus i en ren, torr och uppvärmd lokal med fullgod ventilation, vilken är för ändamålet avsedd. Det är även möjligt att använda sig av tält eller motsvarande utrymme även för en permanent reparationsplats utomhus, förutsatt att det är möjligt att tillhandahålla renlighet och en garanterad temperatur på minst 18°C, genom hela reparations- och härdningsfasen. Utöver dessa kriterier så finns det en rad styrande säkerhetsföreskrifter för att minimera den tydliga brandrisken vid användning av brandfarliga ämnen, minimera hälsoriskerna vid hantering av kemikalier samt arbetsskyddsföreskrifter.



Figur 10: Princip för reparation av kompositpanel

## 2.7 Studie av lastfall på paneler med utökad storlek

Med utgångspunkt i den tidigare presenterade cell med innermått 14171x9884 [mm], ställdes ett antal olika fall upp beträffande antalet paneler i en cell då panelstorleken ökas. Då dessa mått är relativt ”ojämna”, gjordes med hjälp av programvaran MATLAB ett optimeringsprogram (se bilaga 4 för programkod samt Figur 11 för flödesschema) för att, baserat på given indata angående hattprofilens toppbredd samt cellens bredd och längd, beräkna de optimala innermåttarna med ett minimalt överskott. Dessa beräkningar gjordes med ett antagande att panelerna låg mellan 2-5 stycken i längdled samt 4-10 stycken i breddled. Dessa antagande gjordes baserat på ett kriterium som ställts upp att det maximala antalet paneler, av kompositmaterial, inte fick överstiga det antalet paneler som idag används (50 stycken), tillverkade av ett trälaminat. Efter programmets iterationer visade det sig att en cell med innermått 14100x9880 [mm] skulle vara optimal (vid dessa teoretiska beräkningar), vilket skulle ge ett minimalt glapp mellan panelerna och de stödjande hattprofilerna i breddled respektive mellan panel/panel i längdled. Med tidigare angivet panelantal i vardera led resulterar det i att antalet fall som undersöks är 28 fall, med ett panelantal som varierar från 8 till 50 paneler, enligt tidigare ställt kriterium.



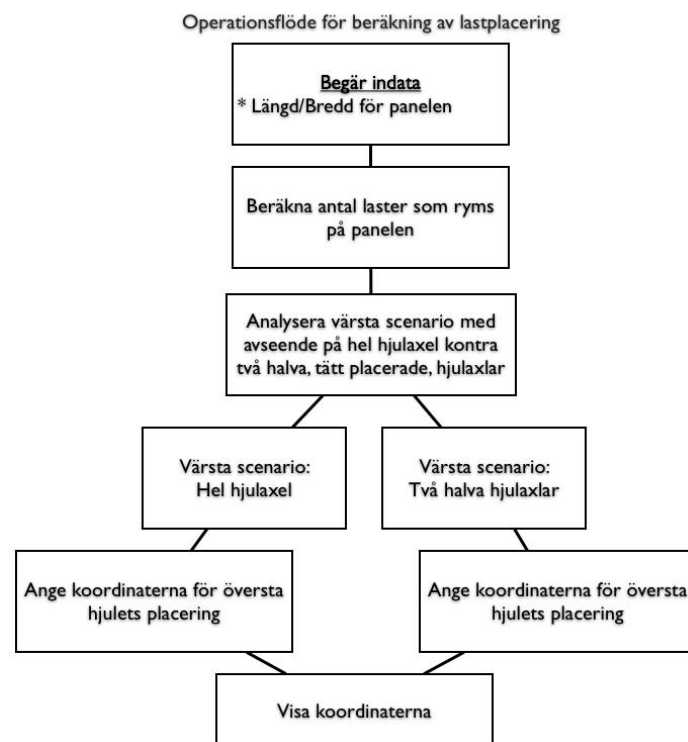
Figur 11: Flödesschema för celloptimeringsprogram

För att undersöka hur många bilar och hur dessa skulle kunna parkeras på en panel, togs uppgifter från en Toyota Succeed Wagon [1] rörande axelavstånd, axelbredd etcetera, som presenteras i Tabell 3. Den största tänkbara panelen som undersöktes hade måtten 4940x3420 [mm]. Utifrån panelens och bilens mått ställdes ett antal olika alternativ upp över hur bilarna skulle kunna parkeras, för att maximera antalet hjul på panelen, samt placera dessa så centrerat omkring tyngdpunkten som möjligt för att simulera värsta tänkbara lastfall. Dessa lastfall visas i Figur 13, där det i det övre vänstra hörnet visas de referenser som använts; den mindre, ifyllda rektangeln syftar till att visa dagens panelstorlek, den större, ifyllda rektangeln visar den maximala tänkbara panelstorleken, samt att det även visas en förenklad bild över den ”referensbil” som har använts.

Tabell 3: Referensmått för vald bil

|                                           |        |
|-------------------------------------------|--------|
| Bilens längd [mm]:                        | 4 300  |
| Bilens bredd [mm]:                        | 1 695  |
| Axelbredd [mm]:                           | 1 260  |
| Axelavstånd [mm]:                         | 2 300  |
| Ett hjuls kontaktarea [mm <sup>2</sup> ]: | 50 000 |

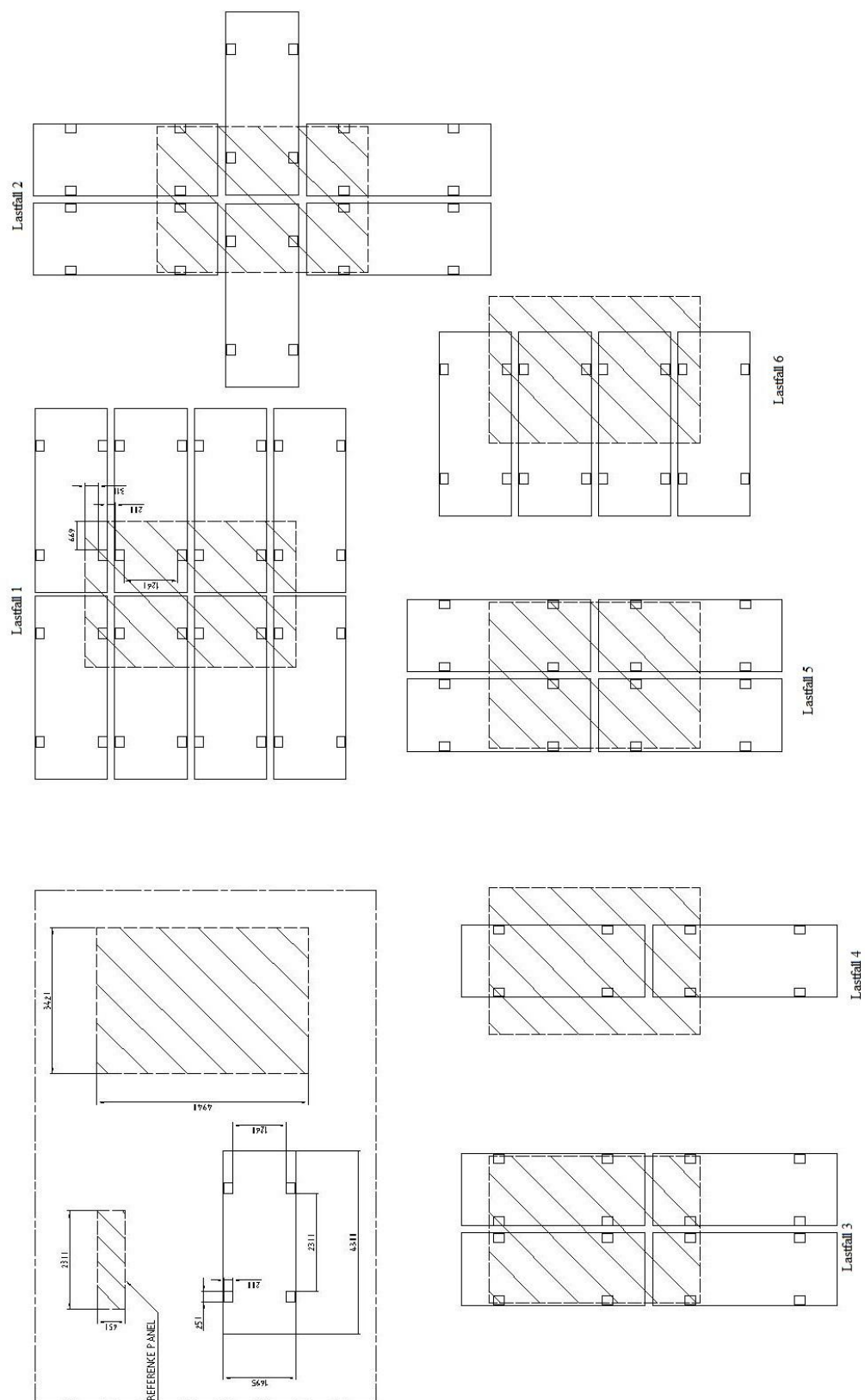
En enkel modell över dessa olika lastfall ställdes upp i Autodesk Inventor, med en 10 mm stålplatta, som simulerade panelen, för att undersöka vilket av lastfallen som skulle ge den största nedböjningen. Det visade sig, som väntat, att lastfall 6, med däckan parkerade centrerat över centrumaxeln gav den maximala nedböjningen. Detta fall användes därefter som ”worst case scenario” för samtliga plattor, efter att en inbördes diskussion förts huruvida, oavsett panelstorlek, detta skulle vara värsta tänkbara lastfall. För att djupare undersöka var på panelen lasterna skulle placeras designades ett program i MATLAB (se bilaga 5 för programkod samt Figur 12 för flödesschema), för att beräkna koordinaterna för den överst placerade lastens angreppspunkt. Programmet beräknade även hur många hela hjulaxlar respektive ”extra” hjul får plats på panelen. Beräknas då det översta hjulets placering, följer de andra automatiskt.



Figur 12: Flödesschema för beräkning av lastplacering

Med hjälp av ett internt framtaget Excelbaserat makro kallat CORELA, med användningstillstånd från DIAB, gjordes en första, grov uppskattning, för samtliga panelstorlekar, rörande vilka tjocklekar som skulle krävas för att kunna bära upp de krafter som bilarnas tyngd ger upphov till. CORELA fungerar som så att topplaminatmaterialet väljs ur en stor databas, varpå fibertätheten anges och laminatets tjocklek beräknas. Vidare väljs kärnmaterialet ur ytterligare en databas, samt tjockleken anges. På samma sätt som tidigare väljs bottenlaminatmaterialet och dess fibertäthet. De båda laminatens tjocklek eller fibertäthet behöver inte nödvändigtvis vara samma, utifall att en vertikal ojämvikt önskas. Slutligen väljs vilken sammanfogningsmetod som skall användas, vilket bindemedel (till exempel harts) som skall sammanbinda fibrerna samt vilken kemisk agent som skall användas för att sammanfoga laminaten och kärnan. Dessa värden exporteras inom makrot till en beräkningssida, där panelens storlek anges samt den utbredda last som ligger på panelen anges. Därefter beräknas nedböjningen mitt på panelen samt säkerhetsfaktorerna mot brott på grund av alltför stor plastisk deformation samt brott på grund av skjuvspänningar.

Vidare modellerades ett antal olika modeller upp, med utgångsdata i de tidigare bestämda 28 panelstorlekarna upp i programvaran ANSYS med insticksmodulen PrepPost, som tillhandhåller materialegenskaper för kompositmaterial vars mekaniska egenskaper varierar i tre dimensioner (till exempel E-modulen är olika beroende på fiberriktningen i ytterlaminaten). Anledningen till att inte alla 28 storlekar studerades, var att de mindre panelerna inte utnyttjade materialets fulla mekaniska potential och det var då mer kostnadseffektivt att behålla den nuvarande konstruktionen med plywoodpaneler. De kvarstående panelerna belastades i enlighet med lastfall 6 (med lasterna centrerade över dess vertikalaxel) i Figur 13 och nedböjning samt säkerhetsfaktor mot brott och skjuvning vid nedböjning studerades. Den last som användes motsvarade en given grundlast på 5900 N per däcksyta (enligt teknisk specifikation från tidigare order) samt att hänsyn togs till den vertikallacceleration (1,45 gånger tyngdaccelerationen) som uppstår under drift. Detta ger en total last på 8500 N per däcksyta. Denna last placerades därefter ut i enlighet med lastfördelningsfall 6 i Figur 13 på de kvarvarande elva panelstorlekarna. Ett antal av dessa elva studerades med olika laminattjocklekar, för att undersöka hur laminatets tjocklek påverkar den totala nedböjningen samt säkerhetsfaktorn mot skjuvbrott. En sammanfattning av de olika panelerna, dess nedböjningar, vikter samt säkerhetsfaktorn mot skjuvbrott presenteras i bilaga 6. Där visas ett antal olika kombinationer av panelantal för varje cell. I det två första kolumnerna visa vilket antal paneler som används i längd- respektive breddled, samt därpå vilka mått som panelen då får. Vidare uppvisas antalet hattprofiler samt antalet lashingpots per panel, som krävs för att infästningkraven skall uppfyllas. Vissa paneler har undersökts med flera olika laminattjocklekar, för att se hur laminattjockleken påverkar nedböjningen, säkerhetsfaktorn mot skjuvbrott samt vikten på panelen. De två därpå följande kolumnerna visar totalvikterna för en cell; först den rena panelvikten följt av panelvikten samt den tillkommande stålvikten.



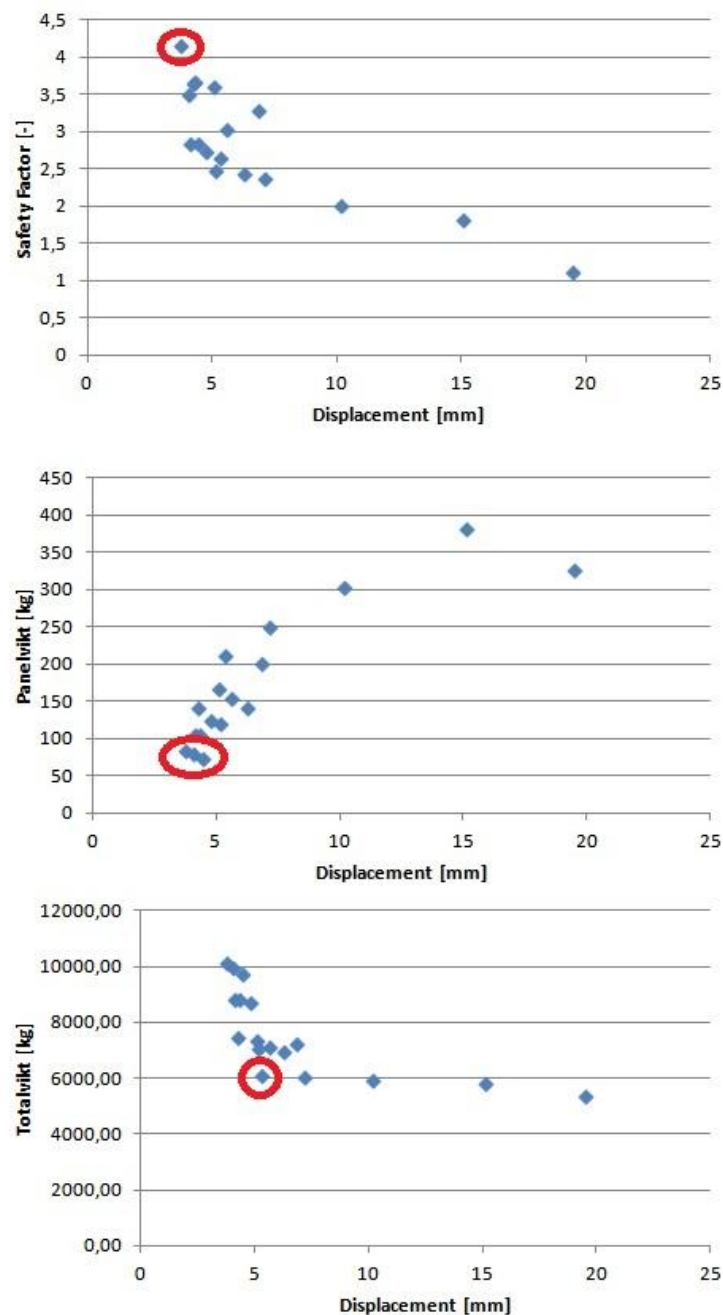
Figur 13: Lastfördelningslayout för en panel med maximal storlek

### 3. Resultat

I följande kapitel presenteras resultaten från de simuleringar som utförts på de olika panelstorlekarna, samt en prisjämförelse kontra nuvarande konstruktion.

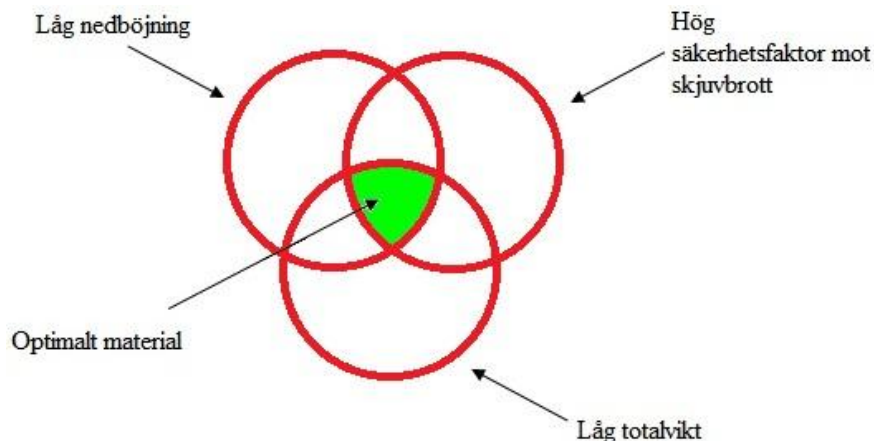
#### 3.1 Resultat av simuleringar

Baserat på de uppgifter som presenteras i bilaga 6, där resultaten av alla beräkningarna i ANSYS sammanställts, plottades grafer där de olika panelstorlekarnas nedböjning (displacement) ställdes mot deras säkerhetsfaktor mot skjuvbrott (safety factor), panel- samt totalvikten (för hela cellen, inklusive hattprofilernas, I-balkarnas, infästningsbrickornas vikt samt lashing potsens). Dessa grafer visas nedan i Figur 14.



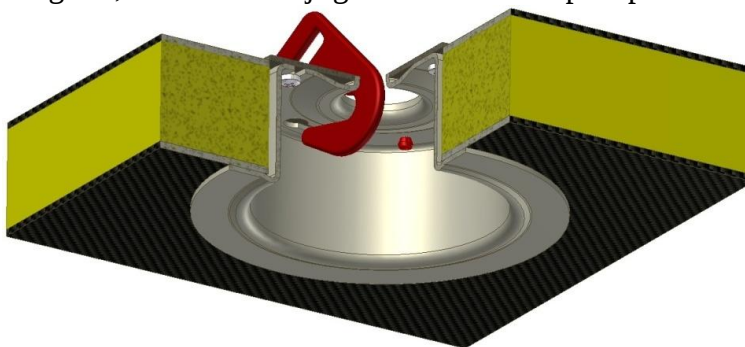
Figur 14: Grafiska framställningar av resultaten från undersökningarna med önskvärda egenskaper inringade

Graferna i Figur 14 visar hur de olika panelstorlekarna (markerade med romber i figuren) står sig i relation till varandra när deras egenskaper ställts mot respektive nedböjning. Utifrån dessa grafer samt datan i bilaga 6, kan en avvägning göras mellan de parametrar som det fokuserats på, det vill säga nedböjningen, säkerhetsfaktorn mot skjuvbrott samt totalvikt, för att komma så nära ett optimalt material som möjligt med dess egenskaper. Önskvärt är då givetvis en låg nedböjning, i kombination med en hög säkerhetsfaktor och en låg totalvikt. Dessa önskvärda egenskaper har markerats i graferna med ringar. Egenskaperna kan även illustreras i ett venndiagram (se Figur 15), där den sammanfallande arean (union av) de tre parametrarna motsvarar det mest optimala materialet.



Figur 15: Venndiagram visandes hur de tre parametrarna sammanfaller

Studeras datan i bilaga 6 så framgår det att samtliga testade panelalternativ, utom de tre minsta, är lättare än dagens stål-plywood-konstruktion (jämför Tabell 1). Detta visar då (förutsatt att de olika storlekarna som undersökts i detta arbete används samt bortsett från de panelstorlekar som ger en ökad vikt studeras) att den möjliga viktbesparingen per cell blir mellan cirka 1,5 - 39,7 %. Detta förutsätter då att dagens lashinglösning (hattprofiler, se Figur 1) används, i kombination med (beroende på panelens bredd) två till fyra rader med lashing pots (se Figur 16) används. Denna lashing pot måste användas istället för den i Figur 8, då det är omöjligt att svetsa i kompositpaneler.



Figur 16: Lashing pot omgiven av vald kompositpanel

Ett antal paneler har däremot så pass låg säkerhetsfaktor ( $>2,5$ ) att de kan anses osäkra, då lasterna kommer påverka panelerna under en lång period, att risken för plastisk deformation och utmattningsbrott är påtaglig. Baserat på detta, så elimineras de från vidare urvalsprocesser. Rörande nedböjningen så är inte någon av panelerna mer benägna att nedböjas än dagens plywoodpaneler, där den maximalt tillåtna gränsen är 20 mm.

### 3.2 Kostnadsjämförelse

Baserat på den valda panelen, som presenteras mer utförligt i kapitel 4, kunde en kostnadsjämförelse göras relativt dagens plywoodkonstruktion. Som visas i Tabell 4 nedan så blir det en väldigt stor initialkostnadsökning relativt det tidigare materialvalet. Kostnaden för plywoodpanelerna är givna av MacGregor, medan kostnaderna för kompositpanelerna är givna av dels DIAB och dels från kompendiet ”Kompositfartyg – en introduktion” [2]. Observera att tabellen nedan endast avser rena materialkostnader för panelerna, då tillverkningskostnader är svårtillgängliga på grund av antalet inblandade underleverantörer samt eventuella ramavtal eller mängdrabatter.

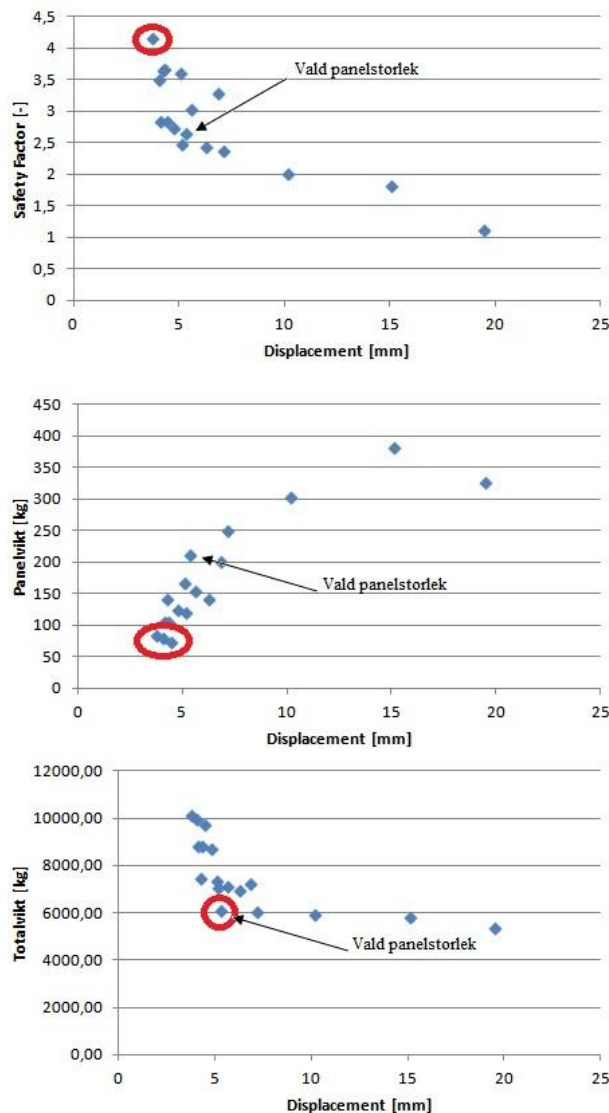
Tabell 4: Kostnadsjämförelse av de två konstruktionerna

| Extern data                                  |                                |                                |                      |                     |                     |
|----------------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|----------------------|---------------------|---------------------|
| Eurokurs [SEK]:                              | 8,92                           | Enligt Dagens Industri 20/2-12 |                      |                     |                     |
|                                              |                                |                                |                      |                     |                     |
| Plywoodpaneler                               |                                |                                |                      |                     |                     |
| Dagens panelstorlek [m <sup>2</sup> /panel]: | 1,495                          |                                |                      |                     |                     |
| Antal paneler/cell [st]:                     | 50                             |                                |                      |                     |                     |
| Antal celler [st]:                           | 138                            |                                |                      |                     |                     |
| Total panelarea (9 däck) [m <sup>2</sup> ]:  | 10 316                         |                                |                      |                     |                     |
|                                              |                                |                                |                      |                     |                     |
|                                              | Pris<br>[€/m <sup>2</sup> ]:   | Pris<br>[SEK/m <sup>2</sup> ]: | Pris<br>[SEK/panel]: | Pris<br>[SEK/cell]: | Totalpris<br>[SEK]: |
|                                              | 18,06                          | 179,1                          | 268                  | 13 388              | 1 847 496           |
|                                              |                                |                                |                      |                     |                     |
| Kompositpaneler                              |                                |                                |                      |                     |                     |
| Utökad panelstorlek [m <sup>2</sup> /panel]: | 9,356                          |                                |                      |                     |                     |
| Antal paneler/cell [st]:                     | 14                             |                                |                      |                     |                     |
| Antal celler [st]:                           | 138                            |                                |                      |                     |                     |
| Total panelarea (9 däck) [m <sup>2</sup> ]:  | 18076                          |                                |                      |                     |                     |
|                                              |                                |                                |                      |                     |                     |
|                                              | Mängd<br>[kg/m <sup>2</sup> ]: | Pris<br>[SEK/m <sup>2</sup> ]: | Pris<br>[SEK/panel]: | Pris<br>[SEK/cell]: | Totalpris<br>[SEK]: |
| Glasfiber                                    | 4,21                           | 336,90                         | 3 152                | 44 130              | 6 089 896           |
| Polyesterresin                               | 2,81                           | 224,60                         | 2 101                | 29 420              | 4 059 931           |
| Skumkärna P150                               | 9                              | 770                            | 7 204                | 100 862             | 13 918 895          |
|                                              |                                |                                |                      |                     |                     |
| SUMMA:                                       |                                | 1 335,9                        | 12 499               | 174 984             | 24 147 750          |
|                                              |                                |                                |                      |                     |                     |
| Procentuell ökning per kvadratmeter:         |                                | 743%                           |                      |                     |                     |

Som det kan utläsas ur tabellen ovan krävs en markant större initialinvestering för kompositpaneler, relativt plywoodpaneler. Den största delen av den ökade kostnaden ligger i skumkärnan P150, där kostnaden på 770 SEK/m<sup>2</sup> avser en tjocklek på 60 [mm]. Eftersom panelerna har olika area, så kan priset per panel inte jämföras. Av samma anledning kan inte heller priset per cell eller den totala kostnaden jämföras, utan fokus får läggas på priset per kvadratmeter.

#### 4. Diskussion och slutsats

För att göra det slutliga panelvalet studerades graferna i Figur 14 samt datan i bilaga 6 och då framkom en panel med måtten (LxBxH) 4940x1894x68 [mm] som det bästa alternativet om de tidigare nämnda parametrarna (nedböjning, säkerhetsfaktor mot skjuvbrott samt totalvikt) beaktas. Den består av en 60 mm kärna av DIABs material P150, omgiven av ett 4 mm kvadraxiellt (fyraxligt), vertikalt symmetriskt upplagt skal av glasfiber på topp- och undersida. I Figur 17 visas hur den valda panelen står sig relativt de andra panelerna ur mekaniska perspektiv. Förutsatt att denna panel väljs så innebär det att det totala antalet paneler för varje cell kommer uppgå till 14, som sammanfogas med sex hattprofiler samt en centrerad I-balk. I vardera panelen placeras 16 lashing pots i två rader om åtta pots. Detta resulterar i att den sammanlagda vikten för en cell uppgår till 6117 kg, som kan jämföras med dagens konstruktion som uppgår till 8927 kg. Studeras hela fartyget, med förutsättningen att antalet celler är oförändrat, så innebär det att den totala vikten för samtliga påverkningsbara celler uppgår till cirka 844 ton. Sammantaget innebär det en viktbesparing på 31,5% från de tidigare 1232 ton.



Figur 17: Markering av vald panel

Huruvida denna valda panel verkligen är den bästa kan diskuteras. Den har varken minst nedböjning, högst säkerhetsfaktor eller lägst vikt. Av tämligen klara skäl uppstår den minsta nedböjning på de, till arean sett, minsta panelerna. Detta då lasten sprids på en mindre yta och avstånden till uppläggningspunkterna är mindre. Analogt ser man också att de största nedböjningarna uppstår på de allra största panelerna som undersökts, då på grund av de större avstånden till uppläggningspunkterna. Högst säkerhetsfaktor mot brott uppnås även den på de mindre panelerna, allra högst i de fall då panelarean är relativt liten i kombination med en stor laminattjocklek. Även detta är tämligen naturligt, då det är laminatet som tar upp de stora tryck-/dragspänningarna, medan kärnan tar upp skjuvkrafterna. Att öka laminattjockleken, leder till en ökad tålighet mot brott. Detta visas tydligt i bilaga 6, där flera test har gjorts på samma panelarea, men med olika laminattjocklekar. Det framgår då att med minskad laminattjocklek minskar även säkerhetsfaktorn, samtidigt som nedböjningen ökar.

Även egenskapen lägst vikt åstadkommes för den areamässigt minsta panelen, med lägst laminattjocklek. Det har visat sig under studien att störst påverkan på vikten har mängden laminat. Kärnan P150 har en densitet på just  $150\text{kg/m}^3$ , som kan jämföras med att laminatet har en densitet på cirka  $1700\text{kg/m}^3$ . Väljs då en panel med liten area och en liten mängd laminat, uppnås givetvis en låg vikt.

Hänsyn måste dock tas till den ökade stålsvikt som uppstår då antalet paneler minskar. Då panelstorleken minskar, så ökar givetvis *antalet* paneler och därmed krävs det fler uppläggningspunkter. Dessa består då av hattprofiler och I-balkar, som är gjorda av stål. Så även om den totala *panelvikten* för de mindre panelerna är lägre, än för de med en större area, så förlorar man den viktbesparingen i form av att mer stål behövs för att bära upp panelerna. Som jämförelse kan nämnas att den största undersökta panelen (4940x3420x68 mm) uppnådde en *panelvikt* på 3050 kg, medan den minsta panelen (1976x1894x66 mm) uppnådde en *panelvikt* på 2532 kg. Här visas det att i ren *panelvikt* så är en mindre panel att rekommendera, med en differens på drygt 500 kg/cell. Emellertid, om även stålvikten tas i beaktning, så erhåller den större panelen en *totalvikt* på 5817 kg, medan den mindre panelen erhåller en *totalvikt* på 9714 kg, alltså en differens på 3897 kg/cell. Detta visas även i bilaga 6.

Det detta visar är att hänsyn måste tas till alla ingående delar och därefter, genom lämpliga avvägningar, besluta vilka måttproportioner som den slutliga panelen skall ha. För detta projekt sattes en minimigräns, för vilken säkerhetsfaktorn inte fick understiga på 2,5. Detta för att kunna svara mot eventuella oförutsedda händelser som skulle kunna påverka panelerna negativt. Den valda panelen (4940x1894x68 mm), markerad med grått i bilaga 6, ligger som synes strax över denna. Studeras samtliga fall som har testats med olika laminattjocklekar, så framgår det att panelvikten minskar med cirka 7 % för varje halv millimeter som man minskar laminattjockleken. Dock minskar även säkerhetsfaktorn, denna med cirka 15 %, för varje halv millimeter som laminattjockleken minskas med. Ponerar det att den valda panelens laminattjocklek skulle minskas, så skulle visserligen vikten minskas, vilket är önskvärt, men säkerhetsfaktorn skulle då understiga den tidigare uppsatta minimigränsen, varpå man kan antaga att den valda dimensionen på panelen är optimal.

Som synes i Tabell 4 i kapitel 3.2 ovan, så är inköpskostnaden för kompositpaneler väldigt mycket högre än för plywoodpaneler, nämligen 743 % högre. Då exakta siffror för den här magnituden av paneler är relativt svåra att få tag på, användes häftet ”Kompositfartyg – en introduktion” som grund för polyester hartsens samt glasfibrets pris. Priset för kärnan, Divinycell P150, kommer ifrån DIABs säljavdelning. Hänsyn har inte tagits till eventuella mängdrabatter eller ramavtal, så priset skulle antagligen kunna sjunka en aning om dessa tillämpas.

Med utgångspunkt i de tekniska beräkningar som har gjorts med hjälp av ANSYS PrepPost, samt modelleringar i AutoDesk Inventor, så visar projektet att en stor viktbesparing (cirka 31 %) är möjlig, om fokus ligger på själva bildäcken. Studeras däremot hela fartyget är viktbesparingen inte fullt lika imponerande; antages fartygets tjänstevikt till 30 000 ton, så skulle ett utbyte av panelmaterialet, innebära en viktbesparing på cirka 1,3 %. Dock skall det betonas att samtliga beräkningar är teoretiska och att det verkliga lastfallen kan skilja sig från de som studerats i detta projekt.

#### 4.1 Framtida rekommendationer

Oavsett panelstorlek, uppkommer det ett behov av uppläggning, bestående av stål. Den rena stålvikt som tillkommer uppgår till mellan knappa 1900 kg till strax under 6500 kg. En rekommendation för framtida undersökningar är att, om teoretiskt möjligt, beräkna hur stor viktbesparing som kan göras om även hattprofilerna och I-balkarna skulle konstrueras i någon form av kompositmaterial. Då hattprofilen har relativt liten godstjocklek (4 mm) så rekommenderas det i sådana fall att modellera upp den i ett rent laminatmaterial för maximal styvhet. I-balken å andra sidan skulle antingen kunna modelleras upp med en tunn kärna för att ta upp vissa skjuvningar alternativt, likt hattprofilen, modellerna den i ett rent laminat. På grund av I-balkens geometri, så skulle det dock rekommenderas, för att underlätta tillverkningen, att modellera även denna i ett rent laminat.

Alternativt skulle det användandet av betydligt större paneler (storleksmässigt i samma storlek som cellens innerarea) införas. Dessa skulle kunna konstrueras enligt samma sandwichprincip som tidigare presenteras, med modifikationen att förstävningar på undersidan i både transversell och longitudinell riktning implementeras. Dessa förstävningar kan konstrueras av antingen rent laminat eller av sandwichstruktur, vilkens princip visas i Figur 18 nedan.



Figur 18: Generell princip för förstävningar av laminat

Ytterligare en punkt av intresse är att undersöka hur ett skifte från glasfiber till kolfiber skulle påverka vikten. Då kolfiber har bättre mekaniska egenskaper än glasfiber, men till ungefär samma vikt, så torde laminatåtgången minska, varefter även panelvikten bör minska. Dock kostar kolfiber i dagsläget cirka 10 gånger mer än glasfiber, vilket gör att investeringskostnaden blir ännu högre än den tidigare beräknade.

Då ett materialskifte har visat sig vara en tämligen skrämmande hög investering för redare, rekommenderas det för framtida undersökningar att en LCC-analys (Life Cycle Cost) görs och undersöker om och i så fall hur lång tid det tar innan investeringen betalar av sig. Livstiden för detta koncept är i dagsläget okänt, vilket gör att en LCC-analys försvåras en aning, men tester utav panelen (till exempel provning med en rigg som simulerar en bil som kör över) kan göras och skulle då resultera i en uppskattad livslängd.

De positiva effekterna av ett materialskifte måste även de undersökas. I och med att fartygets totalvikt minskar, så kommer också bränsleförbrukningen att minska. En undersökning av denna effekt är att rekommendera, då detta bör ses som den största positiva följden. Då lastytan i sig redan är maximalt utnyttjad, så kan den inte ökas. Dock kan lastens vikt ökas, det vill säga tyngre fordon kan skeppas varpå det skulle kunna leda till en ökad lönsamhet, ty antalet potentiella kunder ökar.

En ökad last kan även leda till problem som undersökas. Det faktum att panelstorleken ökas skapar ett nytt problem, nämligen att en bil *teoretiskt sett* skulle kunna falla igenom till planet under. I den tidigare konstruktionen så var panelerna så pass små så att även om ett brott i panelen skulle uppstå, så höll stålstrukturen uppe fordonet. Komposita material ger, till skillnad från plywood, ingen förvarning innan brott uppstår. I plywoodpaneler kan det studeras hur sprickor framkommer, medan de komposita panelerna kan knäckas momentant och väldigt plötsligt, på grund av sin styvhet. Det skulle kunna tänkas att någon form av elastiskt nät vävs in eller att armering av kärnan tillämpas, varpå en ökad flexibilitet uppkommer och säkerhetsrisken minskas.

En inrådan är även att försöka undersöka de verkliga tillverkningskostnaderna som uppstår samt de transportskostnader som uppkommer då tillverkningen av panelerna, med största sannolikhet, inte sker på samma plats som tillverkningen av fartyget för att säkerställa att kvalitetskraven uppfylls och eventuell plagiering undviks i största möjliga mån. Som ett exempel kan nämnas att ett fartyg av den storlek som undersökts i detta arbete kräver 1932 paneler. Förutsatt att panelerna tillverkas i Sverige och skall skeppas till varv i Kina alternativt Korea med 40-fots sjöcontainrar, krävs i sådana fall att 27 stycken containrar används, i enlighet med Tabell 5 nedan. I tabellen nedan har hänsyn tagits till ett visst avstånd mellan panelerna för att simulera ett eventuellt emballage runt panelerna.

Tabell 5: Containerbehov vid transport av paneler

| Containerns innermått (40-fot)                       |       | Panelens mått |           |
|------------------------------------------------------|-------|---------------|-----------|
| Längd [mm]:                                          | 12050 | Längd [mm]:   | 4940      |
| Bredd [mm]:                                          | 2350  | Bredd [mm]:   | 1894      |
| Höjd [mm]:                                           | 2370  | Höjd [mm]:    | 68        |
|                                                      |       |               |           |
| Antal celler/fartyg:                                 | 138   |               |           |
| Antal paneler/cell:                                  | 14    |               |           |
| Totalt antal paneler:                                | 1932  |               |           |
|                                                      |       |               |           |
| Antal paneler som kan ställas på högkant i breddled: |       |               | 30        |
| Antal paneler som kan läggas ovanpå:                 |       |               | 6         |
| Antal paneler som ryms efter varandra i längdled:    |       |               | 2         |
| Totalt antal paneler som ryms i en container         |       |               | 72        |
|                                                      |       |               |           |
| Totalt containerbehov:                               |       |               | <b>27</b> |

## Källförteckning

[1] Toyotas japanska hemsida, [hämtat 2009-10-14]

Tillgänglig: <http://toyota.jp/succeedwagon/spec/spec/index.html>

[2] Stenius, Burman, Rosén, Garne, Kutteneuler och Norrby et al (2011)

*Kompositfartyg – en introduktion*. Stockholm: KTH

ISBN: 978-91-7415-917-2

[3] International Maritime Organization (2001), *SOLAS Amendments 2000*. London:

IMO

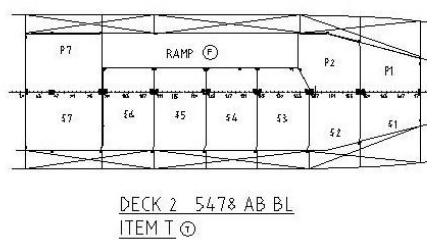
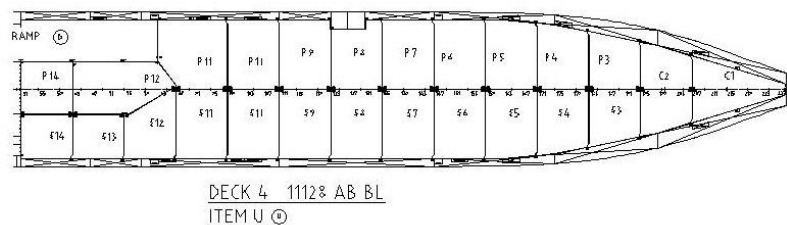
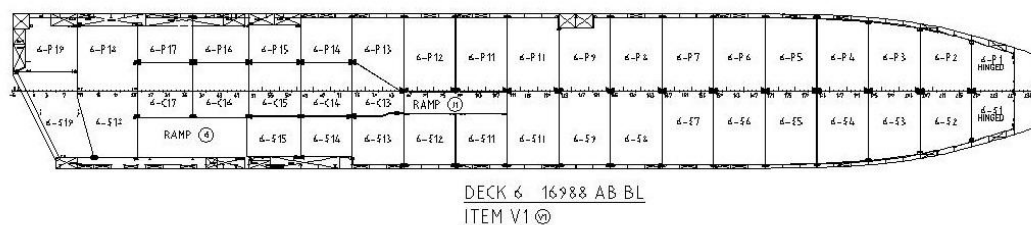
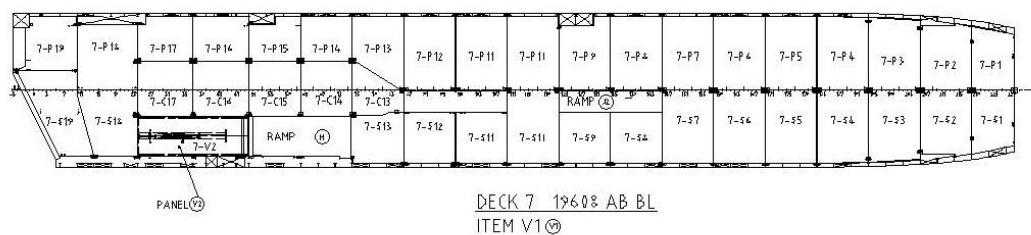
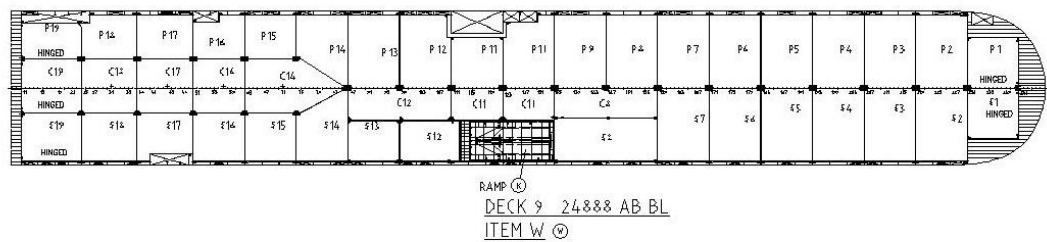
ISBN: 92-801-5110-X

## Figurförteckning

| Figurplacering: | Källa:                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|-----------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Framsida        | Egenritad                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| Figur 1         | MacGregor                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| Figur 2         | MacGregor                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| Figur 3         | Egenritad                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| Figur 4         | MacGregor                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| Figur 5         | MacGregor (med egna modifikationer)                                                                                                                                                                                                                                                             |
| Figur 6         | MacGregor (med egna modifikationer)                                                                                                                                                                                                                                                             |
| Figur 7         | MacGregor                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| Figur 8         | MacGregor                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| Figur 9         | <a href="http://www.nauticexpo.com/prod/ayres-composite-panels/sandwich-panels-plywood-honeycomb-28043-244684.html">http://www.nauticexpo.com/prod/ayres-composite-panels/sandwich-panels-plywood-honeycomb-28043-244684.html</a><br>(används med tillstånd av Ayres Lightweight Panel Systems) |
| Figur 10        | Egenritad                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| Figur 11        | Egenritad                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| Figur 12        | Egenritad                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| Figur 13        | Egenritad                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| Figur 14        | Egenritad                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| Figur 15        | Egenritad                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| Figur 16        | MacGregor (med egna modifikationer)                                                                                                                                                                                                                                                             |
| Figur 17        | Egenritad                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| Figur 18        | Egenritad                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| Bilaga 1        | MacGregor                                                                                                                                                                                                                                                                                       |

## Bilagor

### Bilaga 1: Översiktlig presentation av däckslayouter



## Bilaga 2: Sammanställning av kärnmaterial

| Company         | Productname        | Type             | Cell size [mm] | Density [kg/m <sup>3</sup> ] | Compressive Strength [MPa] | Compressive Modulus [MPa] | Shear Strength [MPa] | Shear Modulus [MPa] | Tensile Strength [MPa] |
|-----------------|--------------------|------------------|----------------|------------------------------|----------------------------|---------------------------|----------------------|---------------------|------------------------|
| ArmaCell        | ArmaForm PET AC100 | PET-Foam         |                | 100                          | 1,5                        | 105                       | 0,9                  | 25                  | 2,4                    |
| ArmaCell        | ArmaForm PET AC115 | PET-Foam         |                | 115                          | 1,8                        | 120                       | 1                    | 30                  | 2,7                    |
| ArmaCell        | ArmaForm PET AC135 | PET-Foam         |                | 135                          | 2,3                        | 150                       | 1,3                  | 35                  | 3                      |
| ArmaCell        | ArmaForm PET AC150 | PET-Foam         |                | 150                          | 2,6                        | 180                       | 1,4                  | 45                  | 3,4                    |
| ArmaCell        | ArmaForm PET AC200 | PET-Foam         |                | 200                          | 3,6                        | 220                       | 1,8                  | 50                  | 4,4                    |
| ArmaCell        | ArmaForm PET AC80  | PET-Foam         |                | 80                           | 1                          | 75                        | 0,6                  | 20                  | 2,1                    |
| Diabgroup       | Divinycell F40     | FST Polymer Foam |                | 40                           | 0,4                        | 25                        | 0,5                  | 4,5                 | 1,5                    |
| Diabgroup       | Divinycell F50     | FST Polymer Foam |                | 50                           | 0,6                        | 30                        | 0,7                  | 7,5                 | 1,7                    |
| Diabgroup       | Divinycell F90     | FST Polymer Foam |                | 90                           | 0,7                        | 40                        | 1,1                  | 9,5                 | 2,15                   |
| Diabgroup       | Divinycell H100    | Polymer Foam     |                | 100                          | 2                          | 135                       | 1,6                  | 35                  | 3,5                    |
| Diabgroup       | Divinycell H130    | Polymer Foam     |                | 130                          | 3                          | 170                       | 2,2                  | 50                  | 4,8                    |
| Diabgroup       | Divinycell H160    | Polymer Foam     |                | 160                          | 3,4                        | 200                       | 2,6                  | 73                  | 5,4                    |
| Diabgroup       | Divinycell H200    | Polymer Foam     |                | 200                          | 5,4                        | 310                       | 3,5                  | 73                  | 7,1                    |
| Diabgroup       | Divinycell H250    | Polymer Foam     |                | 250                          | 7,2                        | 400                       | 4,5                  | 97                  | 9,2                    |
| Diabgroup       | Divinycell H45     | Polymer Foam     |                | 45                           | 0,6                        | 50                        | 0,56                 | 15                  | 1,4                    |
| Diabgroup       | Divinycell H60     | Polymer Foam     |                | 60                           | 0,9                        | 70                        | 0,76                 | 20                  | 1,8                    |
| Diabgroup       | Divinycell H80     | Polymer Foam     |                | 80                           | 1,4                        | 90                        | 1,15                 | 27                  | 2,5                    |
| Diabgroup       | Divinycell HP 60   | Polymer Foam     |                | 65                           | 0,95                       | 74                        | 0,85                 | 20                  | 1,8                    |
| Diabgroup       | Divinycell HP 80   | Polymer Foam     |                | 80                           | 1,5                        | 105                       | 1,25                 | 28                  | 2,8                    |
| Diabgroup       | Divinycell P 100   | Polymer Foam     |                | 110                          | 1,5                        | 100                       | 0,85                 | 28                  | 1,8                    |
| Diabgroup       | Divinycell P 120   | Polymer Foam     |                | 120                          | 1,65                       | 115                       | 0,91                 | 32                  | 2                      |
| Diabgroup       | Divinycell P 150   | Polymer Foam     |                | 150                          | 2,3                        | 152                       | 1,25                 | 40                  | 2,45                   |
| Diabgroup       | Divinycell P 60    | Polymer Foam     |                | 65                           | 0,6                        | 47                        | 0,45                 | 13                  | 1,2                    |
| Diabgroup       | ProBalsa LD7       | Balsacore        |                | 90                           | 5,4                        | 1850                      | 1,6                  | 96                  | 7                      |
| Diabgroup       | ProBalsa PB        | Balsacore        |                | 155                          | 12,7                       | 4100                      | 3                    | 166                 | 13,5                   |
| Elliott Company | ELFOAM P 400       | Polyiso Foam     |                | 64                           | 0,413                      | 8,247                     | 0,296                | 2,99                | 0,551                  |
| Elliott Company | ELFOAM P 600       | Polyiso Foam     |                | 96                           | 0,8                        | 20,6                      | 0,565                | 4,63                | 0,868                  |
| Hexacor         | PP -10             | Honeycomb        | 10             | 64                           | 1                          | 50                        | 0,3                  | 9                   | 0,7                    |
| Hexacor         | PP -8              | Honeycomb        | 8              | 80                           | 2                          | 95                        | 0,6                  | 13                  | 0,7                    |
| Hexacor         | PP -8H             | Honeycomb        | 8              | 80                           | 2,2                        | 97                        | 0,8                  | 19                  | 0,75                   |
| Nida-Core       | Balsalite BL6.5R   | Balsacore        |                | 108                          | 6,8                        | 2241                      | 1,85                 | 107,6               | 6,9                    |
| Nida-Core       | Balsalite BL9.5R   | Balsacore        |                | 152                          | 13                         | 4068                      | 3                    | 159,3               | 13,1                   |
| Nida-Core       | H11-60PP           | Honeycomb        | 11             | 60                           | 1,2                        | 12,6                      | 0,5                  | 4                   | 0,43                   |
| Nida-Core       | H11PP -45          | Honeycomb        | 11             | 45                           | 0,4                        | 9                         | 0,3                  | 5                   | 0,3                    |
| Nida-Core       | H8HP               | Honeycomb        | 8              | 110                          | 2,4                        | 50                        | 0,6                  | 9                   | 0,6                    |
| Nida-Core       | H8PP               | Honeycomb        | 8              | 80                           | 1,3                        | 15                        | 0,5                  | 5                   | 0,5                    |
| Plascore        | PP 1-4.0-N1-10     | Honeycomb        | 10             | 64                           | 0,96                       | 58,5                      | 0,38                 | 10,3                | 0,83                   |
| Plascore        | PP 1-5.0-N1-8      | Honeycomb        | 8              | 80                           | 1,55                       | 65,4                      | 0,52                 | 11,7                | 0,89                   |

### Bilaga 3: Resultat efter viktning av kärnmaterial

Poängantalet är 1-11 poäng i samtliga kategorier, förutom densiteten där poängen går mellan 2-22. Höga poäng ges till goda egenskaper.

| Company         | Productname        | Type             | Density<br>[kg/m <sup>3</sup> ] | Compressive<br>Strength<br>[points] | Compressive<br>Modulus<br>[points] | Shear<br>Strength<br>[points] | Shear<br>Modulus<br>[points] | Tensile<br>Strength<br>[points] | TOTAL<br>SUM<br>[points] |
|-----------------|--------------------|------------------|---------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------|------------------------------|---------------------------------|--------------------------|
| Diabgroup       | ProBalsa PB        | Balsacore        | 8                               | 11                                  | 11                                 | 8                             | 11                           | 11                              | 60,00                    |
| Nida-Core       | Balsalite BL9.5R   | Balsacore        | 8                               | 11                                  | 11                                 | 8                             | 11                           | 11                              | 60,00                    |
| Nida-Core       | Balsalite BL6.5R   | Balsacore        | 12                              | 7                                   | 11                                 | 5                             | 8                            | 7                               | 50,00                    |
| Diabgroup       | ProBalsa LD7       | Balsacore        | 14                              | 6                                   | 10                                 | 4                             | 7                            | 7                               | 48,00                    |
| Diabgroup       | Divinycell H250    | Polymer Foam     | 2                               | 8                                   | 8                                  | 11                            | 7                            | 10                              | 46,00                    |
| Diabgroup       | Divinycell H200    | Polymer Foam     | 4                               | 6                                   | 8                                  | 9                             | 5                            | 8                               | 40,00                    |
| Diabgroup       | Divinycell H160    | Polymer Foam     | 8                               | 4                                   | 6                                  | 7                             | 5                            | 6                               | 36,00                    |
| Diabgroup       | Divinycell H130    | Polymer Foam     | 10                              | 3                                   | 6                                  | 6                             | 4                            | 5                               | 34,00                    |
| Diabgroup       | Divinycell H100    | Polymer Foam     | 14                              | 2                                   | 5                                  | 4                             | 3                            | 4                               | 32,00                    |
| Diabgroup       | Divinycell HP 80   | Polymer Foam     | 16                              | 2                                   | 5                                  | 4                             | 2                            | 3                               | 32,00                    |
| Diabgroup       | Divinycell H80     | Polymer Foam     | 16                              | 2                                   | 4                                  | 3                             | 2                            | 3                               | 30,00                    |
| ArmaCell        | ArmaForm PET AC100 | PET-Foam         | 14                              | 2                                   | 5                                  | 3                             | 2                            | 3                               | 29,00                    |
| ArmaCell        | ArmaForm PET AC200 | PET-Foam         | 4                               | 4                                   | 7                                  | 5                             | 4                            | 5                               | 29,00                    |
| ArmaCell        | ArmaForm PET AC135 | PET-Foam         | 10                              | 3                                   | 5                                  | 4                             | 3                            | 3                               | 28,00                    |
| ArmaCell        | ArmaForm PET AC150 | PET-Foam         | 8                               | 3                                   | 6                                  | 4                             | 3                            | 4                               | 28,00                    |
| ArmaCell        | ArmaForm PET AC80  | PET-Foam         | 16                              | 1                                   | 4                                  | 2                             | 2                            | 3                               | 28,00                    |
| Diabgroup       | Divinycell F40     | FST Polymer Foam | 20                              | 1                                   | 2                                  | 2                             | 1                            | 2                               | 28,00                    |
| Diabgroup       | Divinycell H60     | Polymer Foam     | 18                              | 1                                   | 3                                  | 2                             | 2                            | 2                               | 28,00                    |
| Diabgroup       | Divinycell HP 60   | Polymer Foam     | 16                              | 1                                   | 4                                  | 3                             | 2                            | 2                               | 28,00                    |
| Hexacor         | PP-8H              | Honeycomb        | 16                              | 3                                   | 4                                  | 2                             | 2                            | 1                               | 28,00                    |
| ArmaCell        | ArmaForm PET AC115 | PET-Foam         | 12                              | 2                                   | 5                                  | 3                             | 2                            | 3                               | 27,00                    |
| Diabgroup       | Divinycell P120    | Polymer Foam     | 12                              | 2                                   | 5                                  | 3                             | 3                            | 2                               | 27,00                    |
| Diabgroup       | Divinycell P150    | Polymer Foam     | 8                               | 3                                   | 6                                  | 4                             | 3                            | 3                               | 27,00                    |
| Diabgroup       | Divinycell F50     | FST Polymer Foam | 18                              | 1                                   | 2                                  | 2                             | 1                            | 2                               | 26,00                    |
| Diabgroup       | Divinycell H45     | Polymer Foam     | 18                              | 1                                   | 2                                  | 2                             | 1                            | 2                               | 26,00                    |
| Hexacor         | PP-8               | Honeycomb        | 16                              | 2                                   | 4                                  | 2                             | 1                            | 1                               | 26,00                    |
| Diabgroup       | Divinycell P100    | Polymer Foam     | 12                              | 2                                   | 4                                  | 3                             | 2                            | 2                               | 25,00                    |
| Nida-Core       | H11-60PP           | Honeycomb        | 18                              | 2                                   | 1                                  | 2                             | 1                            | 1                               | 25,00                    |
| Plascore        | PP1-5.0-N1-8       | Honeycomb        | 16                              | 2                                   | 3                                  | 2                             | 1                            | 1                               | 25,00                    |
| Diabgroup       | Divinycell F90     | FST Polymer Foam | 14                              | 1                                   | 2                                  | 3                             | 1                            | 3                               | 24,00                    |
| Diabgroup       | Divinycell P60     | Polymer Foam     | 16                              | 1                                   | 2                                  | 2                             | 1                            | 2                               | 24,00                    |
| Nida-Core       | H11PP-45           | Honeycomb        | 18                              | 1                                   | 1                                  | 1                             | 1                            | 1                               | 23,00                    |
| Nida-Core       | H8PP               | Honeycomb        | 16                              | 2                                   | 1                                  | 2                             | 1                            | 1                               | 23,00                    |
| Plascore        | PP1-4.0-N1-10      | Honeycomb        | 16                              | 1                                   | 3                                  | 1                             | 1                            | 1                               | 23,00                    |
| Hexacor         | PP-10              | Honeycomb        | 16                              | 1                                   | 2                                  | 1                             | 1                            | 1                               | 22,00                    |
| Elliott Company | ELFOAM P400        | Polyiso Foam     | 16                              | 1                                   | 1                                  | 1                             | 1                            | 1                               | 21,00                    |
| Elliott Company | ELFOAM P600        | Polyiso Foam     | 14                              | 1                                   | 2                                  | 2                             | 1                            | 1                               | 21,00                    |
| Nida-Core       | H8HP               | Honeycomb        | 12                              | 3                                   | 2                                  | 2                             | 1                            | 1                               | 21,00                    |

## Bilaga 4: MATLAB-kod för beräkning av optimal cellstorlek

```
%Detta program beräknar, utifrån given indata, den optimala
%cellstorleken för minimalt svinn och "hela" paneler,
%då antalet paneler kan variera i breddled och längdled.
%Även den differens (+-) som panelerna får variera efterfrågas,
%varpå ett spann med cellstorlekar undersöks.
%
%Programmet undersöker endast de fall då panelantalet varierar
% mellan 2-5 paneler i längdled samt mellan 4-10 i breddled.
%Följande indata efterfrågas (samtlig indata skall anges i mm):
%
%Hattprofilens toppbredd
%Referenscellens längd
%Referenscellens bredd
%Differensgräns i längdled
%Differensgräns i breddled
%
%Programmet skrevs under hösten 2011 av © Erik Sahlin i samband med
%att ett examensarbete på maskiningenjörsprogrammet (180 hp) vid
%Chalmers Tekniska Högskola, utfördes på MacGregor RoRo i Göteborg.

%Töm skärmen samt variabellista
clear;
clc;

%Definition av hattprofilens bredd
hpb=0;
while hpb<=0
    hpb=input('Hur bred är hattprofilen?\n');
    if hpb<=0
        fprintf('Ange ett positivt värde tack!\n\n')
    end
end

%Definition av en referenscell
ref_langd=0;
ref_bredd=0;

while ref_langd<=0 || ref_bredd<=0
    while ref_langd<=0
        fprintf('Tänk på att cellen ofta är bredare än den är
lång\n');
        ref_langd=input('Hur lång är referenscellen?\n');
        if ref_langd<=0
            fprintf('Ange ett positivt värde tack!\n\n')
        end
    end

    while ref_bredd<=0
        ref_bredd=input('Hur bred är referenscellen?\n');
        if ref_bredd<=0
            fprintf('Ange ett positivt värde tack!\n\n')
        end
    end
end
end
```



```

        fprintf('Bästa måttet ur breddsynpunkt är %g
mm.\n',bast_tal_bredd);
        fprintf('Då diffar det minimalt, nämligen %g mm.\n\n',diff_bredd);
    end

    %Optimering i längsled
    antal_ratt_langd=0;

    for k=ref_langd-sokfalt_langd:ref_langd+sokfalt_langd
        if (k-(round(k/2)*2))>=0
            if (k-(round(k/3)*3))>=0
                if (k-(round(k/4)*4))>=0
                    if (k-(round(k/5)*5))>=0
                        antal_ratt_langd=antal_ratt_langd+1;
                        ratt_tal_langd(antal_ratt_langd)=k;
                    end
                end
            end
        end
    end

    if antal_ratt_langd==0
        fprintf('Inget värde möjligt i längdled!\n')
    else
        diff_langd=k-ref_langd;

        for l=1:antal_ratt_langd
            if abs(ratt_tal_langd(l)-ref_langd)<diff_langd
                diff_langd=abs(ratt_tal_langd(l)-ref_langd);
                bast_tal_langd=ratt_tal_langd(l);
            end
        end

        fprintf('Bästa måttet ur längdsynpunkt är %g
mm.\n',bast_tal_langd);
        fprintf('Då diffar det minimalt, nämligen %g mm.\n',diff_langd);
    end

```

## Bilaga 5: MATLAB-kod för beräkning av översta däckets placering

```
%Detta program beräknar, utifrån given indata, placeringen för
%det översta däck på den bil som parkeras på panelen. Även antalet
%bilar respektive "extra däck" från angränsande bilar som får plats
%på panelen undersöks.
%
%Följande indata efterfrågas (samtidig indata skall anges i mm):
%
%Panelens bredd
%Panelens längd
%
%Programmet skrevs under hösten 2011 av © Erik Sahlin i samband med
%att ett examensarbete på maskiningenjörsprogrammet (180 hp) vid
%Chalmers Tekniska Högskola, utfördes på MacGregor RoRo i Göteborg.

%Töm skärmen samt variabellista
clc;
clear;

%Given indata
hjulbredd=150;
hjullängd=200;
hjulbas_bredd=1360;
hjulbas_längd=2300;
bilbredd=1695;
billängd=4300;
dackavstand=400;
bilavstand=365;

%Begär indata angående panelens storlek
bredd=0; längd=0;
while bredd<=0
    bredd=input('Ange panelens bredd: [mm]\n');
    if bredd<=0
        fprintf('Ange ett positivt värde tack!\n');
    end
end
while längd<=0
    längd=input('Ange panelens längd: [mm]\n');
    if längd<=0
        fprintf('Ange ett positivt värde tack!\n');
    end
end

%Definiera tyngdpunkten på panelen
c_bredd=bredd/2;
c_längd=längd/2;

%Beräkning av antalet hela bilar som ryms på panelen
hela_bilar=floor(längd/bilbredd);

%Beräkning av antalet "extra däck" som ryms på panelen
if hela_bilar~=0
    if längd-(hela_bilar*bilbredd+((hela_bilar-1)*bilavstand))>=1135
        extra_dack=2;
    end
end
```

```

        else if langd-(hela_bilar*bilbredd+((hela_bilar-
1)*bilavstand))>=567.5
            extra_dack=1;
        else
            extra_dack=0;
        end
    end
else
    if langd-bilavstand-(dackavstand-bilavstand)>=335
        extra_dack=2;
    else if langd>=hjulbredd
        extra_dack=1;
    else
        extra_dack=0;
    end
end
end

%Undersök om två centralt placerade extra däck är "värre" än
%en centralt placera hel bil
if hela_bilar==1 && extra_dack==0
    extra_dack_v2=2;
    if c_langd-(hjulbas_bredd/2)+(hjulbredd/2)>(dackavstand/2)
        fprintf('Extra hjul skall centreras!!\n');
        pause(1.5);

        %Beräkna översta däckets placering
        top_ulc_x=c_bredd-(hjullangd/2);
        top_ulc_y=c_langd-(dackavstand/2)-hjulbredd;
        top_urc_x=top_ulc_x+hjullangd;
        top_urc_y=top_ulc_y;
        top_llc_x=top_ulc_x;
        top_llc_y=top_ulc_y+hjulbredd;
        top_lrc_x=top_urc_x;
        top_lrc_y=top_urc_y+hjulbredd;

        %Utskrift av koordinaterna
        disp('Koordinaterna för det översta däckets blir, räknat från
det övre vänstra hörnet:')
        fprintf('Övre vänstra hörnet: (%g,%g)\n',top_ulc_x,top_ulc_y);
        fprintf('Övre högra hörnet: (%g,%g)\n',top_urc_x,top_urc_y);
        fprintf('Nedre vänstra hörnet:
(%g,%g)\n',top_llc_x,top_llc_y);
        fprintf('Nedre högra hörnet: (%g,%g)\n',top_lrc_x,top_lrc_y);

        break;
    end
end

%Beräkna det totala antalet däck
tot_dack=hela_bilar*2+extra_dack;

if tot_dack==0
    fprintf('Det ryms inga däck på panelen!!\n')
    break;
end

```

```

%Undersök huruvida det är ett jämnt eller udda antal däck som ryms
if mod(tot_dack,2)==1;
    odd_no=1;
else
    odd_no=0;
end

clc;

%Meddelar om lastfallens skall roteras relativt
%den referensriktning som anges i rapporten
if bredd>langd
    fprintf('Lastfallens skall roteras!\n');
    rotation=1;
end

if odd_no==0
    %Beräkna översta däckets placering vid jämnt antal däck
    top_ulc_x=c_bredd-(hjullangd/2);
    top_ulc_y=c_langd-(bilavstand/2)-((hela_bilar/2)*bilbredd)-
    (((hela_bilar+extra_dack)/2)-1)*bilavstand-(extra_dack/2)*hjulbredd-
    (dackavstand-bilavstand)/2;
    top_urc_x=top_ulc_x+hjullangd;
    top_urc_y=top_ulc_y;
    top_llc_x=top_ulc_x;
    top_llc_y=top_ulc_y+hjulbredd;
    top_lrc_x=top_urc_x;
    top_lrc_y=top_urc_y+hjulbredd;

    %Utskrift av koordinaterna
    disp('Koordinaterna för det översta däckets blir, räknat från det
    övre vänstra hörnet:')
    fprintf('Övre vänstra hörnet: (%g,%g)\n',top_ulc_x,top_ulc_y);
    fprintf('Övre högra hörnet: (%g,%g)\n',top_urc_x,top_urc_y);
    fprintf('Nedre vänstra hörnet: (%g,%g)\n',top_llc_x,top_llc_y);
    fprintf('Nedre högra hörnet: (%g,%g)\n',top_lrc_x,top_lrc_y);

else
    %Beräkna översta däckets placering vid udda antal däck
    top_ulc_x=c_bredd-(hjullangd/2);
    top_ulc_y=(langd-(((hela_bilar*bilbredd)+((hela_bilar+extra_dack)-
    1)*bilavstand)+(extra_dack*hjulbredd)))/2;
    top_urc_x=top_ulc_x+hjullangd;
    top_urc_y=top_ulc_y;
    top_llc_x=top_ulc_x;
    top_llc_y=top_ulc_y+hjulbredd;
    top_lrc_x=top_urc_x;
    top_lrc_y=top_urc_y+hjulbredd;

    %Utskrift av koordinaterna
    disp('Koordinaterna för det översta däckets blir, räknat från det
    övre vänstra hörnet:')
    fprintf('Övre vänstra hörnet: (%g,%g)\n',top_ulc_x,top_ulc_y);
    fprintf('Övre högra hörnet: (%g,%g)\n',top_urc_x,top_urc_y);
    fprintf('Nedre vänstra hörnet: (%g,%g)\n',top_llc_x,top_llc_y);
    fprintf('Nedre högra hörnet: (%g,%g)\n',top_lrc_x,top_lrc_y);
end

```

## Bilaga 6: Sammanställning av panelstorlekar och dess påverkan vid last

| Antal paneler i längd: | Antal paneler i bredd: | Längd [mm]: | Bredd [mm]: | Antal hatt-profiler: | Antal Lashing pots: | Core-tjocklek [mm]: | Laminat-tjocklek [mm]: | Nedböjning [mm]: | Säkerhets faktor skjubbrott: | Panel-vikt [kg]: | Total panelvikt [kg]: | Totalvikt inkl allt* |
|------------------------|------------------------|-------------|-------------|----------------------|---------------------|---------------------|------------------------|------------------|------------------------------|------------------|-----------------------|----------------------|
| 2                      | 4                      | 4940        | 3420        | 3                    | 32                  | 60                  | 4                      | 15,1             | 1,82                         | 381,26           | 3050,08               | 5817,10              |
| 2                      | 4                      | 4940        | 3420        | 3                    | 32                  | 60                  | 3                      | 19,49            | 1,12                         | 326,52           | 2612,16               | 5379,39              |
| 2                      | 5                      | 4940        | 2708        | 4                    | 24                  | 60                  | 4                      | 10,19            | 2                            | 301,89           | 3018,9                | 5911,94              |
| 2                      | 6                      | 4940        | 2233        | 5                    | 16                  | 60                  | 4                      | 7,15             | 2,36                         | 248,93           | 2987,16               | 6006,22              |
| 2                      | 7                      | 4940        | 1894        | 6                    | 16                  | 60                  | 4                      | 5,33             | 2,64                         | 211,14           | 2955,96               | 6117,04              |
| 3                      | 5                      | 3293        | 2708        | 4                    | 18                  | 60                  | 4                      | 6,84             | 3,29                         | 201,24           | 3018,6                | 7246,74              |
| 3                      | 6                      | 3293        | 2233        | 5                    | 12                  | 60                  | 4                      | 5,11             | 3,61                         | 165,94           | 2986,92               | 7345,08              |
| 3                      | 6                      | 3293        | 2233        | 5                    | 12                  | 60                  | 3,5                    | 5,62             | 3,02                         | 154,03           | 2772,54               | 7130,80              |
| 3                      | 6                      | 3293        | 2233        | 5                    | 12                  | 60                  | 3                      | 6,28             | 2,44                         | 142,11           | 2557,98               | 6916,35              |
| 3                      | 7                      | 3293        | 1894        | 6                    | 12                  | 60                  | 4                      | 4,27             | 3,65                         | 140,75           | 2955,75               | 7455,93              |
| 3                      | 7                      | 3293        | 1894        | 6                    | 12                  | 60                  | 3                      | 5,14             | 2,47                         | 120,54           | 2531,34               | 7031,73              |
| 4                      | 6                      | 2470        | 2233        | 5                    | 8                   | 60                  | 4                      | 4,79             | 2,74                         | 124,47           | 2987,28               | 8684,53              |
| 4                      | 7                      | 2470        | 1894        | 6                    | 8                   | 60                  | 4                      | 4,11             | 2,83                         | 105,57           | 2955,96               | 8795,23              |
| 4                      | 7                      | 2470        | 1894        | 6                    | 8                   | 60                  | 4                      | 4,31             | 3,67                         | 105,57           | 2955,96               | 8795,23              |
| 5                      | 7                      | 1976        | 1894        | 6                    | 6                   | 60                  | 4                      | 3,74             | 4,16                         | 84,46            | 2956,1                | 10138,47             |
| 5                      | 7                      | 1976        | 1894        | 6                    | 6                   | 60                  | 3,5                    | 4,06             | 3,5                          | 78,39            | 2743,65               | 9926,13              |
| 5                      | 7                      | 1976        | 1894        | 6                    | 6                   | 60                  | 3                      | 4,48             | 2,84                         | 72,33            | 2531,55               | 9714,13              |

\*Allt syftar i det här fallet till följande vikter: panelerna, hattprofilerna, I-balkarna, lashing pots samt infästningsbrickorna för hattprofilerna.