

Rationell tillverkning av sandwichstrukturer för energieffektiva persontransporter



Författare: Jocke Petterson, RISE; Erik Marklund, RISE
Datum: 2020-06-30
Projekt inom Hållbar produktion – FFI – 2017-06-13

FFI Fordonsstrategisk
Forskning och
Innovation

VINNOVA

Energimyndigheten

TRAFIKVERKET

FKG

VOLVO

SCANIA

VOLVO

SCANIA

VOLVO

SCANIA

VOLVO

SCANIA

VOLVO

Innehållsförteckning

1 Sammanfattning	3
2 Executive summary in English.....	3
3 Bakgrund.....	4
4 Syfte, forskningsfrågor och metod	5
5 Mål	5
6 Resultat och måluppfyllelse	6
7 Spridning och publicering	9
7.1 Kunskaps- och resultatspridning	9
7.2 Publikationer.....	9
8 Slutsatser och fortsatt forskning	10
9 Deltagande parter och kontaktpersoner.....	10

Kort om FFI

FFI är ett samarbete mellan staten och fordonsindustrin om att gemensamt finansiera forsknings- och innovationsaktiviteter med fokus på områdena Klimat & Miljö samt Trafiksäkerhet. Satsningen innebär verksamhet för ca 1 miljard kr per år varav de offentliga medlen utgör drygt 400 Mkr.

För närvarande finns fem delprogram; Energi & Miljö, Trafiksäkerhet och automatiserade fordon, Elektronik, mjukvara och kommunikation, Hållbar produktion och Effektiva och uppkopplade transportsystem. Läs mer på www.vinnova.se/ffi.

1 Sammanfattning

Omställningen från konventionella till elektriska drivlinor skapar många utmaningar, men öppnar även för nya möjligheter rörande komponentpackning och utformning av bärande strukturer samt nya tillverkningsmetoder för dessa. Lättvikt och hållbarhet är ledord i sammanhanget. I renodlade batterifordon bidrar viktreduktionen primärt till reducerad energiförbrukning men indirekt även till valmöjligheter såsom: fördelaktigare laddningstid, räckvidd och/eller batteristorlek. Projektet har syftat till att nyttja dessa möjligheter för att sänka vikten och därmed energiförbrukningen för framdrift samt energiåtgången för klimathållning med hjälp av nya tillverkningskoncept, rationell sammansättning och ny konstruktionsteknik. Målet har varit att bidra till ökad tillverknings effektivitet och minskad miljöpåverkan genom att utveckla och verifiera rationella tillverkningsmetoder för lätta självbärande karossmoduler i sandwichelement.

Medverkande parter i projektet har varit RISE SICOMP (koordinator), Clean Motion, Ljungby Komposit och Volvo Bussar. Clean Motion har utvecklat en ny konstruktion för golvstrukturen för nästa generations Zbee, och har tillsammans med Ljungby Komposit tillverkat karosser för provning och verifiering. Genom nya materialval, förbättrad produktionsteknik och delvis genom ny utformning har vi kunnat visa att en viktminskning på ca 45% på golvstrukturen är möjlig utan att kompromissa med ursprungliga styvhetskrav och hållfasthetskrav. Produktionsuppföljning har också gjorts med syfte att effektivisera befintligt produktionskoncept. Volvo Bussar har utvecklat olika konstruktionskoncept för karossmoduler i sandwichelement och byggt en prototypstruktur för provning och verifiering. Genom hela projektet har det varit ett starkt fokus på miljöaspekter, dvs både med avseende på inre arbetsmiljö, och produktens miljöbelastning i ett hållbarhetsperspektiv. Ett viktigt arbete har också varit att ta fram riktlinjer för konstruktion och tillverkning av sandwichstrukturer.

2 Executive summary in English

The transition from conventional to electric powertrains creates many challenges, but also opens new opportunities for component packing and design of load-bearing structures, as well as new manufacturing methods for them. Lightweight and sustainability are key words in this context. In pure battery vehicles, weight reduction primarily contributes to reduced energy consumption but indirectly also to choices such as: more favourable charging time, range and / or battery size. The project aims to use these opportunities to reduce the weight and thus the energy consumption for propulsion, as well as the energy demand for climate control with the help of new manufacturing concepts, efficient assembly, and new structural design technologies. The aim has been to contribute to increased manufacturing efficiency and reduced environmental impact by developing and verifying efficient manufacturing methods for lightweight self-supporting body modules using sandwich elements.

Participating parties in the project have been RISE SICOMP (coordinator), Clean Motion, Ljungby Komposit and Volvo Buses. Clean Motion has developed a new floor structure for the next generation of the Zbee vehicle, and together with Ljungby Komposit manufactured floor structures for testing and verification. By new material selections, improved production technology and partly through new design, it was shown that a weight reduction of about 45% on the floor structure is possible without compromising original rigidity and strength requirements. Production monitoring protocols has also been carried out with the aim of streamlining the existing production concept. Volvo Buses has developed various design concepts for body modules in sandwich elements and built a prototype structure for testing and verification.

An experimental tool for forming both PET and PUR foam cores has been developed within the framework of the project and has been used for evaluation of PET and PUR foam regarding quality, tolerances, and cost. The geometry of the experimental tool has also formed a basis for modelling

and simulation of the moulding process. The results suggest that PUR foam moulded according to the obtained process data and cast in aluminium tools can give a significant quality improvement. Hot compression forming of PET foam to a very complex geometry (double curved surfaces and large thickness variations) proved to be very problematic. Alternative casting methods for PUR foam have also been investigated.

Throughout the project there has been a strong focus on environmental aspects, i.e. both regarding internal work environment, and the product's environmental impact from a sustainability perspective. An important task has also been to develop guidelines for design and manufacturing using sandwich materials.

3 Bakgrund

Världen står inför stora utmaningar på klimat och hållbarhetsområdet. Mer eller mindre alla marknadssegment i Europa har hållbarhet som marknadsdrivande kraft, men fordonsindustrin går på många sätt i spetsen, dels på grund av lagar och föreskrifter, men även för att möta marknadens önskemål. För transportsektorn är viktreduktion centralt för att minimera miljöpåverkan, och nya lösningar i lättmetall och fiberkompositer utmanar befintliga tillverkningstekniker. I renodlade batterifordon bidrar viktreduktionen primärt till reducerad energiförbrukning men indirekt även till valmöjligheter såsom: fördelaktigare laddningstid, räckvidd och/eller batteristorlek.

Både Volvo Bussar och Clean Motion tillverkar idag elfordon i låga volymer och har i många fall gemensamma slutanvändare och likvärdiga tekniska problemställningar. En stor utmaning för båda företagen (såväl som för andra fordonstillverkare) är den snabba omställningen till nollemissionsfordon, vad gäller såväl kollektiva som personliga transporter. Eldrift är på sikt den enda hållbara lösningen och av kostnads och utrymmesskäl ser vi en snabb tillväxt både för elbussar och för små eltransportfordon. Projektet är ett led i utvecklingen av en eldriven citybuss och vidareutveckling och effektivisering av tillverkningsprocesser för Clean Motions eldrivna närtransportfordon Zbee, se Figur 1. Båda fordonstyperna använder elektrisk drift baserad på batterier. För att nå minimal energiförbrukning och maximera räckvidden är viktreduktion och termisk isolering för effektiv klimathållning ytterst viktiga faktorer.



Figur 1: Clean Motions eldrivna närtransportfordon Zbee

Ett sandwichmaterial består av två tunna täcksikt med hög styvhet och hållfasthet placerade på varsin sida om en lätt och vek kärna bestående av exempelvis ett material i honeycombstruktur, eller av något skummaterial i plast eller metall. Täcksikten består typiskt av metallplåt eller fiberarmerat kompositmaterial som är limmade mot kärnan. Täcksikten hanterar drag- och tryckbelastningar medan kärnan tar upp skjuvkrafter och håller täcksikten separerade för att maximera böjstyvheten i förhållande till vikt. Fördelar med sandwichmaterial är möjligheter att sänka vikten och därmed energiförbrukningen för framdrift; minska värmeförluster genom bättre termiska egenskaper och därmed minska energiåtgången för klimathållning; minska tillverkningskostnader med hjälp av nya tillverkningskoncept, rationell sammansättning och ny konstruktionsteknik. Tillverkningen av dagens Zbee och busskarosers bärande strukturer, klimatskydd och inredningspaneler kännetecknas av tekniska lösningar lämpade för små årliga kvantiteter. Det innebär i praktiken val av lösningar som kräver låga investeringar i verktyg men som å andra sidan kräver mycket manuellt arbete. Här kan därför ny sandwichteknik lämplig för medelstora volymer bli centralt som konstruktionskoncept. Zbee tillverkas redan idag med hjälp av sandwichteknik, men är beroende av att sandwichkärnans passform är korrekt i syfte att undvika dyr efterbearbetning. Något som även är centralt för framtida busskarosser tillverkade i sandwichelement. Slutproduktens kostnad blir starkt beroende av arbetskraftskostnader såväl som av robustheten och repeterbarheten vid tillverkningen. Projektet initierades därför med syftet att bidra till ökad tillverknings effektivitet och minskad miljöpåverkan genom att utveckla och verifiera rationella tillverkningsmetoder för lätta självbärande karossmoduler i sandwichelement.

4 Syfte, forskningsfrågor och metod

Projektet har syftat till att nyttja möjligheter med sandwichkonstruktion för att sänka vikten och därmed energiförbrukningen för framdrift; minska värmeförluster och därmed energiåtgången för klimathållning; minska tillverkningskostnader med hjälp av nya tillverkningskoncept, rationell sammansättning och ny konstruktionsteknik. Medverkande parter i projektet har varit RISE SICOMP, Clean Motion, Ljungby Komposit och Volvo Bussar. RISE SICOMP har ansvarat för den gemensamma teknikforskningen inklusive projektledning och administration. Volvo Bussar har utvecklat olika konstruktionskoncept för karossmoduler i sandwichelement och byggt en prototypstruktur för provning och verifiering. Clean Motion har utvecklat en ny konstruktion för golvstrukturen för nästa generations Zbee, och har tillsammans med Ljungby Komposit tillverkat karosser för provning och verifiering. Forskningsfrågor som har adresserats i projektet är: (i) rationell sammanfogning mellan sandwich- och monolitstruktur, (ii) utveckling av metoder för strukturoptimering av limfogens och adherends geometrier, (iii) utveckling och verifiering av rationell tillverkning för net-shape PUR-kärnor, (iv) utvärdering av net-shape formning av termoplastiska PET-skum, (v) rationell sammansättning av sandwich mot omgivande busstruktur och integrering av konsoler samt (vi) utveckling av modeller och metoder för prediktering av formförändring och processvariabilitet i skummaterial. För att svara på dessa forskningsfrågor var projektet uppdelat i 6 st tekniska arbetspaket: Utveckling av net-shape kärnmaterial (AP2); Systemoptimering och integration (AP3); Limförband och modulskarvar (AP4); Optimering av produktionsupplägg för medelstora serier (AP5); Utveckling, tillverkning och utprovning av busstrukturer (AP6) samt Utveckling, tillverkning och utprovning av Zbee (AP7). Projektet startade i slutet av 2017 och har pågått till juni 2020.

5 Mål

Projektet har bidragit till målen för programmet Hållbar Produktion genom flera kompetensområden. Några exempel utgörs av materialmodeller, minimering av avfallsprodukter och specifika tillverkningsmetoder för vissa material. Enligt färdplanen för FFI Hållbar Produktion är syftet med programmet att möjliggöra tillverkning av nya fordonslösningar och starkare global konkurrenskraft samtidigt som lägre miljöeffekter och ökad bilsäkerhet möjliggörs. Vägkartan identifierar två huvudspår för att erhålla detta: Viktminskning och en högre grad av elektrifiering.

Detta projekt följer vägen för viktminskning, eftersom utvecklingen av simuleringsverktyg för de tidiga stadierna av industriella projekt är avgörande för genomförandet av sandwichtillverkning. Det andra huvudspåret av färdplanen, "högre grad av elektrifiering", behandlas indirekt genom att sandwichkonstruktioner förenklar elektrifieringen av bussar och Zbeen.

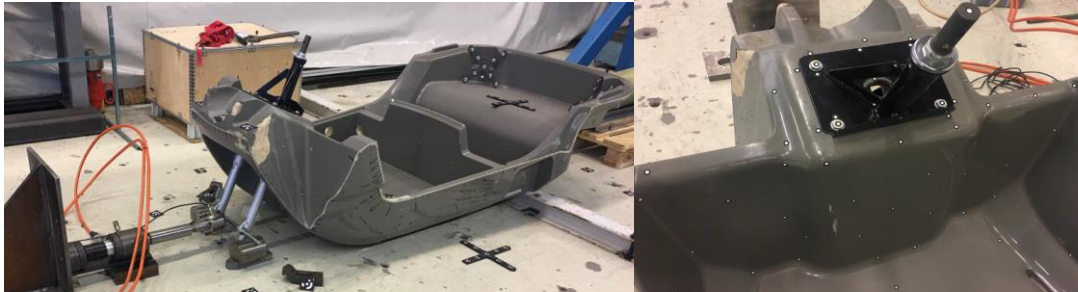
Utveckling och elektrifiering av fordonsflottan är av största betydelse för att Sverige skall kunna behålla sin internationella spets. Tillverkningstekniken för sandwichelement samt för sammanfogning av sandwich och monolita strukturer och den efterföljande modulariseringen av fordonskoncepten samt utökad flexibilitet vid sammabyggnad förväntas bidra till att reducera monterings tiden och samtidigt tillåta ökad kvalitet. De utvecklade koncepten möjliggör på sikt även mer rationell karossering av fordon, eftersom bärande struktur monteras ihop med större enheter/moduler vilka har förutsättningar att tillverkas i anpassade flöden. Detta torde vara nyckeln för att kunna möta tilltagande konkurrens i lågkostnadsregioner. Projektet har haft som mål att resultera i verifierade tillverkningsmetoder och tillhörande beräkningsverktyg ämnade för tillverkning av komposit sandwichstrukturer i medelstora volymer. Vi förutsätter här också en väsentlig tillverkningskostnadsreduktion jämfört med konventionella koncept.

En viktig aspekt hos elfordon och dess energiförbrukning är egenvikten. T.ex. så väger idag en normalstor elbil ca: 300-400 kg/passagerare medan bussar ligger på ungefär 140 kg/passagerare och Zbee på 85 kg/passagerare. Det intressanta i sammanhanget är att båda företagen har samma långsiktiga målbild på <75 kg/passagerare för sina tillsynes olika fordon. Kortsiktigt har dock Volvo Bussar som mål med projektet att komma ner till <100 kg/passagerare. En annan viktig aspekt för att minska energiförbrukningen hos elfordon (de facto alla fordon) är termisk isolering och klimathållning. Här kommer sandwichmaterialens isolerande egenskaper väl till pass. Således, utöver verifierade tillverkningsmetoder för komposit sandwichstrukturer kommer minskad produktionskostnad, viktoptimering och klimatrelaterad energihållning vara viktiga delmål i projektet. Projektet har konkretiserat detta genom att utveckla ett antal prototyper och experimentellt utvärderat kritiska egenskaper. Sandwichtekniken avviker väsentligt ifrån dagens balkbaserade strukturer och innehåller därför delvis nya utmaningar när det gäller tillförlitliga beräkningsmetoder för hållfasthet, deformationer och strukturdynamik. Projektets provstrukturer kommer därför även att nyttjas för uppmätning av diverse strukturegenskaper och i hög grad bidra till vår beräkningskompetens och metodikutveckling.

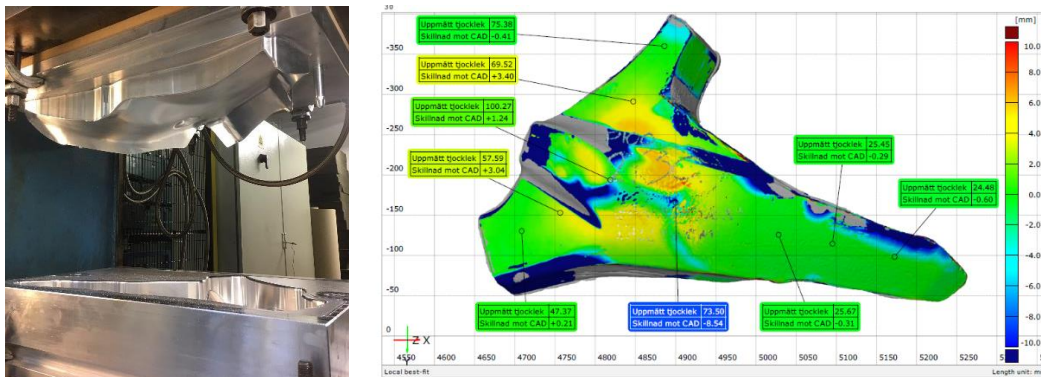
6 Resultat och måluppfyllelse

En ny design för Zbee-golvstruktur har tagits fram i projektet. Med hänsyn till tillverkningstekniska aspekter har ett stort antal varianter av skumkärna och täckskikt simulerats och jämförts med den gamla strukturen i form av styvhet: sidolast (vridstyvhet) och vertikallast. Mekanisk provning av sidolast och vertikallast för Zbee golvstruktur samt optisk mätning av deformationen genom GOM Tritop (se Figur 2) har också genomförts för verifiering av simuleringarna. Beräkningar har visat att en viktminskning på ca 45% på strukturen är möjlig utan att kompromissa med ursprungliga styvhetskrav och hållfasthetskrav. Viktminskningen uppnås genom dels nya materialval dels ny design. Produktionsuppföljning har också gjorts med syfte att effektivisera befintligt produktionskoncept. Layouter för produktion enligt projektplan har ersatts med scenariobeskrivningar där olika kapacitetsanpassade koncept beskrivs med avseende på mantid, kapacitet, golvyta, risker och investeringar. Olika produktionsscenarier har genomarbetats och har resulterat i effektiviseringar i mantid med mellan 10-35 % beroende på produktionsvolym. Här har det också varit ett starkt fokus på miljöaspekter, dvs både med avseende på inre arbetsmiljö, och produktens miljöbelastning i ett hållbarhetsperspektiv. Skanning och utvärdering av geometrin hos befintliga skumkärnor och formverktyg har utförts för att karakterisera avvikelser från börvärden. Resultaten har använts till att skapa åtgärder för att effektivisera produktionen och minska vikten på färdiga komponenter. Ett experimentverktyg för formning av både PET och PUR-kärnor har tagits fram inom ramen för projektet och har använts för utvärdering av PET och PUR-formning

med avseende på kvalitet, toleranser och kostnad, se Figur 3. Geometrin i experimentverktyget har även utgjort en grund för modellering/simulering av formningsprocessen. Resultaten antyder att PUR-skum gjutet enligt framtagna processdata och gjutet i aluminiumverktyg kan ge en betydande kvalitetshöjning. Pressning (varmformning) av PET-skum till en mycket komplex geometri (dubbelkrökta ytor och stora tjockleksvariationer) visade sig vara mycket problematiskt. Alternativa gjutmetoder för PUR-skum har också undersökts.



Figur 2: Mekanisk provning av sidolast och vertikallast för Zbee golvstruktur samt optisk mätning av deformationen genom GOM Tritop



Figur 3: Experimentverktyget och toleransmätningar på formad skumkärna

Volvo Bussar har i projektet fokuserat sitt arbete på att utveckla ett tak i sandwichmaterial. Strukturella infästningar, limfogar, och möjligheter till dimensionering av dessa med avseende på hållfasthet och termisk isolering har undersökts. En prototyp av en bussektion med sandwichkonceptet har tagits fram, se Figur 4. Ett examensarbete har utvecklat metoder för snabb beräkning av termisk isolering på sandwichtvärsnitt, samt utvecklat ett optimeringsverktyg för dimensionering av infästningar. I studien på modulscharvar har målsättningen varit att utveckla robusta lösningar samt hur dessa ska utformas för att ha bra monterbarhet i produktion. Utformningen på förbandet skiljer sig åt beroende på vilken teknik som väljs för att producera panelerna (limning eller vakuuminjicering). Parallellt gjordes en studie av ytskikt vid limning för att skapa en förståelse för vilka parametrar som är viktiga att kontrollera för önskad vidhäftning samt yttextur. Även här har det också varit ett starkt fokus på arbetsmiljöaspekter och produktens miljöbelastning i ett hållbarhetsperspektiv.

Ett viktigt arbete har varit att ta fram riktlinjer "konstruktionsguidelines" innehållande materialval, dimensioneringsfilosofi, konstruktionslösningar och montering etc.



Figur 4: Demonstrator i sandwichmaterial utvecklad av Volvo Bussar

Mer specifikt som samlad dokumentation för projektdeltagarna har följande rapporter levererats och finns tillgängliga via en gemensam projektsida:

Arbetspaket och leverabel	Rapport
D 2.1	Sandwich and core materials: Overview and testing of possible candidates for next generation of the Zbee floor and back rest
D 2.2/2.4	Simulations of PUR and PET forming
D 2.3	Practical trials of PUR and PET forming
D 2.5	Mechanical recycling of sandwich components
D 3.1	Dimensioning criteria, structural optimization and other requirements
D 3.2	Thermal insulation capability of the structure
D 3.3	Evaluation of adhesion - surface texture, treatment and adhesives
D 3.4	Joining Technology: Evaluation of alternative joining techniques between panels, shell and other structures
D 4.1	Analysis of stiffness between shells and profiles for even stress distribution across adhesive joints
D 4.2	Design and development of modular joints
D 4.3	Adhesive Technology Evaluation of alternative surface layers/textures and finishes to meet various automotive surface finishes

D 5.1	Production process scenarios for Zbee components
D 6.1	Discussions with suppliers: additional facilities and equipment analysis
D 6.2	Mechanical, Acoustic and insulation testing results used to refine the simulation models developed in WP 2 to 5
D 7.1	Stiffness re-design and inserts solutions for the Zbee
D 7.2a	Simulations to support Zbee design
D 7.2b	Predicting impact and indentation damage in sandwich panels: background to the SICOMP software

7 Spridning och publicering

7.1 Kunskaps- och resultatsspridning

Hur har/planeras projektresultatet att användas och spridas?	Markera med X	Kommentar
Öka kunskapen inom området	X	Genom tre examensarbeten och ett konferensbidrag har en del av arbetet gjorts publikt
Föras vidare till andra avancerade tekniska utvecklingsprojekt	X	Resultaten kommer att implementeras och användas av de berörda företagen i sin forskning och produktutveckling
Föras vidare till produktutvecklingsprojekt	X	Se ovan
Introduceras på marknaden	X	Ett nytt koncept för Zbee golvstruktur har utvecklats och förväntas komma i produktion. Ett sandwichtak för Volvos eldrivna citybuss förväntas komma i produktion.
Användas i utredningar/regelverk/tillståndsärenden/ politiska beslut		

7.2 Publikationer

Tre examensarbeten har utförts inom projektet:

- Inegbedion EM, (2018). Stiffness re-design and insert solutions for the ZBee. Master thesis, Division of Light Weight Structures, KTH, Stockholm, Sweden 2018.
- Pandey J, (2018). Design methods for high thermal efficiency load bearing inserts used in composite sandwich structures. Master thesis, Division of Material and Computational Mechanics, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden 2018.
- Roos L, (2019). Prediction of interlaminar stress in composite sandwich joints: A method development for Volvo Buses. Master thesis, Division of Material and Computational Mechanics, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden 2019.

Ett konferensbidrag har presenterats:

- Cameron C, (2019). Multi-objective thermal and structural optimization of potted inserts in composite sandwich panels for mass transit vehicles. Presentation & proceedings at Nafems World Congress 2019, 17-20 June, Quebec City, Canada.

8 Slutsatser och fortsatt forskning

Projektet har bidragit till att stärka deltagarnas konkurrenskraft, främst genom ett tätt kunskapsutbyte, validering av simuleringar och genom praktiska försök av tillverkning och provning av sandwichstrukturer. Projektet har även stärkt företagens koppling till forsknings och innovationsmiljöer genom samverkan med RISE SICOMP. Projektet har synliggjort vilka möjligheter som finns med tekniken, men också vilka utmaningar som finns, och vad som kräver vidareutveckling. Sammanfattningsvis har projektet bidragit till förmågan att kunna producera nya produkter, komponenter och fordon i form av lättare och mer termiskt isolerande material, lämpligt för medelstora volymer på ett mer kostnadseffektivt sätt. De utvecklade sandwichkoncepten möjliggör för en utökad flexibilitet vid sammabyggnad, sammanfogning och i förlängningen modularisering. Projektet har även haft som mål att reducera monteringstiden avsevärt med samtidigt ökad kvalitet för att kunna möta tilltagande konkurrens från lågkostnadsregioner. På sikt är en mer rationell karossering av bussar möjlig, eftersom bärande struktur monteras ihop med större enheter/moduler vilka har förutsättningar att tillverkas i anpassade flöden. För Clean Motion har projektet likaså bidragit till en enklare slutmontering och ökad kvalitet för Zbees golvstruktur. Dessutom har det bidragit till Clean Motions mikrofabrikskoncept som är en förutsättning för deras strategi med lokal produktion och global process- och produktutveckling. Den kunskapsuppbyggnad som projektet bidragit med på området kommer att utnyttjas i den fortsatta utvecklingen. Det har i projektet konstaterats vikten av att komponentens design och materialval är väl anpassad för den tillverkningsprocess som väljs för rationell tillverkning samtidigt som materialens prestanda skall kunna utnyttjas på bästa sätt. Projektet har tagit hänsyn till detta och utarbetat riktlinjer för konstruktion och tillverkning av sandwichstrukturer. På detta viktiga område finns dock betydligt mer att göra och förslag till fortsatt forskning och utveckling är att lyfta området "design av sandwichstrukturer", både med avseende på nya bättre detalj- och konceptlösningar, dimensionering och optimering, men även utbildning av konstruktörer och teknikspridning i branschen. Ett annat område för fortsatt arbete är utvecklingen av hållbara material, och hur de ska anpassas för produktion.

9 Deltagande parter och kontaktpersoner

Jocke Pettersson, RISE SICOMP (koordinator)

Erik Marklund, RISE SICOMP

Hans Folkesson, Clean Motion

Jörgen Johansson, Clean Motion

Thommy Rosberg, Ljungby Komposit

Anders Werner, Ljungby Komposit

Michael E. Inegbedion, Volvo Bussar & Clean Motion

Lars-Erik Eriksson, Volvo Bussar

David Lantz, Volvo Bussar

Ulf Lindblad, Volvo Bussar

Anders Olsson, Volvo Bussar

**LJUNGBY
KOMPOSIT**



**CLEAN
MOTION**
zbee

**RI.
SE**