



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

MIKKO SALONEN

KERROSLEVYTYYPPIINEN OVIRAKENNE JOUKKOLIIKENNE SOVELLUKSIIN

Diplomityö

Tarkastaja: professori Jyrki Vuorinen
Tarkastaja ja aihe hyväksytty Automaatio-, kone- ja materiaalitekniikan tiedekuntaneuvoston kokouksessa
8. helmikuuta 2012

TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Materiaalitekniikan koulutusohjelma

SALONEN, MIKKO: Kerroslevytyyppinen ovirakenne joukkoliikenne sovellukseen

Diplomityö, 51 sivua

Helmikuu 2012

Pääaine: Muovit ja elastomeerit

Tarkastaja: professori Jyrki Vuorinen

Avainsanat: Linja-auton ovi, ovilehti, ikkunamateriaali, muovi-ikkuna, kovapinnoitettu polykarbonaatti, PC, lämpölaajeneminen, kerroslevy

Tässä diplomityössä kehitetään uudenlaista oviratkaisua linja-autoon, jossa perinteinen ikkunalasi on korvattu muovi-ikkunalla. Korvaamalla lasi muovilla voidaan oven massaa pienentää merkittävästi. Oven keventäminen osaltaan keventää koko ajoneuvoa ja näin pienentää kulutusta ja päästöjä. Muovin käyttö lasin sijasta voi myös lyhentää toimitusaikoja. Muovin parempi iskunkesto ja muokattavuus helpottavat oven kokonpanoa, pienentävät ikkunan rikkoontumisen todennäköisyyttä ja tuovat vapauksia muotoiluun. Lasin korvaaminen muovilla nykyisenkaltaisessa ovesa ei kuitenkaan ole järkevää, jos painon pienentäminen on ainoa saavutettu etu, muovin korkeamman hinnan takia.

Kovapinnoitettu polykarbonaatti todettiin sopivaksi ikkunamateriaaliksi aiemmassa diplomityössä. Kovapinnoitettua polykarbonaattia on jo pidemmän aikaa käytetty henkilöautoissa ja materiaalia löytyy useilta valmistajilta.

Suuret lämpötilan vaihtelut aiheuttavat ongelmia rakenteissa, joissa on yhdistetty erilaisia materiaaleja. Linja-auton ovi on hyvä esimerkki kohteesta, jossa materiaalien lämpölaajenemiskertoimien ero tulee ottaa huomioon suunnittelussa. Lämpöliikkeiden estäminen liian pienillä välyksillä tai väärillä kiinnitysmenetelmillä johtaa aina heikomman komponentin muokkautumiseen tai rikkoutumiseen.

Muovien kiinnittämismenetelmistä tässä työssä on käsitelty hitsaus ja sen perusmenetelmät, liimaus ja käytetyimmät liimatyyppit sekä mekaaniset liitokset. Työssä esitellään myös kerroslevyteoriaa ja kerroslevyjen käyttöä.

Kokeellinen osa koostuu nykyisen ovilehden ominaisuuksien määrittämisestä, kerroslevyrakenteiden ja liimojen testauksesta ja kahdesta prototyypiovesta. Ensimmäinen prototyyppi on perinteisenkaltaisen ovi, jossa lasi on suoraan korvattu muovi-ikkunalla. Tämä ovi on ollut käytössä liikennöitsijällä puoli vuotta. Ovesta tutkitaan erityisesti ikkunan kestävyyttä tänä aikana. Toinen prototyyppi keskittyy uuden ovityypin kehittelyyn ja siinä kokeillaan yhtä tapaa valmistaa tuplaikkunallinen kerroslevytyyppinen ovi. Työssä esitellään myös tähän ratkaisuun johtanutta ideointia ja muita harkinnassa olleita vaihtoehtoja.

ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Materials Engineering

SALONEN, MIKKO: Sandwich-type door structure for public transport applications

Master of Science Thesis, 51 pages

February 2012

Major: Plastics and Elastomers

Examiner: Professor Jyrki Vuorinen

Keywords: bus door, door, window material, plastic window, hard-coated polycarbonate, PC, thermal expansion, sandwich structure

This thesis develops a new kind of bus door solution, where the traditional window glass has been replaced by a plastic window. The mass of the door can be significantly reduced by substituting glass with plastic. The mass reduction of the door helps making busses lighter and therefore lowers fuel consumption and emissions. Use of plastic instead of glass can also shorten delivery times. Improved impact resistance and ductility of the plastic facilitate assembly, reduce the likelihood of windows breaking and provide freedom of design. Due to the higher price, weight reduction alone is not sufficient reason for the replacement of glass with plastic.

Hard-coated polycarbonate was found to be suitable window material in a previous thesis. Automotive industry has been using hard-coated polycarbonate for years in passenger cars and there are many material suppliers.

Large temperature changes cause problems in structures where different materials are incorporated. Bus door is a good example of such a structure where the differences in materials thermal expansion factors must be taken into account. The prevention of thermal movement by improper methods of attachment or clearances leads to breakage or deformations in the weaker component.

This thesis presents suitable methods of joining for plastics e.g. welding, adhesive bonding and mechanical joints. Some details on the welding methods, typical adhesives, sandwich theory and the use of sandwich structures are also presented.

Experimental part consists of determination of the mechanical properties of production doors, sandwich and adhesive testing and two different prototype doors. First prototype is basically a production door where glass has been substituted with plastic without any other modifications to door itself. This door has been in test use for six months. From this test mainly the wear resistance of the window is evaluated. The second prototype attempts to create a new sandwich-type door structure. This thesis also presents the process leading to this prototype and other ideas under consideration.

ALKUSANAT

Tämä työ on tehty Tampereen teknillisen yliopiston materiaaliopin laitokselle. Työn tarkoituksena oli selvittää mahdollisuuksia käyttää kovapinnoitettua polykarbonaattia ikkunanmateriaalina linja-auton ovelle. Tämä työ keskittyy selvittämään mahdollisia materiaaleja ja niiden kiinnitysmenetelmiä sekä ideoimaan uutta rakennetta.

Haluaisin erityisesti kiittää yhteistyöstä Jaakko Polvista, joka teki diplomityötään konstruktitekniikan laitokselle sekä dosentti Juha Miettistä. Haluaisin myös kiittää tilaajayrityksen yhteyshenkilöitä ja tuotannon työntekijöitä, jotka mahdollistivat sekä mittaukset että prototyyppien valmistamisen. Lisäksi suuri kiitos kuuluu työni ohjaajalle Jyrki Vuoriselle sekä työtovereille Muovi- ja elastomeeritekniikan laboratoriossa, joilta sain hyviä neuvoja ja ohjeita.

Lisäksi erityiskiitos Siirille, vanhemmille ja kavereille, jotka ovat kannustaneet jaksamaan tämän urakan ja koko opiskeluajan.

Pirkkalassa 8.2.2012

Mikko Salonen
Kreetantie 7 a 6
33950 Pirkkala
040 562 8739

SISÄLLYS

1	Johdanto.....	1
2	Ikkunamateriaali	3
3	Lämpölaajeneminen	5
4	Liittäminen.....	8
4.1	Hitsaus	8
4.1.1	Lämmön avulla	9
4.1.2	Liuetinliimaus/hitsaus	9
4.2	Liimaus	10
4.2.1	Elastiset liimamassat	10
4.2.2	Säteilyn avulla kovetettavat liimat.....	11
4.2.3	Rakenneliimat	12
4.3	Mekaaniset liitokset.....	12
4.3.1	Ruuviliitoksen suunnittelussa huomioitavaa	12
4.3.2	Napsausliittimet	13
5	Kerroslevyrakenne	15
5.1	Pintalevyt	16
5.2	Ydinaineet	16
6	Lähtötilanne	17
6.1	Nykyinen ovirakenne.....	17
6.1.1	Ominaisuuksien määrittäminen	17
6.2	Aiemmin tutkittua.....	19
7	Tavoitteet ja vaatimukset.....	20
8	Uuden ovilehden ideointi	22
9	Liimaustestit	24
9.1	Kovetusaikatesti UV-kovettuvalla liimalla.....	24
9.2	Kerroslevy PC-hunajakennolla	26
9.3	Kerroslevy PVC-vaahdolla	30
9.4	Yhteenvedetty taivutustesteistä.....	34
10	Perinteinen ovi muovi-ikkunalla.....	35
10.1	Käyttökokemukset.....	36
11	Uusi ovi muovi-ikkunalla	39
12	Johtopäätökset.....	42
	Lähteet.....	43

TERMIT JA NIIDEN MÄÄRITELMÄT

PC	Polykarbonaatti
PMMA	Polymetyylimetakrylaatti
UV	Ultravioletti-säteily
UNECE	Yhdistyneiden kansakuntien Euroopan talouskomissio
E-43	UNECE:n sääntö, joka koskee ajoneuvoissa käytettäviä ikkunoita
α	Lineaarinen lämpölaajenemiskerroin
L	Pituus
ΔL	Pituuden muutos
ΔT	Lämpötilan muutos
Al	Alumiini
σ	Jännitys
E	Kimmomoduuli
ε	Venymä
PU/PUR	Polyuretaani
MS	Muokatut silikonit (Modified Silicones)
VOC	Haihtuvat orgaaniset yhdisteet (Volatile Organic Com- ponents)
PVC	Polyvinyylidikloridi
v /s	Taipuma
F	Voima
τ	Leikkausjännitys

1 JOHDANTO

Tämän diplomityön tarkoituksena on kehittää uudenlainen oviratkaisu linja-autoon, jossa perinteinen ikkunalasi on korvattu muovi-ikkunalla. Tässä työssä keskitytään selvittämään mahdollisia materiaaleja ja ideoimaan niiden käyttöä sovelluskohteessa. Samaan aikaan tehdään toinen diplomityö, joka keskittyy ovilehden lujuusopilliseen tarkasteluun.

Nykyään linja-autot ovat hyvin näyttäviä ja sulavalinjaisia ja niissä on paljon ikkunapinta-alaa. Myös linja-autojen ovet ovat muodoiltaan monimutkaisempia ja näyttävämpiä suurine lasipintoineen ja tilavine kulkuaukkoineen. Tällaiset nykyaikaiset ovet voivat painaa helposti yli 70 kg, josta lasin osuus on hyvin suuri. Tällaiset ovet ovat hitaita liikkeissään ja rasittavia käyttölaitteille, varsinkin auton ollessa kallellaan. Ovien massaa voidaan pienentää korvaamalla lasi muovilla. Materiaalin vaihdon seurauksena pelkän ikkunan paino voidaan puolittaa. Ikkunan painon pienentäminen mahdollistaa kevyemmät ovirakenteet ja oven käyttölaitteet. Kevyempi rakenne mahdollistaa mm. suuremmat oven liikenopeudet, joilla voidaan lyhentää linja-autojen pysäkillä käyttämää aikaa.

Koko ovirakenteen painon pudotus voi olla jo merkittävä suhteutettuna ajoneuvon massaan, johon ovi asennetaan. Näin ollen ajoneuvojen massaa saadaan pienennettyä, mikä vaikuttaa suoraan polttoaineen kulutukseen ja päästöihin. Nykyisillä polttoaineen hinnoilla ja tiukoilla päästömääräyksillä pienetkin painonsäästöt tuovat taloudellista hyötyä erityisesti linja-autoissa, jotka ovat liikkeellä jatkuvasti. Muovin pienempi lämmönjohtavuus auttaa myös energiatehokkuuden parantamisessa vähentämällä talvella lämmitys- ja kesällä jäähdytystarvetta, mikä vaikuttaa myös suoraan kulutukseen ja päästöihin.

Muita etuja lasin korvaamisessa muovilla ovat muovi-ikkunoiden helpompi työstäminen ja muovilevyn lyhyemmät toimitusajat verrattuna karkaistuun lasiin, varsinkin pienissä erissä. Muovi-ikkunoiden parempi iskun ja taivutuksen kesto helpottavat käsittelyä kuljetuksen ja tuotannon aikana ja pienentävät ikkunan rikkoontumisen mahdollisuutta käytössä. Muovi-ikkunoita on myös mahdollista taivuttaa ja muuten muokata tuotannossa, joka tuo vapauksia erilaisten ovimuotojen suunnitteluun entistä pienemmissä sarjoissa.

Muovin käyttö sellaisenaan lasin sijasta ei kuitenkaan ole järkevää korkeamman hinnan vuoksi. Tästä syystä koko oven rakennetta tulisi kehittää, jolloin mahdollisesti päästäi-

siin tilanteeseen jossa muovin kalliimpi hinta ei vaikuttaisi kokonaiskustannuksiin esim. lyhentyneen kokoonpanoajan ansiosta.

2 IKKUNAMATERIAALI

Soili Kalliokoski käsitteli omassa diplomityössään [Kalliokoski 2011] mahdollisten ikkunamateriaalien kulumiskestävyyttä mm. pesutesteillä. Työssä tarkasteltiin eri valmistajien tarjoamia ajoneuvokäyttöön hyväksytyjä polymetyylimetakrylaatti- ja polykarbonaattilevyjä. Työssä todettiin, että vaihtoehdoista parhaiten linja-auton ikkunamateriaaliksi sopii kovapinnoitettu polykarbonaatti [Kalliokoski 2011].

Kovapinnoitettua polykarbonaattia on käytetty henkilöautojen lasituksissa jo pidemmän aikaa. Tuoreena esimerkkinä on kuvassa 1 näkyvät Bugatti Veyron Grand Sportin targa-katto [Smith 2011] ja vuoden 2011 Mercedes Benz SLK Roadsterin kattoikkuna [BayNews 2011]. Molemmissa materiaaliksi valittiin Bayer Sheet Europe:n Makrolon AG2677 joka on värjätty Bayer Material Science:n kehittämällä infrapunasäteilyn absorboivilla väreillä. Vaikka ensisijainen syy lasin korvaamiseksi muovilla olikin painon pienentäminen (Bugatti 50 % [Smith 2011], Mercedes Benz 40 % [BayNews 2011]), tehostettiin muovin käytöllä myös autojen energiatehokkuutta vähentämällä ohjaamon jäähdytyksen tarvetta. Tällä materiaalivalinnalla saavutettiin Bugatti:n testeissä vain 2 °C korkeampi ohjaamon lämpötila, verrattuna kovakattoiseen versioon, 35 °C lämpötilassa suoritetuissa maantiekokeissa [Smith 2011].



Kuva 1: Bugatti Veyron Grand Sport:n polykarbonaatista valmistettu targa-katto [Smith 2011] ja Mercedes Benz SLK Roadster:n kattoikkuna [BayNews 2011]

Useilla valmistajilla on valikoimissaan kovapinnoitettua polykarbonaattia. Valmistajia ja niiden kauppanimiä ovat mm. KRD Sicherheitstechnik: KASI-PC Flex, Bayer: Makrolon AR, Arla Plast: Saphir ja Sabic Innovative Plastics: Lexan Margard. Kaikilla edellä mainituilla on E-sääntö nro 43:n mukainen hyväksyntä, joten ne soveltuvat ajoneuvokäyttöön. Yhteistä näille tuotteille ovat myös hyvä iskun-, kulutuksen-, UV-säteilyn- ja kemikaalienkestävyys. Yli seitsemän vuoden käytönaikaisia pesuja vastaavassa pesutes-

tissä KASI-PC Flex, Makrolon AR ja Saphir säilyttivät läpinäkyvyytensä käytännössä yhtä hyvin kuin lasi [Kalliokoski 2011]. Lexan Margard ei ollut mukana tässä testissä.

Ikkunamateriaaleja on saatavissa monissa eri väreissä. Esimerkiksi Arla Plast tarjoaa Saphir levyä kaikissa läpinäkyvissä väreissä [Arla Plast 2010]. Värjäys ja erityisesti tummemmat sävyt voivat laskea muovin valonläpäisyn alle 70 %, jolloin niitä ei voi käyttää E-43 säännössä määritellysti ikkunoissa, joista kuljettajan on nähtävä ulos [UNECE 2004, Arla Plast 2011]. Tummia värisävyjä ei voi siis käyttää linja-auton etuovessa, tuulilasissa tai kuljettajan ikkunassa.

3 LÄMPÖLAAJENEMINEN

Lämpölaajeneminen tarkoittaa kappaleen ulkomittojen muutosta lämpötilan muutoksen seurauksena. Lähestulkoon kaikki materiaalit muuttavat muotoaan lämpötilan muuttuessa. Useimmiten lämpölaajenemisen yhteydessä mainitaan lineaarinen lämpölaajenemiskerroin α , joka voidaan ilmaista esimerkiksi yksikössä mm/mm°C, $\mu\text{m}/\text{mK}$ tai kertoimen avulla, esim. $6,5 \times 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$. Lineaarinen lämpölaajenemiskerroin ilmaisee siis kuinka paljon kappaleen yksi dimensio muuttuu yhden celsiusasteen lämpötilan muutoksen seurauksena. Tilavuudenlämpölaajenemiskerrointa käytetään kun tutkitaan tilavuuteen liittyvää muutosta lämpötilan funktiona. Isotrooppiselle materiaalille tilavuuden lämpölaajenemiskerroin on 3α [ASM 2002].

Lämpölaajeneminen tulee ottaa huomioon suunniteltaessa suuria rakenteita esim. siltoja ja putkistoja. Lämpölaajenemisen huomioiminen on tärkeää myös pienemmissä tuotteissa, jotka koostuvat materiaaleista, joilla on eri lämpölaajenemiskertoimet, ja joiden on tarkoitus toimia eri lämpötiloissa. Linja-auton ovi on hyvä esimerkki tällaisesta rakenteesta. Linja-auton oven materiaalit ovat perinteisesti olleet alumiini ja ikkunalasi, jotka kiinnitetään toisiinsa elastisella liimamassalla.

Ajatellaan oven koostuvan vain ikkunasta ja tukirakenteesta. Valitaan tukirakenteen materiaaliksi alumiini ja ikkunamateriaaliksi lasi tai polykarbonaatti. Taulukossa 1 on esitetty valittujen materiaalien lämpölaajenemiskertoimet.

Taulukko 1: Tarkasteltavien materiaalien lämpölaajenemiskertoimet

Materiaali	Lineaarinen lämpölaajenemiskerroin $\alpha \text{ } 10^{-6}/\text{K}$
Alumiini	23 [ASM 2002]
Lasi	9 [Pilkigton 2009]
Polykarbonaatti	70 [Arla Plast 2010]

Lämpötilan aiheuttama pituuden muutos lasketaan kaavalla:

$$\Delta L = \alpha L \Delta T, \quad (1)$$

missä ΔL on lämpötilanmuutoksen aiheuttama pituuden muutos ja ΔT kyseinen lämpötilan muutos. Ovessa kiinnitetään toisiinsa kaksi materiaalia joilla on eri lämpölaajenemiskertoimet, joten tässä yhteydessä on järkevää tarkastella näiden materiaalien pituuden muutoksen erotusta lämpötilan muuttuessa. Sijoitetaan kaavaan 1 α :n tilalle tutkittavien materiaalien lämpölaajenemiskertoimien erotus:

$$\Delta L = (\alpha_{tuki} - \alpha_{ikkuna}) L \Delta T \quad (2)$$

Valitaan oven käyttölämpötila-alueeksi -40 °C — 60 °C , jolloin ΔT saa arvon 100 °C . Tarkastellaan ovilehteä, jonka mitat ovat $2\text{ m} \times 1\text{ m}$ ja lasketaan materiaalipareille alumiini-lasi ja alumiini-polykarbonaatti lämpötilanmuutoksen ΔT aiheuttama pituudenmuutoksen erotus. Taulukosta 2 nähdään kuinka suuren eron 100 °C lämpötilanmuutos aiheuttaa ikkunan ja tukirakenteen välillä. Alumiini-polykarbonaatti – materiaaliparin tapauksessa miinusmerkki tuloksissa tarkoittaa että polykarbonaatin pituus kasvaa enemmän kuin alumiinin.

Taulukko 2: Materiaaliparien pituudenmuutoksien erotukset, kun $\Delta T = 100\text{ °C}$

Materiaalipari	Erotus ΔL pitkä sivu (mm)	Erotus ΔL lyhyt sivu (mm)
Al-lasi	2,8	1,4
Al-PC	- 9,4	- 4,7

Jos ovirakenteessa ikkuna ja tukirakenne kiinnitettäisiin toisiinsa jäykästi, estettäisiin yllä esitetty pituudenmuutoksien luonnollinen erotus. Tämä johtaa jännitykseen materiaaleissa. Jos siis alumiini ja polykarbonaatti kiinnitetään jäykästi toisiinsa lämpötilan nostaminen aiheuttaa alumiiniin vetojännityksen ja polykarbonaattiin puristusjännityksen. Oletetaan, että alumiiniin kohdistuva jännitys ei ole merkittävä [Ticona 2006], joten tutkitaan vain polykarbonaatissa vaikuttavaa jännitystä. Jännityksen suuruutta voidaan arvioida Hooken lain avulla:

$$\sigma = E\varepsilon, \quad (3)$$

missä σ on jännitys, E materiaalin kimmomoduli ja ε venymä. Venymä on määritelmän mukaan:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}. \quad (4)$$

Kaavasta 1 saadaan jakamalla puolittain pituudella L :

$$\frac{\Delta L}{L} = \alpha \Delta T. \quad (5)$$

Näin ollen voidaan Hooken laki kirjoittaa muodossa:

$$\sigma = E\alpha \Delta T. \quad (6)$$

Kaavan 6 avulla saadaan laskettua materiaalissa vaikuttava jännitys lämpötilan muuttuessa, jos lämpölaajeneminen on estetty. Tapauksessa, jossa alumiini ja polykarbonaatti on liitetty toisiinsa jäykästi, voidaan jälleen lämpölaajenemiskertoimena käyttää materiaalien lämpölaajenemiskertoimien erotusta [Ticona 2006]. Saadaan:

$$\sigma = E (\alpha_{tuki} - \alpha_{ikkuna}) \Delta T \quad (7)$$

Kaavan 7 avulla voidaan arvioida muovi-ikkunaan kohdistuvaa jännitystä. Taulukossa 3 on esitetty kaavan 7 avulla laskettu levyssä vaikuttava jännitys ja 5mm paksun levyn reunoihin kohdistuvat voimat lämpötilan muutoksen ollessa 100 °C .

Taulukko 3: Polykarbonaattilevyyn kohdistuva jännitys ja voimat

Materiaali	E (MPa) [Arla Plast 2010]	Jännitys (MPa)	Voima (kN) pitkällä sivulla (2 m x 5 mm)	Voima (kN) lyhyellä sivulla (1 m x 5 mm)
PC	2300	-11	-108	-54

Miinusmerkit jännityksen ja voimien edellä tarkoittavat karbonaatin olevan puristuksessa. Laskuissa levyn tuenta on oletettu täysin jäykäksi mikä todellisuudessa ei ole mahdollista. Tuloksista voidaan kuitenkin todeta, ettei alumiinin ja polykarbonaatin kiinnittäminen jäykästi ole järkevää, sillä rakenteeseen syntyy lämpötilan muuttuessa hyvin suuria jännityksiä, jotka aiheuttavat pahimmassa tapauksessa muovin rikkoontumisen. Todellisuudessa laskuissa esiintyviä yli 100 kN voimia ei ikkunaan synny, vaan ikkuna lommahtaa jo paljon pienemmillä kuormilla.

Edellä esitelty periaate pätee myös lasi-ikkunaa käytettäessä. Vaikka pituuden muutokset ovat pienempiä, ovat syntyvät jännitykset vielä suurempia lasin suuremman kimmokerroimen takia. Lasilla ja alumiinilla on käytännössä sama kimmokerroin n. 70 GPa, joten lämpölaajenemisen aiheuttamat jännitykset vaikuttavat tässä tapauksessa myös alumiinissa merkittävästi. Lämpölaajeneminen tulee siis ottaa rakenteessa huomioon jättämällä sopivat välykset ja käyttämällä kiinnitysmenetelmiä, jotka sallivat lämpölaajenemisen. Autoteollisuuden ikkuna-asennukset, niin lasi- kuin muovi-ikkunoille tehdään lähes yksinomaan elastisilla liimamassoilla, jotka sallivat lämpöliikkeet [Jaakola 2011].

4 LIITTÄMINEN

Muovien liittämässä voidaan käyttää useita eri menetelmiä, joista tässä luvussa esitellään hitsaus, liimaus ja mekaaniset liitokset. Taulukossa 4 on vertailtu Tuffak polykarbonaattilevylle soveltuvia liittämismenetelmiä mm. liitoksen lujuuden ja kustannusten perusteella.

Taulukko 4: Liittämismenetelmien vertailua Tuffak PC-levylle [Troughton 2008]

Method of Joining	Solvent Cement	Adhesive Bonding	Self-tapping Screws	Medium Screws	Rivets	Hot Gas Welding	Hot Blade/ Plate Welding	Ultrasonic Welding	Vibration Welding	Spin Welding	Ratings Legends	
											10=	1=
Tensile strength	8	4	10	10	10	10	10	10	10	10	Parent material strength	Poor
Speed	3	2	2	1	3	2	7	10	6	6	Fast	Slow
Tooling	–	1	1	1	3	5	7	8	8	5	Costly	Inexpensive
Labor	1	2	2	1	3	2	9	10	9	10	High	Low
Capital investment	1	1	2	2	2	4	6	9	8	5	Highest	Lowest
Cosmetic appearance	10	3	5	5	5	2	8	9	9	8	Best	Worst
Setup preparation	1	2	3	3	3	6	8	8	7	5	Long	Short
Part size	10	10	10	10	10	8	6	2	4	6	Unlimited	Small
Dissimilar materials	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	?	No	No	Ok	No		
Part design	9	10	10	10	10	5	6	1	8	3	Simple	Limited complex
Cost of materials	9	6	4	1	3	10	10	10	10	10	Most expensive	Least expensive

4.1 Hitsaus

Muovien hitsaaminen perustuu liitettävien kappaleiden paikalliseen sulattamiseen ja molekyyliketjujen diffuusioon rajapinnan yli. Hitsaaminen soveltuu lähinnä samasta muovista valmistettujen kappaleiden liittämiseen toisiinsa. Suurin osa menetelmistä perustuu lämmön avulla sulattamiseen, mutta tähän voidaan käyttää myös liuottimia [Troughton 2008]. Seuraavaksi esitellään muovien hitsauksen perusteita lämmön ja liuottimien avulla.

4.1.1 Lämmön avulla

Lämmön avulla tapahtuvaan hitsaukseen on tarjolla useita menetelmiä, jotka eroavat toisistaan lähinnä lämmöntuottamiseen käytetyn tekniikan osalta. Kaikille menetelmille on yhteistä taulukon 4 mukaan erinomainen lujuus suhteessa perusaineeseen. Toisaalta lämmön avulla hitsaaminen tarvitsee aina erityisiä laitteita tai koneita, joten aloitus- ja työkalukustannukset ovat aina selkeästi korkeampia kuin liuotinhitsauksessa.

Lämpöenergia voidaan tuoda kappaleisiin ulkoa esim. työkalun, lasersäteen tai kaasun avulla. Ulkoa tuotavaan energiaan perustuvia menetelmiä ovat mm. kuumalevy-, kuumakaasu-, kuumalanka-, infrapuna- ja laserhitsaus [Troughton 2008]. Kuumakaasuhitsaus on esimerkiksi kuten metallien kaasuhitsaamista, mutta kaasuliekki on korvattu kuumalla ilmalla tai inertillä kaasulla ja metallilanka muovilangalla [Viennamo, Nykänen 2011].

Muovin sulattamiseen tarvittava lämpö voidaan aikaansaada myös kitkan avulla. Kitkaan perustuvia menetelmiä ovat mm. ultraääni- ja värähtelyhitsaus, joissa toinen liitettävistä kappaleista värähtelee paikallaan olevaa kappaletta vasten ja kappaleiden välinen kitka tuottaa tarvittavan lämmön [Viennamo, Nykänen 2011].

4.1.2 Liuotinsiimaus/hitsaus

Liuottimen avulla tapahtuvalla liimauksella tai hitsauksella voidaan tarkoittaa joko ns. liuotinsementillä tai sopivalla liuottimella tapahtuvaa kestumuovien liittämistä. Molemmissa tapauksissa liuotin pehmittää muovia jolloin polymeeriketjut pääsevät diffundoitumaan rajapinnan yli ja kappaleet hitsautuvat yhteen. Liuotinsementissä on liuottimen lisäksi liuennutta polymeeriä eli se tuo liimaussaumaan myös uutta materiaalia, joka auttaa kappaleiden liittämässä. Liuotinhitsaus soveltuu vain tasaisten pintojen liittämiseen. Liuotinsementillä voidaan liimata myös epätasaisia kappaleita ja täyttää ohuita saumoja. Yleensä liitettävien kappaleiden tulee olla samaa materiaalia, mutta on myös joitain poikkeuksia. Liuotinsementtiä käytetään paljon esim. viemäriputkien liittoksissa. Liuotinhitsauksella saavutetaan lähes näkymätön liitos joka soveltuu esim. vitriinien kokoamiseen [Troughton 2008].

Taulukon 4 mukaan liuotinhitsaus on ainoa mainituista hitsausmenetelmistä, jolla liitoksen lujuus on korkea, muttei vastaa täysin liitettävän materiaalin lujuutta. Toisaalta työkalu-, työ- ja alkuinvestointikustannukset ovat lähes olemattomat. Liuotinhitsauksessa tuotteen koko voi olla suurempi kuin muissa hitsausmenetelmissä, koska siinä ei tarvita erityislaitteita tai -koneita.

4.2 Liimaus

Liimaus on hyvä tapa muovien liittämiseen, kun hitsaus ei onnistu tai sitä ei haluta käyttää esim. kustannussyistä. Oikein valitulla liimalla voidaan saavuttaa liimasaumalle hyvä tartunta erilaisiin materiaaleihin ja hyvät mekaaniset ominaisuudet. Taulukon 4 mukaan liimasauman lujuus ei yllä yleensä lähellekään hitsattua liitosta. Tämän selittää liimasauman luoma materiaalin epäjatkuvuus tuotteessa, jota ei hitsauksessa synny. Toisaalta liimasauma voi tuoda muita ominaisuuksia, jotka korvaavat lujuuden menetyksen. Esimerkiksi joustava liimasauma voi vähentää värähtelystä tai lämpölaajenemisesta johtuvia jännityksiä. Seuraavassa esitellään muutamia muovien liittämiseen soveltuvia liimatyyppisiä.

4.2.1 Elastiset liimamassat

Elastisten liimamassojen käyttö alkoi yleistyä 1960-luvulla niin rakennusten julkisivujen kuin autojenkin lasituksissa. Myöhemmin liimamassoja alettiin käyttää myös muissa kohteissa kuten linja-autojen katto- ja seinäpaneelien kiinnitykseen. Myös muut teollisuuden alat omaksuivat elastisten liimamassojen käytön. Ja nykyään niitä käytetäänkin monissa sovelluksissa aina kodinkoneiden valmistuksesta laivanrakennukseen. [Burchardt & Merz, 2006]

Elastisia liimamassoja valmistetaan sekä yksi- että kaksi-komponenttisina. Yksikomponenttiset ovat suosittuja käytön helppouden takia. Kaksikomponenttiset massat takaavat yleensä paremmat mekaaniset ominaisuudet heti liimauksen jälkeen, mutta sekoitussuhteiden ja hyvän sekoittumisen seuraaminen vaikeuttaa niiden käyttöä. Yleisimmät liimamassat ovat polyuretaani- tai silikonipohjaisia tai silainoituja polymeerejä, kuten PU-hybridejä ja modifioituja silikoneja. Seuraavissa kappaleissa esitellään yleisimpiä liimamassatyyppisiä ja niiden ominaisuuksia. [Burchardt & Merz, 2006]

4.2.1.1 Polyuretaanipohjaiset liimamassat

Polyuretaanipohjaiset liimamassat ovat erittäin käytettyjä mm. ajoneuvolasituksissa. Käytetyimmät massat ovat yksikomponenttisiä ilmankosteuden vaikutuksesta kovettuvia liima- ja tiivistemassoja. Polyuretaanimassat tarttuvat hyvin useimpiin pintoihin, mutta eivät kestä UV-säteilyä. Massoja on saatavilla sekä joustavina että kohtalaisen jäykkinä. PUR-massat venyvät ja palautuvat hyvin, joten ne kestävät hyvin esim. lämpölaajenemisesta johtuvia jännityksiä. [Petrie 2000]

4.2.1.2 Silikonipohjaiset liimamassat

Silikonipohjaisia liimamassoja käytetään paljon esim. julkisivulasituksissa ja kosteiden tilojen eristyksissä. Massat ovat joko yksikomponenttisiä ilmankosteuden vaikutuksesta

kovettuvia tai kaksikomponenttisia lämmön tai silyylialkoholiryhmien avulla kovettuvia. Silikonipohjaisten liimamassojen etuja ovat erinomainen UV-säteilyn kesto, pieni kutistuma ja hyvä kemikaalien kesto. Silikonipohjaisilla massoilla saavutetaan myös sauman hyvä liikkuvuus [Petrie 2000]. Huonona puolena on mahdollinen silikoniöljyjen leviäminen tuotannossa, joka mm. estää saastuneiden pintojen uudelleen maalaamisen. Tästä syystä silikonipohjaiset tuotteet ovat usein kiellettyjä autoteollisuudessa [Jaakola 2011]. Silikoniöljyjen leviäminen voidaan kuitenkin estää helposti hieman tarkemmalla työhygienialla (puhtaat hanskat) ja työntekijöiden koulutuksella [Jansson 2011].

4.2.1.3 PUR-hybridit ja MS-polymeerit

MS-polymeerit (Modified Silicones) ja PUR-hybridit sisältävät silaaniryhmiä jotka ristisilloittuvat ilmankosteuden vaikutuksesta [Cognard 2006]. Näillä silanoiduilla polyeetteri ja polyuretaani massoilla on hyvin paljon erilaisia ominaisuuksia, jotka vaihtelevat tuotteittain. Yleisesti niitä suositaan kohteissa, joissa yksikomponenttisten polyuretaani- tai silikoni-pohjaisten liimamassojen kovettumisaika on liian pitkä. PUR-hybridit soveltuvat hyvin lasitukseen [Cognard 2006] kun taas MS-polymeerit eivät koska ne menettävät ulkokäytössä adheesio-ominaisuutensa hyvin nopeasti [Petrie 2007].

4.2.2 Säteilyn avulla kovetettavat liimat

Säteilyn avulla kovettuvia liimoja käytetään esim. hampaiden paikkaukseen, elektronikan komponenttien kapselointiin ja kokoonpanoon monissa sovelluksissa. Käytetty säteily voi liimasta riippuen olla elektronisuihku, UV-säteily tai näkyvä valo. Säteilyn avulla kovetettavat liimat ovat liuotinvapaita eikä niistä näin ollen vapaudu VOC-yhdisteitä (volatile organic components). Muita hyviä ominaisuuksia ovat mm. tarvittaessa lähes näkymätön liimasauma ja kovettumisen helppo säännöstely. Niillä voidaan myös liimata lämpötilalle, liuottimille tai kosteudelle herkkiä materiaaleja. Huonona puolena on näiden liimojen korkeampi hinta verrattuna esimerkiksi liuotinpohjaisiin tuotteisiin. [Petrie 2007]

Kovetukseen käytetyn säteilyn energiataso vaikuttaa siihen miten kovettuminen käynnistyy. Elektronisuihkun elektronit sisältävät paljon energiaa, joka suoraan käynnistää polymerisaation. UV-säteilyn energiasisältö on huomattavasti pienempi eikä se riitä prosessin käynnistämiseen. Tämän takia UV-kovettuvat liimat sisältävät fotoinitiaattoreita, jotka UV-säteilyn vaikutuksesta käynnistävät polymerisaation. Fotoinitiaattorit tekevät UV-kovettuvista liimoista hyvin epästabiileja. Ne ovat silti käytetympiä, kuin elektronisuihkun avulla kovettuvat, halvempien aloituskustannusten takia. [Petrie 2007]

4.2.3 Rakenneliimat

Rakenneliimat kestävät erään määritelmän mukaan jännityksiä, jotka ovat vähintään 50% liimattavan materiaalin kestävästä jännityksestä [Troughton 2008]. Muitakin määritelmiä rakenneliimoille on, mutta yleisesti käsitteellä tarkoitetaan ristosilloittuvia ker- tamuovihartseja esim. epokseja ja akrylaatteja [Petrie 2007]. Rakenneliimojen ominai- suudet riippuvat paljon käyttökohteesta, johon ne on suunniteltu, mutta yleisesti hyviä ominaisuuksia ovat korkea lujuus ja nopea kovettuminen verrattuna elastisiin liimamas- soihin sekä hyvä tartunta useimpiin pintoihin. Useat rakenneliimat kestävät myös hyvin ulkokäytössä [Troughton 2008].

4.3 Mekaaniset liitokset

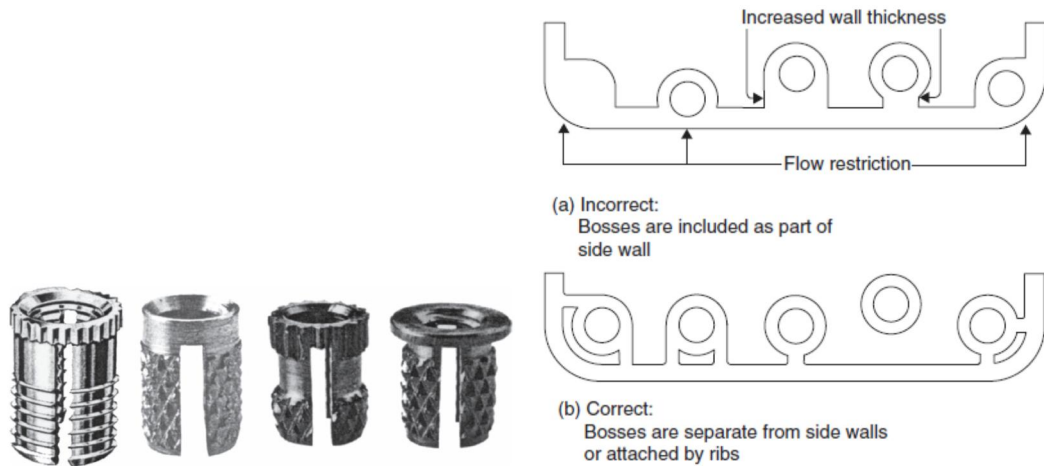
Mekaaniset liitokset ovat helppoja ja nopeita käyttää, ja ne ovatkin edelleen teollisuu- dessa käytetyimpiä liitosmenetelmiä. Mekaaniset liitokset ovat taulukon 4 mukaan hal- poja, mutta niiden heikkous liimaukseen tai hitsaukseen verrattuna on jännitysten kes- kittäminen liitoskohtaan esim. ruuvinreiän ympäristöön [Troughton 2008].

Mekaaniset liitokset voivat olla joko avattavia kuten ruuviliitokset tai kertakäyttöisiä kuten niitit ja napsausliittimet. Avattavien liitosten etuna on mahdollisuus kappaleen purkamiseen ja uudelleen kasaamiseen huollon tai kierrätyksen yhteydessä [Viennamo & Nykänen 2011]. Toisaalta avattavan liitoksen tahaton löystyminen ja osien irtoami- nen tai vaurioituminen on mahdollista. Suoraan muovituotteeseen valetut napsausliitti- met kasvattavatkin suosiotaan niiden tarjoaman helpon kokoonpanon ja kestävän, löys- tymättömän liitoksen ansiosta.

4.3.1 Ruuviliitoksen suunnittelussa huomioitavaa

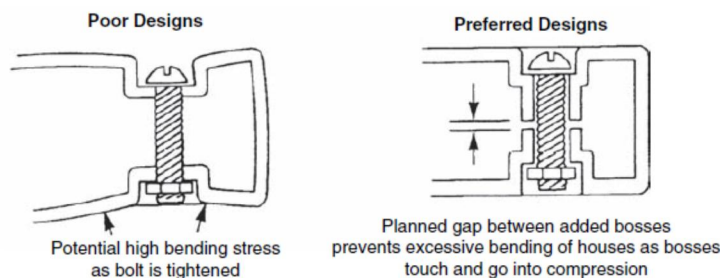
Ruuviliitoksissa voidaan käyttää normaaleja tai itsekierteittäviä ruuveja. Uppokantaisia ruuveja ei tule käyttää, sillä ne aiheuttavat, muotonsa takia, kiristettäessä reiän reunoille suuria puristusjännityksiä hyvin pienelle alueelle. Itsekierteittävässä ruuveissa tulisi suosia kierteenleikkaavaa tyyppiä, koska ne aiheuttavat vähemmän jännityksiä kuin kier- teenmuovaavat tyypit. Aluslevyillä voidaan jakaa ruuvin kannan aiheuttama jännitys suuremmalle alueelle. [Troughton 2008]

Normaalit ruuvit tarvitsevat mutterin tai vastinkappaleeseen kierteet. Muovikappaleeseen voidaan valaa kierteet valmiiksi tai käyttää kierreinserttejä. Itsekierteittäville ruu- veille riittää reikä [Viennamo & Nykänen 2011]. Kuvassa 2 vasemmalla on esitetty eri- laisia laajenevia kierreinserttejä. Kierreinsertit voivat olla myös lämmön tai ultraäänen avulla asennettavia. Kuvassa 2 oikealla on ruiskuvalukappaleen ruuvitaskujen virtauk- sen kannalta huono ja hyvä sijoittelu.



Kuva 2: Vasemalla: laajenevia kierreinserttejä. Oikealla: ruuvitaskujen (a) huono ja (b) hyvä sijoittelu [Troughton 2008]

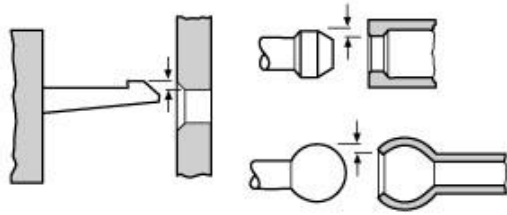
Kuvassa 3 on esitetty huono ja hyvä tapa ruuvikiinnityksen toteuttamiseen eräässä kohteessa. Huonosti suunniteltu kiinnitys aiheuttaa kappaleeseen vääntöjännityksiä ruuvia kiristettäessä. Ruuvien sopiva kiristysmomentti onkin tärkeä erityisesti muovien kiinnityksessä. Liian suuri kiristysmomentti voi rikkoa muovissa olevat kierteet tai aiheuttaa ruuvin kannan ympärille suuria jännityksiä [Troughton 2008].



Kuva 3: Vasemmalla huonosti suunniteltu ruuvi-liitos, joka aiheuttaa taivutusjännityksiä kappaleeseen. Oikealla sama liitos toteutettuna tukirakenteella, joka estää ruuvin liiallisen kiristämisen [Troughton 2008]

4.3.2 Napsausliittimet

Napsausliittimet ovat useimmiten käytössä ruiskuvalettujen kappaleiden yhdistämisessä. Liittäminen kiinnityshakasia tai -kynsiä käyttämällä on nopeaa kokonpanossa. Toisaalta liittimien valmistus osana kappaletta vaatii tarkkuutta muotin ja kappaleen suunnitteluun. Napsausliittimet voivat olla kertakäyttöisiä tai uudelleen avattavia ja suljettavia kuten esimerkiksi pakasterasian kansi tai Minigrip-pussin sulkija [Viennamo & Nykänen 2011]. Kuvassa 4 on esitelty muutamia napsausliittimiä



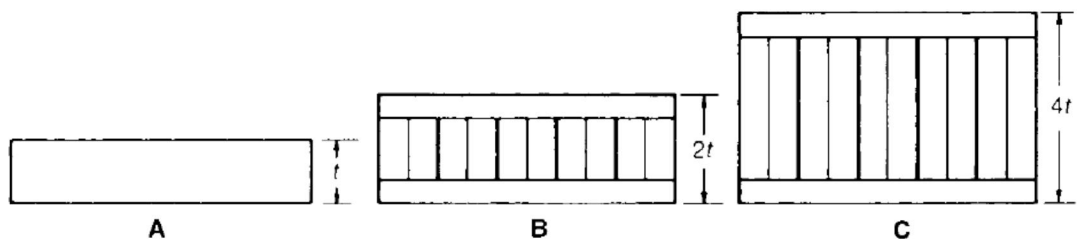
Kuva 4: Taivutusvarsiliitin ja kaksi erilaista rengasliitintä [Viennamo & Nykänen 2011]

5 KERROSLEVYRAKENNE

Kerroslevyt (sandwich panel) muodostuvat ohuista pintalevyistä, ydinaineesta ja liima-kerroksista edellisten rajapinnoilla. Kerroslevyrakenteet ovat suosittuja erityisesti ilma-lusovelluksissa niiden massa suhteutetun korkean lujuuden ja jäykkyyden ansiosta [Miracle & Donaldson 2001]. Kerroslevyrakenteiden jäykkyyttä käytetään hyväksi myös veneenrakennuksessa, ajoneuvoteollisuudessa, urheiluvälineissä ja talonrakennuksessa esimerkiksi ovissa [Marshall 1998]. Kerroslevyjen erinomaiset eristysominaisuudet tekevät niistä suosittuja kylmäkalustesovelluksissa. Kerroslevyjä voidaan käyttää eristämiseen myös talonrakennus-, auto- ja veneteollisuudessa.

Taulukossa 5 on esitetty kerroslevyn ydinaineen paksuuden vaikutusta suhteelliseen lujuuteen ja jäykkyyteen. Taulukosta nähdään kuinka ydinaineen lisäämisellä alumiinisten pintalevyjen väliin voidaan saavuttaa seitsemänkertainen jäykkyys ja yli kolminkertainen lujuus kaksinkertaisella paneelin kokonaispaksuudella $2t$. Paneelin paksuuden kasvattaminen arvoon $4t$ voi kasvattaa jäykkyyden 37-kertaiseksi ja lujuuden yli yhdeksänkertaiseksi painon kasvaessa vain kuusi prosenttia verrattuna pelkkään alumiinilevyyn [Miracle & Donaldson 2001]. Tässä esitettyjen mekaanisten ominaisuuksien parantumisen sijasta syy kerroslevyrakenteiden käyttöön on usein kuitenkin painon säästö ja halvempi hinta [Marshall 1998].

Taulukko 5: Kerroslevyn ytimen paksuuden vaikutus jäykkyyteen, lujuuteen ja painoon. Muokattu lähteestä [Miracle & Donaldson 2001]



	A	B	C
Suhteellinen jäykkyys (D)	100	700	3700
Suhteellinen lujuus	100	350	925
Suhteellinen paino	100	103	106

5.1 Pintalevyt

Pintalevyjen ensisijainen tehtävä on kantaa pinnan suuntaisia jännityksiä ja jakaa jännitykset tasaisemmin ydinaineelle. Ilmailuteollisuudessa käytetyimpiä pintamateriaaleja ovat lasi- tai hiilikuitulaminaatit, sekä alumiini-, titaani- tai teräslevyt [Marshall 1998]. Vähemmän vaativissa kohteissa kuten kuorma-auton kuormatilan seinissä käytetään halvempia materiaaleja, kuten lasikuitulujitettua polypropeenaa [Monopan 2011].

5.2 Ydinaineet

Ydinaineen tehtävä on kantaa kerroslevyyn kohdistuvia leikkausjännityksiä ja stabiloida pintalevyt. Yleisesti käytettyjä ydinmateriaaleja ovat puu, vaahdot ja hunajakennot. Kuvassa 5 on esitelty erilaisia ydinaineita. Puu, erityisesti balsa, on vanhin kerroslevyjen ydinaine. Balsaa on käytetty paljon veneenrakennuksessa ja suksissa sen erinomaisen puristuslujuuden ansiosta [Marshall 1998].



Kuva 5: Erilaisia ydinaineita vasemmalta oikealle: PVC-vahto, balsa ja PC-hunajakkenno [DIAB, CEL]

Yleisimmin ydinaineena käytetään uretaani-, PVC- ja polystyreenivaahtoja. Vaahtojen selkeä etu verrattuna muihin ydinaineisiin on niiden paremmat eristeominaisuudet. Uretaani- ja PVC-vaahtoja käytetään myös kuormaa kantavissa kohteissa, kun taas polystyreenivaahtoa käytetään lähes yksinomaan eristeenä esim. kylmäkalusteissa [Marshall 1998].

Hunajakennoja valmistetaan mm. alumiinista, aramidista, paperista ja muoveista monilla erilaisilla kennon muodoilla. Käyttökohteita, kuten erilaisia hunajakennojakin on paljon. Ilmailuteollisuudessa ja muissa vaativissa kohteissa aramidi on suosittua. Halvemmat vaihtoehdot kuten paperi, alumiini ja kestumuovit ovat käytössä esim. rakennus- [Marshall 1998] ja kuljetussovelluksissa [Monopan 2011].

6 LÄHTÖTILANNE

6.1 Nykyinen ovirakenne

Tällä hetkellä kohdeyrityksen tuotannossa olevat linja-auton ovilehdet koostuvat erillisestä alumiiniprofiilista hitsatusta karmista ja siihen kiinnitetystä ikkunalasista tai peltisestä täytelevystä tai joissain tapauksissa molemmista. Ovilehti on usein hieman kaareva johtuen linja-auton ulkoseinän kaarevuudesta. Tämä tuo oman hankaluutensa niin alumiiniprofiilien hitsaamiseen, kuin myös ikkunalasien valmistukseen. Erityisesti profiilien hitsaaminen ja hitsaussauman siistiminen ovat hyvin aikaa vieviä työvaiheita, joita mielellään vähennettäisiin.

6.1.1 Ominaisuuksien määrittäminen

Nykyisen ovilehden ominaisuuksia määritettiin kolmipistetaivutuksella. Tuloksista saatiin tietoa eri ovilehtien keskinäisistä jäykkyyksistä ja vertailukohta tulevalle uudelle ovirakenteelle. Mittausjärjestely on esitelty kuvassa 6. Ovilehti on kiinnitetty alapäästään testipenkkiin siten että sen liikkuminen on estetty, mutta ovi pääsee kääntymään hieman. Yläpäästä ovi on tuettu vain alapuolelta.

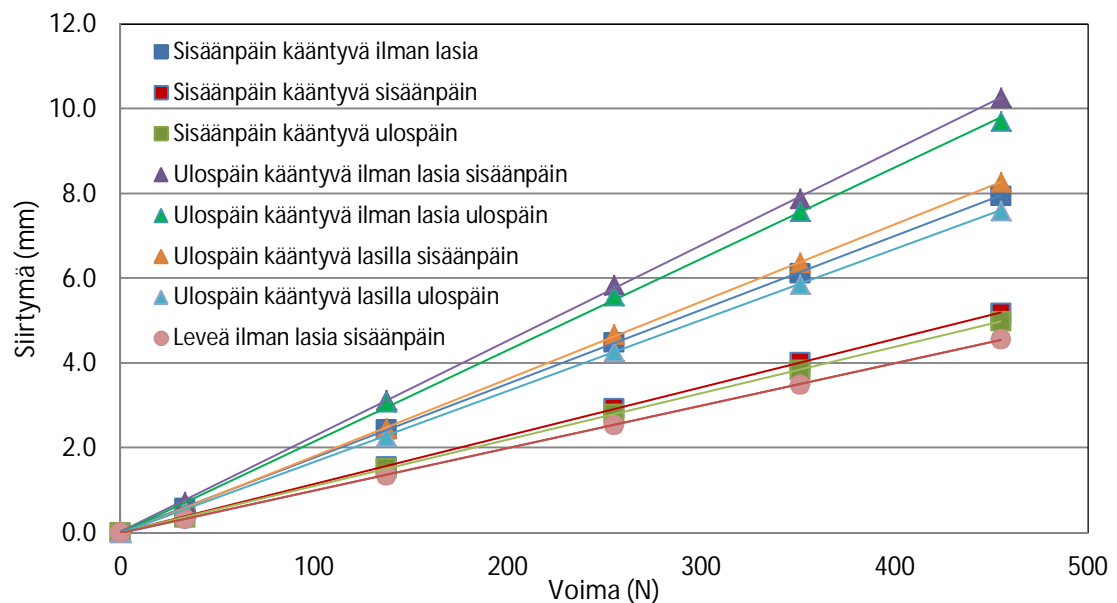


Kuva 6: Mittausjärjestely ovilehtien kolmipistetaivutukseen. Vasemmalla: lasillinen ovilehti. Oikealla: ovilehti rasituksessa

Ovilehtiä rasitettiin laittamalla painoja oven keskikohdalle ja mittaamalla siirtymää mitakelloilla ovilehden alapinnalta. Painoina käytettiin teräs ja betonikappaleita, sekä lautoja jakamassa rasitusta tasaisemmin koko oven leveydelle. Tutkittavat ovilehdet nimettiin ”sisäänpäin kääntyväksi”, ”ulospäin kääntyväksi” ja ”leveäksi” ovilehdeksi. Sisäänpäin kääntyvä ja leveä ovilehti ovat suorita ja ulospäin kääntyvä on kaareva. Sisäänpäin kääntyvä ovilehti testattiin ilman lasia sekä lasin kanssa ulos- ja sisäänpäin. Taivutuksen

suunnat kuvaavat oven liikettä suhteessa ajoneuvoon, jossa ne olisivat kiinni. Kaareva ulospäin kääntyvä ovilehti testattiin myös ilman lasia sisään ja ulospäin, koska oven kaarevuuden arvioitiin vaikuttavan tuloksiin. Leveä ovilehti taivutettiin vain ilman lasia, koska siitä ei ollut lasillista versiota saatavana.

Kaikki mittaukset toistettiin kolme kertaa. Kuvaajasta 1 nähdään keskiarvot eri voimilla mitatuille siirtymän arvoille. Kuvaajasta nähdään lasin, sekä ulospäin kääntyvällä kaarevuuden, jäykistävä vaikutus tuloksiin. Kuvaajasta ei voida suoraan päätellä mikä ovilehdistä on jäykin, koska ne ovat hieman erimittaisia ja tämä vaikuttaa jäykkyyteen merkittävästi.



Kuvaaja 1: Kolmipistetaivutuskokeiden keskiarvotetut tulokset

Taulukossa 6 on esitetty kaavan 8 avulla lasketut neliömomentit ovilehdille tilanteessa, jossa 455 N kuormitus aiheutti pienimmän taipuman. Neliömomentti on kääntäen verrannollinen jäykkyyteen, eli testatuista ovilehdistä jäykin oli ”ulospäin kääntyvä kaareva” [Polvinen 2012]. Leveässä ulospäin kääntyvässä ovilehdessä ei, muista poiketen, ollut lasia. Tämä vaikuttaa ovilehden jäykkyyteen kuten kuvaajasta 1 nähdään. Näin ollen tulokset eivät ole vertailukelpoisia leveän ovilehden tapauksessa. Lisää mittaustuloksista ja laskuista on kerrottu Jaakko Polvisen diplomityössä [Polvinen 2012].

Taulukko 6: Ovilehdille lasketut neliömomentin arvot muokattu lähteestä [Polvinen 2012]

Ovilehti	Kuormitus (N)	Taipuma (mm)	Neliömomentti (mm ⁴)
Ulospäin kääntyvä kaareva	455	7,6	167973
Ulospäin kääntyvä leveä		4,6	190964
Sisäänpäin kääntyvä		5,0	232644

Neliömomentin arvo määritetään kaavalla:

$$I_z(x) = \frac{Fx^2(L_{ovi}-x)^2}{3L_{ovi}Ev_{max}}, \quad (8)$$

missä v_{max} on suurin taipuma, F voima, x kuormituskohta, L pituus ja E kimmomoduuli.

6.2 Aiemmin tutkittua

Kohdeyritys on antanut aiheita lähivuosina useisiin diplomitoihin, joihin tässäkin työssä viitataan. Erityisesti Soili Kalliokosken läpinäkyvien muovien kulumiskestävyyttä ja Jani Kauppilan ovea kiinnipitäviä voimia käsittelevät työt ovat antaneet hyviä lähtökoh-
tia tähän työhön. Komposiittiovillehteä on käsitelty myös yhdessä diplomityössä, joten tähän vaihtoehtoon ei paneuduta tässä työssä.

7 TAVOITEET JA VAATIMUKSET

Tässä luvussa esitellään uuden ovilehden kehityksen tavoitteet ja tavoitteiden pohjalta laadittu vaatimuslista. Vaatimuslista uudelle ovirakenteelle on kerätty yhteistyössä Jaakko Polvisen sekä tuotetta valmistavan yrityksen yhteyshenkilöiden kanssa. Lista on kerätty sekä vaatimuksia, että toiveita, joita käytetään suunnittelutyön pohjana. Osa vaatimuksista on selkeästi pakollisia, kuten ikkunan E-hyväksyntä ja osa taas paremminkin toiveita joiden painoarvoa on korotettu nimeämällä ne vaatimuksiksi, kuten jäykkyyttä ja paksuutta koskevat vaatimukset. Vaatimuslista on esitetty taulukossa 7.

Taulukko 7: Vaatimuslista: vaatimukset = V, toiveet = T

Vaatimukset/Toiveet	V/T
Yhtä jäykkä kuin nykyinen ovilehti lasin kanssa	V
Mahdollisimman paljon läpinäkyvää aluetta	T
Mahdollisimman kevyt	V
Ei hitsauksia (ähän kolmen D:n työvaiheita: Dull, Dirty, Dangerous)	V
Maksimipaksuus ovilehdelle = 40mm	V
Markkinoiden ohuin ja kevein ovilehti (paksuus ~10mm, paino 10 kg)	T
Helppo käsittely (koneistus, taivutus, vähän mahdollisuuksia virheille)	V
Lyhyt toimitusaika (asiakkaan tilauksesta toimitukseen)	V
Tarttumaton pinta (graffitit)	T
Naarmuuntumaton	T
UV-valonkestävä kokonaisuus	V
Helppo tiivisteiden asennus	T
Huurtumaton (luonnollisesti tai vaihtoehtona lämmityselementti)	T
Riittävästi ääntä eristävä	T
Muotonsa muistava. Lommot palautuvat itsestään takaisin.	T
Sileä ulkopinta	V
Rungon maalaustarve vähäinen (esim. profiilit valmiiksi anodisoituna)	T
Saatavissa monella eri värisävyllä (läpinäkyvä pinta)	T
E-hyväksytty ikkuna	V
Läpinäkyvyys > 90 %	T
Hyvä ajoneuvokemikaalien kesto	V

Osa taulukkoon kirjatuihin toiveista ja vaatimuksista, kuten ”mahdollisimman kevyt” tai ”mahdollisimman paljon läpinäkyvää aluetta”, on hyvin epämääräisesti, jos ollenkaan määriteltävissä. Ne ovat listassa mukana lähinnä muistuttamassa kehityssuunnasta, jonka voisi tiivistää esimerkiksi: Kevyempi, helpommin ja turvallisemmin valmistettava, tarpeeksi jäykkä, kustannustehokas ja enemmän läpinäkyvää pintaa sisältävä ovilehti.

Ovilehden keventäminen antaa mahdollisuuden käyttää kevyempiä ja pienempiä toimilaitteita, jolloin toimilaitteiden sijoittaminen linja-autoon on helpompaa ja painon pienentämisen lisäksi säästetään tilaa ajoneuvon sisällä. Ovilehden painon pienentämisellä voidaan myös lisätä oven liikenopeutta.

Helpompi ja turvallisempi valmistus liittyy listalla esitettyihin vaatimuksiin kolmen D:n työvaiheiden (Dull, Dirty, Dangerous) välttämiseen. Näihin tyysiin, likaisiin ja vaarallisiin työvaiheisiin kuuluu tällä hetkellä ainakin alumiiniprofiilien hitsaus ja hitsaus-saumojen hionta. Valmistuksen helppouden piiriin kuuluu myös materiaalien työstettävyyden huomioiminen, sekä mahdollinen maalausten korvaaminen esim. alumiinin anodisoinnilla. Työvaiheiden sekä -menetelmien kehittämisellä voidaan myös mahdollisesti parantaa valmistuksen kustannustehokkuutta.

Oven tulee kestää myös siihen kohdistuvia rasituksia, joita syntyy esim. ajoviimasta, tärinästä ja matkustajien oveen kohdistamista tahallisista tai tahattomista voimista. Oven tarpeellista jäykkyyttä ei tässä yhteydessä tutkita tarkemmin, vaan todetaan että riittää kun saavutetaan tuotannossa olevaa ovea vastaava jäykkyys.

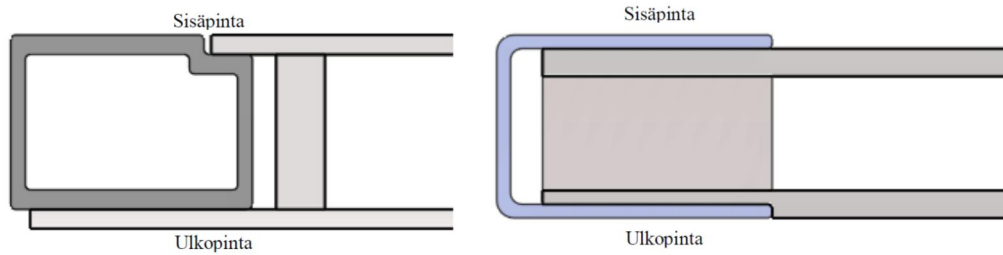
Oven ulkonäkö on tärkeä kilpailuvaltti. Tähän liittyy toiveet oven sileästä ulkopinnasta ja mahdollisimman suuresta läpinäkyvästä alueesta, joka kääntäen tarkoittaa mahdollisimman siroja tukirakenteita ikkunan reunalla. Mahdolliset värisävyt, hyvä läpinäkyvyys ja ikkunan huurtumisen estäminen liittyvät myös houkuttelevan ulkonäön luomiseen. Hyvä läpinäkyvyys ja huurtumisen estäminen ovat auton etuoven tapauksessa myös turvallisuutta parantavia ominaisuuksia.

8 UUDEN OVILEHDEN IDEOINTI

Ovilehden ideoinnissa lähdettiin liikkeelle halusta käyttää kovapinnoitettua polykarbonaattia ikkunamateriaalina. Ideointi jakautui käytännössä kahteen osaan: kiinnitysmenetelmiin ja riittävän jäykkyyden saavuttamiseen. Mahdollisia kiinnitysmenetelmiä käsiteltiin jo luvussa 4. Seuraavassa esitellään nopeasti muutamia ideoinnissa esille nousseita vaihtoehtoja ja lopulta ratkaisu jota päädyttiin kokeilemaan.

Luvussa kolme esiteltiin lämpölaajenemisen teoriaa, ja havainnollistettiin muutama oven suunnittelun ongelmakohta laskujen avulla. Luvun kolme laskujen perusteella on hyvin selvää, että lämpölaajeneminen tulee ottaa huomioon kun eri materiaaleja yhdistetään samaan tuotteeseen. Tällä hetkellä lämpölaajenemiserot käytettyjen materiaalien (alumiini ja lasi) välillä on kompensoitu käyttämällä elastista liimamassaa ikkunan kiinnittämiseen. Ikkunamateriaalin vaihto polykarbonaattiin voitaisiin liimavalmistajan ohjeiden mukaan kompensoida kasvattamalla liimasauman paksuutta. Esimerkiksi 2 m pitkän liimasauman paksuus tulisi olla 8 mm joka kasvattaa oven kokonaispaksuutta jo merkittävästi [Sika 1]. Luvussa 10 on esitelty ovi jossa ikkunalasi on suoraan korvattu muovi-ikkunalla.

Toinen vaihtoehto lämpölaajenemisen huomioimiseen on kiinnittää yhteen vain materiaaleja, joiden lämpölaajenemiskertoimet ovat hyvin lähellä toisiaan. Käytännössä tämä voisi tarkoittaa oven rakentamista liimaamalla tai hitsaamalla PC-ikkunaan tukirakenteita esim. PC-profiilista. Mahdollinen vaihtoehto voisi olla myös kahden PC-levyn väliin kiinnitettävät tukirakenteet, jolloin saataisiin luvussa 5 esitellyn kerroslevyteoriaa mukaileva rakenne. Ongelman edellä mainituissa vaihtoehtoissa tuottaa vaatimuslistan kohta, jossa vaadittiin uudelle ovelle samaa jäykkyyttä, kuin nykyiselle alumiiniprofiilista hitsatulle ovilehdelle. Edellä mainitut muovi-ikkunan ja muovijäykisteiden yhdistelmät voidaan jäykkyyden saavuttamiseksi lisä jäykistää esim. teräs- tai alumiiniprofiililla. Jälleen ongelmaksi voi muodostua lämpölaajeneminen. Metallijäykisteet ja muovinen ikkuna tulisi saada kiinnitettyä, niin etteivät lämpöjännitykset pääse rikkomaan muoviosia. Tähän ratkaisu voisi olla rakenne, jossa muoviosat ovat kelluvana rakenteena kiinni metallijäykisteissä. Kelluvan ikkunan tapauksessa saatetaan kuitenkin menettää ikkunan mahdollinen jäykistävä vaikutus, ja näin ollen tukirakennetta on jäykistettävä muuten. Kuvassa 7 on havainnollistettu vaihtoehtoisia profiiliratkaisuja ja ikkunoiden kiinnittämistä toisiinsa [Polvinen 2012].



Kuva 7: Vasemmalla: suljettu profiili (tumman harmaa,) jossa toisiinsa kiinnitetyt ikkunat ovat kelluvasti kiinni. Oikealla avoin U-profiili (siniharmaa), jonka sisälle ikkunat ja ikkunoita kiinnipitävä jäykiste on puristettu [Polvinen 2012]

Polykarbonaatin kovapinnoitteessa käytetyt piipohjaiset yhdisteet tekevät muovin pinnasta naarmuuntumattoman, mutta samalla pinta on hyvin haastava liimauksen ja hitsauksen kannalta. Yleinen neuvo liimavalmistajien ohjeissa onkin pinnoitteen poisto liimattavalta pinnalta [Jaakola 2011, Myllylä 2011]. Puhtaaseen polykarbonaattipintaan liimat yleisesti ottaen tarttuvat hyvin. Mahdollisuutta käyttää vain toiselta puolelta pinnoitettuja ikkunoita tuplaikkunana selvitettiin, mutta selvyttä tähän asiaan ei saatu.

Vaatimuslistaan kirjattiin vaatimus alumiinin hitsaaminen poistamisesta valmistusprosessista. Ruuvikiinnitys on toinen hyvin paljon käytetty alumiiniprofiilien liittämismenetelmä. Ruuvikiinnitys voidaan toteuttaa esimerkiksi ruuvitaskuilla, jotka ovat kiinteä osa alumiiniprofiilia tai erinäisillä välikappaleilla jotka yhdistävä profiilit toisiinsa. Standardiprofiileille on saatavissa monenlaisia kiinnitys kappaleita, jotka asennetaan joko profiilin uriin tai sisäpuolelle. Alumiiniprofiilin kehityksestä on kerrottu enemmän Jaakko Polvisen työssä [Polvinen 2012].

Lopulta täysikokoinen testiovi, joka esitellään luvussa 11, päädyttiin valmistamaan yhdistämällä alumiiniprofiilia ja muovi-ikkunoista sekä PVC-vaahdosta tehty kerroslevy kelluvaksi rakenteeksi (kuva 7 vasemmalla). Alumiiniprofiilin kiinnittämisessä päädyttiin ruuviliitoksen käyttöön, joka mahdollisti profiilien asentamisen kerroslevyissä olevaan uraan. Oven rakentaminen on tarkemmin esitelty kuvien kanssa luvussa 11. Ratkaisun lujuusopillista puolta on käsitelty Jaakko Polvisen diplomityössä [Polvinen 2012].

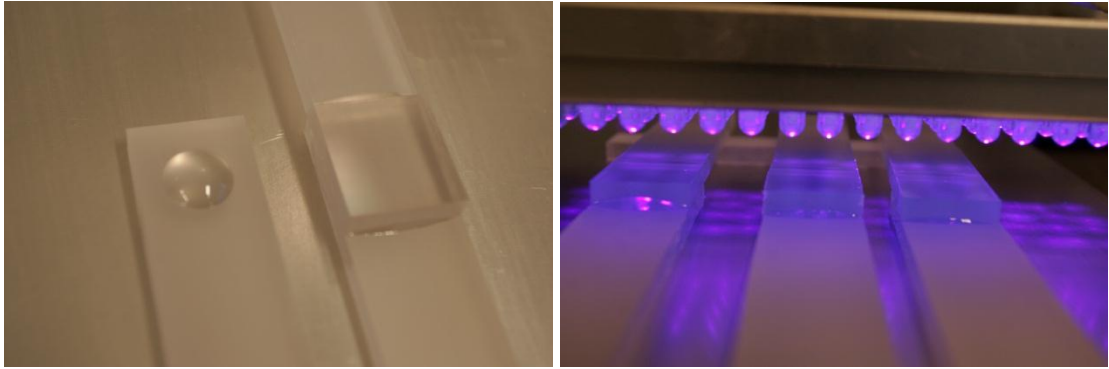
9 LIIMAUSTESTIT

Tässä luvussa esitetään tulokset liimaustesteistä, joita tehtiin tämän diplomityön puitteissa. Testeissä pyrittiin selvittämään kerroslevyrakenteen soveltuvuutta ovilehden jäykisteeksi ja ikkunoiden kiinnityksessä. Ensimmäisenä esitellään saatuja tuloksia UV-kovettuvan liiman kovetusaikatesteistä, sitten kerroslevyrakenteelle, jossa ydinaineena toimii polykarbonaattihunajakkenno ja liimana UV-kovettuva liima ja viimeiseksi kerroslevyrakenteelle jossa ydinaineena toimii PVC-vaaho. Kaikki mittaukset suoritettiin Muovi- ja elastomeeritekniikan laboratorion polymeerihallilla Messphysik MIDI 10-20/4X11 aineenkoestuskoneella. Testausjärjestelyt mukailevat kansainvälisiä standardeja ja soveltuvien osin, kuitenkin niin, että näytekappaleen mitat on valittu edustamaan luvussa 8 esiteltyä suunnitelmaa tuotteesta. Kaikki näytteet vakioitiin ennen testiä vähintään 24h standardiolosuhteissa: lämpötila 23 °C, suhteellinen kosteus 50 %.

9.1 Kovetusaikatesti UV-kovettuvalle liimalle

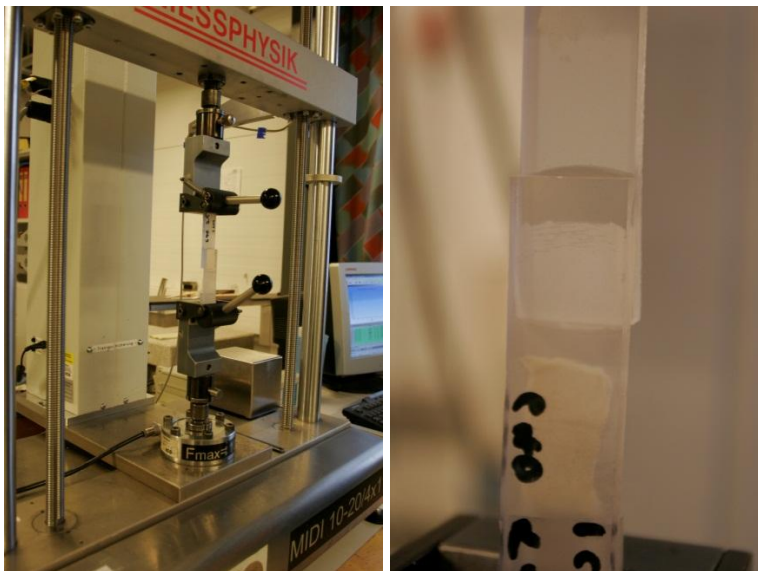
Ensimmäisenä testattiin liiman kovettumista kovapinnoitettujen PC-levyjen välissä. Sekä omissa alustavissa testeissä, että Permabond:n laboratorion testeissä todettiin, että loisteputkimalliset UV-lamput (Esim. Philips blb, Q-lab UVA-340) tuottavat UV-säteilyä liian lyhyillä aallonpituuksilla (maksimi-intensiteetti: Philips 365 nm, Q-lab 340 nm), jota PC-levy suodattaa hyvin tehokkaasti [Myllylä 2011]. Näin ollen liima ei kovetu kunnolla. Liimaustestejä varten saatiin Hot Melt Oy:ltä lainaan Easy Led Oy:n valmistama UV-ledvalaisin, joka tuottaa UV-säteilyä 405 nm aallonpituudella. Tällä valaisimella suoritettiin testejä, joissa pyrittiin selvittämään sopivaa kovetusaikaa liimalle.

Koekappaleet valmistettiin poistamalla kovapinnoite levyn toiselta puolelta hiekkapuhaltamalla ja leikkaamalla PC-levy 20mm levyisiksi soiroiksi. Seuraavaksi soivot pesittiin, kuivatettiin ja pyyhittiin isopropanoliin kastetulla liinalla. Näytteet liimattiin Permabond UV460 liimalla kuvan 8 mukaisesti ja kovetettiin UV-valolla 5, 10, 15 tai 25 min. Kuvassa 8 on esitetty myös liiman kovetus UV-valon avulla. Valaisimen etäisyys koekappaleista oli 1 cm.



Kuva 8: Näytekappaleen liimaus ja liiman kovetus UV-valolla

Testausjärjestely, joka on esitetty kuvassa 9, mukailee standardeja ASTM D 1002 ja SFS-EN 1465, joissa molemmissa määritetään liiman leikkauslujuutta single-lap—menetelmällä. Koekappaleen nimellinen liimapinta oli 20 mm x 25 mm ja vetonopeus 5 mm/min.



Kuva 9: Testausjärjestely ja tyypillinen vaurio testin aikana

Taulukossa 8 on esitetty testattujen kappaleiden kovetusaika, liimapinnan mitat, testin aikana saavutettu maksimivoima sekä edellisistä laskettu maksimijännitys liimapinnalla. Kuvassa 9 oikealla on esitetty tapa, jolla suurin osa koekappaleista hajosi. Käytännössä kaikki kappaleet hajosivat kohesiivisesti liimapinnalta. Koekappale numero 7 katkesi liimauksen molemmilta puolilta, eli vaurio syntyi polykarbonaatissa.

Taulukko 8: Kovetusaikatestien vetokoetulokset: liima-alueen mitat, testin aikana saavutettu maksimivoima ja liimasaumalle laskettu leikkausjännitys

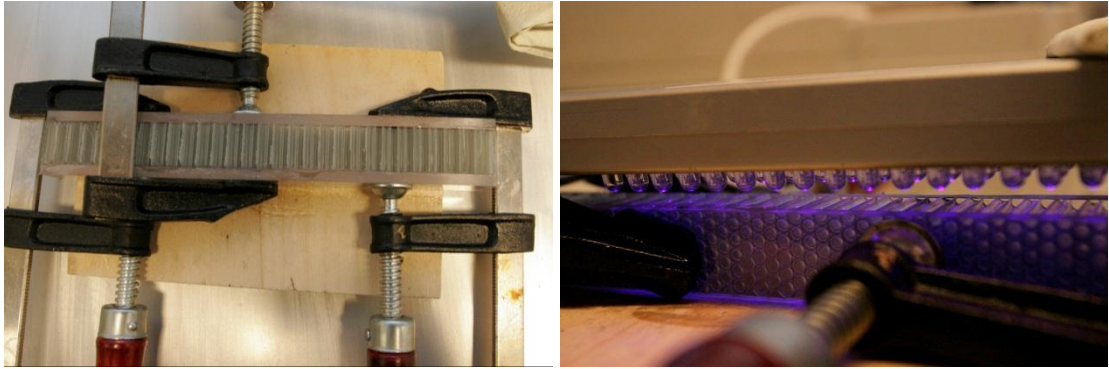
	Kovetusaika (min)	Leveys (mm)	Pituus (mm)	Voima (N)	Leikkausjännitys (MPa)
1	5	19.7	24.1	2062.9	4
2	5	19.9	22.7	1882.1	4
3	5	19.7	24.4	2041.6	4
4	10	19.8	25.3	1235.9	2
5	10	19.8	24.5	2063.0	4
6	10	19.4	23.3	1902.3	4
7	15	19.8	22.8	2849.7	6
8	15	19.7	30.2	1586.0	3
9	15	19.9	25.1	2155.1	4
10	25	19.6	25.2	2460.5	5
11	25	19.8	26.6	1781.2	3
12	25	19.9	25.5	2468.1	5

Keskimäärin kaikilla eri kovetusaajoilla maksimijännityksen arvoksi saatiin 4 MPa. Tuloksista voidaankin todeta vain että selkeää eroa eri kovetusaikojen välille ei saatu näin pienellä näytemäärällä. Näytemäärää kasvattamalla voitaisiin lisätä tarkkuutta ja nähdä mahdollisia eroja.

9.2 Kerroslevy PC-hunajakennolla

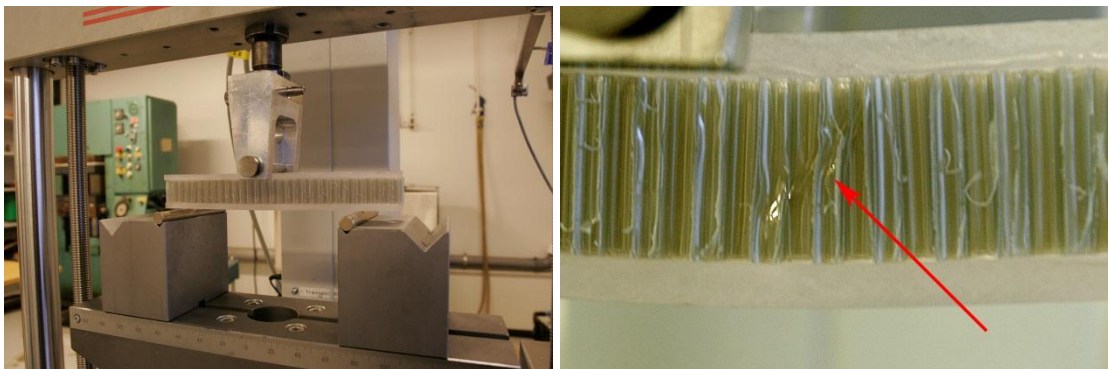
Ensimmäinen testattava kerroslevy koostui 20mm paksusta PC-hunajakennosta, UV-kovettuvasta liimasta ja 5mm paksuista PC-levyistä. Hunajakennon toimitti Italialainen Cel Components, Permabond UV632 ja UV640 liimat Hot Melt Oy ja KRD Sicherheitstechnicin KASI-PC Flex polykarbonaattilevyn Aikolon Oy.

Koekappaleiden valmistus aloitettiin kovapinnoitteen poistolla ja levyjen sekä hunajakennon sahauksella ja puhdistuksella. Koekappaleiden nimellimitat olivat pituus 200 mm, paksuus 30 mm ja leveys 20 mm. Alustavien kokeiluiden perusteella hieman korkeamman viskositeetin omaava UV640 todettiin helpommaksi käsitellä ja näin ollen se valittiin testissä käytettäväksi liimaksi. Liimaa levitettiin liimapinnalle runsaasti ja se tasoitettiin vaahtomuovipalalla. Liima kovetettiin kuvassa 10 esitetyllä tavalla, sivulta päin, jolloin säästyttiin tekemästä kovetusta erikseen kappaleen ylä- ja alapinnoille. Käytetty kovetusaika oli 10 minuuttia. Koekappaleet olivat kuitenkin niin pitkiä, että kovetus täytyi suorittaa kahdessa osassa, joten kappaleen keskiosa sai kaksinkertaisen säteilyannoksen.



Kuva 10: Testipaneelin liimaus ja kovetus UV-valolla

Kerroslevyn ominaisuuksia mitattiin kolmipistetäivutuksessa kuvan 11 mukaisesti viidellä koekappaleella. Mittaukset suoritettiin soveltuvien osien standardien ASTM C393 ja SFS-EN ISO 178 mukaan, käyttäen alatukien välisenä etäisyytenä 150 mm. Kuvassa 11 oikealla näkyy yleisin vauriotyyppi koekappaleissa: ytimen leikkautuminen. Toinen vauriotyyppi, joka esiintyi yleensä myöhemmässä vaiheessa ytimen leikkautumisen jälkeen, oli ytimen ja pintalevyn välisen liimakerroksen hajoaminen.



Kuva 11: Vasemmalla mittausjärjestely, oikealla tyypillinen vaurio testissä

Ytimen leikkausjännityksen laskemisessa käytettiin ASTM C393 standardin kaavaa numero 1:

$$\tau = \frac{P}{(d+c)b}, \quad (9)$$

missä τ on ytimen leikkausjännitys (MPa), P voima (N), d kerroslevyn paksuus (mm), c ytimen paksuus (mm) ja b kerroslevyn leveys (mm). Taivutusvenymä on määritelty standardin SFS-EN ISO 178 kaavassa 7:

$$\varepsilon_f = \frac{600sh}{L^2} \%, \quad (10)$$

missä ε_f on taivutusvenymä prosentteina, s on taipuma (mm), h koekappaleen paksuus (mm) ja L tukien välimatka (mm).

Taivutusjännitys on SFS-EN ISO 178 mukaan:

$$\sigma_f = \frac{3FL}{2bh^2}, \quad (11)$$

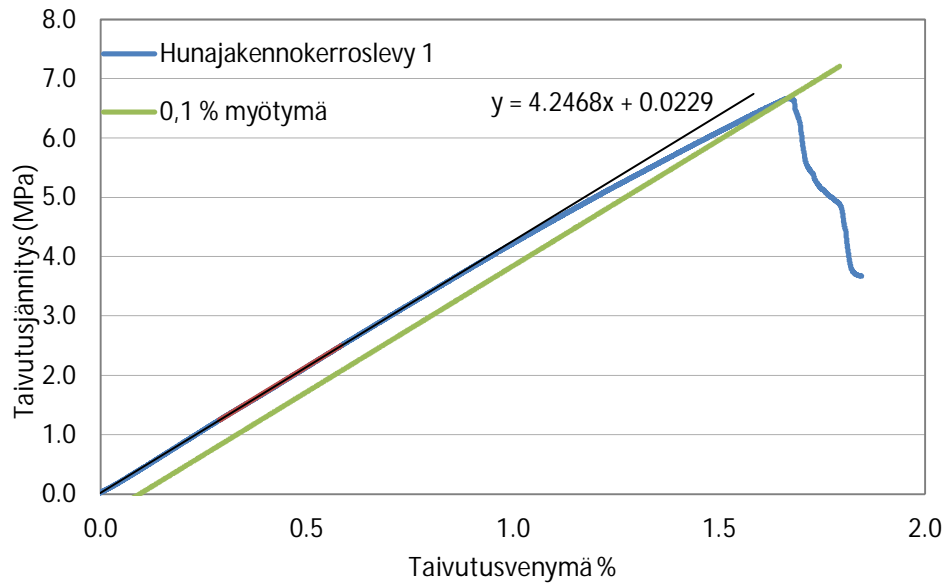
missä σ_f on taivutusjännitys (MPa), F mitattu voima (N), L tukien välimatka (mm), b koekappaleen leveys (mm) ja h koekappaleen paksuus (mm).

Taulukossa 9 on esitetty koekappaleiden mitat, maksimivoima ja näistä lasketut maksimikuormaa vastaavat taivutusjännitys ja ytimen leikkausjännitys.

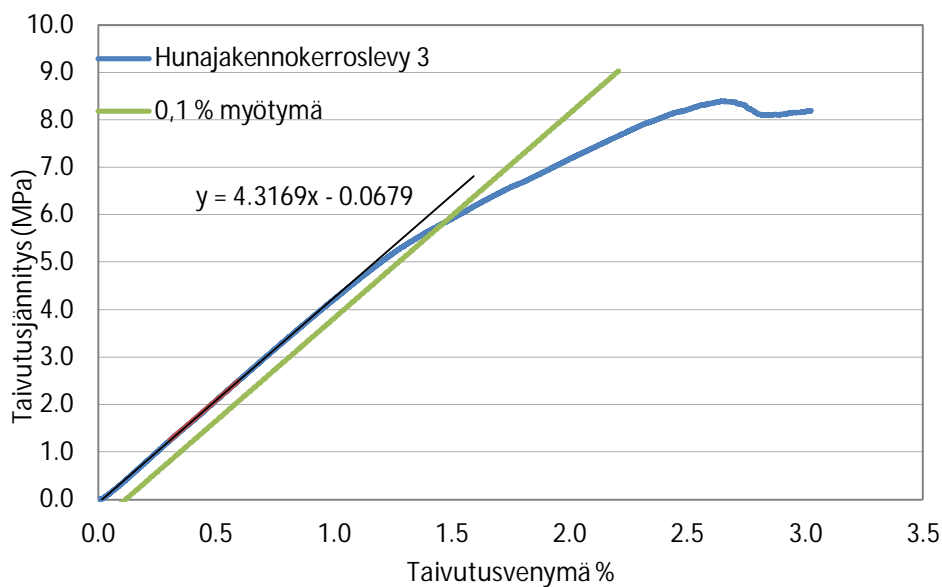
Taulukko 9: Koekappaleiden mitat, saavutettu maksimivoima ja -jännitykset

	Leveys (mm)	Paksuus (mm)	Voima (N)	Taivutusjännitys (MPa)	Ytimen leikkausjännitys (MPa)
1	19.7	29.6	534	7.0	0.55
2	19.7	29.6	853	11.1	0.87
3	19.8	29.6	672	8.7	0.68
4	19.6	29.6	807	10.6	0.83
5	19.8	29.6	690	8.9	0.70
Keskiarvo	20	30	711	9.3	0.7
Keskihajonta				1.6	0.1

Edellä esitettyjä maksimikuormitukseen perustuvia tuloksia ei kuitenkaan voi käyttää suunnittelussa lähtökohtana, koska koekappaleeseen alkaa syntyä vauriota jo paljon ennen maksimikuormitusta. Seuraavaksi pyritään selvittämään koekappaleiden myötöpiste. Metallien tutkimuksessa käytetään yleisesti, jos selkeää myötörajaa ei löydy, myötöjännityksenä 0,2 % myötymää vastaavaa jännitystä. Kuvaajassa 2 on esitetty yhden kerroslevyn taivutustestin jännitys-venymä-kuvaaja. Kuvaajassa näyttäisi olevan terävä myötöraja. Tämä ei kuitenkaan pidä tällaiselle koekappaleelle paikkaansa, kuten kuvaajasta 3 näkyy. Kuvaajassa 3 on esitetty toisen koekappaleen (näyte 3) jännitys-venymä-käyrä, joka edustaa paremmin muita koesarjan näytteitä, jossa terävää myötörajaa ei ole ja käyrä kaareutuu selvästi alun suoran osuuden jälkeen. Kuvaajissa on merkitty punaisella alue, josta suoran kulmakerroin on määritetty.



Kuvaaja 2: Jännitys-venymä-käyrä ja 0,1 % myötymää kuvaava suora näytteelle hunajakennokerroslevy 1



Kuvaaja 3: Jännitys-venymä-käyrä ja 0,1 % myötymää kuvaava suora näytteelle hunajakennokerroslevy 3

Käyrän kaareutumisesta johtuen päätettiin myötörajan määrittämiseen käyttää tiettyä myötymän arvoa kaikille näytteille. Myötörajaksi ei kuitenkaan valittu aiemmin esiteltyä 0,2 % rajaa, koska näyte numero 1 oli jo rikkoontunut 0,2 % myötymän arvolla. Myötörajaksi valittiin 0,1 % myötymää vastaava jännitys. Tämä näkyy kuvaajissa vihreänä 0,1 % tasamyötymää kuvaavana suorana. Taulukossa x on esitelty 0,1 % myötymää vastaavat jännitykset. Taulukosta 10 löytyvät teoreettiset jännitysarvot, joilla tämän tyyppinen kerroslevyrakenne alkaa hajota. Keskihajonta näytesarjassa on huomattavan suuri, joka kertoo näytteiden epätasaisesta laadusta.

Taulukko 10: 0,1 % myötymää vastaavat voiman ja jännitysten arvot

0,1% myötymää vastaava:	Voima (N)	Taivutusjännitys (MPa)	Ytimen leikkausjännitys (MPa)
1	533	6.9	0.55
2	719	9.4	0.74
3	466	6.0	0.47
4	611	8.0	0.63
5	669	8.7	0.68
Keskiarvo	600	7.8	0.6
Keskihajonta		1.3	0.1

Käytetyn ydinaineen leikkauslujuus on noin 1 MPa. Testikappaleet jäivät kuitenkin keskimäärin 40 % tästä teoreettisesta maksimista. Tähän luultavasti suurin syy on näytegeometria, joka ei noudattanut standardia. Standardin mukaan näytteen leveys tulisi olla vähintään kolme kertaa näytteen paksuus, jotta näyte noudattaisi laskuissa sovellettavaa kerroslevyteoriaa. Tässä tapauksessa näytteen leveys oli kuitenkin pienempi kuin näytteen paksuus, jolloin reunojen osuus näytekappaleen koko poikkipinta-alasta on merkittävä ja voi näin ollen vaikuttaa tuloksiin huomattavasti.

Liiman kovetusajan vaikutusta testattiin myös tällä kerroslevyrakenteella kahdella eri näytegeometrialla ja kahdella kovetusajalla. Tulokset, näytteiden leveys ja kovetusajat on esitetty taulukossa 11. Taulukosta nähdään että mittausten hajonta huomioiden ei kovetusajalla ollut merkitystä tuloksiin. Tuloksista nähdään kuitenkin näytteen leveyden kasvamisen pienentävän hajontaa, joka viittaa edellä mainittuun reunojen vaikutukseen näin pienissä näytteissä.

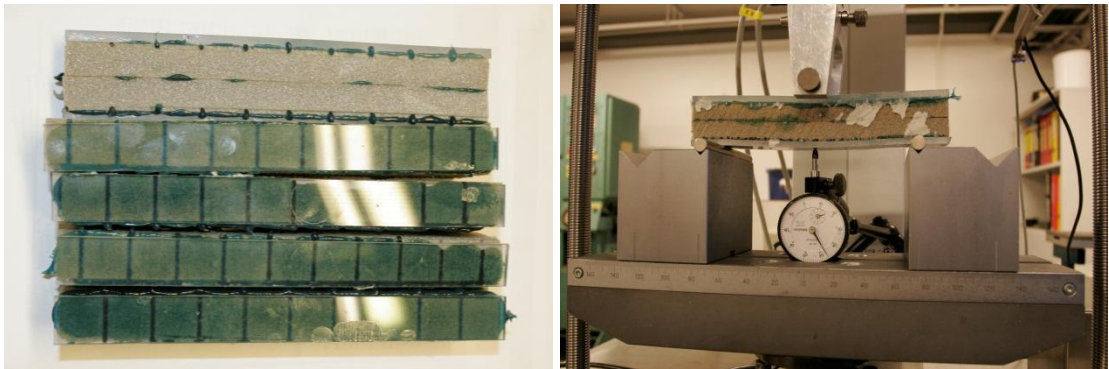
Taulukko 11: Kovetusaikatestin tulokset

Kovetusaika (min)	Leveys (mm)	Voima (N)	Taivutusjännitys (MPa)	Keskihajonta (Taivutusjännitys MPa)	Ytimen leikkausjännitys (MPa)	Keskihajonta (Ytimen leikkausjännitys MPa)
5	15	555	9.5	1.3	0.75	0.11
10	15	581	10.1	2.0	0.79	0.16
5	21	693	8.5	0.8	0.67	0.06
10	21	689	8.5	1.0	0.67	0.08

9.3 Kerroslevy PVC-vaahdolla

Toinen testattava kerroslevy koostui kahdesta yhteen liimatusta 15mm paksusta DIAB Divynycell H 80 PVC-vaahdosta, YTM Industrialin toimittamasta Plexus MA3940LH liimasta ja 5mm paksuista KRD Sicherheitstechnicin KASI-PC Flex polykarbonaattilevyistä.

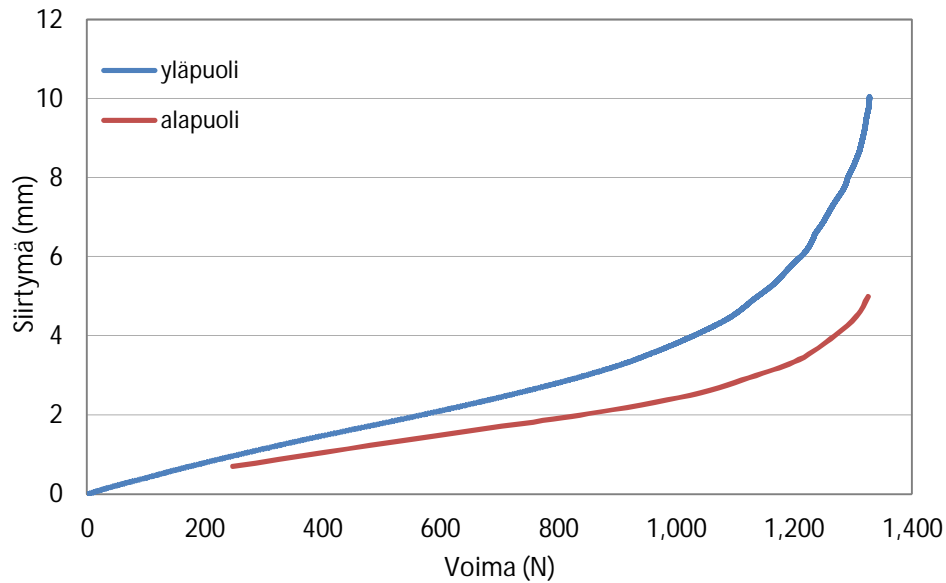
Koekappaleiden valmistus aloitettiin jälleen kovapinnoitteen poistolla, levyjen sekä vaahdon leikkauksella ja osien puhdistuksella. Testikappaleet liimattiin nopeasti kovettuvalla kaksikomponenttisella Plexus metakrylaattiliimalla ja puristettiin puristimilla kovettumisen ajaksi. Liiman avo aika on noin viisi minuuttia ja se saavuttaa n. 80 % lopullisesta lujuudesta kymmenessä minuutissa [Plexus 2004]. Kuvassa 12 on esitetty valmiit koekappaleet. Näytteissä näkyvät poikittaiset raidat johtuvat PVC-vaahdon pintakuvioinnista. Kuvassa näkyy myös liimasauva näytekappaleen keskellä vaahtokerros-ten välissä.



Kuva 12: Vasemmalla PVC-vaahtokerroslevy näytteet, oikealla mittausjärjestely

Kerroslevyn ominaisuuksia mitattiin, kuten luvussa 9.2, kolmipistetaivutuksessa. Huomattavin ero vaahdon ja hunajakennon välillä oli vaahdon kokoon painuminen testin aikana, ja palautuminen kuormituksen poiston jälkeen. Vaahtoydin kesti näin ollen suurempia, ja jopa toistuvia muodonmuutoksia ilman koekappaleen hajoamista. Koekappaleisiin ei käytännössä syntynyt silmin nähtäviä vaurioita pois lukien yläpainimen PC-levyyn tekemät pienet painumat.

Vaahdon kokoon painumista seurattiin kuvan 12 (oikealla) mukaisesti mittakellolla kappaleen alapinnalla. Koekappaleen kokoon painumista on esitelty kuvaajassa 4. Kuvaajasta 4 nähdään, kuinka ero kappaleen ylä- ja alapuolen siirtymissä kasvaa voiman kasvaessa. Kuvaajasta nähdään myös että voiman arvoilla 0 – 900 N siirtymä kasvaa lähes lineaarisesti, jonka jälkeen kappale alkaa myötään ja siirtymä kasvaa suhteessa nopeammin kuin sen aiheuttava kuormitus.



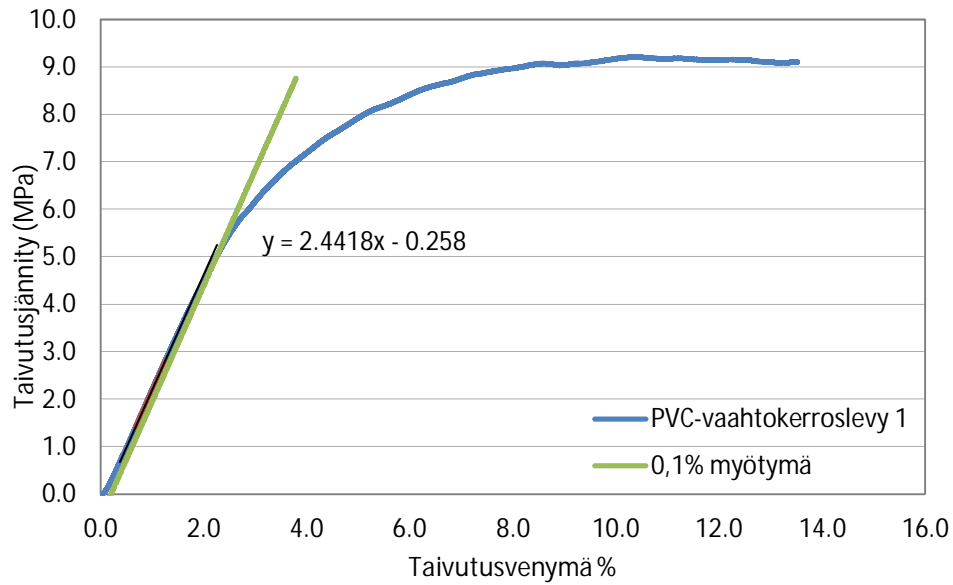
Kuvaaja 4: Koekappaleen ylä- ja alapuolen siirtymä voiman funktiona

Kerroslevylle laskettiin luvun 9.2 tapaan taivutus- ja ytimen leikkausjännitys testin aikaisen suurimman voiman mukaan. Nämä tulokset on esitelty taulukossa 12. Tulosten keskihajonnoissa on selkeä parannus verrattuna hunajakennokerroslevyyn, mistä voidaan päätellä näytteiden olevan homogeenisempiä.

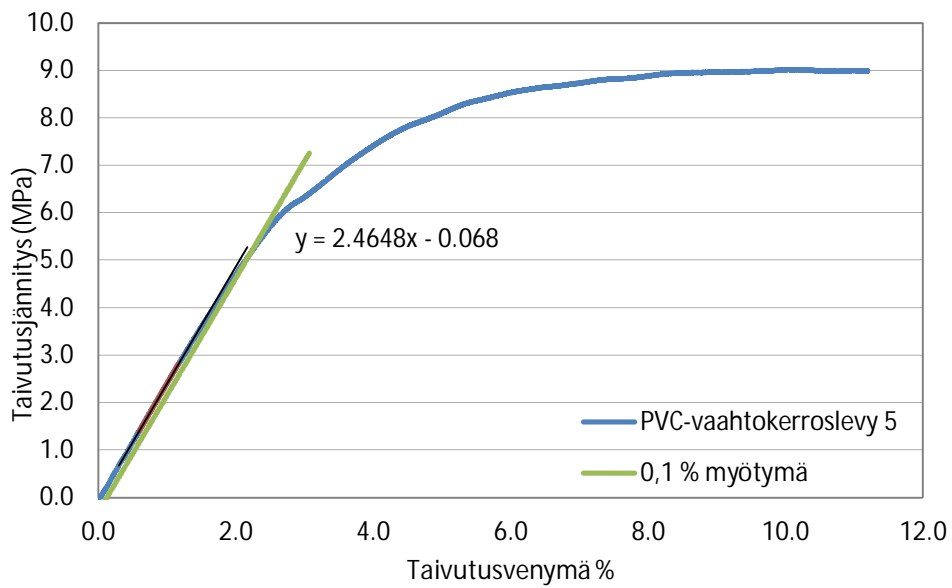
Taulukko 12: Koekappaleiden mitat, saavutettu maksimivoima ja -jännitykset

	Leveys (mm)	Paksuus (mm)	Voima (N)	Taivutusjännitys (MPa)	Ytimen leikkausjännitys (MPa)
1	19.8	40.2	1310	9.2	0.94
2	19.7	40.9	1328	9.1	0.95
3	20	40.4	1338	9.2	0.95
4	20	40.5	1360	9.3	0.96
5	20.1	39.8	1283	9.1	0.91
Keskiarvo	20	40	1324	9.2	0.94
Keskihajonta				0.1	0.02

Maksimikuormitustulokset eivät kuitenkaan kerro koko totuutta. Määritetään kuten edellä myötöraja PVC-vahtokerroslevy näytteille. Kuvaajissa 5 ja 6 on esitelty kahden koekappaleen jännitys-venymä-käyrät ja myötörajan määrittämisessä käytetty 0,1 % myötymää kuvaava suora.



Kuvaaja 5: Jännitys-venymä-käyrä ja 0,1 % myötymää kuvaava suora näytteelle PVC-vahtokerroslevy 1



Kuvaaja 6: Jännitys-venymä-käyrä ja 0,1 % myötymää kuvaava suora näytteelle PVC-vahtokerroslevy 3

Taulukossa 13 on esitelty 0,1 % myötymää vastaavat jännitykset ja voimat.

Taulukko 13: 0,1 % myötymää vastaavat voimat ja jännitykset

0,1% myötymää vastaava:	Voima (N)	Taivutusjännitys (MPa)	Ytimen leikkausjännitys (MPa)
1	719	5.1	0.52
2	852	5.8	0.61
3	711	4.9	0.50
4	892	6.1	0.63
5	732	5.2	0.52
Keskiarvo	781	5.4	0.56
Keskihajonta		0.5	0.06

9.4 Yhteenveto taivutustesteistä

Testin tarkoituksena oli vertailla kahden erilaisen kerroslevyn taivutusominaisuuksia ja sopivuutta käyttökohteeseen. Ovirakenne tuetaan esim. alumiiniprofiileilla, joten kerroslevyn ei oleteta kantavan oveen kohdistuvia kuormia. Rakenteen tulisi kestää pieniä taipumia, joita linja-auton oveen syntyy, särkymättä. Taipumien absoluuttiseen arvoon ei tässä yhteydessä oteta kantaa vaan kerroslevyjä vertaillaan niiden kestämiensä jännitysten ja taivutusvenymien perusteella. Tuloksia tarkastellessa tulee pitää mielessä etteivät näytekappaleet olleet samankokoisia, joten arvojen toisiinsa vertaaminen suoraan ei ole järkevää.

Taulukoon 14 on kerätty myötörajaa kuvaavat jännitysarvot. Taulukkoon on myös kirjattu syntykö testin aikana näytteeseen näkyviä tai tuotteen hylkäämiseen johtavia vaurioita. Taulukon 14 numeroarvoja tutkailtaessa näyttäisi siltä, että hunajakennokerroslevy olisi hieman parempi vaihtoehto suuremman taivutusjännityksen ansiosta. Kuitenkin tarkasteltaessa edellisten lukujen jännitys-venymä-käyriä ja näytteiden vaurioita nähdään että hunajakennokerroslevyt hajoavat hyvin pienillä taivutusvenymän arvoilla. PVC-vahtokerroslevyssä ei testeissä tapahtunut katastrofaalisia, mahdollisesti käyttöä estäviä, vaurioita ollenkaan. PVC-vahtokerroslevylle on taulukossa annettu pienempi taivutusjännityksen arvo, mutta tehtyjen havaintojen perusteella voidaan sen olettaa kestävän suurempiakin kertaluontoisia tai toistuvia jännityksiä ilman katastrofaalisia seurauksia. PVC-vahto on siis parempi vaihtoehto ydinmateriaaliksi tässä tapauksessa.

Taulukko 14: Testattujen näytteiden jännitysten keskiarvot ja näkyvät vauriot

	Taivutusjännitys (MPa)	Ytimen leikkausjännitys (MPa)	Vaurioita näytteessä
Hunajakennokerroslevy	8	0.6	Kyllä
PVC-vahtokerroslevy	5	0.6	Ei

10 PERINTEINEN OVI MUOVI-IKKUNALLA

Touko-kesäkuussa 2011 tehtiin prototyyppi uudesta sähkökäyttöisestä pariovesta, jonka yhteistyö-liikennöitsijä otti testiin yhteen autoonsa. Oven karmi on alumiinia, johon ikkuna ja tiivisteet on kiinnitetty. Ovesa oli tarkoitus käyttää perinteistä lasi-ikkunaa, mutta toimitusvaikeuksista johtuen päätettiin turvautua muovi-ikkunaan. Ikkunaksi valittiin Aikolon Oy:n toimittama ja KRD Sicherheitstechnikin valmistama KASI-PC flex kovapinnoitettu polykarbonaattilevy. 5 mm paksu PC-levy toimitettiin muotoon leikatuna. Levyn reunoille oli valmiiksi maalattu musta Sika Primer 209 D. Kuvassa 14 vasemmalla nähdään primer-reunus ikkunassa.



Kuva 14: Vasemmalla: primer-reunus ikkunassa ja sen aktivointi. Oikealla: liimamasan levitys

Liimaus suoritettiin pääosin Sikan ohjeistuksen mukaan [Sika 2]. Primer pinta oli useita päiviä vanha, joten se aktivoitiin uudelleen Sika Aktivator pyyhinnällä Sikan ohjeistuksen mukaan [Sika 3]. Ovilehden alumiinikarmin liimattava pinta hiottiin ja puhdistettiin Sika Aktivator 205 (Cleaner 205). Seuraavaksi pintaan levitettiin pensselillä Sika Primer 210. Liima (Sikaflex 295 UV) levitettiin kolmion muotoisena nauhana kuvan 14 (oikealla) mukaan. Seuraavaksi muovilevy asetettiin paikalleen. PC levy taipui kaarevan oven mukaiseksi itsestään, eikä sitä näin ollen tarvinnut tukea paikalleen puristimilla. Kuvassa 15 vasemmalla on ikkuna liimattuna karmiin.



Kuva 15: Vasemmalla: ikkuna liimattuna karmiin. Oikealla: Ovi kiinnitettyä paikalleen linja-autoon

Ohjeistuksen mukaan tulisi n.2 m pitkän ikkunan liimasauman paksuus olla 8mm [Sika 1]. Tässä tapauksessa liimasaumasta ei voitu tehdä näin vahvaa, koska ovi oli alun perin suunniteltu lasi-ikkunalliseksi, jolloin liimasauman paksuus on pienempi. Lopullinen liimasauman paksuus oli n. 4 mm. Kuvassa 15 oikealla ovet on kiinnitetty paikalleen linja-autoon.

10.1 Käyttökokemukset

Testikäytössä ollutta ovilehteä arvioitiin tammikuussa 2012. Alla on esitetty kuvien avulla ikkunan puolen vuoden aikana kärsimät vauriot (kuva 16). Noin puolen vuoden käytön aikana ovi on kärsinyt loppukesän helteet ja syksyn loskakelit, mutta erityisen kovia pakkasia ei jaksoon osunut. Etukäteen arvioitiin suurien lämpötilan vaihteluiden tuottavan suurimmat ongelmat ovessa olevan liian ohuen liimasauman vuoksi. Liimasauman kuntoa ei kuitenkaan tässä yhteydessä päästä tutkimaan. Ikkuna on ilmeisesti kestänyt helteet pahemmin vääntyilemättä, koska tästä ei liikennöitsijän edustajalla ollut valittamista.

Kuvassa 16 vasemmalla ja keskellä näkyy mustan primer-pinnan yläosassa harmaantumista. Tällainen muutos oli odotettavissa, koska ikkunassa ei ollut UV-suojausta. Pelkkä ikkunaan maalattu primer ei kestä UV-säteilyä ja se alkaa hajota. Harmaantuminen on merkki primerissa tapahtuvasta hajoamisesta, joka johtaa lopulta adheesioon menetykseen [Jaakola 2011]. Suoraan ikkunaan maalattu suojaamaton primer ei siis sovellu käyttöön. Harmaantuminen on ikkunassa paikallista, vaikkakin useassa kohdassa, ja se näyttää liittyvän primerin levitystapaan. Primer on maalattu ikkunan pintaan ja harmaantuneet kohdat näyttävät esiintyvän kohdissa, joissa levitys on keskeytynyt, kun sutia on kostutettu lisää. Harmaantuminen voi siis liittyä eroihin primer-kerroksen paksuudessa. Primer-kerroksen harmaantumista tulee seurata jatkossakin, koska se voi pa-

himmillaan johtaa ikkunan irtoamiseen. Tällä hetkellä ikkuna kuitenkin tuntui olevan vielä hyvin paikallaan.

Kuvassa 16 vasemmalla ja keskellä näkyy myös auton päivittäisen pesemisen ikkunalle aiheuttama rasite. Ikkuna on käytännössä täysin naarmuuntunut. Naarmut ovat selkeästi pienempiä kuin viereisessä lasi-ikkunassa, mutta niitä näyttää olevan enemmän. Täytyy myös muistaa että viereinen lasi-ikkuna on tehdasasennettu ja ollut siis käytössä vuosia.



Kuva 16: Vasemmalla: harmaantumista primerpinnassa, keskellä: suurennettu kuva naarmuista, oikealla: primerin lohkeilua

Soili Kalliokosken diplomityössä testattiin kovapinnoitetun polykarbonaatin pesunkestoa ja se todettiin yhtä hyväksi lasin kanssa, eikä muovi naarmuuntunut käytännössä ollenkaan testeissä [Kalliokoski 2011]. Nyt kuitenkin näyttäisi että kovapinnoitettu polykarbonaatti naarmuuntuu käytössä todella nopeasti. Syy eroihin pesutestien ja todellisen käytön välillä on luultavasti se, että pesulatesteissä näytteet olivat aluksi puhtaita, kun taas linja-autot pesuun tullessaan voivat olla hyvinkin pölyisiä ja hiekkaisia, mikä yhdistettynä harjaamiseen naarmuttaa ikkunoita hyvin tehokkaasti. Naarmuuntumisen kehitystä tulisi seurata ja mitata vaikuttaako naarmuuntuminen jo oven läpinäkyvyyteen, ja määrittää missä vaiheessa naarmuuntumisesta tulee käyttöä estävä esteettinen haitta.

Kuvassa 16 oikealla näkyy kolmas vauriotyyppi ikkunassa. Näyttäisi siltä, että primer on tässä kohdassa lohkeillut irti ikkunasta ja alla oleva alumiini pinta olisi tullut näkyviin. Tätä on kuitenkin hankala todistaa, koska ikkuna pitäisi irrottaa tilanteen tutkimiseksi. Vaurio voisi mahdollisesti olla myös esim. kosteutta, joka olisi päässyt primerin ja muovin väliin.

Yhteenvedona tästä puolen vuoden testikäytöstä voidaan todeta, että ikkuna kesti käytön ja naarmuuntuminen on ainoa vaurio jota ei olisi voitu estää valmistukseen panostamal-

la. Kuvasta 16 nähdään hyvin, että ikkunan UV-suojaus on pakollinen sekä ikkunan kestävyden, että ulkonäön kannalta. Naarmuuntuminen vaatii lisätutkimusta todellisessa käytössä. Sallittu naarmuuntumis-aste ja -nopeus tulisi myös määrittää, jotta voitaisiin arvioida olisiko muovi-ikkuna todellinen vaihtoehto lasiselle.

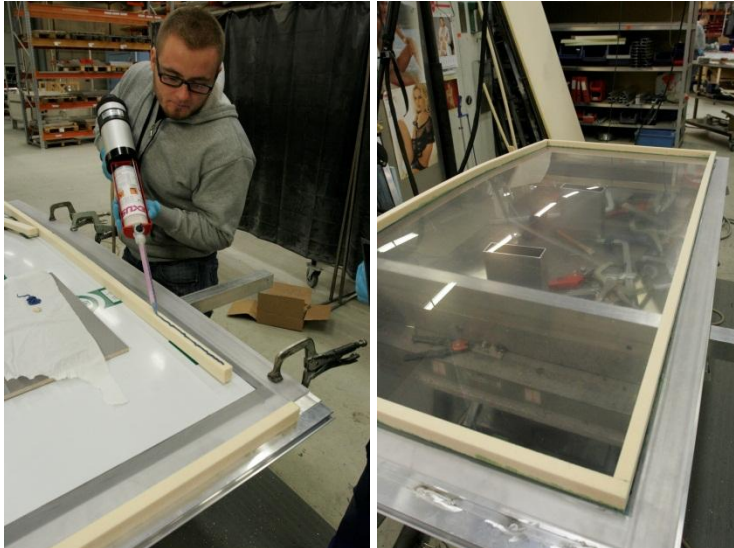
11 UUSI OVI MUOVI-IKKUNALLA

Luvussa 8 esiteltiin ideoita uudeksi ovityypiksi. Täysikokoinen testiovi päätettiin tehdä hyödyntäen alumiiniprofiilia, johon hitsattiin ruuvitaskut. Tuotantovaiheessa profiili pursotettaisiin valmiiksi ruuvitaskujen kanssa, mutta tähän prototyyppiin ei löytynyt sopivia valmiita profiileita, joten ruuvitaskut asennettiin jälkikäteen profiiliin. Ruuvitaskut näkyvät kuvassa 17, jossa on eritelty myös ovesta käytetyt osat. Kuvassa 17 oikealla näkyy kovapinnoitteen poisto liimausalueelta hiomalla. Hionnan jälkeen PC-levyn pinta puhdistettiin hiontapölystä ja sormenjäljistä imuroimalla ja pyyhkimällä isopropanolilla.



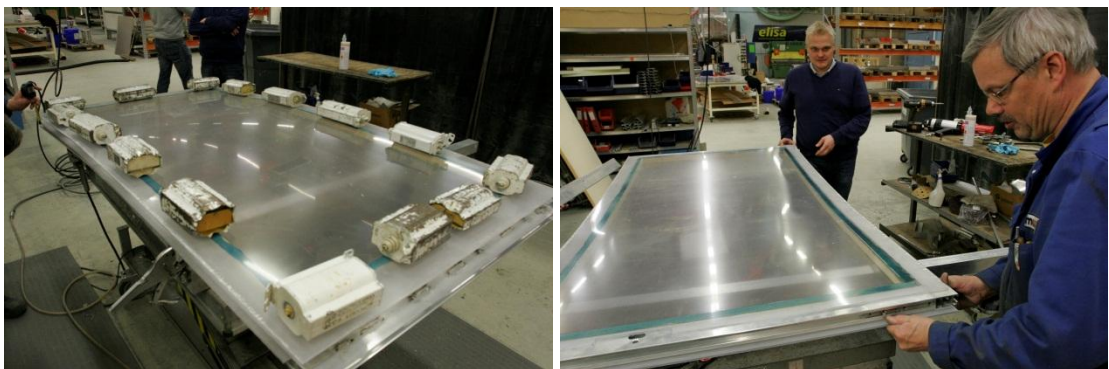
Kuva 17: Vasemmalla leikkauskuva testioven rakenteesta, oikealla kovapinnoitteen poisto PC-levystä

30 mm paksu DIAB Divinycell H100 PVC-vaahdo leikattiin sirkelillä 20mm leveiksi soiroiksi ja puhdistettiin pölystä ja rasvasta kuten PC-levykin. Valmistettava ovityyppi oli hieman kaareva. Kaarevuus saatiin ikkunaelementtiin aikaiseksi liimaamalla ikkunaelementti kaarevan alumiiniprofiilin päällä. Käytetty liima oli samaa Plexus kasikomponenttimetakrylaattiliimaa, jota käytettiin liimaustestissä luvussa 9.3. Liima levitettiin PVC-vaahdon pintaan kuvan 18 mukaan paineilmatoimisella annostelulaitteella. Vaahতোsoiro asetettiin paikalleen ja painettiin kevyesti, jotta liima leviäisi tasaisesti. Vaahতোsoiron päälle asetettiin painoja luomaan painetta liimasaumaan ja ylimääräinen liima pyyhittiin pois. Sama toistettiin jokaiselle ikkunan reunalle, jonka jälkeen ikkunaelementti oli kuvan 18 (oikealla) mukaisessa vaiheessa. Jo tässä vaiheessa huomattiin liiman nopean kovettumisen tuovan ongelmia ikkunan pitkien sivujen liimaamisessa.



Kuva 18: Vasemmalla liiman levitys PVC-vaahtoon, oikealla PVC-vahto liimattuna PC-levyyn

Seuraavassa vaiheessa päällimmäinen ikkuna liimattiin yhdellä kertaa kiinni joka reunalta, joka aluksi huoletti liiman nopean kovettumisen ja sisäpuolelle jäävien purseiden takia. Liiman levitys kuitenkin, hieman yllättäen, onnistui tarpeeksi nopeasti ja ikkuna saatiin kerralla oikealle kohdalle. Kuvassa 19 liimasauma jätettiin kovettumaan painojen alle. Seuraavaksi alumiiniprofiilit asennettiin paikoilleen ikkunoiden väliin jääneeseen uraan (kuva 17 vasemmalla ja 19 oikealla).



Kuva 19: Vasemmalla päällimmäisen PC-levyn liimaus painojen avulla, oikealla alumiiniprofiilin asennus

Valmis ovi asennettiin testauspenkkiin, jossa sitä voidaan avata ja sulkea kuten oven ollessa käytössä linja-autossa. Kuvassa 20 ovi on asennettuna testauspenkkiin.



Kuva 20: Valmis ovi testipenkissä

Prototyypin valmistuksesta oli paljon erilaisia ongelmia, joista voidaan ottaa oppia. Eri-tyisesti vaikeuksia tuotti tuotantotiloissa oleva pöly. Muovilevyt varautuvat staattisesti niitä käsiteltäessä, ja näin huoneilmassa, vaatteissa ja työtasoilla oleva pöly ja roskat tarttuvat ikkunalevyihin hyvin herkästi ja niiden puhdistaminen kokonaan ikkunan pinnasta on lähes mahdotonta. Tämän tyyppinen työ tarvitsee selkeästi puhtaamman tilan, kuin nyt oli käytettävissä. Liimaus tuotti vaikeuksia monellakin tapaa. Esimerkiksi siistin liimasauman tekeminen on hyvin tarkkaa ja aikaa vievää työtä, joka ei onnistu, jos käytettävä liima kovettuu liian nopeasti. Liimattavien osien kohdistaminen toisiinsa on myös haastavaa ilman työhön soveltuvaa muottia tai tukia.

Valmistetun oven ulkonäössä on paljon parantamisen varaa. Kaikki oven sisällä käytetyt tukirakenteet ja kiinnitykset näkyvät ulkopinnan läpi, joten kaikki valmistus virheet näkyvät. Hyvä ratkaisu oven sisäosien piilottamiseen katseelta voisi olla kehitteillä oleva sieve print-painatus ikkunan reunalla [Kalliokoski 2011, Hahtonen 2011].

Tällaisenaan valmistettu prototyyppi on aivan liian vaikeasti valmistettava, eikä ole myöskään varmaa onko tällä rakenteella saavutettu mitään muuta etua kuin painonsäätö. Jotta mahdollisista saavutetuista hyödyistä saataisiin tietoa, tulisi ovea testata ja ainakin ruuviliitosten ja ikkuna elementin osalta määrittää niiden jäykkyys ja värähtelyominaisuuksia.

12 JOHTOPÄÄTÖKSET

Kokoajan tiukentuvat päästötavoitteet luovat jatkuvan tarpeen ajoneuvojen keventämiselle. Perinteistä terästä korvataan kevyemmällä metalleilla ja lujitemuoveilla ja lasi-ikkunoita korvataan muovisilla. Henkilöautopuolella muovi-ikkunoita on käytetty jo pitkään ja muovin muotoiluun tuomia vapauksia osataan jo hyödyntää merkittävästi. Henkilöautopuolella on jo useita valmistajia, jotka ovat erikoistuneet muovi-ikkunoiden valmistukseen, mutta pienempien valmistusmäärien takia raskaan kaluston lasitukset tehdään edelleen pääasiassa lasilla.

Tässä työssä kehitettiin konsepti muovi-ikkunallisesta linja-auton ovesta, jonka pohjalta kehitystyötä voidaan jatkaa. Työn aikana muovi-ikkunan käyttöä seurattiin yhden testioven osalta. Tästä testistä saatiin tietoa muovin kulumiskestävydestä todellisissa olosuhteissa. Testin perusteella lasi vaikuttaa edelleen kulumiskestävyytensä ansiosta paremmalta ikkunamateriaalilta.

Työssä käsiteltiin muovi-ikkunoiden kiinnitysmenetelmiä ja lämpölaajenemisen tuomia ongelmia. Lämpölaajenemisen huomioiminen on tärkeää ja työssä on annettu siihen ratkaisuvaihtoehtoja. Prototyypiovessa päädyttiin käyttämään kerroslevytyyppistä rakennetta, jonka rakennevaihtoehtoja ja liimaamista tarkasteltiin liimaus- ja taivutustestein. Testien perusteella prototyypiovi päätettiin valmistaa alumiiniprofiileista ruuviliitoksien ja näihin kelluvasti kiinnitetystä kerroslevytyyppisestä tuplaikkunasta. Näin saavutettiin rakenne, jossa lämpölaajeneminen on huomioitu ja rakenne on tarpeeksi jäykkä. Ratkaisu toi myös painon säästöä verrattuna lasi-ikkunalliseen versioon. Prototyypin valmistuksessa tuli vastaan monia vaikeuksia, eikä rakenne tällaisenaan ole valmistettavissa sarjatuotantona.

Konseptin jatkokehittely, erityisesti valmistuksen osalta, vaatii vielä paljon työtä. Jatkon kannalta tärkeitä tutkimus kohteita ovat muovi-ikkunallisen oven valmistettavuuden kehittäminen ja muovi-ikkunoiden kulumiskestävyuden arviointi todellisessa käyttöympäristössä. Myös ovilehdeltä vaadittavien ominaisuuksien määrittäminen olisi tärkeää. Tässä työssä käytetyt suunnittelukriteerit, joiden mukaan uusia rakenteita verrataan vain jo tuotannossa oleviin ratkaisuihin, eivät ole järkeviä. Muovi-ikkunallinen ovilehti ei ole vielä mahdollinen, mutta kunhan valmistuksen ongelmat saadaan selvitettyä aukeaa ovien suunnitteluun aivan uusia mahdollisuuksia.

LÄHTEET

Kalliokoski, Soili. Kulumiskestävä läpinäkyvä muovimateriaali kuljetussovelluksiin. Diplomityö. 2011. Tampereen teknillinen yliopisto.

UNECE, Regulation No. 43 UNIFORM PROVISIONS CONCERNING THE APPROVAL OF SAFETY GLAZING MATERIALS AND THEIR INSTALLATION ON VEHICLES, 2004, Saatavissa: <http://www.unece.org/trans/main/wp29/wp29regs41-60.html>

Arla Plast, Saphir datasheet,2010, viitattu 29.11.2011, saatavissa: <http://www.arlaplast.com/en/Catalog/ProductSheet/transparent-products/saphir>

Arla Plast, ECE R43 approval for SAPHIR™ and SAPHIR™ COLORADO 2011

Smith, Chris. PC automotive glazing means more than weight saving. European Plastic News 3.3.2011 www-lähde, viitattu 5.12.2011, saatavilla: <http://www.europeanplasticsnews.com>

BayNews. First panoramic roof made of polycarbonate for electrohydraulic convertible top. 19.10.2011. www-lähde, viitattu 5.12.2011, saatavilla: <http://www.press.bayer.com/baynews/baynews.nsf/id/First-panoramic-roof-made-of-polycarbonate-for-electrohydraulic-convertible-top>

ASM International. Materials Properties Database Committee. ASM ready reference: Thermal properties of metals, Chapter 2 Thermal Expansion. 2002

Pilkington. Perustietoa lasista 2009, viitattu 15.12.2011 saatavissa: <http://www.pilkington.com/resources/fi6880perustietoalasista.pdf>

Ticona. Designing With Plastics: The Fundamentals. 2006 saatavissa: <http://www.scribd.com/doc/31295692/Designing-Plastic-Components>

Jaakola, Jukka. Sika Finland. Puhelin ja sähköpostikeskustelut vuoden 2011 aikana.

Burchardt, B. R., & Merz, P. W. (2006). Chapter 6 elastic bonding and sealing in industry. In Philippe Cognard (Ed.), *Handbook of adhesives and sealants* (pp. 355-480, xlii) Elsevier Science Ltd.

Petrie, Edward M. (2000). Handbook of Adhesives and Sealants. McGraw-Hill. Online version available at: http://www.knovel.com/web/portal/browse/display?_EXT_KNOVEL_DISPLAY_bookid=610&VerticalID=0

Troughton, Michael J. (2008). Handbook of Plastics Joining - A Practical Guide (2nd Edition). William Andrew Publishing.

Online version available at:

http://www.knovel.com/web/portal/browse/display?_EXT_KNOVEL_DISPLAY_bookid=2292&VerticalID=0

Cognard, Philippe (2006). Handbook of Adhesives and Sealants, Volume 2 - General Knowledge, Application of Adhesives, New Curing Techniques. Elsevier.

Online version available at:

http://www.knovel.com/web/portal/browse/display?_EXT_KNOVEL_DISPLAY_bookid=4040&VerticalID=0

Petrie, Edward M. (2007). Handbook of Adhesives and Sealants (2nd Edition). McGraw-Hill.

Online version available at:

http://www.knovel.com/web/portal/browse/display?_EXT_KNOVEL_DISPLAY_bookid=3317&VerticalID=0

Jansson Juha. YTM Industrial. Keskustelut ja sähköpostikirjeenvaihto vuoden 2011 aikana.

Viennamo, Nykänen, Muovimuotoilu, Taideteollinen korkeakoulu, 2011, www-lähde, saatavilla: www.muovimuotoilu.fi viitattu 20.10.2011

Miracle, Daniel B.; Donaldson, Steven L. (2001). ASM Handbook, Volume 21 - Composites. ASM International.

Online version available at:

http://www.knovel.com/web/portal/browse/display?_EXT_KNOVEL_DISPLAY_bookid=3139&VerticalID=0

Marshall, Andrew C. Chapter 12: Sandwich construction, Handbook of Composites (2nd Edition) (1998). Springer - Verlag.

Online version available at:

http://www.knovel.com/web/portal/browse/display?_EXT_KNOVEL_DISPLAY_bookid=359&VerticalID=0

DIAB. Divynycell, ProBalsa www-lähde, viitattu 5.12.2011, saatavissa: www.diabgroup.com

CEL Components. Light honeycomb cores. www-lähde, viitattu 5.12.2011, saatavissa: http://www.honeycombpanels.eu/eng/componenti_pannelli_sandwich/componenti_pannelli_sandwich.php

About MonoPan®, www-lähde, www.monopan.ca/about/ viitattu: 7.11.2011

Polvinen, Jaakko. Ajoneuvon oven rakenteen kehittäminen. Diplomityö. 2012. Tampereen teknillinen yliopisto

Sika Services AG. 1. PC-PMMA windows bonding dimensions.

Myllylä, Antero. Hot Melt Oy, Permabond maahantuoja. Keskustelut ja sähköposti kirjeenvaihto vuoden 2011 aikana.

ITW Plexus. Plexus MA3940LH Technical Data Sheet. 2004

Oy Sika Finland Ab. 2. Muovi-ikkunan liimaus ja tiivistys Sikaflex-295 UV – menetelmällä

Sika Services AG. 3. Reactivation of different SikaPrimer