



Liimattujen lujitemuovipalkistojen vaatimukset ja tarkastusmenetelmät

Kirjoittajat: Merja Sippola, Perttu Hintikka





Luottamuksellisuus: Julkinen

Raportin nimi Liimattujen lujitemuovipalkistojen vaatimukset ja tarkastusmenetelmät	
Asiakkaan nimi, yhteyshenkilö ja yhteystiedot Wihuri Power Products (ent. Oy Astra-Marine Ab) Yhteyshenkilö: Timo Järvinen, Jami Aarnio-Wihuri Bella-Veneet Oy Yhteyshenkilö: Klaus Lamminpää Konekesko Oy Yhteyshenkilö: Peter Krusberg Oy Nautor Ab Yhteyshenkilö: Antti Ivaska, Ulf Finnäs Oy Sika Finland Ab Yhteyshenkilö: Jukka Jaakola TeKes Yhteyshenkilö: Matti Evola	Asiakkaan viite
Projektin nimi Liimattujen lujitemuovipalkistojen vaatimukset ja tarkastusmenetelmät	Projektin numero/lyhytnimi Liimattu LM-palkki
Raportin laatija(t) Merja Sippola, Perttu Hintikka	Sivujen/liitesivujen lukumäärä 63 s.
Avainsanat Liimaliitos, liimaus, lujitemuovi, laminaatti, vene	Raportin numero VTT-R-02681-12
Tiivistelmä <p>Tutkimusprojektissa tarkastellaan veneen pohjapalkiston liimaliitoksen ominaisuuksia, vaatimuksia ja valmiin liitoksen tarkastamista ainetta rikkomattomilla tarkastusmenetelmillä. Pohjapalkiston liimaaminen tuotantoprosessin osana on nopea ja tehokas kiinnitysmenetelmä. Liimausten soveltaminen venerakenteisiin on haastavaa kosteudesta ja suuresta lämpötilavaihteluvälistä sekä suurista mittatoleransseista johtuen. Liitos altistuu aaltokuormituksessa iskumaiselle väsymiselle ja telakointikuormien tai liimaliitoksen kovettumisprosessissa mahdollisesti syntyneiden esijännitysten johdosta virumiselle. Liitoksessa käytettävältä liimalta vaaditaan lämpötila- ja kosteuskestävyyttä sekä riittävää täyttökkyä liitostoleranssivaihteluiden johdosta. Liitosgeometrialla voidaan vaikuttaa erityisesti liimaliitoksen reunoilla esiintyviin jännityskeskittyymiin. Kirjallisuusselvityksessä on tarkasteltu myös muita pohjapalkiston suunnittelunäkökulmia standardien ja kirjallisuuslähteissä esitettyjen tietojen valossa.</p> <p>Kirjallisuusselvityksen perusteella lupaavimmaksi tarkastusmenetelmäksi osoittautui termografia. Lämpökuvauksia tehtiin useille erillisille koekappaleille sekä veneenrunkoon liimatun sisämoduulin liimasaumoille. Tutkimus vahvisti menetelmän toimivuuden liimasaumojen tarkastuksessa. Palkiston liimaliitoksien mekaanisia ominaisuuksia tutkittiin liimattujen hattujäykistepaneelien taivutuskokeilla. Kokeissa veneen palkiston liimasauman kuormitus yksinkertaistettiin kolmipistetaivutukseksi ja viisiviivataivutukseksi. Staattisten taivutustestien lisäksi iskumaisen kuormituksen haitallisuutta selvitettiin iskukokein. Pienempien kuponkikappaleiden repimiskokeilla selvitettiin hattujäykisteen laipan nurkan pyörityssäteen ja liimatyypin vaikutusta repimislujuuteen. Lisäksi repimiskokeissa selvitettiin vikakoon vaikutusta lujuuteen. Tutkimuksessa käsitellään myös liimaliitosten numeerista mallintamista. Elementtimenetelmän avulla mallinnettiin veneen runkoon liimattu pohjapalkisto sekä tehtiin useita pienempiä FE-malleja koekappaleista.</p> <p>Taivutuskokeissa kappaleet vaurioituivat laminaatista, eikä liimasaumaa saatu kuormittamaan riittävästi. Iskukokeet vahvistivat, että kuormitusnopeudella on merkitystä liimasauman kuormittamiseen. Tutkimuksessa käytetyillä liimoilla liimasaumat eivät vaikuttaneet erityisen herkiltä vaurion etenemiselle toistuvien iskujen vaikutuksesta. Repimiskokeiden perustella laipan</p>	

nurkan pyörityksen kasvattaminen alentaa repimislujuutta. Repimiskoe-kappaleisiin tehdyt vauriot heikensivät lujuutta n. 30 %, mutta vauriokoon kasvattaminen ei vaikuttanut lujuuteen heikentävästi.

FE-mallien avulla saatiin määritellyksi saumoissa vaikuttavia jännitys-jakaumia sekä erilaisten yksityiskohtien vaikutuksia liimasauman kuormittumiseen. Malleista nähtiin, että hyvin ohuilla liimasaumoilla jännitykset ovat merkittävästi suurempia kuin paksummilla ja niinpä alle 1,5 - 2 mm liimasauma ei ole suositeltava. Jäykemmällä liimoilla staattiset jännitykset liimasaumassa ovat suurempia kuin joustavammilla liimoilla. Liian joustavakaan liima ei kuitenkaan saa olla, koska silloin liikkeet kasvavat liian suuriksi ja toistuva kuormitus voi rikkoa rakenteen. Havaittiin myös että liimasauman hatun sisäpuolisen purseen tekeminen huolella kasvattaa lujuutta, koska tällöin liima tukee palkin uuman kaarevaa osaa, eikä uuma pääse taantumaa liimasauman reunan yli. Mallien tuloksia ei kuitenkaan pystytty täysin verifioimaan käytetyllä koejärjestelyllä.

Useiden rakenneliimojen ominaisuudet ovat riittäviä katkokuitulaminaattien liittämiseen. Tässä tutkimuksessa käytetyillä liimoilla liimasauma ei näyttäisi olevan kovin herkkä liimasauman virheille. Pohjapalkistojen liimauksessa esiin tulleet vauriot ja käytännön ongelmat vaikuttavat useimmiten liittyvän valmistustekniikkaan. Erityisesti valmistuksessa on huolehdittava siitä että laminaatit ovat kovettuneet ja liimapinnat huolella puhdistettu ennen liimausta.

Luottamuksellisuus	Julkinen	
Espoo 4.4.2012		
Laatijat	Tarkastaja	Hyväksyjä
		
Merja Sippola Erikoistutkija	Markku Hentinen Asiakkuuspäällikkö	Eila Lehmus Teknologiapäällikkö
		
Perttu Hintikka Asiantuntija		
VTT:n yhteystiedot Teknologian tutkimuskeskus VTT, Kemistintie 3, Espoo, PL 1000, 02044 VTT		
Jakelu (asiakkaat ja VTT)		
Tilaaaja VTT/Kirjaamo	1 alkuperäinen 1 alkuperäinen	
<i>VTT:n nimen käyttäminen mainonnassa tai tämän raportin osittainen julkaiseminen on sallittu vain VTT:ltä saadun kirjallisen luvan perusteella.</i>		

Alkusanat

Tämä on loppuraportti TEKES:n Veneohjelmaan kuuluvasta ”Liimattujen lujite-muovipalkistojen vaatimukset ja tarkastusmenetelmät” -projektista. Tutkimuksen rahoittajat ovat TEKES, VTT, Wihuri Power Products (ent. Oy Astra-Marine Ab), Bella-Veneet Oy, Konekesko Oy, Oy Nautor Ab ja Oy Sika Finland Ab. Tekijät kiittävät projektin rahoittajia ja aktiivista johtoryhmää.

Jukka Jaakola	Oy Sika Finland Ab, pj
Timo Järvinen	Oy Astra-Marine Ab
Jami Aarnio-Wihuri	Wihuri Power Products (ent Oy Astra-Marine Ab)
Klaus Lamminpää	Bella-Veneet Oy
Peter Krusberg	Konekesko Oy
Antti Ivaska, Ulf Finnäs	Oy Nautor Ab
Matti Evola	TEKES

Espoo 4.4.2012

Merja Sippola

Perttu Hintikka

Sisällysluettelo

Alkusanat.....	3
1 Johdanto.....	6
2 NDT.....	6
2.1 Termografia.....	7
2.1.1 Lämpökuvauksessa käytetty laitteisto.....	7
2.1.2 Koekappaleiden valmistus ja materiaalit.....	8
2.1.3 Koekappaleiden lämpökuvaus.....	11
2.1.4 Tulokset koekappaleiden lämpökuvauksista.....	11
2.1.5 Yhteenveto koekappaleiden lämpökuvauksista.....	14
2.1.6 Liimatun sisämoduulin lämpökuvaus.....	14
2.1.7 Liimatun sisämoduulin lämpökuvauksessa käytetty menetelmä.....	15
2.1.8 Tulokset ja havainnot liimatun sisämoduulin lämpökuvauksesta.....	16
2.1.9 Liimatun hattujäykisteen lämpökuvaus.....	18
2.2 Ultraäänitarkastus.....	19
2.2.1 Liimattujen koekappaleiden ultraäänitarkastus.....	20
2.2.2 Tulokset ja havainnot.....	20
2.3 Mikroaaltotarkastus.....	21
2.3.1 Tulokset ja havainnot.....	22
2.4 Muita menetelmiä.....	23
3 FE-mallit.....	26
3.1 Veneen FE-malli.....	26
3.2 Koekappaleiden FE-mallit.....	34
3.2.1 Kolmipistetaivutuskokeiden FE-mallit.....	34
3.2.2 Viisiviivataivutuskokeiden FE-mallit.....	41
3.2.3 Tasokuorma paneelilla malli.....	43
4 Kokeet.....	45
4.1 Repivä kuorma, viisiviivataivutus.....	46
4.2 Leikkauskuorma, kolmipistetaivutus.....	46
4.3 Koekappaleiden valmistus ja materiaalit.....	46
4.4 Esikäsittely.....	47
4.5 Liimaus.....	47
4.5.1 Klebehartz.....	47
4.5.2 Sikafast.....	49
4.5.3 Plexus.....	49
4.6 Repimiskoekappaleiden valmistus lisäkokeisiin.....	50
4.7 Kolmipistetaivutuskokeet.....	51
4.7.1 Esikokeet.....	51
4.7.2 Varsinaiset kokeet.....	51
4.8 Viisiviivataivutuskokeet.....	53

4.9 Iskukokeet.....	54
4.10 Repimiskokeet	56
5 Havainnot ja niiden analysointi	60
6 Johtopäätökset	61
7 Lähdeviitteet	63

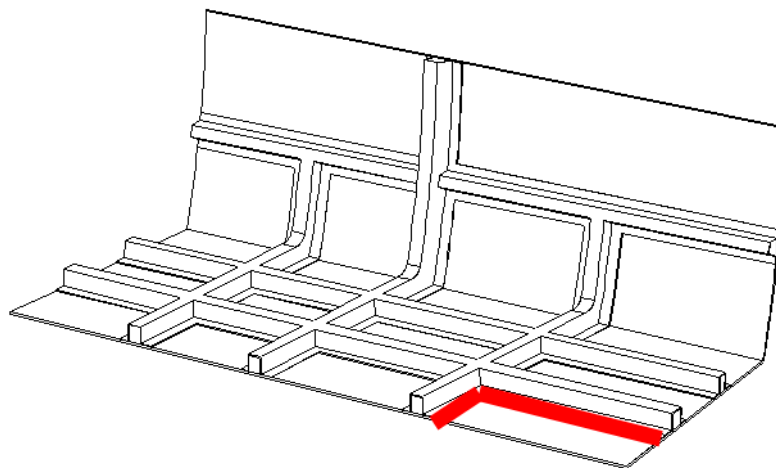
1 Johdanto

Lujitemuovista valmistettujen veneiden runkorakenne on tyypillisesti jäykistetty pitkittäisten ja poikittaisten palkkirakenteiden avulla (Kuva 1). Perinteisesti veneiden lujitemuovipalkistot on kiinnitetty runkoon laminoimalla. Tuotannon kannalta tehokkaampi ja nopeampi tapa kiinnittämiseen on palkistojen liimaaminen. Liimauksella voidaan myös parantaa liitosalueiden ulkonäköä laminointiin verrattuna.

Liimaamalla kiinnitetyissä palkistoissa on kuitenkin havaittu ongelmia ja osa venevalmistajista on joutunut luopumaan niiden käytöstä. Korjaustelakat ovat havainneet liimattujen palkistojen rikkoutuvan eri tavoin kuin laminoitujen. Vaurioalueet ovat usein olleet huomattavasti suurempia kuin laminoimalla kiinnitetyissä ja joissain tapauksissa koko palkisto on irronnut rungosta. Lisäksi liimaliitosten tarkastaminen ja laadunvalvonta on osoittautunut hankalaksi.

Veneiden rakenteen perusmitoitus esitetään melko kattavasti ISO 12215 standardin osassa 5 (1). Liimausta käsitellään standardin osassa 6 (2) periaatteellisella tasolla, mutta yksinkertaisia työkaluja todellisten liimattujen rakenteiden analysointiin ei kuitenkaan anneta. Paikalliset jännityshuiput, epälineaarinen käytös ja liitosten rajapinnat aiheuttavat suunnittelussa ongelmia ja tarkempi lujuusanalyysi edellyttää elementtimenetelmän käyttöä.

Tutkimuksen tavoitteena on kehittää liimausosaamista siten, että venevalmistajat voivat jatkossa käyttää sitä lujitemuovipalkistojen kiinnitykseen. Osatavoitteisiin kuuluvat lujitemuovipalkistojen liimasaumojen vaatimusten ja lujuutta heikentävien tekijöiden selvittäminen sekä tuotantovaiheessa syntyvien vikojen kartoitus. Lisäksi pyritään löytämään tuotanto-olosuhteisiin soveltuva tarkastusmenetelmä liimasaumoille.



Kuva 1. Liimattu pohjapalkisto, tutkittava liimasauma on merkitty punaisella.

2 NDT

Kirjallisuusselvityksen perusteella termografia oli liimatun pohjapalkiston tarkastamiseen lupaavin menetelmä, joten siihen keskityttiin myös kokeellisessa tutkimuksessa. Lisäksi selvitettiin ultraääni- ja mikroalton menetelmien soveltuvuutta.

2.1 Termografia

Termografiassa rakennevikoja tutkitaan mittaamalla kappaleen pinnan lämpötilajakaumaa. Jakauman määrittämisessä käytetään apuna lämpökameraa, joka muodostaa kuvan infrapunatunnistimen ja infrapunasäteilyä välittävän linssin avulla. Lämpötilaerot kuvautuvat erilaisina harmaa- ja värisävykarttoina. Mittauksissa käytetään usein ulkoisia lämpölähteitä esimerkiksi lämpömattoja, ilmapuhaltimia, lämpölamppuja tai sähkövastuskuumentimia. Vaurioita voidaan analysoida kuvaamalla joko lämmitettyä pintaa tai vastakkaista pintaa. Vaurioituneissa kohdissa lämmönjohtavuus on huonompi, mikä aiheuttaa pintalämpöihin eroja. Termografiaa voidaan käyttää myös syklisten kuormitusten yhteydessä, jolloin vikojen yhteydessä oleviin jännityshuippuihin kehittyä eniten lämpöä.

2.1.1 Lämpökuvauksessa käytetty laitteisto

Tutkimuksessa käytetty lämpökamera oli akuilla toimiva, käsikäyttöinen Fluke Ti32 (Kuva 2). Infrapunakuvien lisäksi kameralla voidaan ottaa visuaalisia kuvia, jotka voidaan yhdistää ja tallentaa yhdessä infrapunakuvan kanssa. Lämpökuvat ja visuaaliset kuvat voidaan esittää yksittäisinä kuvina tai yhdistelmäkuvin, joissa infrapunakuvat ja näkyvän valon kuvat on kohdistettu toisiinsa. Lämpökuvat ja visuaaliset kuvat saadaan näkyviin kameran nestekidenäytölle, ja niitä voidaan tallentaa muistikortille. Kuvien jatkokäsittelyssä käytetään kameran mukana olevaa ohjelmistoa. Palettia ja mitta-alueita säätämällä voidaan muodostaa useita erilaisia väri- ja harmaasävykarttoja lämpögradientin havainnollistamiseksi. Pintojen lämmityksessä käytettiin kahta 1000 Watin infrapunalamppua (Kuva 3), jotka asetettiin lämmityksen ajaksi kohteen yläpuolelle noin 40 cm korkeuteen.



Kuva 2. Fluke Ti32 -lämpökamera.



Kuva 3. Infrapunalamppu 1000 W.

2.1.2 Koekappaleiden valmistus ja materiaalit

Kokeita varten valmistettiin koekappaleita, jotka kuvasivat liimattuja venerakenteita. Kuhunkin koelaminaattiin liimattiin kaksi laminaattilistaa, joiden tarkoituksena oli simuloida hattujäykisteen laippoja. Liimoina käytettiin Sikaflex 221 polyuretaani-liima ja DP-190 epoksiliimaa. Kyseisiä liimoja ei käytetä jäykistepalkkisten liimaamiseen veneteollisuudessa, mutta ne soveltuvat tarkastusmenettelmien tutkimiseen.

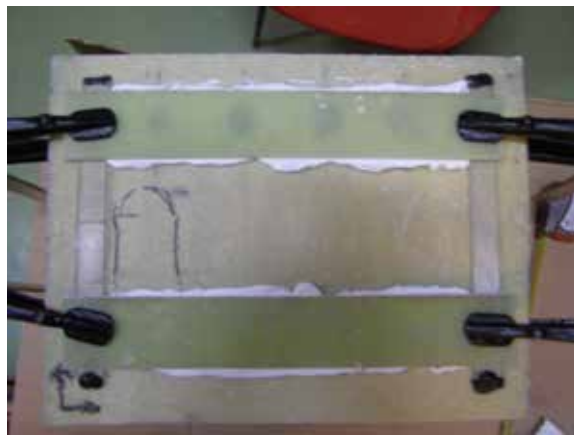
Ennen liimausta koekappaleet tarkastettiin lämpökameralla mahdollisten vaurioiden paikantamiseksi, minkä jälkeen liimattavat pinnat esikäsiteltiin tekemällä liuotinpuhdistus asetonilla ja hionta P80 hiomapaperilla. Hionnan jälkeen tehtiin vielä uusi liuotinpuhdistus hiontapölyn poistamiseksi. Tämän jälkeen toiseen liimapintaan muodostettiin keinotekoisia vaurioita tiivistysnauhan avulla (Kuva 4). Toinen lista toimi ehjänä referenssinä. Liimat levitettiin tasaiseksi kerrokseksi sauma-alueelle liimapistoolin avulla (Kuva 5). Sauman paksuus säädettiin halutunlaiseksi asettamalla listojen alle muoviset tukipalat. Liimaus kovetettiin huoneolosuhteissa käyttäen apuna ruuvipuristimia (Kuva 6).



Kuva 4. Vaurioiden tekeminen tiivistysnauhan avulla (koekappale 1).



Kuva 5. Koekappaleen liimaus (koekappale 1).



Kuva 6. Liimauksen kovetus (koekappale 1).

Lämpökuvausta varten valmistettiin kaikkiaan viisi erilaista koekappaletta vaihtelevin vaurioin ja materiaalein. Seuraavassa esitetään lyhyt kuvaus kustakin koekappaleesta. Koekappale 1 valmistettiin 340 mm x 260 mm lasikuitulaminaattilevystä, jonka paksuus oli noin 5 mm. Lasikuitulevyn ulkopinnalla oli noin 2 mm:n gelcoat-kerros. Koekappaleeseen liimattiin kaksi 305 mm x 50 mm x 4 mm lasikuitulaminaattilistaa Sikaflex 221 -polyuretaaniliimalla. Liimasauman paksuuden säätämiseksi käytettiin kahta 5 mm paksua muovipalaa, jotka asetettiin listojen alle kuvan 5 mukaisesti. Ennen liimausta toiseen liimasaumaan tehtiin tiivistenauhalla neljä pyöreätä vauriota, joiden halkaisijat olivat 5 mm, 10 mm, 15 mm ja 20 mm (Kuva 5).

Koekappale 2 valmistettiin hiilikuitukerroslevystä, jossa oli 15 mm:n PVC-ydinaine ja 0,8 mm:n pintalevyt. Koekappaleen koko oli 510 mm x 400 mm, josta varsinaista kerroslevyä 400 mm x 290 mm. Koekappaleen pintaan liimattiin kaksi 360 mm x 50 mm x 2 mm hiilikuitulistaa. Toiseen liimaukseen tehtiin vaurioita tiivistenauhan ja irrotusmuovin avulla (Kuva 7). Koekappale liimattiin Sikaflex 221 -liimalla käyttäen 5 mm:n saumapaksuutta.



Kuva 7. Koekappaleen 2 vauriot.

Koekappale 3 valmistettiin 6 mm:n kaarevasta lasikuitulaminaatista, johon liimattiin kaksi kaarevaa 6 mm:n paksuista lasikuitulistaa Sikaflex 221 -liimalla. Kuva 8 esittää koekappaleeseen tehdyt vauriot. Laminaatti oli kooltaan 355 mm x 190 mm ja liimatut listat pituudeltaan 345 mm. Listojen leveys vaihteli 50 mm:n molemmin puolin.



Kuva 8. Koekappaleen 3 vauriot.

Koekappaleessa 4 käytettiin 6 mm:n lasikuitulaminaattia ja 2 mm:n Scotch Weld DP-190 epoksiliimasaumaa. Koekappale oli kooltaan 440 mm x 155 mm ja liimatut lasikuitulistat 440 mm x 50 mm. Koekappaleeseen tehtiin pyöreitä vaurioita, joiden halkaisijat olivat 40 mm, 35 mm, 30 mm, 25 mm, 20 mm, 15 mm, 10 mm ja 5 mm (Kuva 9).



Kuva 9. Koekappaleen 4 vauriot.

Koekappale 5 oli 500 mm x 215 mm hiilikuitulaminaattia, johon liimattiin 455 mm x 50 mm hiilikuitulistat Scotch Weld DP-190 epoksiliimasaumalla. Koekappaleen ja listojen paksuudet olivat 4 mm ja liimausauman paksuus 2 mm. Koekappaleeseen tehtiin pyöreitä vaurioita, joiden halkaisijat olivat 40 mm, 35 mm, 30 mm, 25 mm, 20 mm, 15 mm, 10 mm ja 5 mm (Kuva 10).



Kuva 10. Koekappaleen 5 vauriot.

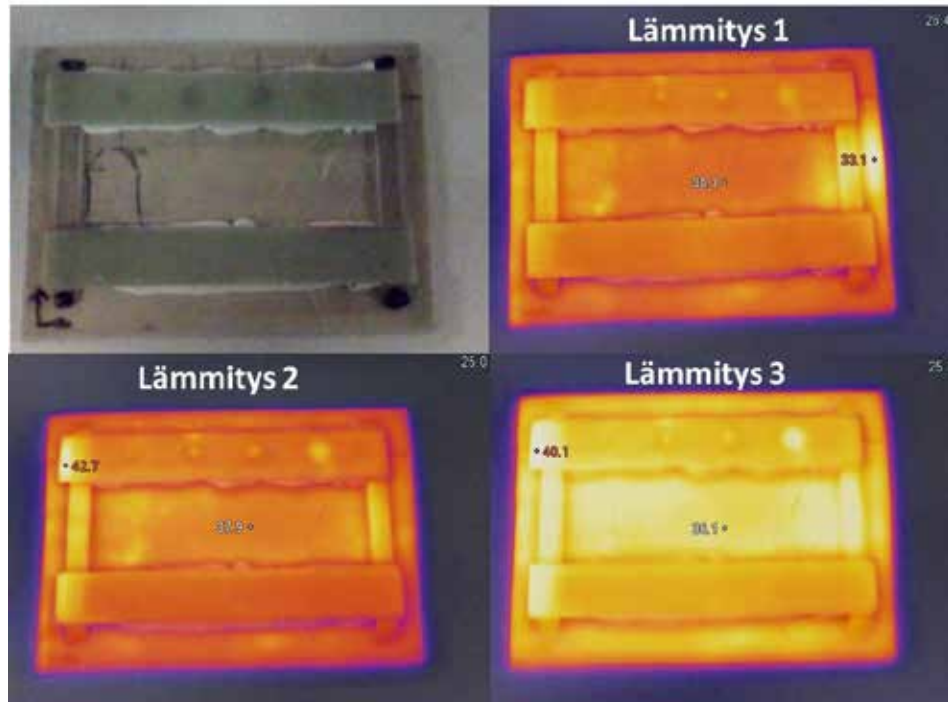
2.1.3 Koekappaleiden lämpökuvaus

Kuvattavien pintojen tarkkojen lämpötila-arvojen määrittämiseksi kameran asetukset on määriteltävä tarkoin. Materiaalin kykyä säteillä infrapunaenergiaa ulospäin kuvataan emissiivisyydellä. Tehokkaasti energiaa säteilevillä pinnoilla emissiivisyystekijän voidaan arvioida olevan 95 %, joka toimii useimmissa tapauksissa. Koekuvauksissa lämpökameran emissiivisyyden arvona käytettiin oletusarvoa 0,95. Mittauksissa olennaisinta oli saada esiin pinnan lämpötilaeroja, eikä tarkkan emissiivisyyden asettaminen näin ollen ollut tarpeellista.

Taustalämpötilan kompensointi asetettiin oletusarvoon $BG = 20 \text{ °C}$ kuten myös läpäisykorjauksen arvo $T = 100 \text{ %}$. Tarkkoja lämpötila-arvoja määritettäessä kyseiset kompensointiarvo t on asetettava oikein. Läpäisykorjausta tarvitaan ainoastaan mittauksissa, jotka tehdään infrapunasäteilyä heikentävien kappaleiden kuten ikkunalasien läpi. Koekappaleita lämmitettiin noin 40 cm:n etäisyydeltä 30 s- 120 s kerrallaan. Lämmitysyhtäysten kesto ja määrä vaihtelivat koekappaleiden välillä.

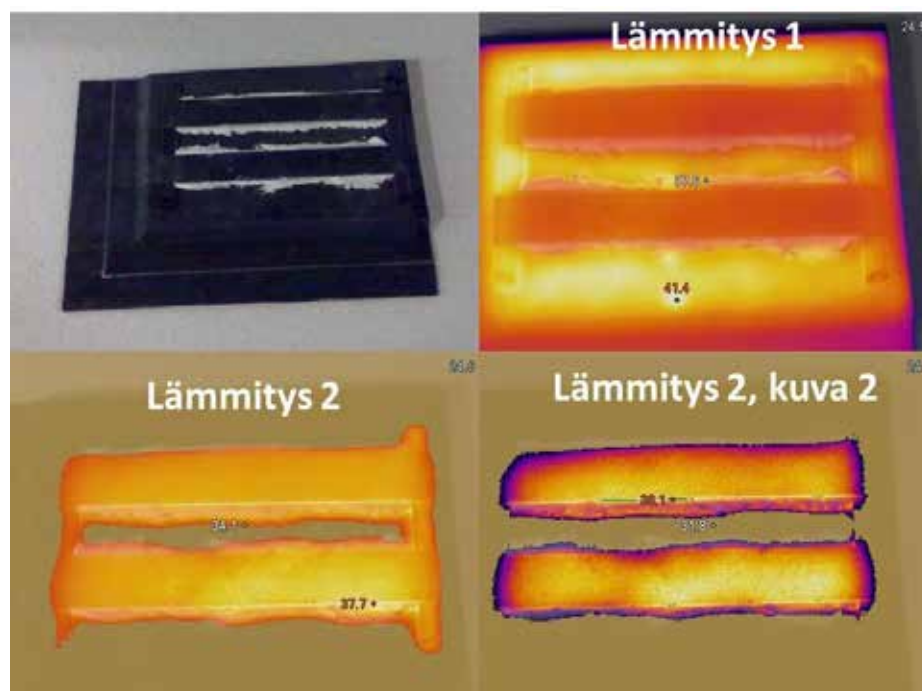
2.1.4 Tulokset koekappaleiden lämpökuvauksista

Kuva 11 esittää koekappaleen 1 lämpökuvauksen tulokset. Kuvat esittävät kappaleen lämpöjakaumaa ensimmäisen toisen ja kolmannen lämmityssyklin jälkeen. Kaikissa kuvissa nähdään selvästi halkaisijaltaan 20 mm, 15 mm ja 10 mm vauriot. Pienin 5 mm:n vaurio erottuu kuvissa heikosti.



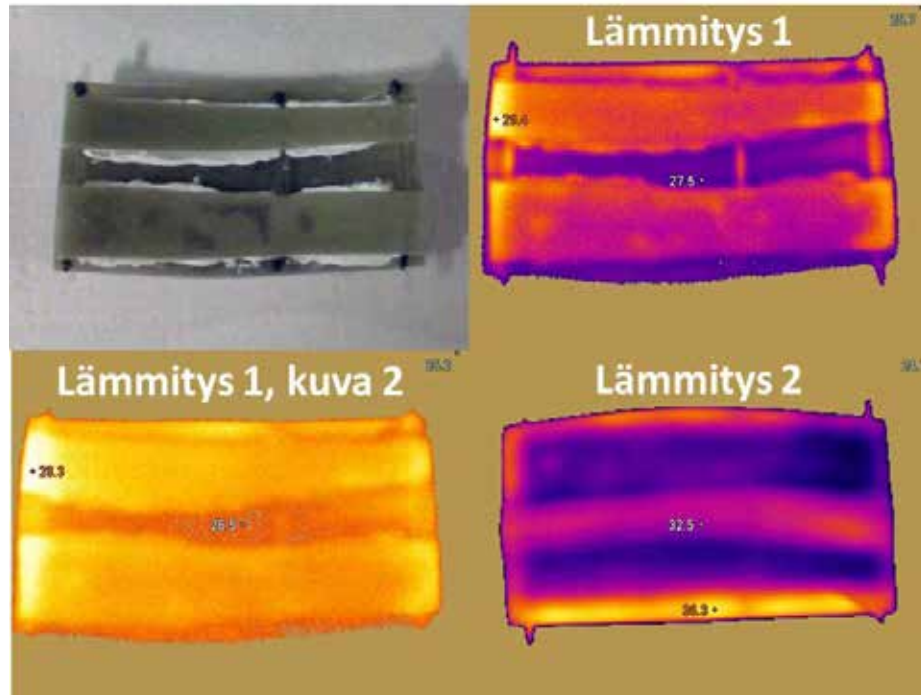
Kuva 11. Koekappaleen 1 lämpökuvat.

Kuva 12 esittää hiilikuitukerroslevyn (koekappale 2) lämpökuvat. Kuvassa ylempi lista on liimattu ilman alkuvaurioita. Ensimmäisen lämmityssyklin jälkeen otetussa kuvassa vauriot eivät erotu lainkaan. Toisen lämmityksen jälkeen isoimmat vauriot näkyvät pieninä sävyvaihteluina. Kappaleeseen asetettu umpinainen tiivistenauhamöykky sekä pieni kaistale irrotusmuovia eivät erotu lainkaan. Toisen lämmityssyklin jälkeisissä kuvissa kappaleen mittausaluetta on säädetty pienemmäksi, jolloin lämpökuvaan tulevat vain kyseisellä lämpöalueella olevat kohteet. Lämpöaluetta säätämällä voitiin tässä tapauksessa hieman parantaa vauriokohdan erottuvuutta.



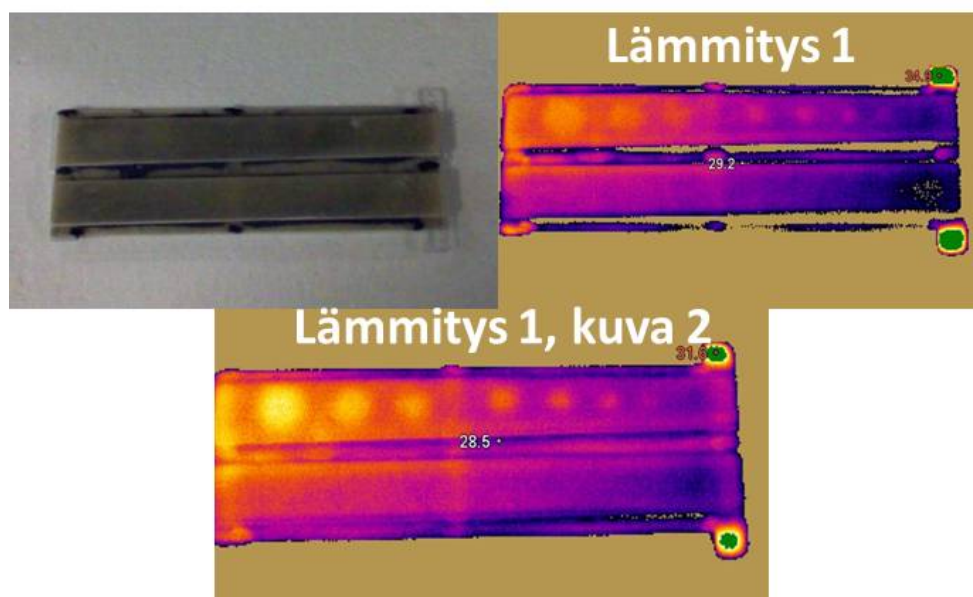
Kuva 12. Koekappaleen 2 lämpökuvat.

Kuva 13 esittää kaarevan koekappaleen 3 lämpökuvat. Ensimmäisen lämmityksen jälkeen otetussa kuvassa ilmasulkeuman sisältävät vauriot erottuvat. Umpinainen tiivistenaumahöyky ja pieni pala irrotusmuovia eivät erotu lainkaan. Toisen lämmityksen jälkeen kääntöpuolelta otetusta kuvasta ilmasulkeuman sisältävät vauriot erottuvat. Kaikissa lämpökuvissa on käytetty pienempää mittausaluetta.



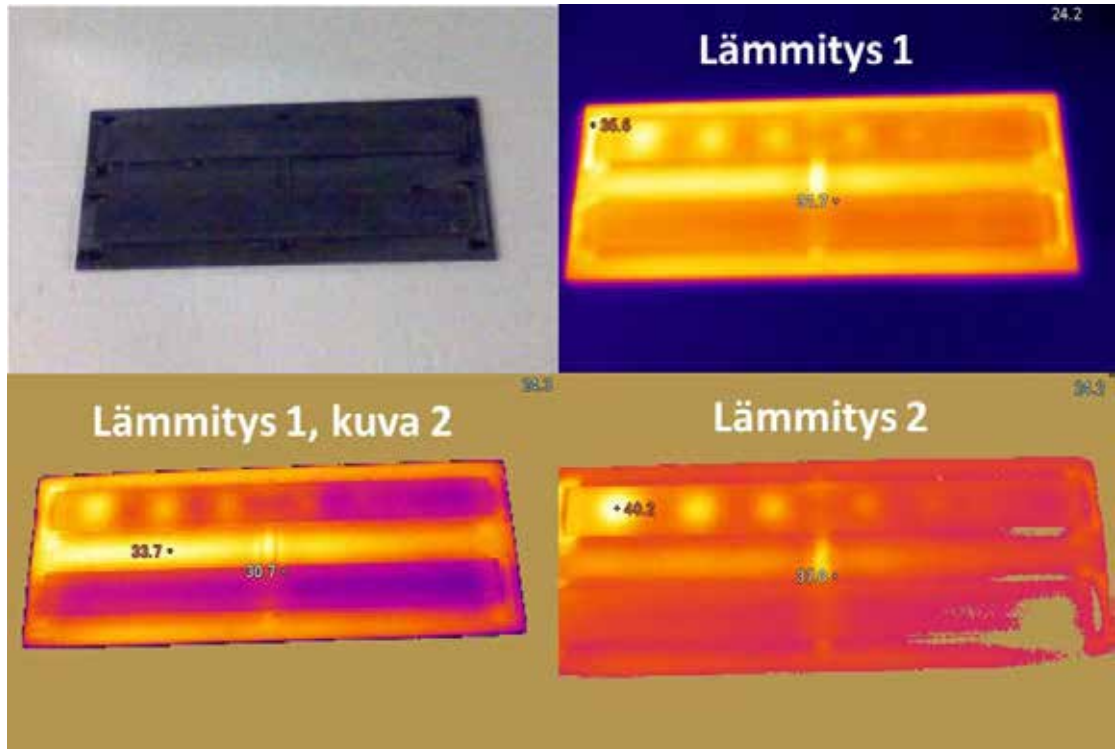
Kuva 13. Koekappaleen 3 lämpökuvat.

Koekappaleen 4 kuvissa (Kuva 14) vauriot voidaan havaita 10 mm:n halkaisijaan asti. Pienin 5 mm:n vaurio ei kuvissa erotu. Molemmat lämpökuvat on otettu yhden lämmityssyklin jälkeen.



Kuva 14. Koekappaleen 4 lämpökuvat.

Hiilikuidusta valmistetun koekappaleen 5 kuvissa (Kuva 15) halkaisijaltaan 25 mm:n vaurio erottuu kaikissa kuvissa melko selvästi. Myös 20 mm:n vaurio voidaan havaita kuvista. Pienimmät vauriot eivät selvästi näy kuvissa.



Kuva 15. Koekappaleen 5 lämpökuvat.

2.1.5 Yhteenveto koekappaleiden lämpökuvauksista

Koekappaleiden lämpökuvauksissa lasikuitulaminaateista havaittiin halkaisijaltaan noin 10 mm:n vauriot, jotka sisälsivät ilmasulkeuman. Hiilikuitulaminaateissa vauriot erottuivat selvästi heikommin. Hiilikuidun hyvä lämmönjohtavuus aiheuttaa pinnan lämpötilaerojen huomattavan nopeaan tasoittumiseen lämmityksen jälkeen, joten lämmitys-kuvaussykliä tulisi tehdä nopeammin. Lämpötila-alueita pienentämällä vaurioiden erottuvuutta voi joissain kohdin hieman parantaa. Irrotusmuovin avulla tehtyjä pieniä delaminaatiovaurioita 10 mm x 10 mm ei havaittu lämpökamerakuvissa. Myöskään umpinaiset tiivistenauhasta tehdyt pallot eivät näkyneet kuvissa. Koelaminaatin kaarevuuden vaikutusta kokeiltiin yhdelle koekappaleelle. Kaarevuuden ei havaittu merkittävästi heikentävän vaurionerottelukykyä tai vaikeuttavan tasaista esilämmitystä. Koekappaleet tehtiin käyttäen sekalaisia hiili- ja lasikuitulaminaatteja vaihtelevin ainevahvuuksin. Laminaattien ja liimasauman paksuudet, laminaatin kuitusuunnat, hartsit ja liimat vaikuttavat kappaleen lämmönjohtavuuteen. Venerakenteiden laminaateissa esiintyy melko runsaasti vaihteluita esim. ainevahvuuteen ja kuitujen suuntaukseen liittyen. Kokonaisuutena koekappaleilla tehdyt testit osittivat lämpökuvauksen soveltuvan liimasaumojen tarkastukseen erityisesti lasikuitulaminaateilla.

2.1.6 Liimatun sisämoduulin lämpökuvaukset

Tarkastettava kohde oli runkoon liimattu sisämoduuli, johon kuuluivat ruiskulaminoitunut jäykisterakenne ja sisäkuori. Laminaattien paksuudet kohteessa olivat seuraavat: verhoilupaneeli 2 - 4 mm, jäykistepalkkien uumat 3 - 4 mm ja laipat 6

mm. Rungon mitoitus oli tehty ISO 12215-5 mukaan huomioimatta sisäkuoren laminaattia. Rungon kyljissä oli käytetty kerroslevyrakennetta ja pohjassa yksi-kuorirakennetta. Nousulistoja ei ollut kitattu tai tasattu ennen sisäkuoren liimausta. Sisämoduulin ja rungon välillä oli noin 3 - 4 mm toleranssi. Sisämoduulin palkiston rakenne oli avonainen epätavanomainen munakennorakenne, jossa ei ollut selkeitä pää- ja sekundäärijäykisteitä (Kuva 16).



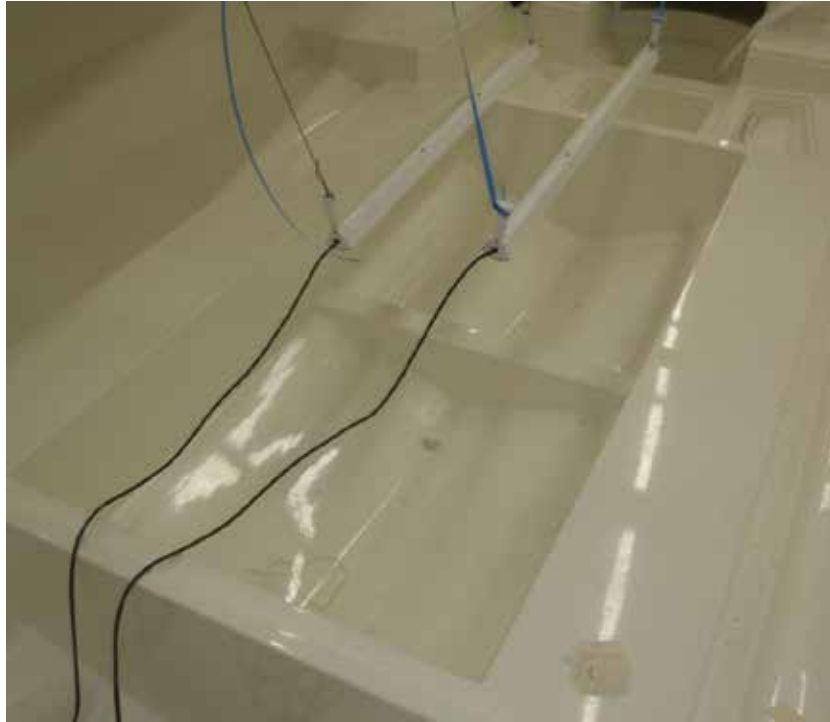
Kuva 16. Veneen runkoon liimattu sisämoduuli.

Sisämoduulin liimaus tehtiin kyseisessä venetyypissä seuraavasti:

1. Muottiin laminoituneen runkokappaleen päälle lasketaan aukotettu ja leikattu sisämoduuli, minkä jälkeen runkoon piirretään adheesioalueet.
2. Sisämoduuli nostetaan pois ja runkoon levitetään polyesteriliima 5 mm:n kamalastalla. Liiman levitys tehdään koko alueen yli. Liimaa levitetään myös hattupalkkien alle sekä laitoihin, jonne sisämoduulin laminaattiverhoilu jatkuu.
3. Sisämoduuli lasketaan paikoilleen.
4. Sisämoduuli imetään runkoon kiinni 0,3 - 0,5 barin alipaineella palkistoon porattujen reikien välityksellä. Liima toimii tiivisteenä alipaineen aikana.
5. Alipaine poistetaan noin 2 tunnin kuluttua liiman kovettumisen jälkeen.
6. Veistämö toteaa liimauksen onnistumisen koputusmenetelmällä.

2.1.7 Liimatun sisämoduulin lämpökuvauksessa käytetty menetelmä

Ennen lämpökameratarkastusta rakennetta arvioitiin silmämääräisesti ja vaurioita etsittiin metalliesineellä koputtamalla. Mahdolliset vaurioalueet merkittiin koputuksen yhteydessä kohteeseen. Liimattua rakennetta kuvattiin Fluke Ti32 -lämpökameralla ja lämmitettiin kahdella 1000 Watin infrapunalampulla. Lamput kiinnitettiin roikkumaan noin 40 cm:n korkeuteen lämmitettävän kohteen yläpuolelle (Kuva 17). Kohteen pinta heijasteli voimakkaasti hallin kattovalaistuksesta, joka häiritsi kuvausta merkittävästi. Heijastusten poistamiseksi tarkasteltava runko varjostettiin muovilla. Lämmitysaikoja vaihdeltiin 1 - 3 minuutin välillä. Kuvauksen aikana lämpökamerakuvassa näkyviä vaurioita verrattiin koputuskokeen tuloksiin.

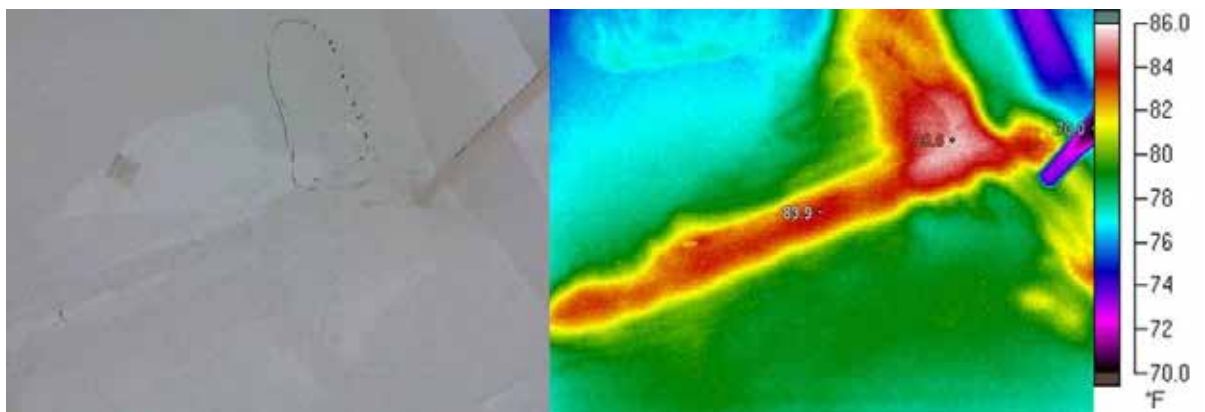


Kuva 17. Tarkastettavan alueen lämmitys kahdella infrapunalampulla.

2.1.8 Tulokset ja havainnot liimatun sisämoduulin lämpökuvauksesta

Tarkastuksen yhteydessä laidan ja pohjan laminaattiverhouksessa oli paikoin silmin havaittavaa aaltoilua. Jäykisteiden läheisyydessä aaltoilua havaittiin myös käsin kokeilemalla. Sisäkuoren alueelta ja jäykisteiden läheisyydestä koputtamalla löydettiin kohtia, joissa adheesiota ei ollut.

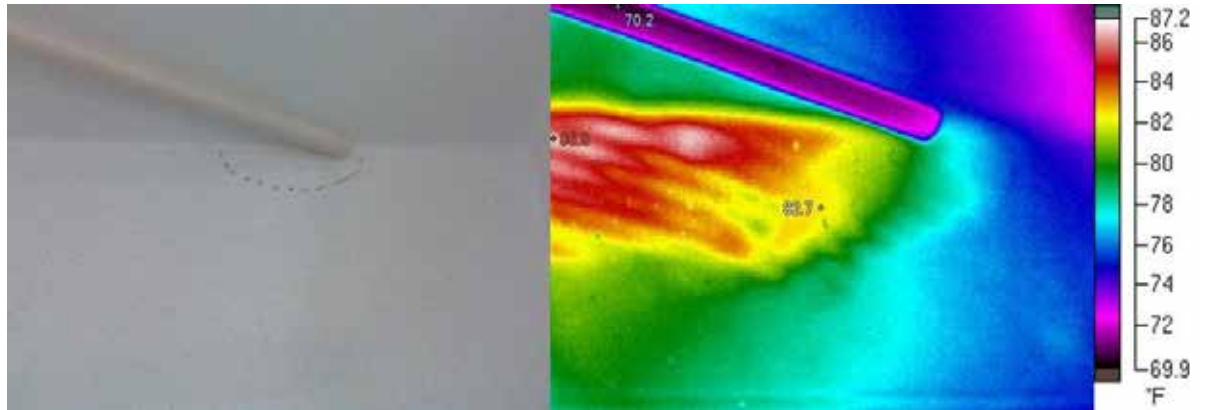
Infrapunakameralla löydettiin alueita, joissa ei ollut adheesiota palkkien (kaarien) uumien läheisyydessä, palteessa ja kölirangassa laminaattiverhouksen taitteessa. Kuva 18 esittää kölirangassa laminaattiverhouksen taitteesta, kaaren lähistöltä esikoputuksen yhteydessä löytynyt vaurio ja vastaavasta kohdasta otettu lämpökamerakuva. Lämpökamerakuvassa näkyvä punainen lämmin alue kuvaa kohtaa, jossa adheesiota ei ole. Lämpökamerakuvauksen jälkeen tehty koputuskoete varmisti vaurion olevan infrapunakuvassa esitetyn kokoinen ja muotoinen.



Kuva 18. Kölirangan laminaattiverhoilun liimasauman vauriot.

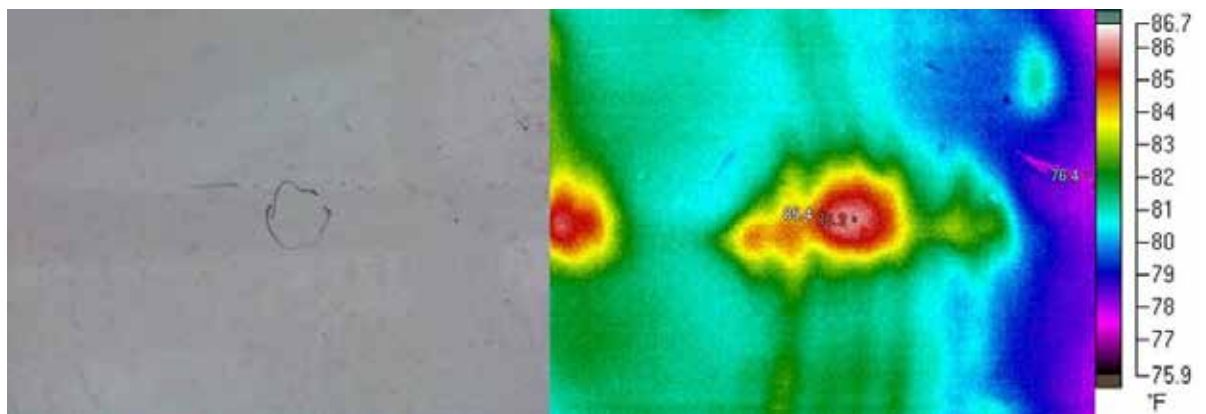
Vastaavasti Kuva 19 esittää pituusjäykisteen uuman vierestä koputtamalla löydetyn vaurion sekä vastaavasta kohdasta otetun lämpökamerakuvan. Lämpökuva

osoittaa vaurion koon olevan selvästi koputuksella määritettyä suurempi. Uudessa koputuskokeessa vaurio osoittautui lämpökuvauksessa havaitun kokoiseksi.

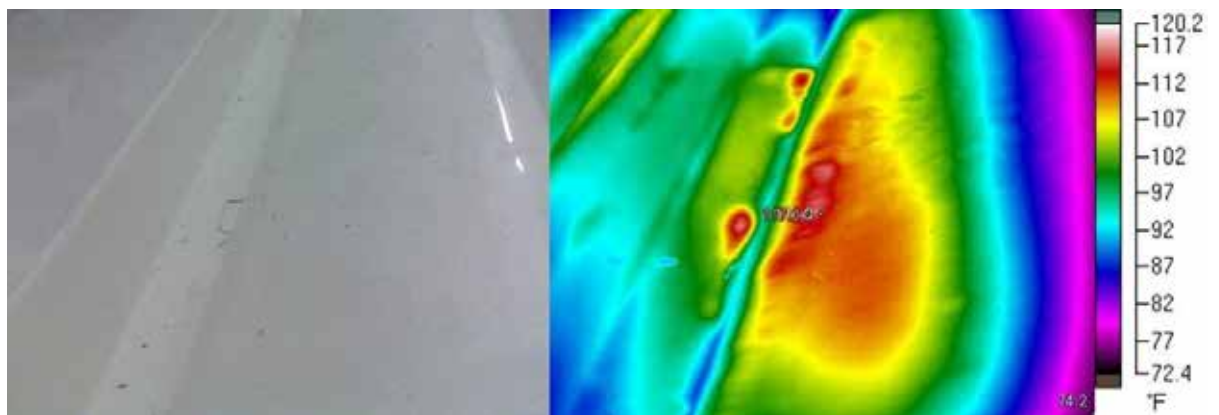


Kuva 19. Liimasauman vaurio pituusjäykisteen tyvessä.

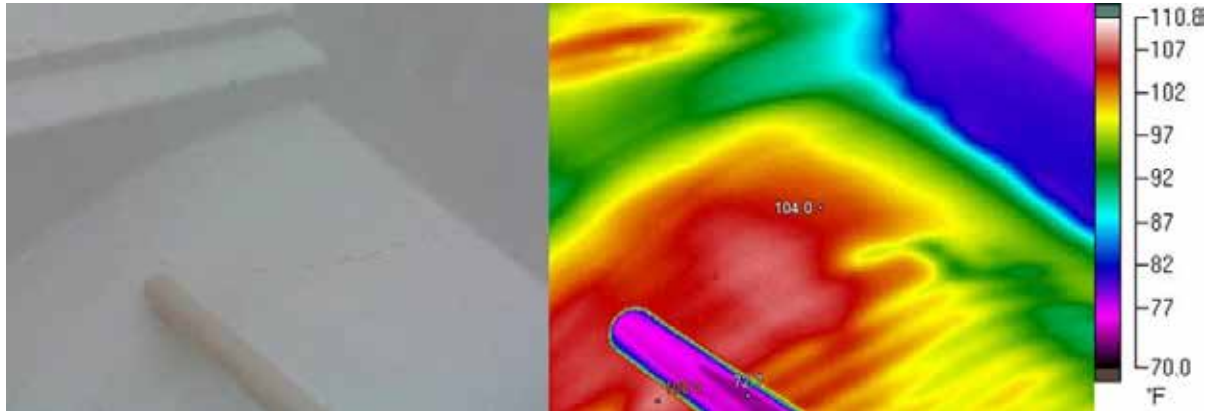
Kuva 20 esittää verhoilupaneelissa näkyvä halkaisijaltaan n. 5 cm:in vaurio, joka pystyttiin varmentamaan koputtamalla. Vastaavasti Kuva 21 esittää laajemmalta alueelta verhoilupaneelista löytynyttä vauriota. Vaurio sijaitsi poikittaisjäykisteen päädyn välittömässä läheisyydessä (Kuva 22).



Kuva 20. Verhoilupaneelin liimasauman vaurioita.



Kuva 21. Laaja-alainen verhoilupaneelin liimasauman vaurio.

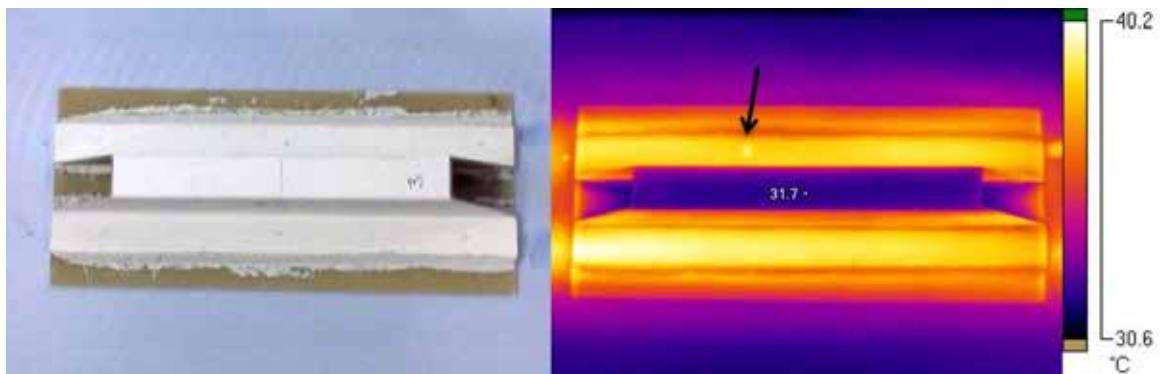


Kuva 22. Liimasauman vaurio poikittaisjäykisteen päädysssä.

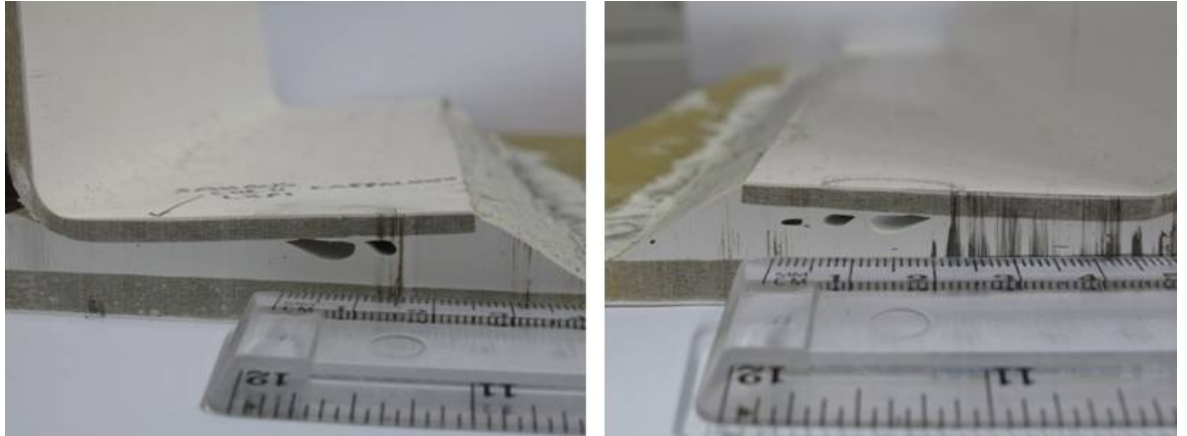
2.1.9 Liimatun hattujäykisteen lämpökuvauus

Termografialla tarkastettiin myös lasikuitupaneeleja, joihin oli liimattu hattujäykiste. Ainevahvuudet olivat seuraavat: lasikuitupaneeli n. 6mm, hattujäykiste n. 4 mm ja liimasauma n. 4 mm. Paneelin mitat olivat 700 mm x 300 mm. Liimana käytettiin polyesteripohjaista Klebehartz 4426 -liimaa. Koekappaleen liimauksiin ei tehty keinotekoisia vaurioita.

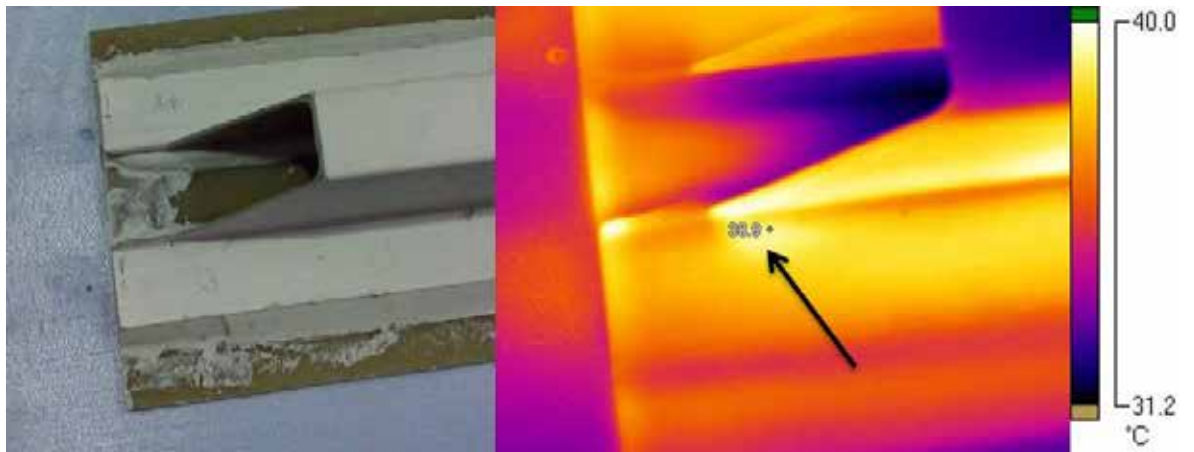
Tarkastuksen tuloksena koekappaleen liimasaumasta löytynyt vaurio on esitetty kuvassa (Kuva 23). Vauriota ei pystytty havaitsemaan liimasaumasta koputtamalla. Vaurion tarkempi koko ja muoto selvitettiin sahaamalla kappale halki kyseisestä kohdasta. Sahauksen yhteydessä löydettiin halkaisijaltaan n. 9 mm ja syvyydeltään n. 3 mm ilmakupla (Kuva 24). Myös koekuormitettuja koekappaleita tarkastettiin termografialla. Lämpökuvista pystyttiin havaitsemaan kappaleen kärkeen syntynyt leveämpi halkeama (Kuva 25). Sen sijaan kapeita hiushalkeamia liimasauman ja laminaatin rajapinnassa tai liimassa ei havaittu lämpökuvissa.



Kuva 23. Hattujäykisteen liimasaumasta termografian avulla löydetty vaurio.



Kuva 24. Hattujäykisteen liimasauman todellinen vaurio aukisahatussa koekappaleessa.



Kuva 25. Koekuormitetun koekappaleen vaurio lämpökuvassa.

2.2 Ultraäänitarkastus

Ultraäänimenetelmissä käytetään lyhyitä korkeataajuusaaltoja, joita lähetetään tutkittavaan materiaaliin. Tyypillisesti rakenteiden tarkastuksessa käytetään pulsikaiku- tai läpäisymenetelmää. Pulssikaikumenetelmässä mitataan ultraäänisignaalin takaisinheijastuksia yhdistetyllä lähetin/vastaanotto luotaimella. Läpäisymenetelmässä mitataan kappaleen läpäissyttä ultraäänipulsseja, jolloin tarvitaan erilliset lähetin- ja vastaanotto luotaimet rakenteen vastakkaisille puolille. Läpäisymenetelmässä mitataan yleensä ultraääniaallon vaimenemista. Tämä tapahtuu esimerkiksi epäjatkuvuuskohdissa, joissa aalto hajoaa. Mittauksissa voidaan käyttää myös kappaleen vastakkaiselle puolelle sijoitettua heijastinta, jolloin signaali vastaanotetaan lähettimen puolelta. Tarkastuksen edellytyksenä on kunnollinen akustinen kytkentä luotainten ja tutkittavan kappaleen välillä. Kytkentä saadaan aikaiseksi asettamalla pehmeä luotain kappaleen pinnalle tai sivelemällä pintaan geeliä. Parhaimmat tulokset saavutetaan käyttämällä väliaineena vettä. Veden käyttö edellyttää kappaleen vesiupotusta tai suurempien kappaleiden kohdalla vesisuihkun käyttöä. Ultraäänien avulla havaitaan pääasiassa tasomaisia vikoja. Tutkimuksia varten tarvitaan tyypillisesti referenssikappaleita. Ultraäänimittaukset ovat yleisimpiä liimaliitoksien tutkimusmenetelmiä.

2.2.1 Liimattujen koekappaleiden ultraäänitarkastus

Tarkastuksessa käytettiin manuaalista yhden luotaimen Epoch XT ultraäänilaitetta (Kuva 26) ja 0,5 MHz pulssikaiku-luotainta. Koekappaleina käytettiin samoja keinoitekoisia vaurioita sisältäneitä koekappaleita kuin aiemmin lämpökameratarkastuksissa. Lisäksi ultraäänellä tutkittiin liimattua jäykistepalkkia.

Tarkastuksessa käytetty taajuus oli melko matala, koska tarkastettujen koekappaleiden vaimennus oli suuri. Tulokset tulkittiin laitteen näytöltä ns. A-kuvana, joka esittää heijastukset aika/amplitudi-koordinaatistossa.



Kuva 26. Olympus Epoch XT -ultraäänilaitte.

2.2.2 Tulokset ja havainnot

Koekappaleiden vaurioiden etsintä osoittautui hankalaksi häiriöiden johdosta. Erityisesti joustavalla polyuretaaniliimalla liitettyjen kappaleiden tarkastaminen oli hankalaa vaimennuksen johdosta. Mittalaitteen näytölle saatu kuva sisälsi usein runsaasti häiriökaikuja, jotka hankaloittivat tulkintaa. Luotain oli fyysiseltä kooltaan melko suuri ja sen kärjessä oli joustamaton vaimenninosa, joka hankaloitti osaltaan akustisen kytkennän muodostamista. Luotaintyyppi ei myöskään soveltunut kaareville pinnoille. Kuva 27 esittää liimatun lasikuitukoekappaleen tarkastusta ultraäänilaitteella.

Liimattujen koekappaleiden tarkastuksessa vaurioita ei pystytty tarkoin määrittelemään. Osaltaan tarkastustulosta heikensivät tulosten tulkintaan liittyvät ongelmat. Liimatusta hattujäykisteestä (Kuva 23) ultraäänilaitteella havaittiin halkaisijaltaan n. 9 mm ja paksuudeltaan n. 3 mm ilmakupla. Vaurion koko ja sijainti voitiin määritellä hyvällä tarkkuudella. Mittaustulosta paransivat huomattavasti jäykisterakenteen hyvä pinnalaatu ja liimattuja koekappaleita paremmat mittatoleranssit.

Oikeiden mittaasetusten tekeminen, tarkastaminen ja tulosten tulkinta olivat hankalasti toteutettavia käytetyillä laitteistolla ja tutkimuksessa käytetyillä kappaleilla.



Kuva 27. Liimatun lasikuitu-polyesterikoekappaleen ultraäänitarkastus.

2.3 Mikroaaltotarkastus

Tarkastusmenetelmä perustuu mikroaaltoihin, joita lähetetään kappaleeseen luotaimen avulla. Luotain poimii paluusignaalia ns. dielektristen ominaisuuksien muutoksista johtuvia kentän voimakkuuden muutoksia. Menetelmä ei tarvitse välittäjäaineita ja tarkastus voidaan tehdä yhdeltä puolelta. Mikroaaltolaitteita valmistavan Evisiven mukaan laitteistolla voidaan havaita materiaalista, ilmakuplat, huokokset, delaminaatiot, säröt, pinnoitteen alainen korrosio, paksuusmuutokset ja vieraat aineet. Mikroaaltolaitteella voi tarkastaa keraameja, muoveja, lujitemuoveja, puuta ja kumia. Mikroaallot eivät voi tunkeutua johtaviin materiaaleihin kuten metalleihin. Aineet ja materiaalit, jotka absorboivat voimakkaasti mikroaaltoja aiheuttavat rajoituksia tarkastukselle. Esimerkiksi veden alla olevaa kappaletta ei voida tarkastaa mikroaaltolaitteella. Käytössä olleella laitteella ei myöskään pystytä määrittelemään virheiden syvyyksiä.

Mikroalloilla voidaan tarkastaa kumia ja muita pehmeitä materiaaleja, joiden tarkastaminen esimerkiksi ultraäänellä on hankalaa. Myös komposiittien mittaamisen pitäisi valmistajan mukaan helpottua erityisesti paksujen, monikerroksisten lujitekuituja sisältävien laminaattien osalta. Ultraäänitarkastus on usein altis kyseisien materiaalien tuottamille signaalihäiriöille. Mikroaaltomenetelmällä voidaan nähdä myös tasomaisen vian takana olevia vikoja.

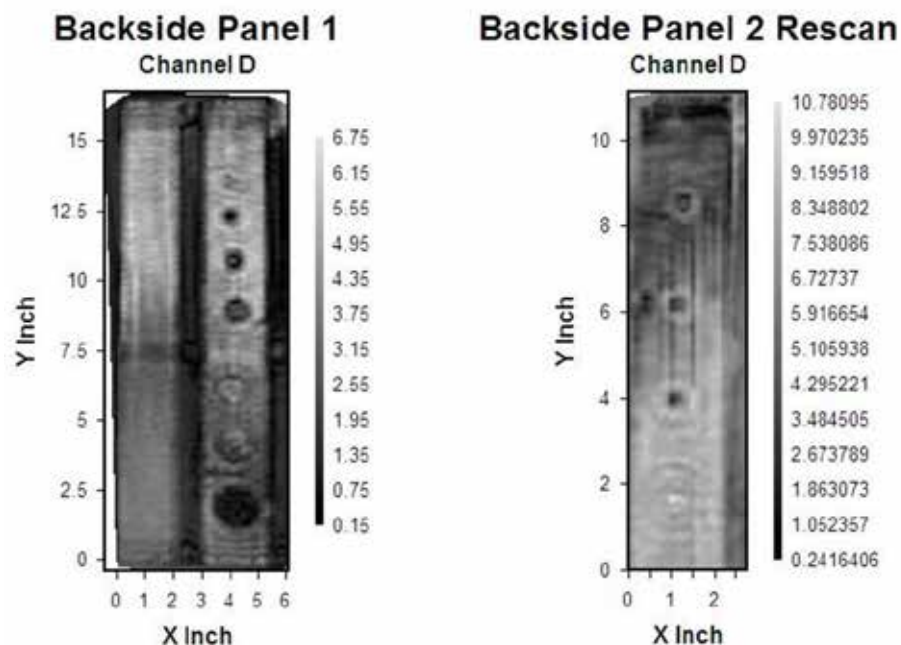
Evisive-mikroaaltolaitteella mittausten tulkinta tapahtuu tietokoneohjelman avulla harmaasävy- tai värikarttina tai suoraa signaalikäyrää tulkitsemalla. Karttojen muodostamista varten tarvitaan kuvassa (Kuva 28) näkyvä luotaimen paikannin jalustoineen tai paikkatietoja välittävä xy-mittauspöytä. Usein koekappaleiden muoto tai koko estää paikantimien käytön, jolloin tuloksia tulkitaan suoraan mittasignaalista. Evisive-mikroaaltolaitteella tutkittiin liimattuja, lasi- ja hiilikuitulaminaatista tehtyjä koekappaleita sekä korjattavana olleen veneen runkorakennetta.



Kuva 28. Liimatun koelaminaatin tarkastus Evisive-mikroaaltolaitteella.

2.3.1 Tulokset ja havainnot

Koekappaleiden vianetsintä Evisive-laitteistolla osoittautui hankalaksi, koska luotain on hyvin herkkä kappaleen pinnanlaadulle. Laitteistolla ei pystytty käsi-luotausta käyttämällä löytämään laminaattien liimasaumoihin tehtyjä keinotekoisia vaurioita. Paras tulos saatiin tarkastamalla lasikuitulaminaattia, jonka ulkopinnalla oli sileä gelcoat-kerros. Lasikuitulaminaatista löydettiin 20 mm:n vaurio. Vastaavasti hiilikuitulaminaatista vaurioita ei löydetty. Samat laminaatit tutkittiin kääntöpuolelta käsin myös xy-mittapöydän avulla, jolloin lasikuitulaminaatista erottui selvästi halkaisijaltaan n. 10 mm:n vaurio ja heikosti halkaisijaltaan n. 5 mm:n vaurio (Kuva 29). Hiilikuitulaminaatista erottui halkaisijaltaan 10 mm:n vaurio. Veneen rungon tarkastus tehtiin käsin luotaamalla tulkitsemalla mittasignaalia. Signaali sisälsi paljon häiriöitä, eikä vaurioita tai rungon sisäisen rakenteen yksityiskohtia pystytty luotettavasti määrittelemään.



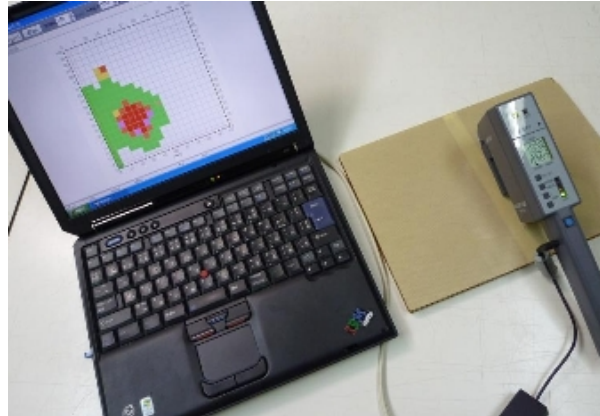
Kuva 29. Evisive-mikroaaltolaitteen ja xy-mittapöydän avulla tarkastetut liimatut koekappaleet (vasemmalla hiilikuitukappale, oikealla lasikuitukappale).

2.4 Muita menetelmiä

Venetekniikassa rakenteiden ja liimaliitosten tarkastuksessa käytetään usein koputusmenetelmiä. Koputuskokeissa rakennetta koputellaan kovalla esineellä sisäisten vaurioiden paikallistamiseksi. Tyypillisesti veneteollisuudessa koputtaja arvioi rakennetta korvakuulolla ilman apulaitteita. Perinteisen koputusmenetelmän ongelmat ovat, hitaus ja tarkastuksen subjektiivinen luonne, minkä vuoksi tulokset vaihtelevat hyvin voimakkaasta tarkastajien kesken. Myös käyttö meluisissa tuotantotiloissa on toisinaan ongelmallista. Tutkimuksessa selvitettiin onko koputukseen olemassa laitteita, joiden avulla tarkastuksen automatisoinnin astetta, erotte-lukykyä ja tulosten tulkitsemista voidaan helpottaa.

Komposiittien tarkastamiseen on kehitetty erilaisia instrumentoituja koputuslaitteita. Osaan laitteista on saatavilla myös tulosten tulkintaa helpottavia tietokoneohjelmistoja. Tietokoneohjelmien avulla tulokset voidaan esittää esimerkiksi värisävykarttoina tulkinnan helpottamiseksi. Instrumentoidut iskuvasarat mittaavat kappaleen jäykkyydestä riippuvia iskujen kontaktiaikoja, joihin rakenteen vauriot vaikuttavat. Esimerkkejä instrumentoiduista iskuvasaroista ovat (Kuva 30):

- Woodpecker WP-632AM
- Computer-Aided Tap Tester (CATT)
- Wichitech RD3 Tap Hammer.



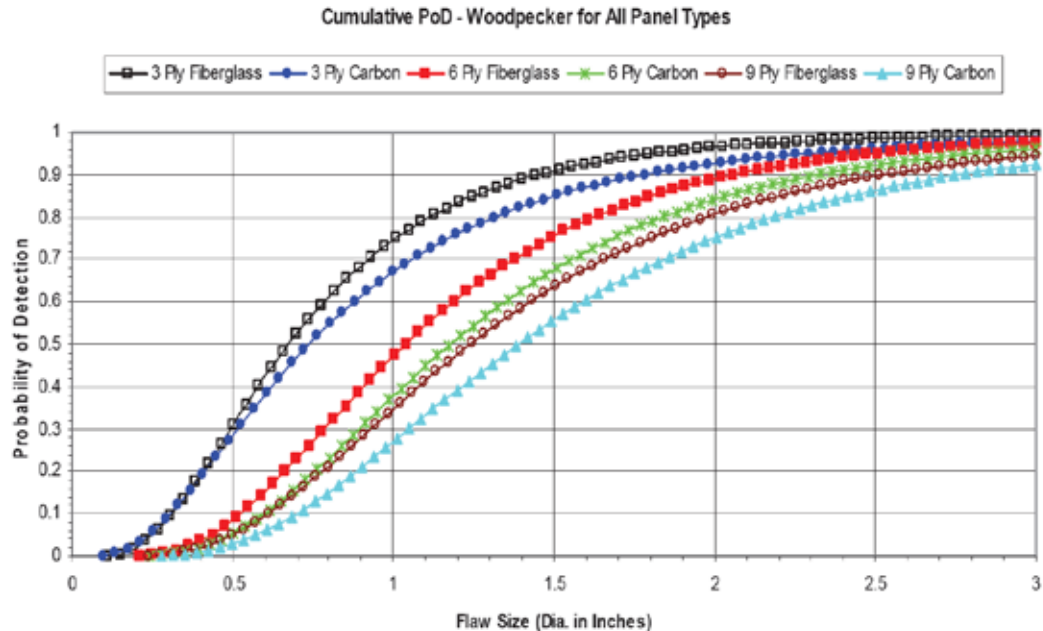
Kuva 30. Instrumentoituja iskuvasaroita Woodpecker (ks. edellinen sivu yli kuva), CATT ja Wichitech Tap hammer (3), (4), (5).

Instrumentoidut koputusvasarat soveltuvat valmistajien tietojen mukaan parhaiten delaminaatioiden ja kerroslevyjen liimasaumojen tutkimiseen. Erityisesti sovel-luskohteena mainitaan hunajakennorakenteet. Tyypilliset käyttökohteet ovat lähinnä lentotekniikassa käytetyt komposiitit.

Koputusmenetelmien soveltuvuutta komposiittirakenteiden tarkastamiseen on arvioitu esim. FAA:n (Federal Aviation Administration) toimesta. Tutkimus kes-kittyi tyypillisten lentokonerakenteissa esiintyvien kerroslevyjen tarkastamiseen. Kuva 31 esittää vian havaitsemisen todennäköisyyden vian halkaisijan funktiona Woodpecker-iskulaitteelle. Kokeet tehtiin hunajakenko-kerroslevyille, joiden pin-

talevyjen paksuus vaihteli. Koputusvasaroiden luotettavuus näyttää tutkimusten valossa heikkenevän laminaatin paksuuden kasvaessa.

Performance of a Single Device over the range of Test Specimens



Kuva 31. Vian havaitsemisen todennäköisyys halkaisijan funktiona Woodpecker-iskulaitteelle. Koekappaleina hunajakennokerroslevyt vaihtelevin pintalevyin (6).

Veneiden liimatuissa lujitemuovipalkistoissa laminaattien ainevahvuudet ovat suuria, joten on syytä olettaa, etteivät markkinoilla olevat iskulaitteet ole erityisen soveltuvia tarkastusmenetelmäksi. Selvityksessä esiin tulleet laitteet eivät myöskään vaikuta olevan erityisen tehokkaita käytettäväksi esimerkiksi veneiden tuotannossa niiden hitauden vuoksi.

Liitoksien testaukseen (bond testing) markkinoidaan myös erilaisiin ääni- ja ultraäänitekniikoihin perustuvia laitteita. Laitteisiin voidaan valita sopiva mittausmenetelmä tarkastettavan kohteen mukaan:

- Pitch-catch menetelmät (ei väliainetta):
 - RF-method, impulse method, swept method
- MIA-menetelmä (Mechanical Impedance Analysis) (ei väliainetta)
- Resonanssimenetelmä: Luotain asetetaan resonoimaan ja asetetaan kappaleen pinnalle (nestemäinen välittäjäaine).

Laitteiden sovelluskohteet ovat erilaiset delaminaatiovauriot ja komposiittien liitoksissa, esim. kerroslevyn ydinaineen ja pintalevyn liitoksissa esiintyvät vauriot. Tyypillisesti ns. ”bond test” -laitteita käytetään lentokonerakenteiden tarkastukseen. Markkinoilla olevia laitteita ovat esimerkiksi:

- Bondmaster 1000e+
- Bondascope
- V-95 Bondcheck.

Esimerkkitapauksena lisäselvityksen kohteena ollut Bondmaster 1000e+ ei valmistajan mukaan kuitenkaan sovelly kovin hyvin tyypillisille tyypillisten tuotan-

toveneiden jäykistepalkkien liimaliitosten tarkastamiseen materiaalien suuresta vaimennuksesta johtuen.

3 FE-mallit

3.1 Veneen FE-malli

Projektissa tehtiin veneen pohjapalkiston kokonaismalli ABAQUS-ohjelmalla (Kuva 32). Laskentamallia varten suunniteltiin melko raskas perämoottorivene ISO 12215-6 standardin ohjeiden mukaan. Runko ja palkisto koostuivat katkokuitumattoa ja -rovinkia sisältävistä lasikuitulaminaateista. Taulukossa 1 on esitetty veneen perusmitat ja rungon sekä palkiston laminaattien ladonnat. Palkiston kiinnityksessä runkoon käytettiin polyesteriliimaa, jonka oletettiin olevan isotrooppista ja käyttäytyvän Hooken lain mukaisesti. Polyesteriliiman kimmomoduulina käytettiin arvoa 500 MPa ja Poissonin vakiona arvoa 0,4. Liimaliitoksen paksuus oli 10 mm. Veneen runko ja palkisto mallinnettiin 8-solmuisilla kuorielementeillä ja polyesteriliima 20-solmuisilla tiielementeillä.

Taulukko 1. Veneen perusmitat ja laminaateissa käytetyt ladonnat.

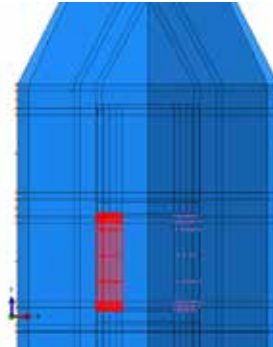
Rungon pituus	7 [m]	Runko GelCoatista TopCoatiin	
Rungon leveys	2,6 [m]	Katkokuitu CSM	1x300 g/m ²
Vesilinjan leveys	2,4 [m]	Katkokuitu CSM	3x450 g/m ²
Palleleveys	2,4 [m]	Rovinki WR	2x600 g/m ²
Pohjakulma	19°	Katkokuitu CSM	5x450 g/m ²
Syväys täydellä kuormalla	0,6 [m]	Palkisto	
Maksiminopeus täydellä kuormalla	48 [solmua]	Katkokuitu CSM	5x450 g/m ²
Paino täydellä kuormalla	3100 [kg]		
Suunnittelukategoria	C - Rannikko		



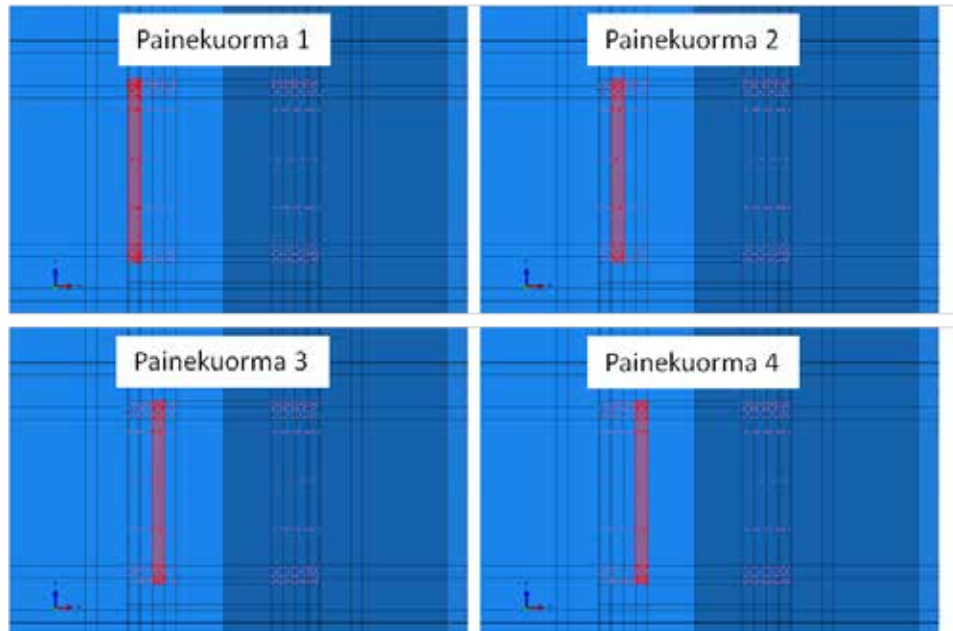
Kuva 32. Veneen elementtimalli.

Elementtimalliin lisättiin ISO 12215-6 suunnitteluperusteiden mukainen painekuorma, jolla mallinnettiin aallon vaikutusta veneen liimaliitokseen. Painekuorma jaettiin kyljen pohjapaneelissa neljään osaan (Kuva 33). Osa painekuormasta kohdistui suoraan liimaliitoksella kiinnitettyyn palkistoon, mutta suurin osa painekuormasta jäi laidoituspaneelin kannettavaksi. Tällöin liimaliitokseen kohdistui

puristuskuormituksen lisäksi repivää kuormitusta. Painekuorma oli jaettu siten, että suurin paine on lähellä köliä. Kylkeä pitkin noustaessa kohti veneen laitaa painekuorma laskee. Kuva 33 ja Taulukko 1 havainnollistavat painekuormitusta.



Kuva 33. Veneen pohjaan kohdistuva painekuorma.

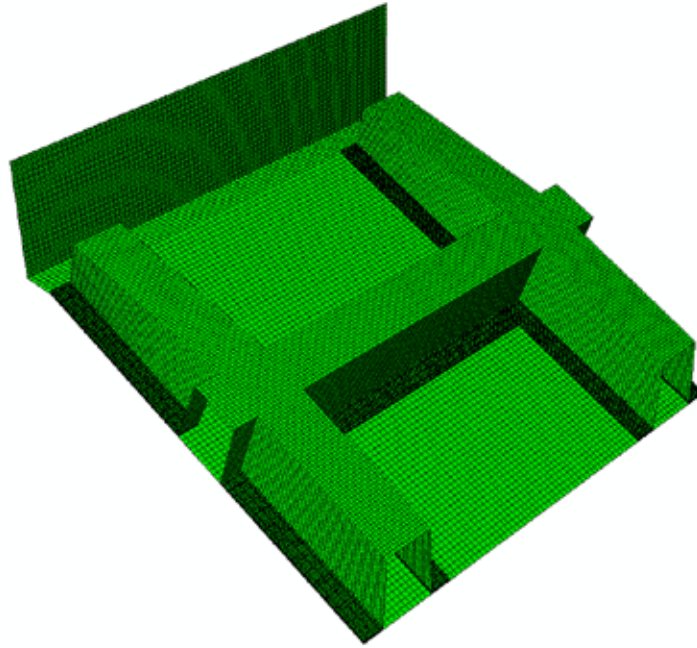


Kuva 34. Veneen pohjaan kohdistuvat neljä diskreettiä painekuormitusta.

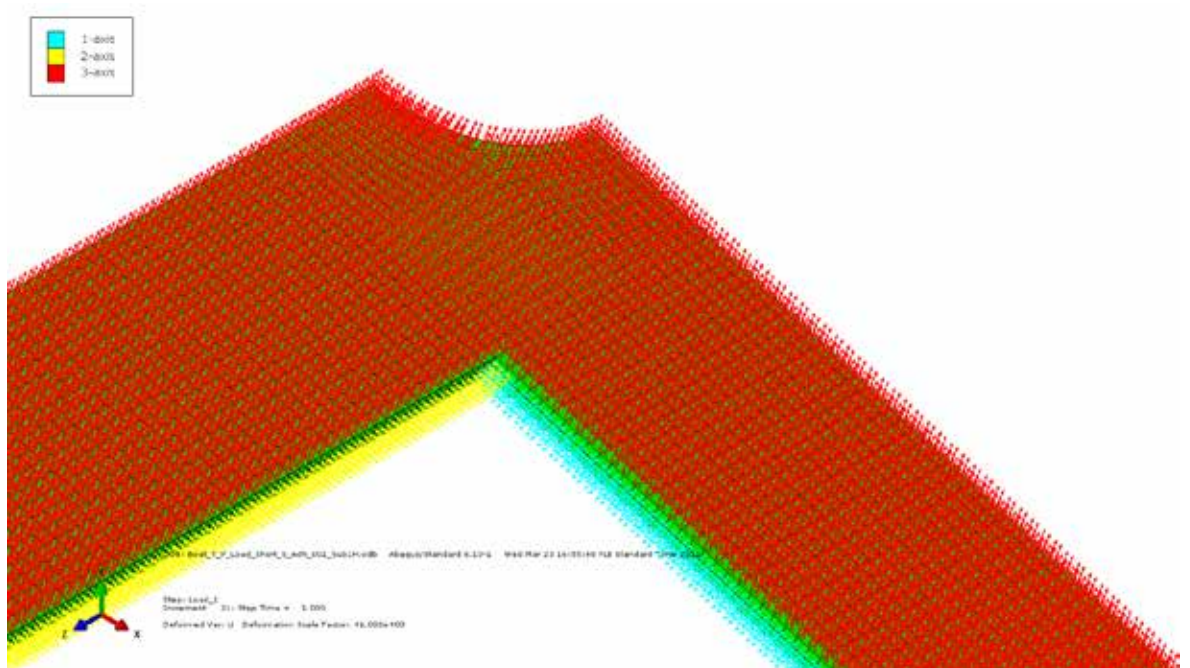
Taulukko 2. Diskreettien painekuormien arvot.

Painekuorma 1	52400 [Pa]
Painekuorma 2	108400 [Pa]
Painekuorma 3	162600 [Pa]
Painekuorma 4	216800 [Pa]

Veneen perän siirtymä- ja kiertymävapausasteet estettiin. Tällöin vene joutuu taivutustilaan, veneen etuosan ollessa aaltokuormituksen alaisena. Tämän lisäksi kannen jäykistävä vaikutus huomioitiin estämällä kylkien siirtymä x- ja y-akselin suunnassa. Kuva 34 ja Taulukko 2 havainnollistavat mallissa käytettyjä kuormitustiloja. Ratkaisun tuloksia käytettiin alimallissa (Kuva 35), jonka avulla jännitystilaa liimaliitoksessa voidaan analysoida tarkemmin. Alimallilla on analysoitu ehjää ja vioittunutta liimasaumaa.



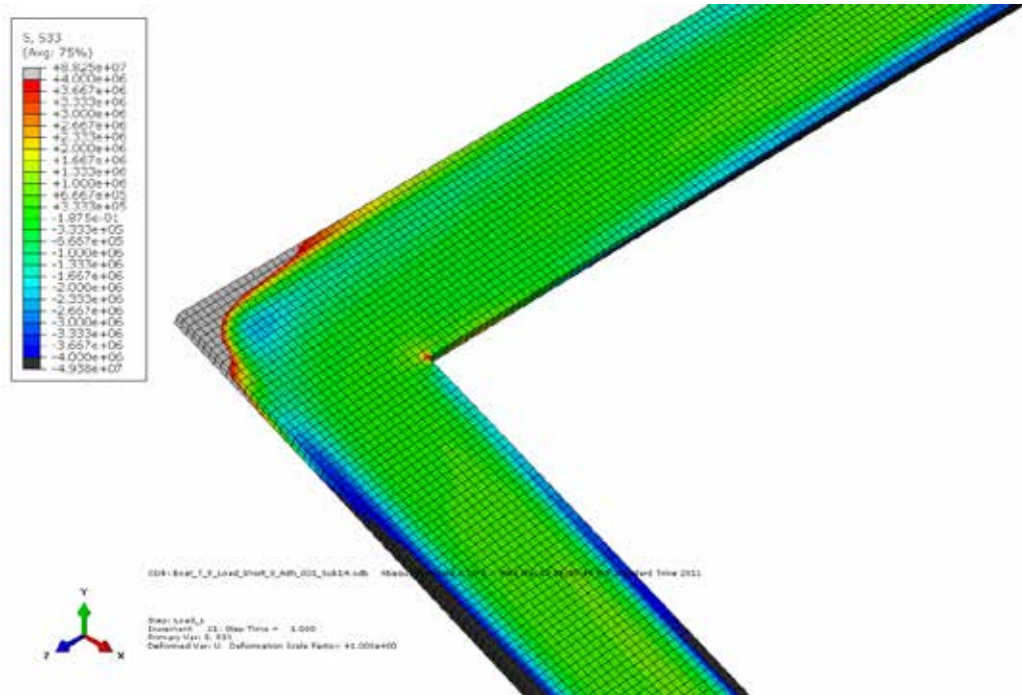
Kuva 35. Alimalli liimasauman tarkempaa tarkastelua varten.



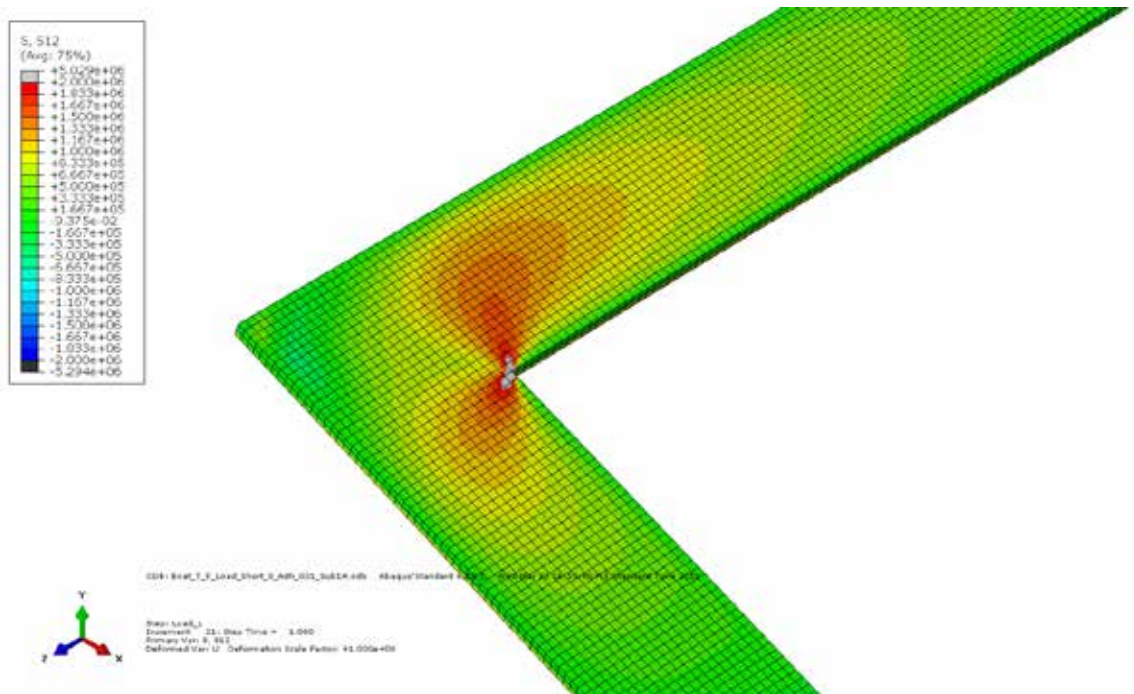
Kuva 36. Tulosten tarkastelussa käytetty koordinaatisto: x-akseli on suunta 1, eli veneen pituussuunta, y-akseli on suunta 2, eli veneen poikittaissuunta kulkien kylkeä pitkin ja z-akseli on suunta 3, eli veneen pohjan normaali.

Liimasauman kestävyys kannalta merkittävimmät jännityssuunnat ovat repivä, eli veneen pohjan normaalin suuntainen (z-akseli) jännityskomponentti ja leikkausjännitykset, jotka ovat tasoissa x-z ja x-y. Kuvista (Kuva 37 ja Kuva 40) huomataan, ettei liimasaumassa oleva epäjatkuvuuskohta aiheuta suuria muutoksia liimasauman repivään jännityskenttään. Toisaalta Kuva 38 ja Kuva 41 osoittavat tason x-y leikkausjännityksen keskittyvän lähinnä liimasauman sisäkulmaan, vaikka epäjatkuvuuskohtan reunaelementeissä on havaittavissa leikkausjännityksen lisääntymistä. Tasossa x-z liimasauman epäjatkuvuuskohtaan ei muodostu

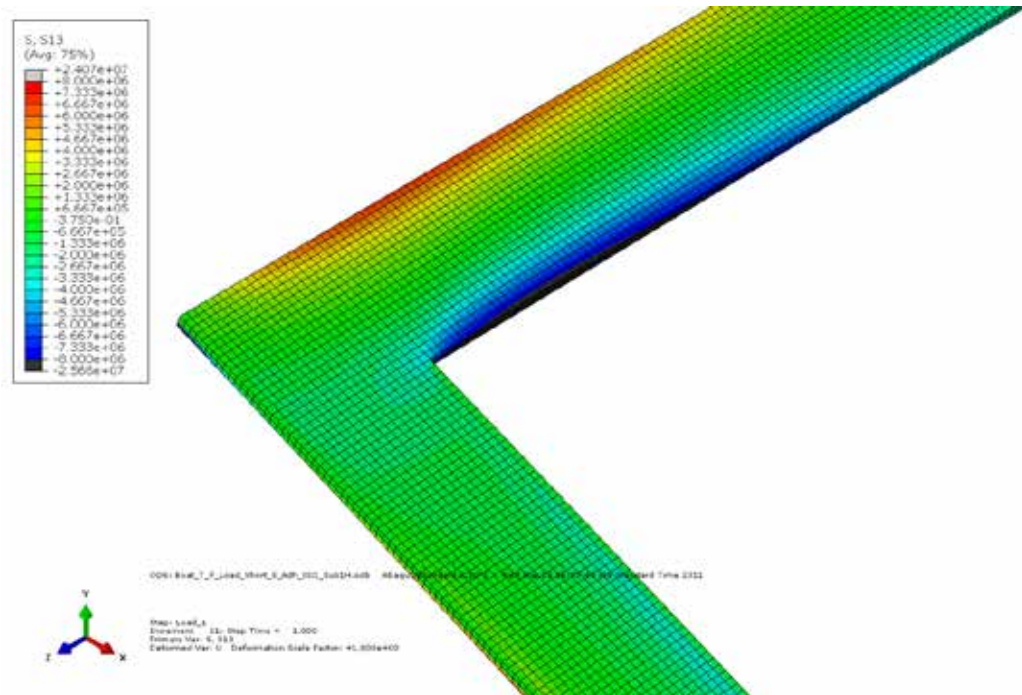
merkittäviä leikkausjännityksiä (Kuva 39 ja Kuva 42). Näin ollen voidaan todeta, ettei epäjatkuvuuskohta tällä kuormituksella tässä kohtaa liimasaumaa aiheuta merkittäviä jännityskeskittymiä liimasaumassa.



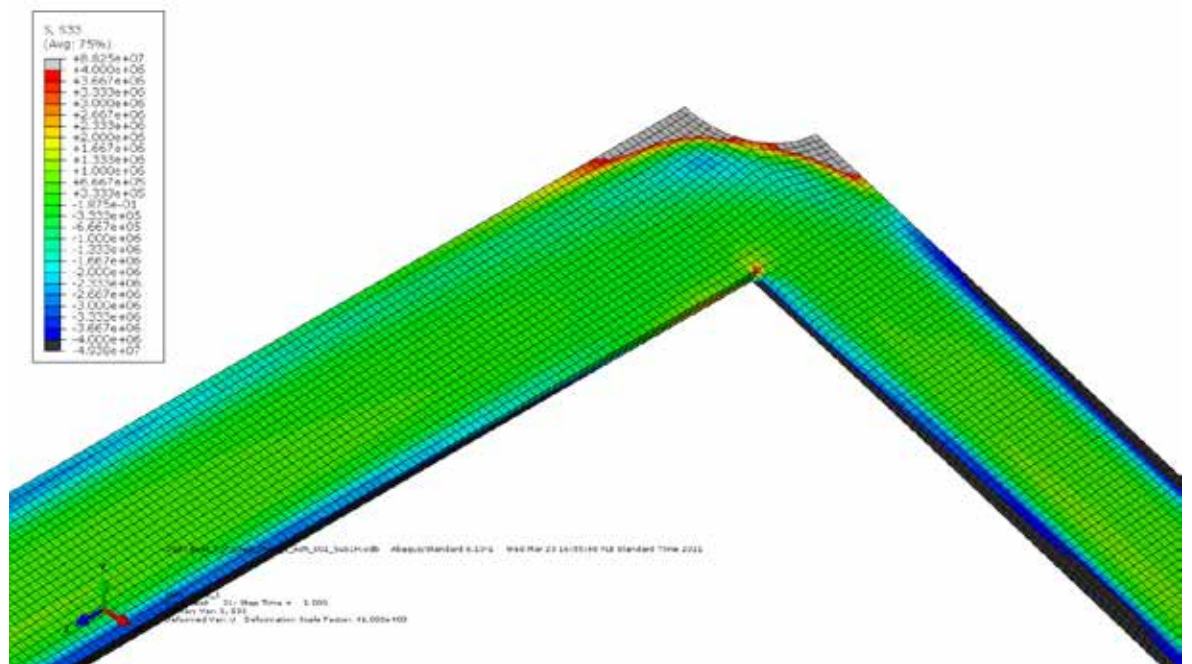
Kuva 37. Repivä jännitys, eli pohjan normaalin suuntainen (z-akseli) jännityskomponentti liimasauman keskipinnalla.



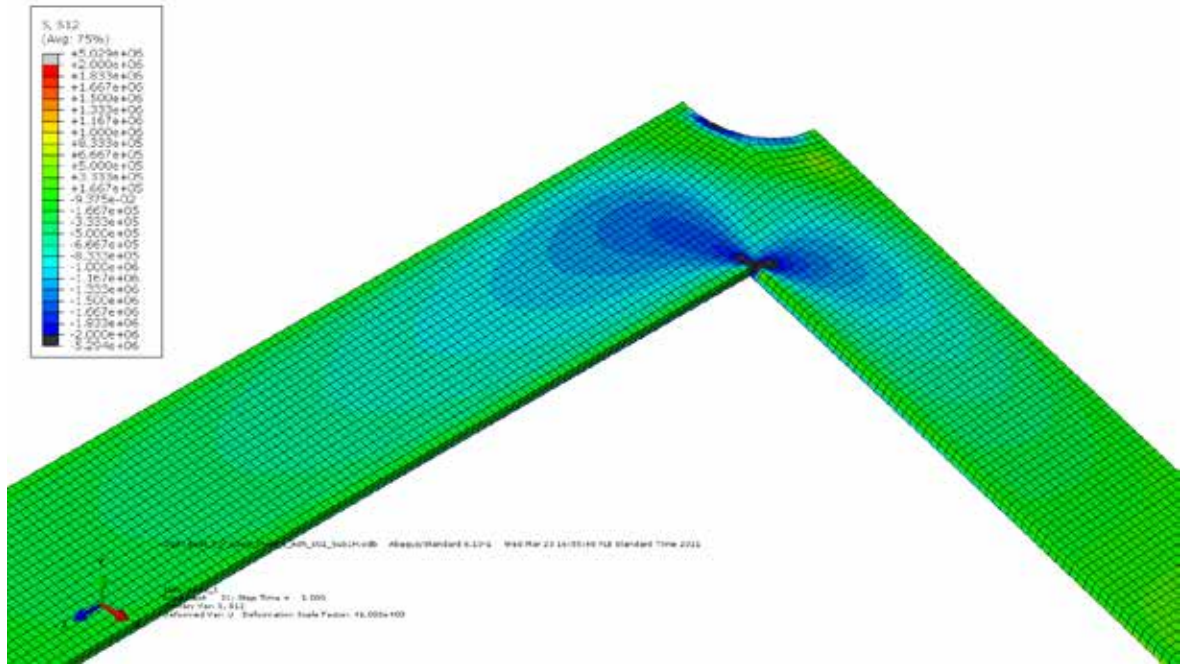
Kuva 38. Leikkausjännitys tasossa x-y liimasauman keskipinnalla.



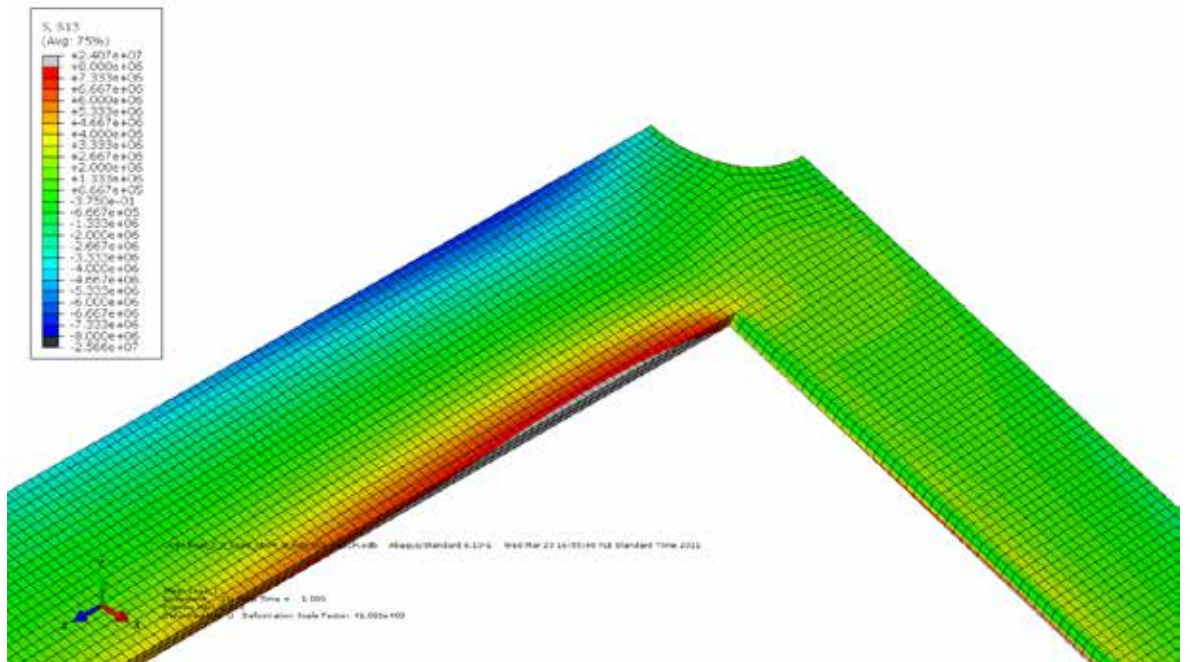
Kuva 39. Leikkausjännitys tasossa x - z liimasauman keskipinnalla.



Kuva 40. Repivä jännitys eli pohjan normaalin suuntainen (z -akseli) jännityskomponentti liimasauman keskipinnalla, kun saumassa on epäjatkuvuuskohta.



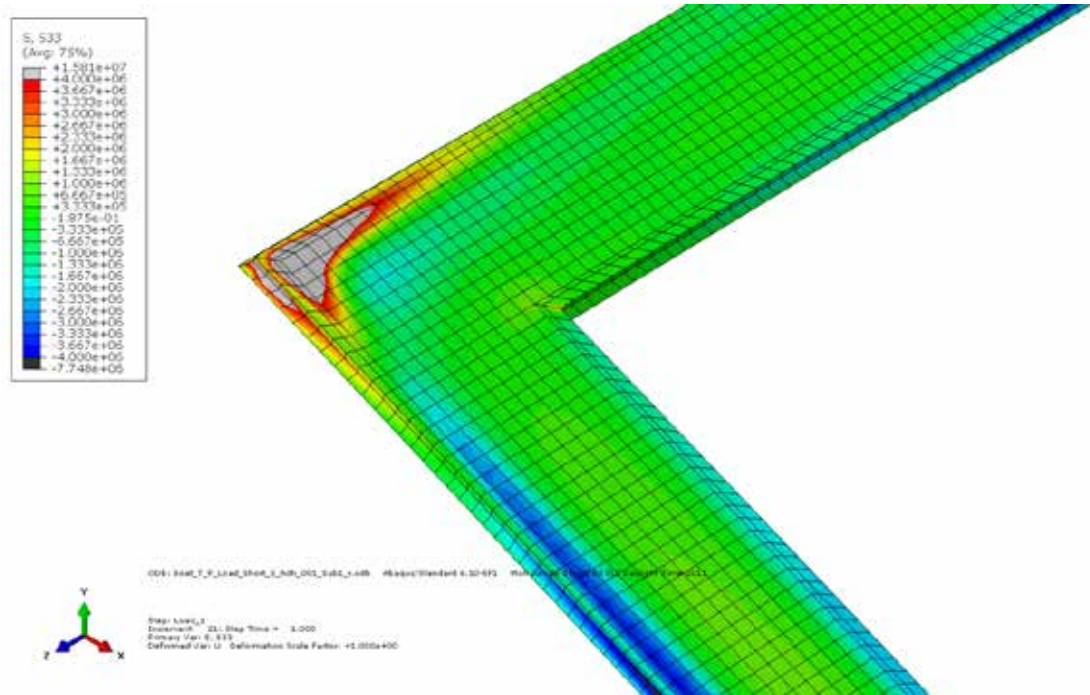
Kuva 41. Leikkausjännitys tasossa x - y liimasauman keskipinnalla, kun saumassa on epäjatkuvuuskohta.



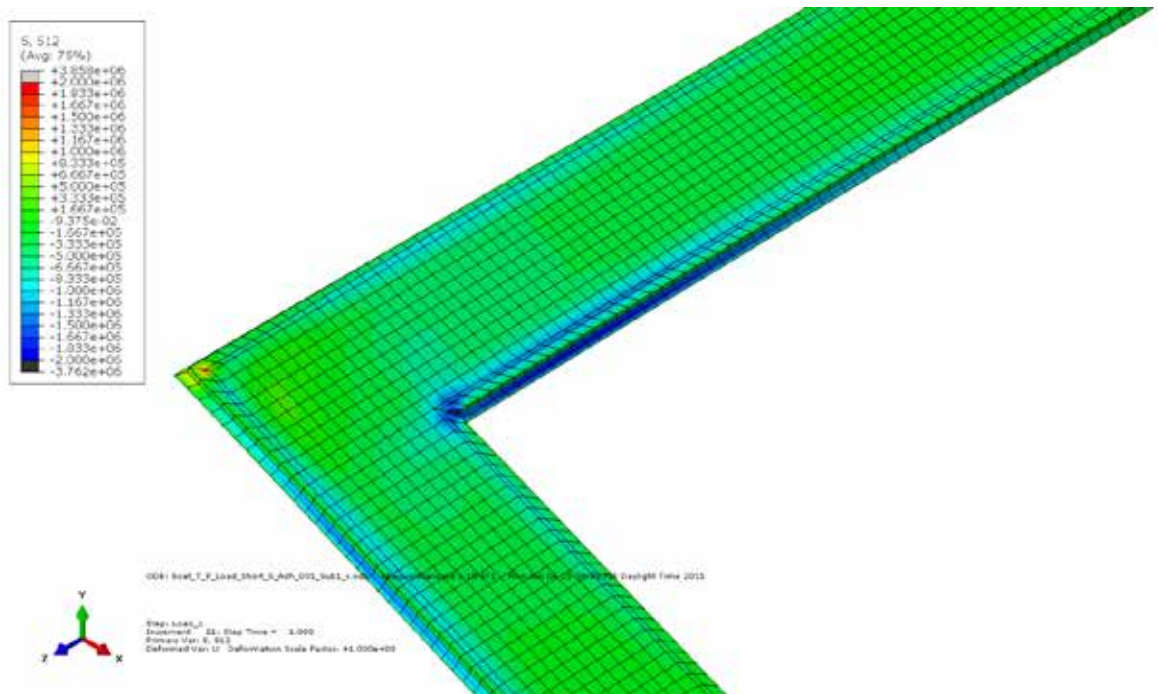
Kuva 42. Leikkausjännitys tasossa x - z liimasauman keskipinnalla, kun saumassa on epäjatkuvuuskohta.

Edellä esitetyssä alimallissa (Kuva 35) kaikki liimasauman reunat ovat teräviä ja aiheuttavat näin suurempia jännityskeskittymiä. Tämän takia alimallista tehtiin uusi malli, johon lisättiin pyöristys ja viiste, jolloin liimasaumaan muodostuvat jännitykset pienenevät. Kuva 43 esittää pyöristetyn liimasauman repivää jännitystä (z -akseli), Kuva 44 tasossa x - y vaikuttavaa leikkausjännitystä ja Kuva 45 tasossa x - z vaikuttavaa leikkausjännitystä. Kun verrataan kuvia (Kuva 37 ja Kuva 43) huomataan, että liimasauma reunan pyöristäminen mallissa pienentää mallin antamia repivä jännityksiä. Pyöristyksillä on suurin vaikutus leikkausjännityksiin

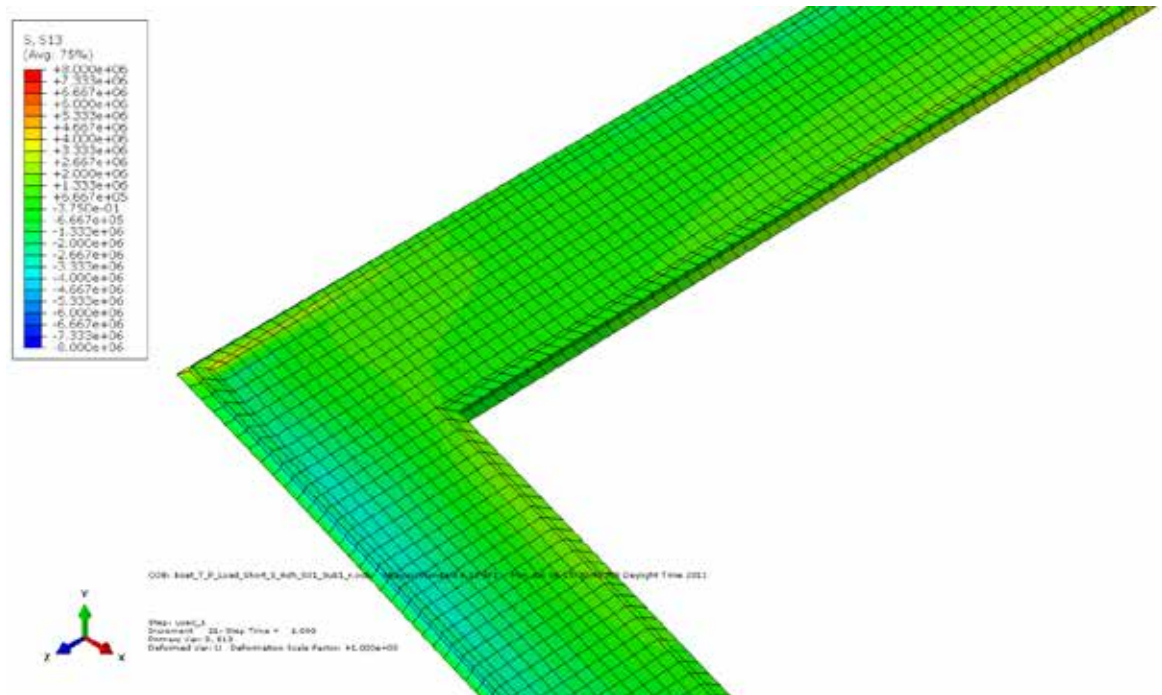
tasossa x-y ja x-z (Kuva 38, Kuva 44, Kuva 39 ja Kuva 45). Kaikissa repivän jännityksen kuvissa jännitysasteikko on sama. Tämä pätee myös leikkausjännityskuviin.



Kuva 43. Repivä jännitys eli pohjan normaalin suuntainen (z-akseli) jännityskomponentti pyöristetystä liimaliitoksessa.



Kuva 44. Leikkausjännitys tasossa x-y pyöristetystä liimaliitoksessa.



Kuva 45. Leikkausjännitys tasossa x-z pyöristetystä liimaliitoksessa.

Taulukko 3 esittää jännityskomponenttien (leikkaus tasoissa x-z ja x-y sekä repivä jännitys z-akselin suunnassa) arvoja yksittäisissä solmuissa. Nämä solmut edustavat jännityshuippuja, jotka kuitenkin on valittu siten, etteivät mallissa mahdolliset singulaaripisteet kuten terävät kulmat merkittävästi vaikuta valittujen pisteiden arvoihin (Taulukko 3). Tämän lisäksi taulukossa on vertailtu pyöristykseen vaikutuksia liimasauman jännityskomponentteihin. Tuloksista nähdään pyöristykseen pienentävän jännitystasoa kaikissa tarkastelluissa jännityskomponenteissa, mutta erityisen suuri vaikutus pyöristyksellä on leikkausjännitykseen x-y tasossa. Todellisuudessa liimasauman reunat ovat yleensä melko pyöreitä muotoja. Toisinaan esiintyy pursevikoja, joissa liimaa puuttuu (esim. ilmakupla) ja liimasauman reuna on jyrkähkö.

Taulukko 3. Vertailutaulukko ehjän ja viallisen liimasauman jännityshuippujen välillä sekä pyöristämättömä ja pyöristetyn ehjän liimasauman jännityshuippujen välillä.

Pyöristämätön	Reikä	Yksikkö	Ehjä	Yksikkö	Pyöristetty	Ehjä	Yksikkö
Taso x-z	6.78	MPa	6.85	MPa	Taso x-z	1.08	MPa
Taso x-y	1.43	MPa	1.67	MPa	Taso x-y	0.07	MPa
z-akseli	3.65	MPa	4.11	MPa	z-akseli	2.07	MPa

Vertaamalla näitä jännitysarvoja kappaleen 4.3 veneliimojen lujuusarvoihin (kappale 4.3 Taulukko 10) voidaan todeta että tällä paksulla liimasaumalla ja näillä materiaaliarvoilla liimasauman lujuudet eivät ylitä.

3.2 Koekappaleiden FE-mallit

3.2.1 Kolmipistetaivutuskokeiden FE-mallit

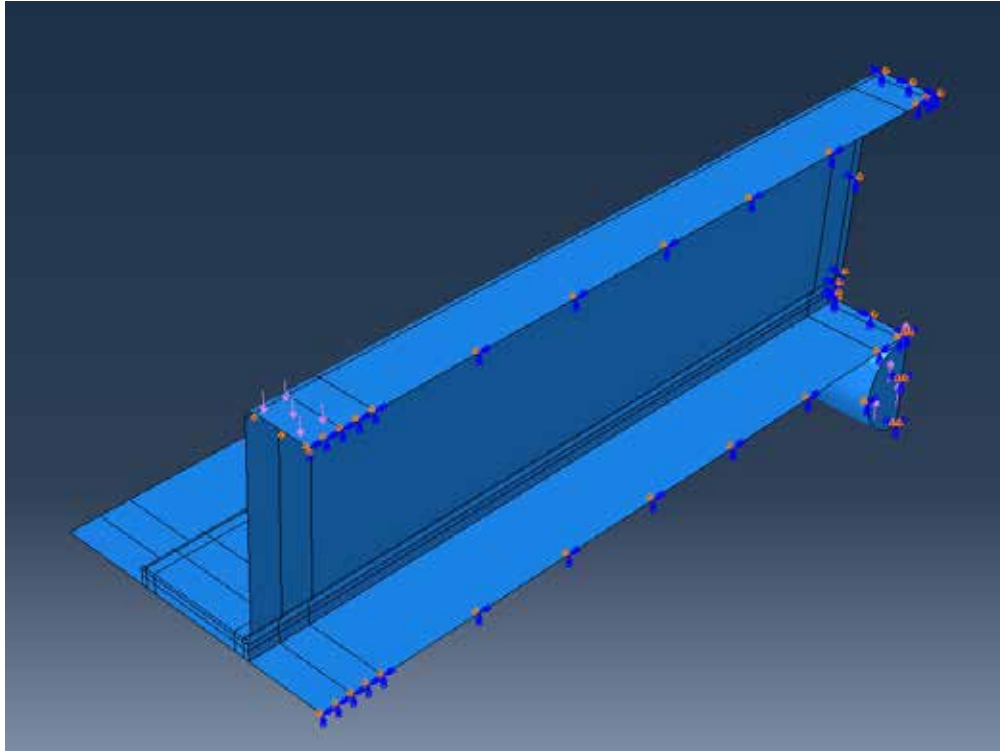
Kolmipistetaivutuskoe kuvaa tilannetta, jossa matalakölinen vene saa pohjakosketuksen esim. kiveen tai kallionharjanteeseen tai isommassa veneessä kölin kautta välittyvää kuormitusta telille siirrettäessä.

Kolmipistetaivutuskokeesta tehtiin kaksi geometriaa: Molemmissa oli 110 mm korkea hattuprofiili, jonka ylälaipan leveys oli 66,5 mm, hatun alaosan leveys 80 mm ja laippojen leveys 63,5 mm, liimattuna 700 mm * 300 mm paneeliin ja kuormitettuna kuvan (Kuva 46) mukaisesti. Ensimmäisessä geometriassa kuvattiin normaalit liimapurseet, toisessa hatun sisäpuolinen purse jätettiin pois ja kolo ulottui hieman laipan allekin. Edellisessä tutkittiin palkin normaalia jännitystilaa kuormitettaessa palkki kolmipistetaivutuksena paneelin puolelta murtoon asti (Kuva 46). Jälkimmäisessä mallissa tutkittiin pursevian vaikutusta jännitystilaan samassa kuormituksessa (Kuva 47). Tuotannossa pursevika ei yleensä ole koko palkin mittainen, vaan liimaa puuttuu vain joltakin matkalta. Syynä pursevian yksinkertaistukseen oli ABAQUS CAE:n heikkous kaksoiskaarevien pintojen verkotuksessa.

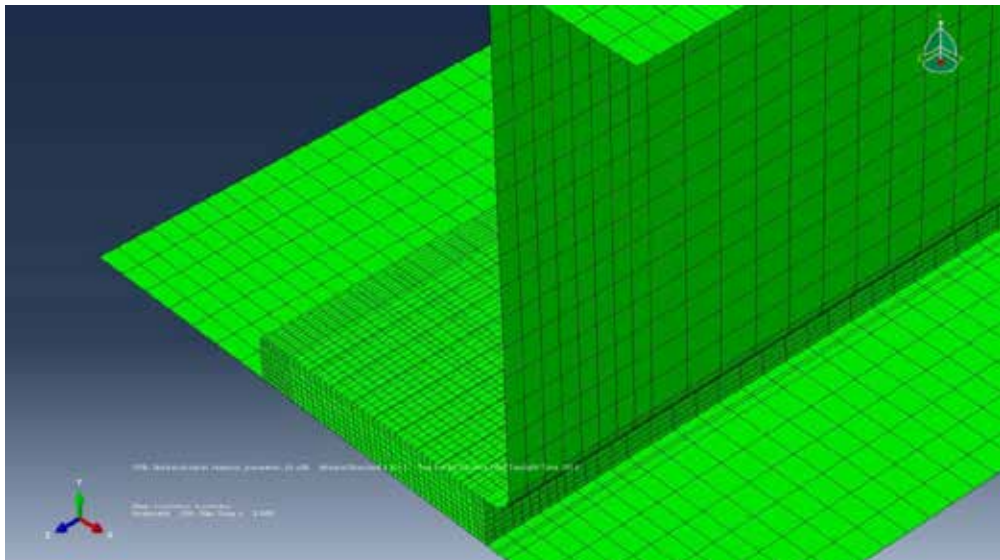
Ensimmäisestä mallista tehtiin useita erilaisia versioita. Mallissa käytetyt liimat olivat seuraavat:

- Polyuretaaniliimamassa Büfa Klebeharz 740-4426
- Sikafast-3131 2-komponentti metyylimetakrylaatti.

Versio 1 käyttäen kokeen mukaisia ruiskulaminoituja palkkia ja paneelia (jäykkyys 9 GPa) ja Klebehartz liimaa. Lisäksi tehtiin vielä monta eri liimapaksuutta välillä 1 mm - 10 mm. Versio 2 käyttäen samoja palkkia ja paneelia ja SikaFast liimaa, eri liimapaksuuksia 1 mm - 10 mm. Versiot 3 ja 4 kuten versiot 1 ja 2, mutta palkin ja paneelin jäykkyys oli 12,46 GPa (ajatuksena kuvata käsinlaminoitua palkkia ja paneelia).



Kuva 46. Kolmipistetaivutuksen malli ja kuormitus.

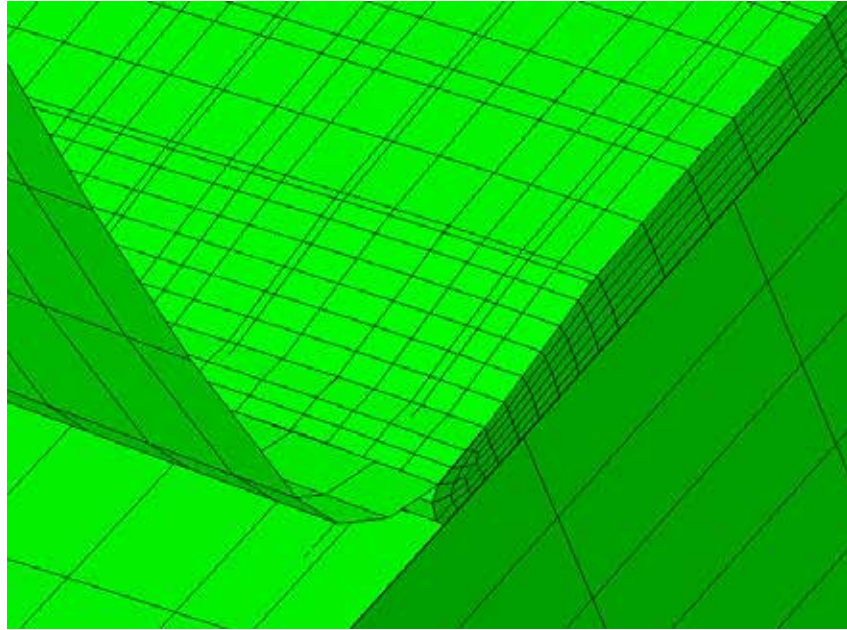


Kuva 47. Purseviallinen malli.

3.2.1.1 Malli 1, versio 1, ruiskulaminoitu palkki ja paneeli, jäykkä liima

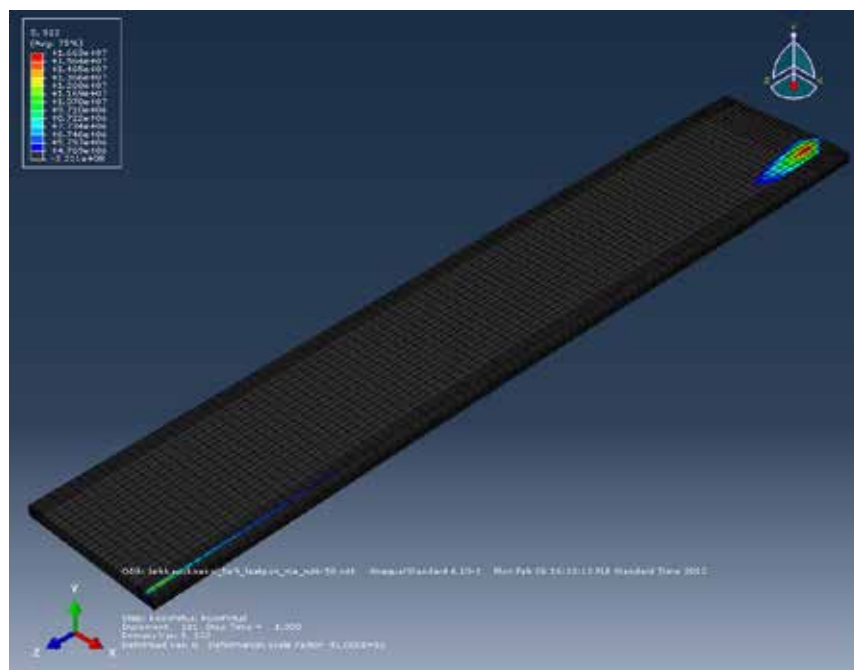
Tässä mallissa palkin ja paneelin jäykkyys oli 9 GPa. Mallista tehtiin useita versioita eri liimapaksuuksilla. Malleissa 50 kN kuormalla (kokeiden maksimikuormien keskiarvo) rakenne taipui noin 17 mm. Kokeissa maksimitaipuma oli keskimäärin noin 15 mm.

Tutkittaessa liimasauman jännityksiä ja muodonmuutoksia havaittiin, että kuormittavan rullan lähellä palkin uuma puristui liimapursetta vasten, jolloin liiman sisäreunan alueelle syntyi puristusta (Kuva 48). Vastaavasti kauemmas liiman sisäreunasta pyrki syntymään kohouma, joka aiheutti ko. alueelle paneelin tasoa vastaan kohtisuoria vetojännityksiä (Kuva 49).



Kuva 48. Liimasauman reuna puristuu uuman puristuessa paneelia kohti.

Palkin ja paneelin jännityksiä paksuussuunnassa on hieman hankala arvioida tässä käytetyn FE-mallin avulla, koska mallissa palkki ja paneeli on kuvattu kuorielementeillä. Kohtuullisen arvion ko. jännityksille lähellä liiman ja laminaatin rajapintaa saa kuitenkin venymän jatkuvuusehdosta rajapinnassa. Jotta venymä rajapinnassa olisi jatkuva, tulee jännityksen muuttua rajapinnassa jäykkyysien suhteessa. Kuva 49 esittää aluetta, jolla liiman vetojännitys paneelin tasoa vastaan kohtisuorassa suunnassa ylitti mallissa tällä tavalla saadun palkin laipan paksuussuuntaisen jännitysarvon (= palkin lujuus tasoa vastaan kohtisuorassa suunnassa * liiman jäykkyys/palkin jäykkyys tasoa vastaan kohtisuorassa suunnassa). Tämä alue on suunnilleen alue, jolta palkin laipan pitäisi delaminoitua, mikäli liiman adheesio palkin laippaan on suurempi kuin palkin laipan lujuus paksuussuunnassa.



Kuva 49. Kriittisen repivän jännityksen alue jäykän liiman tapauksessa, kun palkin ja paneelin jäykkyudeksi on oletettu 9 GPa ja liimasauman paksuudeksi 5 mm.

Kriittisen repivän jännityksen alueita liimasaumassa on kolmipistetaivutuksessa kaksi. Toinen on rullan lähellä, jonkin matkaa hatun sisäpuolisen liimasauman reunasta laipan keskelle päin, toinen lähellä tukea ja lähempänä hatun sisäpuolista liimasauman reunaa.

Taulukko 4 esittää suurimmat jännitykset liimasaumassa eri paksuisille liimakerroksille.

Taulukko 4. Liimasauman jännitykset käytettäessä ruiskulaminoituja palkkeja ja jäykkää liimaa.

Malli	liima	sauma mm	taipuma mm	repivä jänn. liimassa MPa	leikkaus liimassa MPa	jänn. suhde	puristus liimassa MPa
Ob-50	jäykkä	2.8	17	31	55.5	0.56	-280
6-50	jäykkä	5	17	19	40.2	0.47	-236
4-50	jäykkä	10	16.3	12.3	34.2	0.36	-182

Taulukosta nähdään, että paksummalla liimakerroksella jännitykset ovat pienempiä ja repivän jännityksen osuus on pienempi. Puristusjännitykset ylittävät liiman lujuuden, mutta kokeissa liima lähinnä puristui kasaan ilman näkyviä vaurioita.

Malleista on nähtävissä myös, että palkin ylälaippaan syntyy niin suuria vetojännityksiä, ettei ruiskulaminaatti niitä kestä. Tämä asia on havaittavissa kaikissa tässä projektissa tehdyissä kolmipistetaivutuskokeiden malleissa - jos ymmärtää katsoa oikeata kohtaa. Valitettavasti tarkastelimme vain liimasauman jännityksiä. Palkkien jännityksiin tulimme kiinnittäneeksi huomiota koesuunnittelun kannalta liian myöhään - koekappaleet oli jo valmistettu. Tähän johti ennako-oletus siitä että liimasauma olisi rakenteen kriittinen kohta. Esikokeissakaan ongelma ei tullut ilmi, koska esikokeissa käytettyjen palkin päiden viisteiden vaatima erikoinen tuentatapa johti liimasauman peittämiseen ja murtokuorman merkittävään alenemiseen.

3.2.1.2 Malli 1, versio 2, ruiskulaminoitu palkki ja paneeli, joustava liima

Tässä mallissa palkin ja paneelin jäykkyys oli 9 GPa. Mallista tehtiin useita versioita eri liimapaksuuksilla. Malleissa 50 kN kuormalla rakenne taipui noin 17 mm. Kokeissa vastaava taipuma oli noin 19 mm.

Taulukko 5 esittää suurimmat jännitykset liimasaumassa eri paksuisille liimakerroksille.

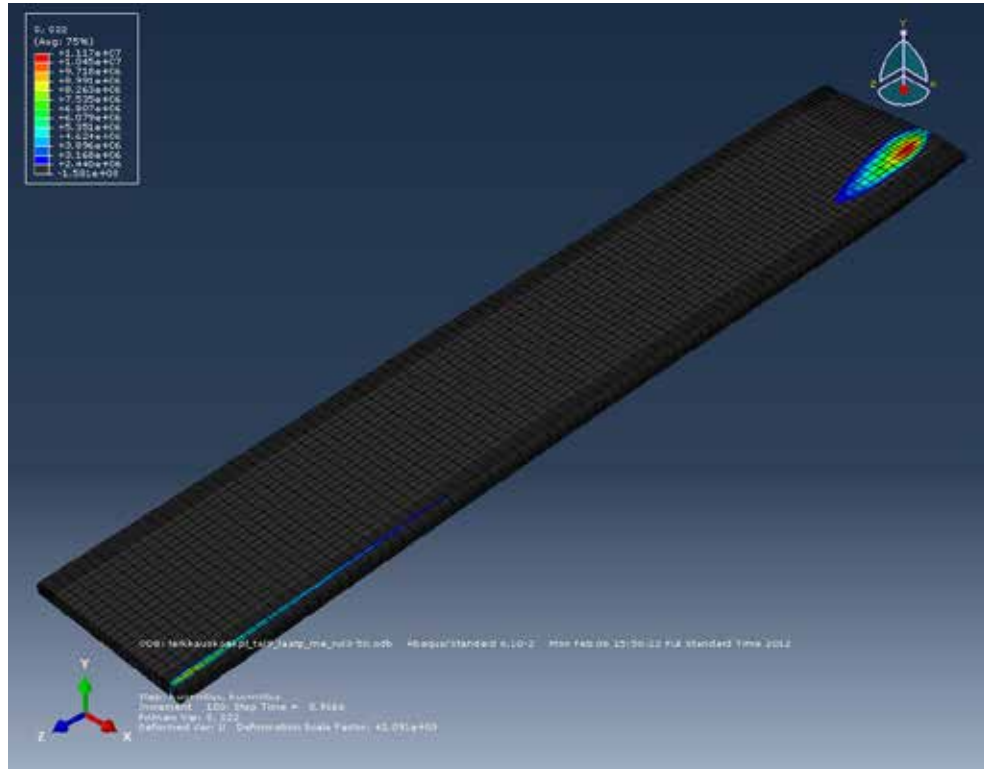
Taulukko 5. Liimasauman jännitykset käytettäessä ruiskulaminoituja palkkeja ja joustavaa liimaa.

Malli	liima	sauma mm	taipuma mm	repivä jänn. liimassa MPa	leikkaus liimassa MPa	jänn. suhde	puristus liimassa MPa
10-50	joustava	2	17.5	26.8	57.6	0.47	-246
3-50	joustava	5	16.7	13.3	26.7	0.50	-160
8-50	joustava	10	17	10	24.7	0.40	-127

Taulukosta nähdään, että paksummalla liimakerroksella jännitykset ovat pienempiä ja repivän jännityksen osuus on pienempi. Vertaamalla taulukkoon (Taulukko 4) huomataan, että joustavammalla liimalla jännitykset ovat pienempiä. Puristusjännitykset ovat silti varsin suuria ja ylittävät liiman lujuuden.

Kuva 50 esittää aluetta, jolla mallista venymän jatkuvuusehdon avulla arvioitu palkin laipan paksuussuuntainen jännitys ylitti laipan paksuussuuntaisen lujuuden. Vertaamalla tätä kuvaan (Kuva 49) havaitaan, että joustavalla liimalla kriittisen

repivän jännityksen alue on hieman laajempi, vaikka suurimman repivän jännityksen absoluuttiarvo on pienempi kuin jäykällä liimalla.



Kuva 50. Kriittisen repivän jännityksen alue joustavan liiman tapauksessa, kun palkin ja paneelin jäykkyudeksi on oletettu 9 GPa ja liimasauman paksuudeksi 2 mm.

3.2.1.3 Malli 1, versio 3, käsinlaminoitu palkki ja paneeli, jäykkä liima

Tässä mallissa palkin ja paneelin jäykkyys oli 12,46 GPa. Mallista tehtiin useita versioita eri liimapaksuuksilla. Malleissa 50 kN kuormalla rakenne taipui noin 12 mm.

Vertaamalla näitä malleja ruiskulaminoitun palkin ja paneelin sisältäviin malleihin havaitaan että palkin ja paneelin ollessa jäykempiä liimasauman jännitykset jäävät hieman pienemmiksi. Palkin taipuma on luonnollisesti myös pienempi.

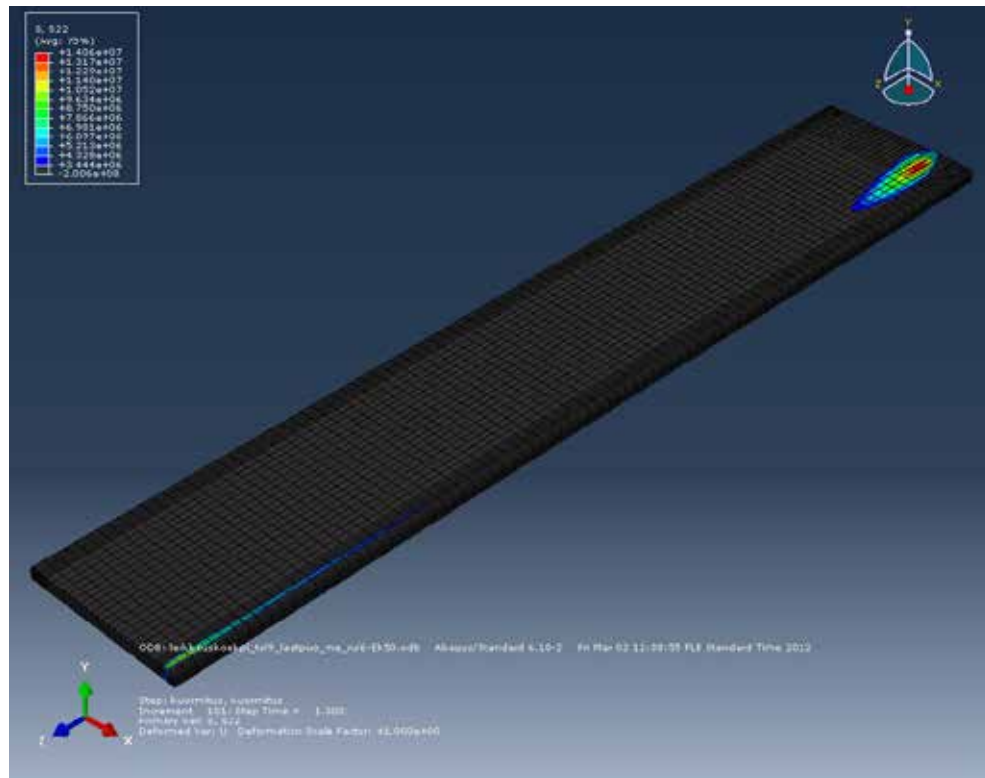
Taulukko 6 esittää suurimpia jännityksiä liimasaumassa eri paksuisille liimakerroksille

Taulukko 6. Liimasauman jännitykset käytettäessä käsinlaminoituja palkkeja ja jäykkää liimaa.

Malli	liima	sauma mm	taipuma mm	repivä jänn. liimassa MPa	leikkaus liimassa MPa	jänn. suhde	puristus liimassa MPa
0b-Ek50	jäykkä	2.8	12.5	23.3	52	0.45	-254
6-Ek50	jäykkä	5	12.4	16.8	37.9	0.44	-227
4-Ek50	jäykkä	10	12	11	29.7	0.37	-174

Taulukosta nähdään jälleen, että paksummalla liimakerroksella jännitykset ovat pienempiä ja repivän jännityksen osuus on pienempi. Vertaamalla taulukkoon (Taulukko 4) huomataan että käsinlaminoitussa tapauksessa jännitykset ovat hieman pienempiä kuin ruiskulaminoitussa tapauksessa. Puristusjännitykset ovat silti varsin suuria ja ylittävät liiman lujuuden.

Kuva 51 esittää aluetta, jolla mallista venymän jatkuvuusehdon avulla arvioitu palkin laipan paksuussuuntainen jännitys ylitti laipan paksuussuuntaisen lujuuden. Vertaamalla kuvaan (Kuva 49) havaitaan, että jäykemmän palkin tapauksessa kriittinen repivän jännityksen alue rullan lähellä on hieman laajempi, vaikka suurimman jännityksen absoluuttiarvo on pienempi. Tuen lähellä taas tilanne on toisin päin: kriittinen repivän jännityksen alue on pienempi, mutta suurimman repivän jännityksen absoluuttiarvo on suurempi. Erot alueen laajuudessa ovat kuitenkin melko pieniä.



Kuva 51. Kriittisen repivän jännityksen alue käsinlaminoitua palkistoa kuvaavassa mallissa jäykällä liimalla.

3.2.1.4 Malli 1, versio 4, käsinlaminoitu palkki ja paneeli, joustava liima

Tässä mallissa palkin ja paneelin jäykkyys oli 12,46 GPa. Mallista tehtiin useita versioita eri liimapaksuuksilla. Malleissa 50 kN kuormalla rakenne taipui noin 13 mm.

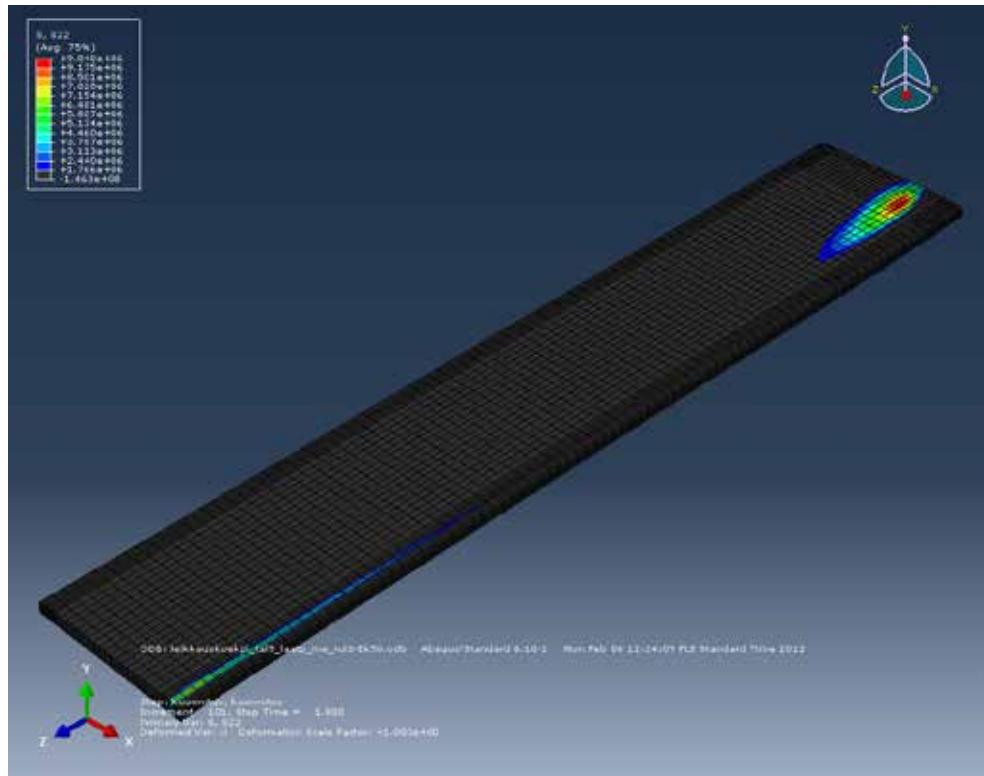
Taulukko 7 esittää suurimpia jännityksiä liimasaumassa eri paksuisille liimakeroksille.

Taulukko 7. Liimasauman jännitykset käytettäessä käsinlaminoituja palkkeja ja joustavaa liimaa.

Malli	liima	sauma mm	taipuma mm	repivä jänn. liimassa MPa	leikkaus liimassa MPa	jänn. suhde	puristus liimassa MPa
0-Ek50	joustava	2.8	12.7	18.2	40.9	0.44	-185
3-Ek50	joustava	5	12.7	10.7	25.6	0.42	-152
8-Ek50	joustava	10	12.6	8	22.8	0.35	-119

Taulukosta nähdään jälleen että paksumpi liimasauma pienentää jännityksiä. Vertaamalla taulukkoon (Taulukko 5) huomataan jälleen, että käsinlaminoidussa tapauksessa jännitykset ovat hieman pienempiä kuin ruiskulaminoidussa tapauksessa. Puristusjännitykset ylittävät silti liiman lujuuden.

Kuva 52 esittää aluetta, jolla mallista venymän jatkuvuusehdon avulla arvioitu palkin laipan paksuussuuntainen jännitys ylitti laipan paksuussuuntaisen lujuuden. Vertaamalla kuvaan (Kuva 50) havaitaan, että käsinlaminoitussa tapauksessa kriittisen repivän jännityksen alue on hieman laajempi, vaikka suurimman repivän jännityksen absoluuttiarvo on hieman pienempi. Erot kriittisen alueen laajuudessa ja repivän jännityksen maksimi-arvoissa eivät ole suuria.



Kuva 52. Kriittisen repivän jännityksen alue käsinlaminoitua palkistoa kuvaavassa mallissa joustavalla liimalla.

3.2.1.5 Malli 2, kuten malli 1, mutta purse puuttui

Tässä mallissa käytettiin jäykkää liimaa ja palkin ja paneelin jäykkyys oli 9 GPa. Pursevikaa oli yksinkertaistettu siten, että hatun sisäpuolinen purse puuttui palkin koko matkalta. Mallissa rakenne taipui 50 kN kuormalla 19 mm.

Taulukko 8 esittää liimasauman suurimmat jännitykset.

Taulukko 8. Liimasauman jännitykset purseettomassa tapauksessa, jäykkä liima.

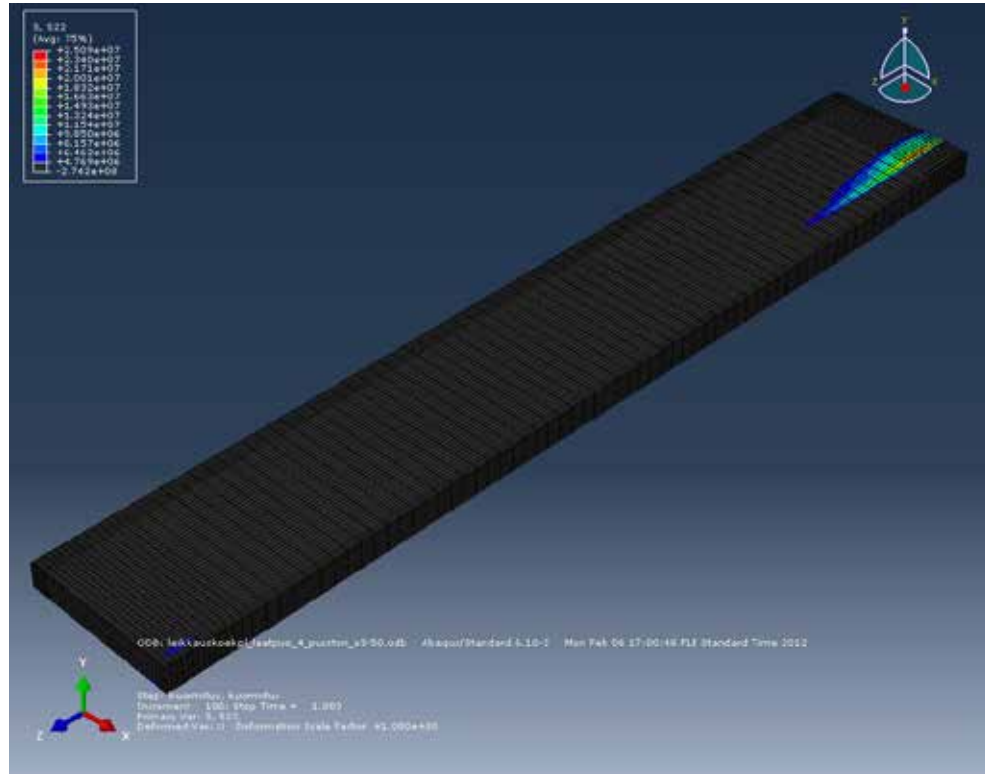
Malli	liima	sauma mm	taipuma mm	repivä jänn. liimassa MPa	leikkaus liimassa MPa	jänn. suhde	puristus liimassa MPa
purseeton-50	jäykkä	10	19.4	25.8	61.9	0.42	-269

Vertaamalla näitä taulukkoon (Taulukko 4) havaitaan, että purseen puuttuminen kasvattaa jännityksiä. Myös repivän jännityksen suhde leikkausjännitykseen kasvaa hieman. Puristusjännitys on todella suuri ja ylittää liiman lujuuden.

Kuva 53 esittää aluetta, jolla mallista venymän jatkuvuusehdon avulla arvioitu palkin laipan paksuussuuntainen jännitys ylitti laipan paksuussuuntaisen lujuuden. Vertaamalla kuvaan (Kuva 49) havaitaan, että purseettomassa tapauksessa kriittisen vetojännityksen alue kuormitusrullan lähellä ulottuu pidemmälle palkin

pituussuunnassa, kun taas tuen lähellä kriittisen vetojännityksen alue katoaa lähes kokonaan.

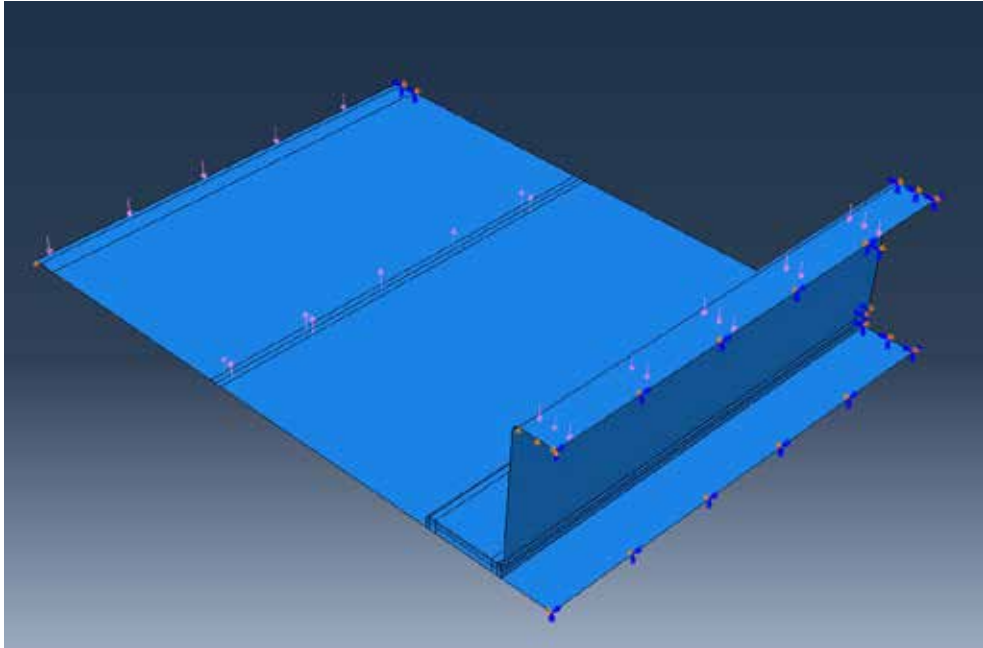
Purseen puuttuessa palkin uuma rutistuu ja taittuu enemmän liimasauman reunan ympäri ja vetojännitykset laipan alle syntyvässä vetojännitysalueessa kasvavat merkittävästi. Malleissa sekä vetojännitykset, että leikkausjännitykset noin kaksinkertaistuivat normaalin purseen tapaukseen verrattuna.



Kuva 53. Kriittisen repivän jännityksen alue purseettomassa mallissa.

3.2.2 Viisiviivataivutuskokeiden FE-mallit

Malli kuvaa yksinkertaistetulla tavalla slamming-kuormitusta. Viisiviivataivutus-
 kokeen malleissa kuormitus oli viivakuorma paneelilla palkin kummallakin puolen (Kuva 54). Kokonaiskuorma oli 25 kN. Paneeli oli tuettu vain palkin suuntaisilta reunoiltaan. Malleissa käytettiin kokeen mukaisia ruiskulaminoituja palkkia ja paneelia (9 GPa) ja 2,8 mm Klebehartz liimaa. Versio 1 tehtiin erittäin hyvällä purseella (Kuva 55), versio 2 tavanomaisella purseella, versioista 3 ja 4 purse puuttui. Versiossa 4 liimaton kolo ulottui hieman syvemmälle palkin laipan alle.



Kuva 54. Viisiviivataivutus.

Kokeissa taipumaa mitattiin rullan pään kohdalta. Tutkimalla taipuman arvoja ko. kohdassa havaittiin, että taipuma malleissa oli hyvin lähellä kokeissa mitattua taipumaa, ero oli millin tai parin luokkaa. Paneelin maksimitaipuma oli sekä kokeessa että malleissa jonkin verran suurempi kuin tämä arvo. Malleissa 25 kN kokonaiskuormalla paneeli taipui noin 91 - 94 mm. Palkki taipui paljon vähemmän kuin paneeli.

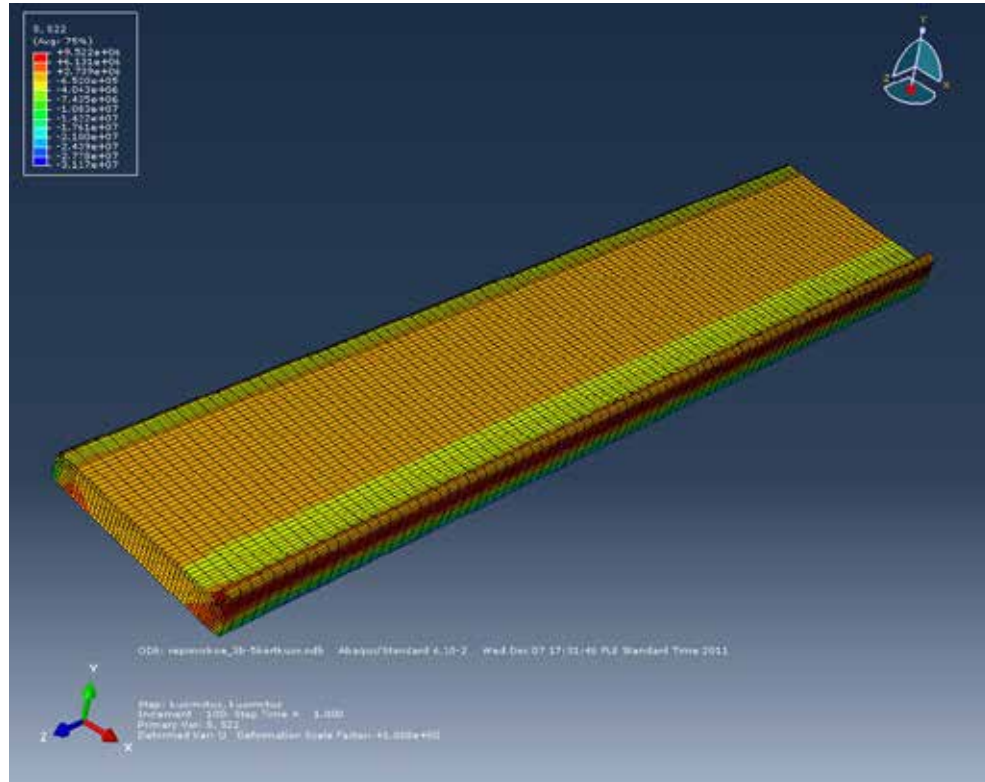
Taulukko 9 esittää liimasauman suurimmat jännitykset viisiviivataivutuskokeen malleissa. Puristusjännitykset ovat paljon pienempiä kuin kolmipistetaitvutuksen malleissa.

Taulukko 9. Liimasauman suurimmat jännitykset viisiviivataivutuskokeen malleissa 25 kN kokonaiskuormalla.

Malli	liima	sauma mm	purse	taipuma mm	repivä jänn. liimassa MPa	leikkaus liimassa MPa	jänn. suhde	puristus liimassa MPa
3b-25kNohutliimakorjmitat	jäykkä	2.8	hyvä	94	25.2	24.5	1.03	-25.2
3b-25kNohutliimakorjmitatv2	jäykkä	2.8	normaali	91.2	34.6	40.6	0.85	-22.9
3b-25kNohutliimakorjmitatv3	jäykkä	2.8	puuttuu	91.1	76.8	27.1	2.83	-50.8
3b-25kNohutliimakorjmitatv4	jäykkä	2.8	puuttuu syvälle	90.9	81.7	27.6	2.96	-49.1

Tutkittaessa liimasauman jännityksiä näissä malleissa havaittiin, että purseen muoto ja koko vaikuttavat jännityksiin. Jos hatun sisäpuolinen purse on tehty erityisen hyvin ja se tukee uumaa koko kaaren matkalta, repivät jännitykset jäävät melkein kolmanneksen pienemmiksi kuin tavanomaisella purseella. Leikkausjännitykset putoavat puoleen. Purseettomien mallien perusteella vaikuttaisi siltä, että jos purse puuttuu kokonaan, repivä jännitys liimasauman reunassa yli kaksinkertaistuu, kun taas suurin leikkausjännitys pienenee yli neljänneksen verrattuna tavanomaisen purseen tapaukseen. Tarkasteltaessa näitä tuloksia pitää kuitenkin muistaa, että mallit joista purse puuttuu, voivat liioitella jännityksiä liimasauman reunalla, koska niihin syntyy lievä singulariteetti liimasauman reunalle. Tämä ei kuitenkaan selitä eroa tavanomaisen ja hyvän purseen välillä.

Kuva 55 esittää paksuussuuntaisia jännityksiä liimasaumassa mallissa, jossa purse on erityisen hyvä.



Kuva 55. Paksuussuuntaiset jännitykset viisiviivataivutuksen mallissa, jossa hatun sisäpuolinen purse ulottuu pidemmälle ja ylemmäs.

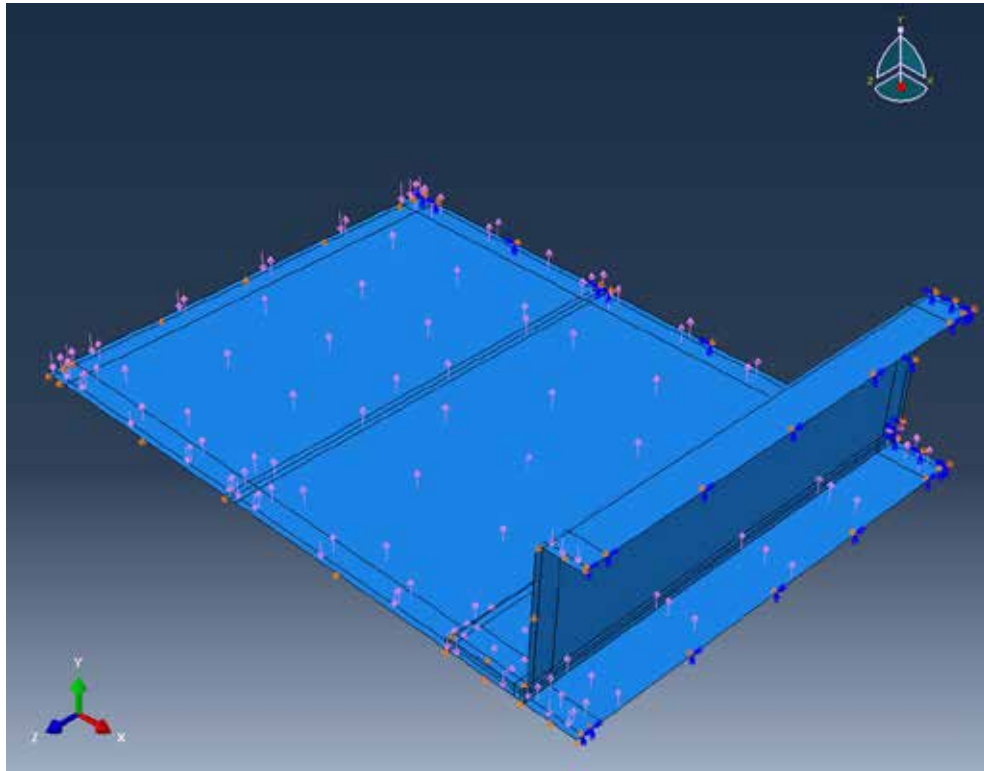
Mallista on myös nähtävissä, että paneelin laminaatti pettää ennen kuin liimasauma. Valitettavasti tarkastelimme vain liimasauman jännityksiä, paneelin jännityksiin tulimme kiinnittäneeksi huomiota koesuunnittelun kannalta liian myöhään - koekappaleet oli jo valmistettu. Tähän johti ennako-oletus siitä että liimasauma olisi rakenteen kriittinen kohta.

3.2.3 Tasokuorma paneelilla malli

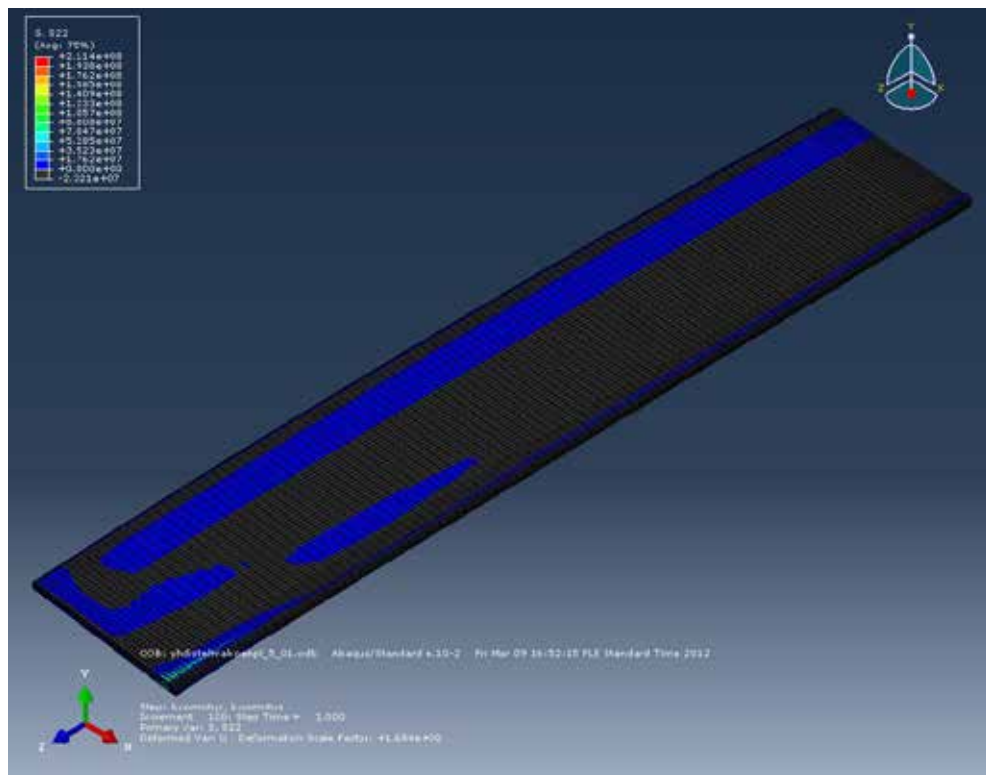
Malli kuvaa slammingkuormitusta ja tehtiin sen arvioimiseksi, miten hyvin viisiviivakoe ja kolmipistetäivutuskoe kuvaavat slammingkuormitusta. Mallissa kuormitus oli tasokuorma paneelilla (Kuva 56), jota tuki tutkittava liimattu palkki, joka kulki paneelin poikki. Paneelin tuenta oli tehty puolijäykäksi vastaamaan tilannetta, jossa tutkittava palkki olisi osa jäykistepalkkistoa. Palkin pään siirtymät palkin suunnassa oli estetty kuin myös palkin ylälaipan pään siirtymät palkin korkeussuunnassa. Tämä kuvaa sitä, että palkki jatkuisi seuraavaan paneelikenttään ja tuella olisi palkin risteys, joka toimisi uumavahvisteena.

Kuvissa (Kuva 56, Kuva 57, Kuva 58) on esitetty paksuussuuntainen veto liimasaumassa eri kuormitustyypeissä. Malleissa on käytetty erisuuruisia kokonaiskuormia, joten absoluuttiarvojen vertailua ei näiden kuvien pohjalta voi tehdä. Kuvista nähdään kuitenkin, että liimasauman jakauma tasokuorma paneelilla -mallissa on muodoltaan selvästi lähempänä viisiviivataivutuksen jännitystilaa kuin kolmipistetäivutuksen jännitystilaa, joten viisiviivataivutuskoe kuvaa slam-

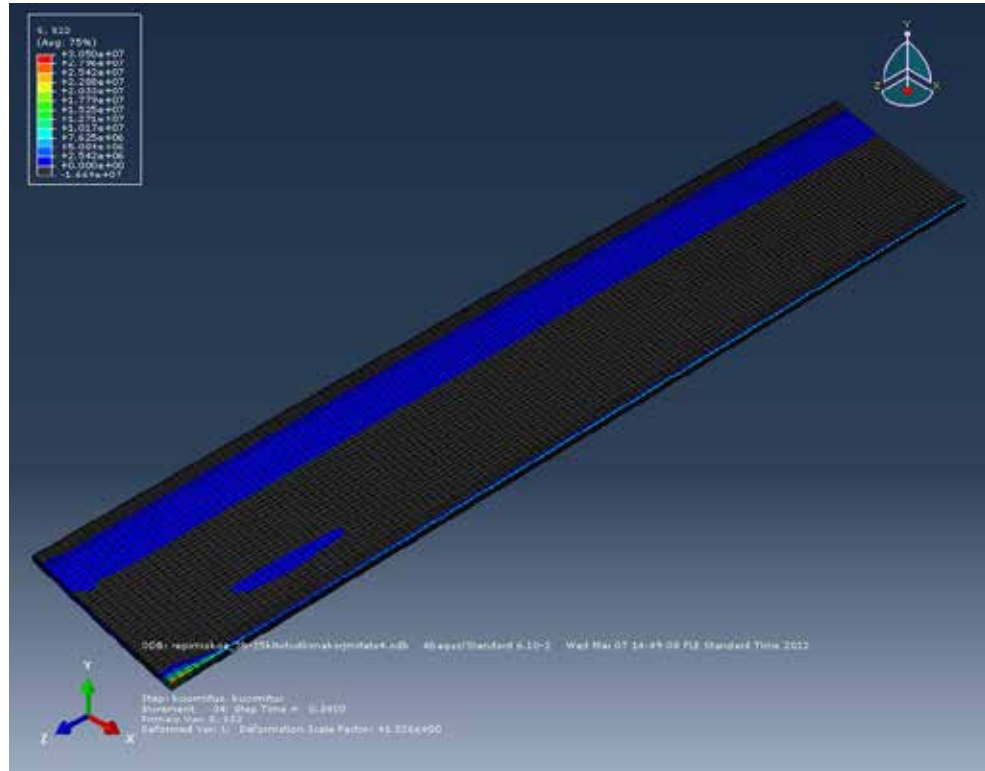
mingkuormitusta paremmin. Kolmipistetaivutuskoee puolestaan kuvaa kivelle ajoa tai teliltä nostoa.



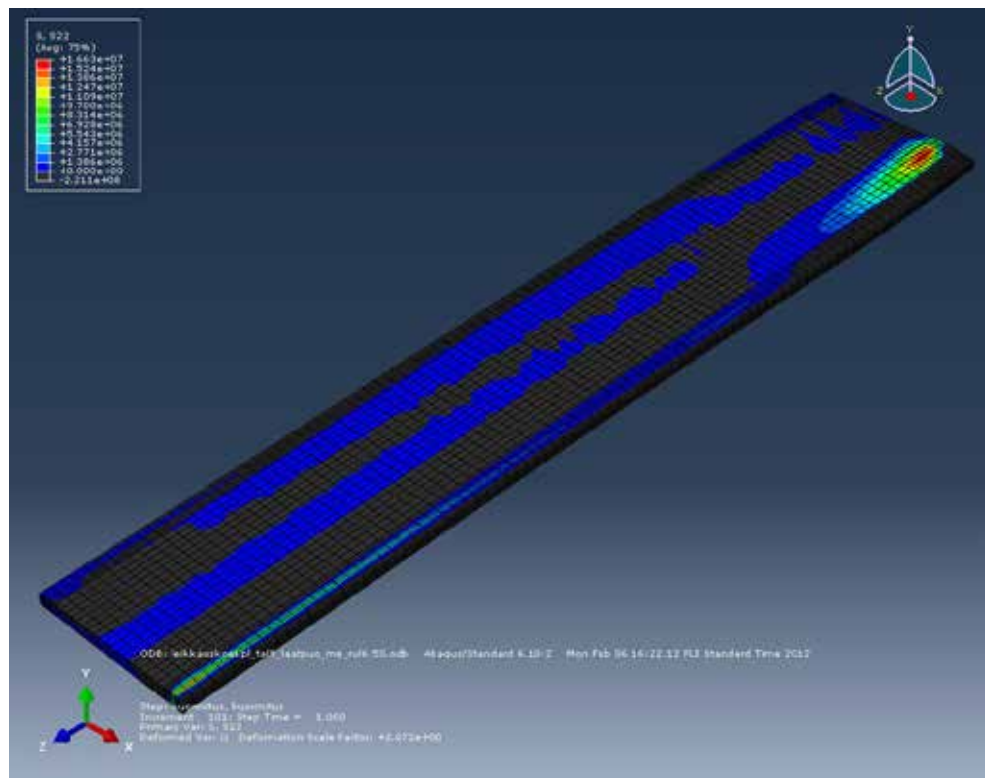
Kuva 56. Tasokuorma paneelilla.



Kuva 57. Repivät jännitykset liimasaumassa tasokuorma paneelilla -mallissa.



Kuva 58. Repivät jännitykset liimasaumassa viisivivataivutuskokeen mallissa.



Kuva 59. Repivät jännitykset liimasaumassa kolmipistetaivutuskokeen mallissa.

4 Kokeet

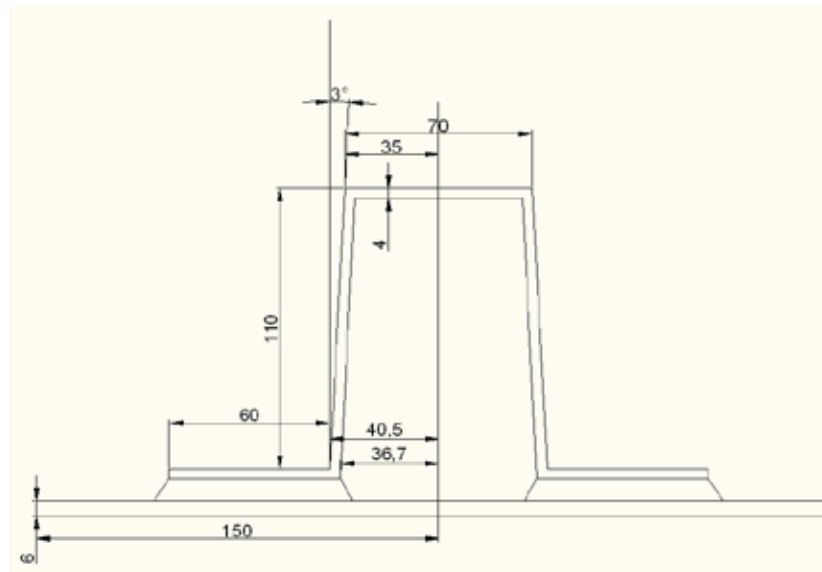
Koekappaleiden suunnittelun perustana käytettiin tyypillisen markkinoilla olevan 7 m veneen jäykisterakennetta, joka on mitoitettu standardin ISO 12215 mukaan.

Kokeita varten rakenteesta poimittiin osa, jonka mittoja skaalattiin pienemmiksi siten, että taivutusjäykkyys EI/L^3 pidettiin vakiona. Skaalatun jäykisteen pituudeksi tuli 700 mm. Kuva 60 esittää jäykisteen muut mitat.

Veneen palkiston liimasauman kuormittuminen pyrittiin yksinkertaistamaan kahden erityyppisen kappaleen taivutustesteiksi:

- *Kolmipistetaivutus* (paneeli 700 mm x 300 mm), jossa leikkauskuorma dominoi
- *Viisiviivataivutus* (paneeli 700 mm x 1000 mm), jossa repivä kuorma dominoi.

Viisiviivataivutuskappaleessa käytettiin samaa jäykistettä kuin kolmipistetaivutuksessa.



Kuva 60. Koekappaleissa käytetty jäykiste (paneelin leveys 300 mm).

4.1 Repivä kuorma, viisiviivataivutus

Koekappale tehtiin laipallisesta hattujäykisteestä ja paneelista. Hattujäykisteen korkeus oli 110 mm, jäykisteen ylälaipan leveys 70 mm, kiinnityslaippojen leveys 60 mm ja jäykisteen sisäpuolinen leveys juuressa 80 mm. Jäykistepalkin kokonaispituus oli 700 mm. Jäykistepalkki liimattiin paneeliin, jonka leveys oli 1000 mm ja pituus 700 mm. Jäykistepalkin tavoitepaksuus oli 4 mm ja paneelin 6 mm.

4.2 Leikkauskuorma, kolmipistetaivutus

Koekappale tehtiin laipallisesta hattujäykisteestä ja paneelista. Hattujäykisteen korkeus oli 110 mm, jäykisteen laipan leveys 70 mm, kiinnityslaippojen leveys 60 mm ja jäykisteen sisäpuolinen leveys juuressa 80 mm. Jäykistepalkin kokonaispituus oli 700 mm. Jäykistepalkki liimattiin paneeliin, jonka leveys oli 300 mm ja pituus 700 mm. Jäykistepalkin tavoitepaksuus oli 4 mm ja paneelin 6 mm.

4.3 Koekappaleiden valmistus ja materiaalit

Koekappaleissa käytettävät laminaattipaneelit ja hattujäykisteet laminoi Veneveistämö Syrjäsuu. Valmistusmenetelmänä oli käsinlaminointi ja kovettaminen avoimessa muotissa. Laminaattien materiaalit olivat seuraavat:

- Koekappaleiden hartsi Ashland, Aropol M105 TBR, batch 1076908
- Koekappaleiden kovetin Akzo Nobel polymer Cemics B.V. Butanox M-50, batch MNS1008427468
- Kirkas Gelcoat Enguard GE NTRL H, batch 0001079718
- Lasikuitumatto Ahlstrom M 601-450g/m², batch 188.

Kirkasta Gelcoatia käytettiin, jotta liimasauman vauriot olisivat paremmin nähtävissä kokeiden yhteydessä. Koekappaleissa käytettiin seuraavia liimoja:

- Polyuretaaniliimamassa Büfa Klebeharz 740-4426, batch 10100230
- Kovetin MEKP (metyylietyyliketoniperoksidi), Norpol nr.1
- Sikafast-3131 2-komponentti metyyliimetakrylaatti
- Plexus MA422 2-komponentti metyyliimetakrylaatti.

Taulukko 10 esittää liimavalmistajien ilmoittamat mekaaniset ominaisuudet kyseisille liimoille. Koekappaleissa käytettiin kolmea erilaista liimaa, joiden jäykkyydet olivat selkeästi erisuuret.

Taulukko 10. Liimojen mekaaniset ominaisuudet valmistajan ilmoituksen mukaan.

Liima	Kimmoduuli E [MPa]	Murtovenymä ε [%]	Leikkauslujuus [MPa]	Vetolujuus [MPa]
Büfa Klebeharz 740-4426	≈ 3 GPa	1,65	17,3	-
Plexus MA422	483-621 MPa	70-100	10,3-12,4	13,8-17,2
Sikafast-3131	59 MPa	120	8	7

4.4 Esikäsittely

Koekappaleiden liimapinnat pyyhittiin asetonilla ja hiottiin karkealla P80 paperilla. Hiontapölyn poistoon käytettiin imuria ja asetonipyyhintää. Paneelien ja jäykisteiden paksuus päissä ja keskellä mitattiin, ja merkittiin koekappaleisiin. Paneeliin merkittiin myös alue, jolle liima levitetään.

4.5 Liimaus

Liimaukset tehtiin sisätiloissa. Ilmankosteus ja lämpötila kirjattiin liimaustöiden alussa tai lopussa. Ilmankosteus-% vaihteli välillä 17,8 - 39,4 % keskiarvon ollessa 27,2 %. Ilman lämpötila vaihteli välillä 21,2 - 23,8 °C keskiarvon ollessa 22,2 °C. Seuraavassa esitellään kullekin liimatyypille käytetty liimausmenetelmä.

4.5.1 Klebehartz

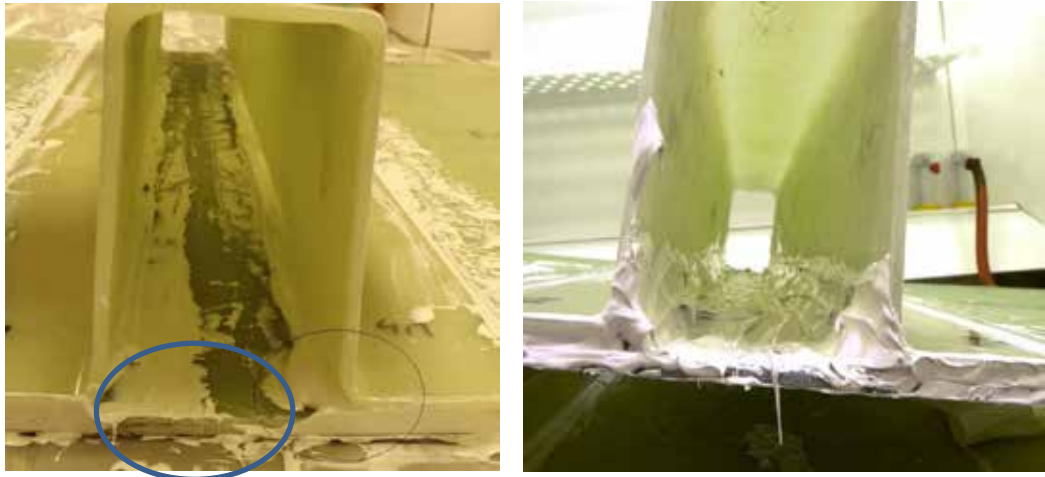
Klebehartz valmistajan Büfan ohjeiden mukaan kovetinta (MEKP, metyyli-etyyliketoni-peroksidi) on käytettävä vähintään 1,5 % painosta, venetuotannossa käytetään kovetinta yleensä 2 % tai jopa 4 %, kun tuotannossa on kiire. Kaikissa liimauksissa käytettiin minimisuositusmäärää 1,5 %, jotta liiman työaika saatiin mahdollisimman pitkäksi. Liimamassa punnittiin vaa'alla ja kovetin mitattiin mitta-asteikon sisältävällä ruiskulla.

Liimasauman tavoitepaksuudeksi määriteltiin valmistusvaiheen alussa 3 - 4 mm. Paksuuden säätämistä varten liimasta valmistettiin sauva, joka kovettumisen jälkeen hiottiin ja katkottiin n. 5 x 5 mm napeiksi. Varsinainen liimasauma levitettiin koekappaleen paneeliin, jonka jälkeen kovettuneet napit asetettiin saumaan jäykisteen päätyihin ja keskelle. Tämän jälkeen hattujäykiste painettiin kiinni liimamassaan. Kappaleet puristettiin yhteen laittamalla jäykistepalkin päihin yhteensä

20 kg:n massa. Liimasauman onnistuminen varmistettiin tarkastamalla liiman pursuaminen tasaisesti laippojen alta palkin sisä- ja ulkopuolelta. Ylimääräinen liimamassa poistettiin laippojen ulkoreunoilta teräslastalla.

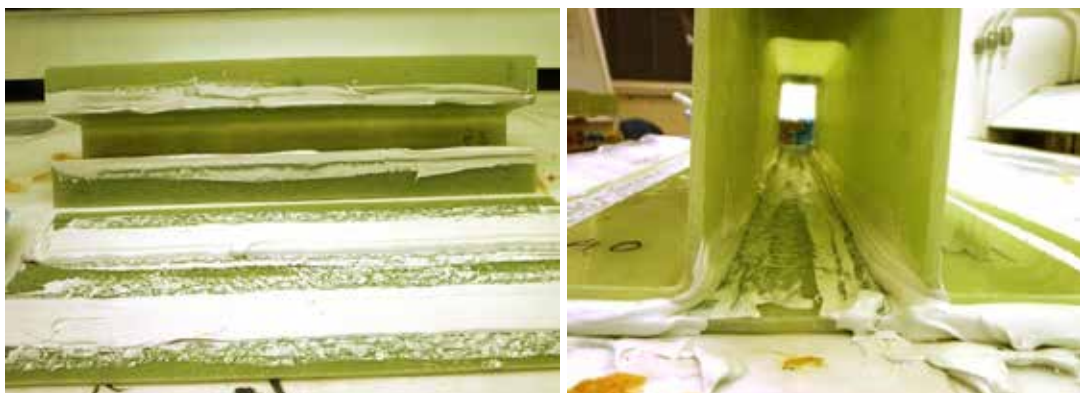
Korokenappien käytöstä luovuttiin leikkauskoekappaleita valmistettaessa. Liimasauman paksuudeksi tuli ilman korokepaloja 1 - 2 mm, joka todettiin riittäväksi paksuudeksi onnistuneelle liimaukselle.

Projektin alkuvaiheessa haluttiin varmistaa liimauksen onnistuminen erityisesti uuman juuressa, pyörityksen kohdalla. Alkulehtien oli, että paksu liimasauma muodostaisi palkkia kiinni puristettaessa hyvän purseen kyseiseen kohtaan. Liimauksen yhteydessä huomattiin, että purse muodostui, mutta haluttua matalampana (Kuva 61). Taivutuskoekappaleiden liimasaumojä korjattiin jälkikäteen lisäämällä liimaa laipan nurkan alueelle.



Kuva 61. Vajaa purse uuman juuressa sekä korjattu liimasauma.

Leikkauskoekappaleita valmistettaessa liimaa levitettiin myös palkin pyörityksen alueelle ennen kuin palkki painettiin kiinni paneelin liimasaumaan (Kuva 62). Näin saatiin aikaan hyvä liimasauma pyörityksen kohdalle, eikä korjausta tarvinnut tehdä.



Kuva 62. Leikkauskoekappaleen liimasauman levitys palkkiin ja purseen muodostuminen palkin sisällä.

4.5.2 Sikafast

Sikafast-koekappaleisiin yritettiin tehdä 3 - 4mm liimasauma hyödyntäen samantaisia napeilla kuin Klebehartz koekappaleisiin. Sikafastin kuivumisaika oli kuitenkin niin lyhyt, että liiman levitys, tasoitus lastalla ja korokepalojen asettelu ei onnistunut. Liima levitettiin tekemällä sik-sak kuviota paneeliin ja palkin laippoihin. Palkin pyöristykseen sekä paneeliin laipan liimausalueelle ulko ja sisäreunoille tehtiin siksak-kuvion lisäksi pitkittäinen liimasauma.

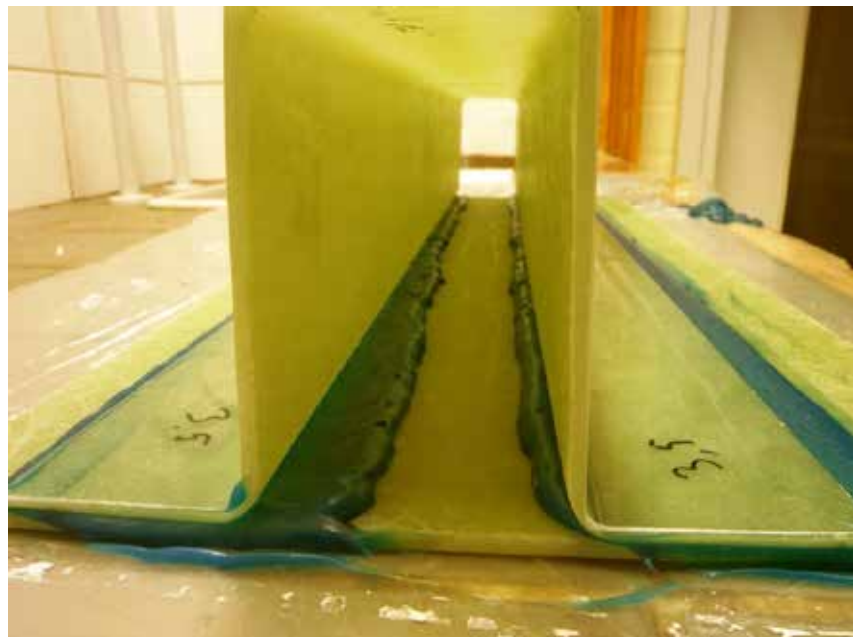


Kuva 63. Sikafast levitys siksak-kuviolla ja muodostunut liimasauma palkin sisällä.

Sikafastin levittäminen suurille pinnoille vaatisi tehokkaamman pistoolin kuin nyt käytössä ollut käsipistooli patruunoilla.

4.5.3 Plexus

Plexuksen liimalla ei yritetty enää lainkaan korokepalatekniikkaa. Liima levitettiin siksak kuviolla palkkiin ja paneeliin. Liima ei kuivunut niin nopeasti kuin Sikafast. Levitykseen käytettiin manuaalista liimapistoolia.



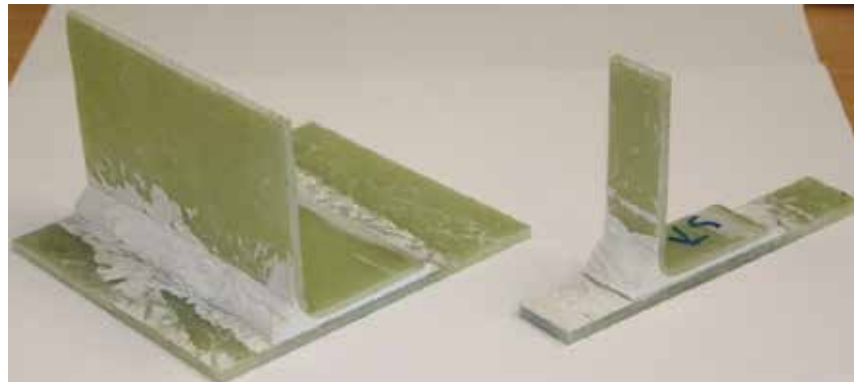
Kuva 64. Liimaus Plexuksella, sisäpurse ja palkin siirtymä liimausalueella.

Plexuksen koostumus oli Sikafastiin ja Kleberharziin verrattuna hyvin juoksevaa. Liima ei muodostanut hyvää pursetta jäykisteen pyöritykseen vaan valui alas. Muodostunut liimasauma oli ohuempi kuin Klebehartz ja Sikafast -koekappaleissa. Liiman hyvä juoksevuus pienensi mahdollisuutta saada aikaan ilmaonkaloita.

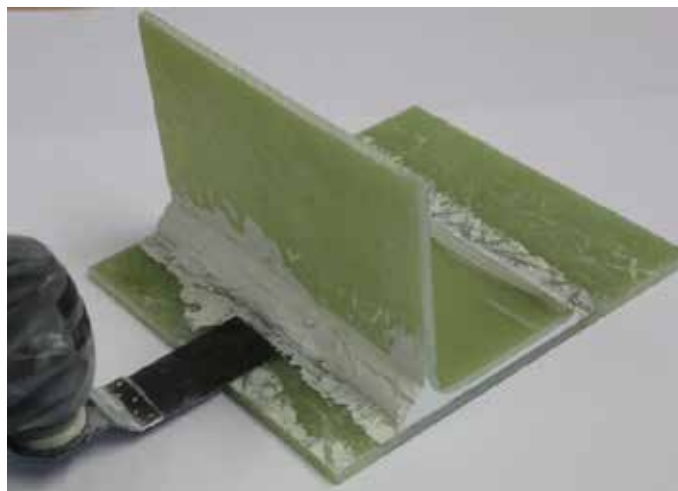
Liiman koostumus aiheutti yhden koekappaleen palkin liukumisen pois sille tarkoitetulta liimausalueelta. Kuvassa esiintyvän koekappaleen alusta ei ollut täysin tasainen ja palkki siirtyi kun painot 20 kg oli asetettu palkin päälle. Siirtyminen huomattiin vasta liiman kuivuttua.

4.6 Repimiskoekappaleiden valmistus lisäkokeisiin

Jatkokokeita varten osa liimatuista koekappaleista sahattiin sirkelillä pienempään kokoon repimiskokeita varten. Repimiskokeita varten tehtiin 30 mm:n levyisiä kuponkikoekappaleita sekä leveämpiä 150 mm:n koekappaleita. Osaan 150 mm:n kappaleiden liimasaumoista tehtiin alkuvaurioita ohuella leikkuukärjellä vauriokoon vaikutuksen selvittämiseksi. Vauriokoot olivat n. leveydeltään n. 15 mm, 25 mm, 35 mm ja 50 mm. Kaikkien vaurioiden pituudet olivat n. 30 mm. Vauriot tehtiin repivän kuormituksen kannalta liimasauman kriittiseen kohtaan laipan sisäpuolelle.



Kuva 65. Repimiskoekappaleet.



Kuva 66. Alkuvaurioiden työstö liimasaumaan.

4.7 Kolmipistetaivutuskokeet

4.7.1 Esikokeet

Esikokeita varten valmistettiin neljä kolmipistetaivutuskappaletta, joiden perusteella pyrittiin arvioimaan koetyypin toimivuutta. Koekappaleisiin liimattujen jäykistepalkkien tuentaa varten päädyt viistettiin. Päätyjen tuennassa käytettiin kuvan 67 mukaista tukea, jossa tuenta asetetaan sekä paneeliin että jäykisteen alalaippon alle kappaleen päätyihin. Koekappaleet vaurioituivat liimasaumasta kappaleen päätyalueelta. Jäykisteen laipan nurkkaan syntyi myös delaminaatiovaurioita sekä tuennasta johtuvia paikallisia laminaatin leikkausvaurioita. Kappaleen keskelle jäykistepalkin laipan nurkkaan syntyi laminaatin delaminaatiovaurioita.



Kuva 67. Esikokeissa käytetty koejärjestely.



Kuva 68. Vauriomuoto esikokeessa.

4.7.2 Varsinaiset kokeet

Kappaleiden kuormitus tehtiin Robcon 100 kN kuormituskoneella nopeudella 5 mm/min. Käytetty tukiväli oli 640 mm ja tukirullien halkaisija 50 mm.

Ensimmäinen koekappale murtui paikallisesti koekappaleiden päätyjen puristuksessa kasaan. Paikallisten kuormitushuippujen alentamiseksi koekappaleen päihin asetettiin vanerista valmistetut tuet, jotka estivät kappaleen uumien lommahduksen. Lisäksi yläpainimen tukirulla poistettiin ja tilalle asetettiin vanerilista, jotta kuormitus saadaan levittymään laajemmalle alueella kappaleen keskiosassa.

Taulukko 11 kertoo koetulokset. Taulukossa punaisella merkityt kappaleet hylättiin, koska päätyjen tuenta oli riittämätön.



Kuva 69. Kolmipistetaivutuskokeissa käytetty koejärjestely.

Taulukko 11. Kolmipistetaivutuskokeiden tulokset.

Kpl	Materiaalipaksuudet						Max. kuorma [kN]	Liima	Vika	Vauriomuoto	Huomiot
	Uumat [mm]			Laipat [mm]							
	1	2	ka	1	2	ka					
47								Klebe			Pelkät rullat
48								Klebe			Latat alarullien päällä
46								Klebe			Latat alarullien päällä, lankut palkin sisällä
31	5.9	5.8	5.9	4.1	4.5	4.3	41.4	Sika		Hattu vedossa	Painimena rulla, päätytuet
66	4.8	5.3	5.1	4.1	4.1	4.1	46.4	Klebe	Kammattu	Leikkaus painimella	Painimena rulla, päätytuet
55	5.3	5.2	5.3	4.3	4.3	4.3	55.3	Klebe		Hattu vedossa	Painimena rulla, päätytuet
56	5.4	4.7	5.1	4.1	4.1	4.1	55	Klebe		Hattu vedossa	Painimena vaneri, päätytuet
65	5.7	5.5	5.6	3.6		3.6	50.4	Klebe	Huono purse	Hattu vedossa	Painimena vaneri, päätytuet
40	6.0	5.4	5.7	4.0		4.0	54.5	Plexus		Hattu vedossa	Painimena vaneri, päätytuet
57	5.0	4.6	4.8	4.1		4.1	56.1	Klebe		Hattu vedossa	Painimena vaneri, päätytuet

Koekappaleet hajosivat hattujäykistelaminaatin vetomurtumana Kuva 70 mukaisesti, lukuun ottamatta koekappaletta 66, joka murtui laminaatin leikkautuessa paikallisesti kappaleen painimen kohdalta. Murtokuorma jäi hieman matalammaksi. Kolmipistetaivutuskokeissa koekappaleet eivät vaurioituneet liimasauhasta ennen laminaatin murtumaa.



Kuva 70. Tyypillinen vauriomuoto staattisessa kolmipistetaivutuksessa.



Kuva 71. Koekappaleen 66 murtuma painimen kohdalta leikkautumalla.

4.8 Viisiviivataivutuskokeet

Kappaleiden kuormitus tehtiin Robcon 400 kN kuormituskoneella nopeudella 10 mm/min. Päätyjen tukiväli oli n. 900 mm ja painimien 560 mm. Koetta varten rakennettiin vanerista kuormitusjigi, joka tuki kappaletta kolmesta kohdasta: keskeltä hattujäykisteen alta sekä paneelin päädyistä. Painimet asetettiin jäykisteen molemmin puolin etäisyydelle. Liimasauma ei vaurioitunut kokeessa ennen laminaatin murtumista.



Kuva 72. Viisiviivataivutuskappaleen koekuormitus.



Kuva 73. Vauriomuoto viisiviivataivutuksessa.

4.9 Iskukokeet

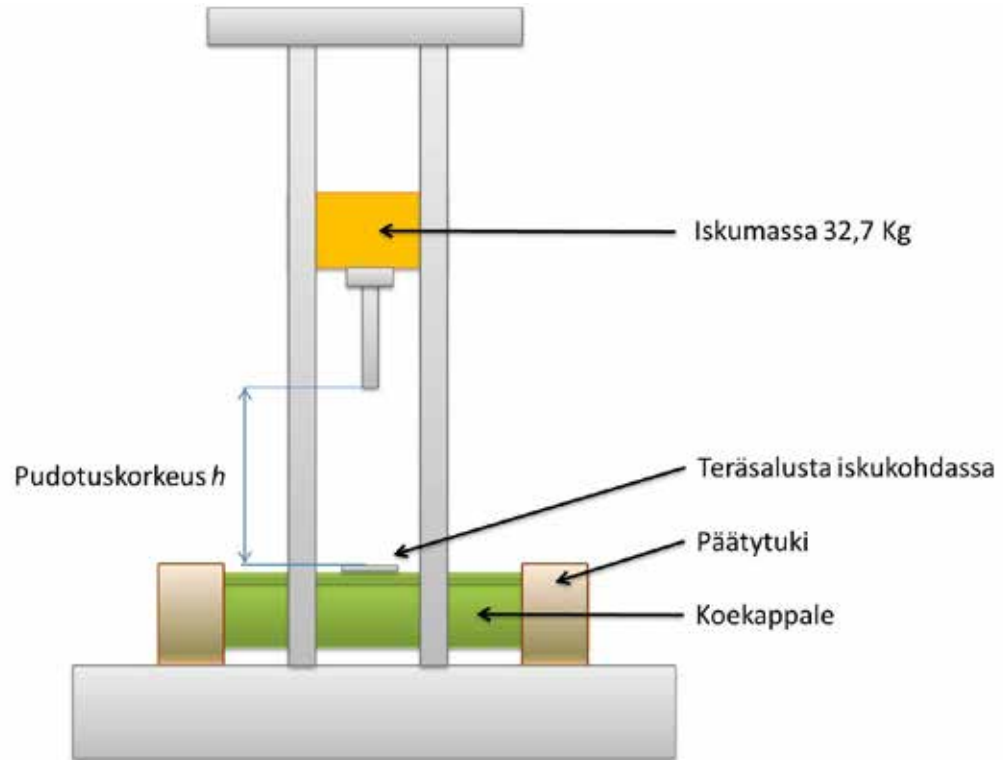
Veneiden pohjapalkistot altistuvat iskumaisille kuormille. Iskumaisen kuormituksen haitallisuutta palkiston liimaliitoksille pyrittiin selvittämään iskukokein, kolmipistetaivutuskappaleiden avulla. Koekuormituksessa käytettiin kuvan (Kuva 74) mukaista koejärjestelyä, jossa iskumassa $m = 32,7$ kg pudotettiin määrätyltä korkeudelta h koekappaleen keskikohtaan. Iskukohtaan asetettiin teräsalusta, jotta iskuenergia saadaan levittymään laajemmalle alueelle, eikä koekappale vaurioidu paikallisesti.

Pudotuskorkeus h arvioitiin seuraavan potentiaalienergian avulla seuraavalla kaavalla

$$\frac{1}{2}kx^2 = mgh \quad (1)$$

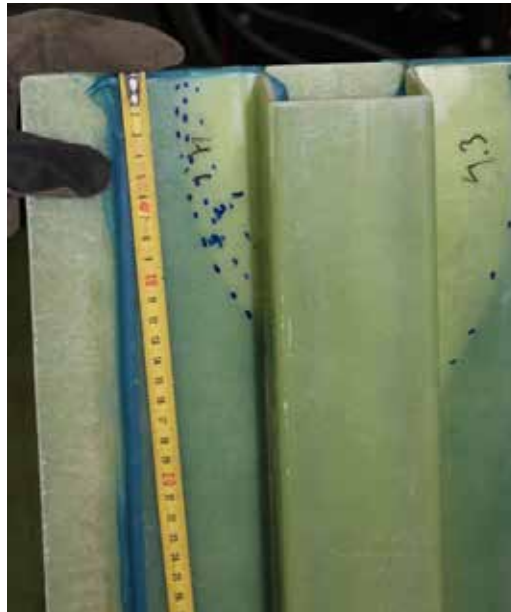
$$\text{P} \quad h = \frac{1}{2}mgkx^2 \quad (2)$$

Kaavassa koekappaleen ajatellaan toimivan jousena, jolloin koekappaleeseen staattisessa kokeessa varastoitunut murtohetkellä varastoitunut energia lasketaan kaavalla $\frac{1}{2}kx^2$. Jousivakio k saadaan lasketuksi staattisen kokeen voima-siirtymädatasta. Suure x tarkoittaa kappaleen murtosiirtymää. Asettamalla kyseinen koekappaleen potentiaalienergia yhtä suureksi iskumassan potentiaalienergian mgh ($g = 9,81$ m/s² putoamiskiihtyvyys) kanssa, voidaan pudotuskorkeus h ilmaista kaavan (2) esittämässä muodossa.

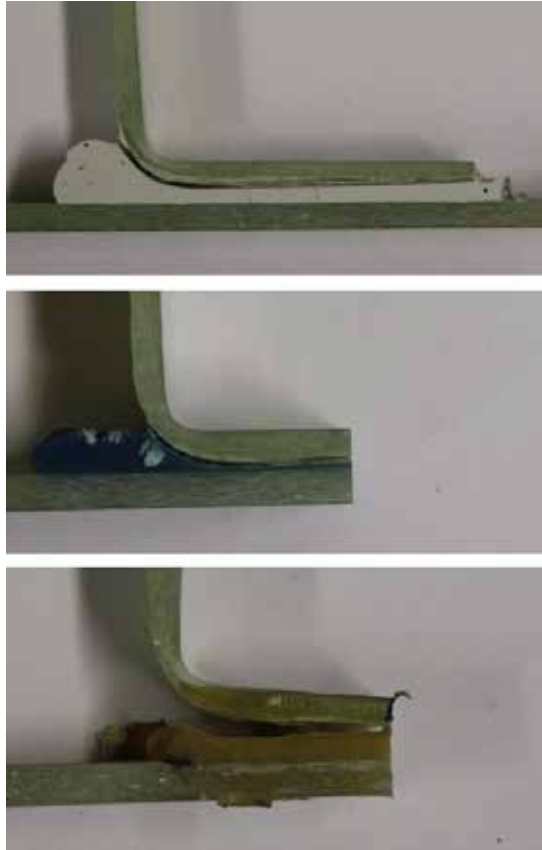


Kuva 74. Iskukokeessa käytetty koejärjestely.

Iskukokeissa vaurioalueet syntyivät liimasaumoihin koekappaleiden päätyalueelle (Kuva 75). Vauriosäröt lähtivät liikkeelle hattujäykisteen sisäpuolen tyvinurkkauksesta. Säröt syntyivät tyvialueelle laminaatin ja liiman rajapintaan, josta ne etenivät laminaatin kerrosten väliin (Kuva 76).



Kuva 75. Iskukokeessa syntyneet vaurioalueet kappaleen päätyalueella (koekappale 42).



Kuva 76. Iskukokeissa syntyneet vauriosäröt koekappaleissa 50, 42 ja 32.

Joustavalla liimalla päätyjen vauriopinta-alat jäivät joustavalla liimalla selvästi pienimmiksi. Osalle iskukoekappaleista tehtiin staattinen kolmipistetaivutus jäännöslujuuden selvittämiseksi. Koekappaleiden murtokuormat eivät eronneet merkittävästi ehjien kappaleiden murtokuormista. Koekappaleiden liimasaumat eivät vaurioituneet ennen laminaatin murtumista. Myöskään koekappaleiden jäykkyydet staattisessa kokeessa mitattuina eivät eronneet ehjän koekappaleen jäykkyydestä.

Taulukko 12. Iskuvaurioitettujen koekappaleiden jäännöslujuudet.

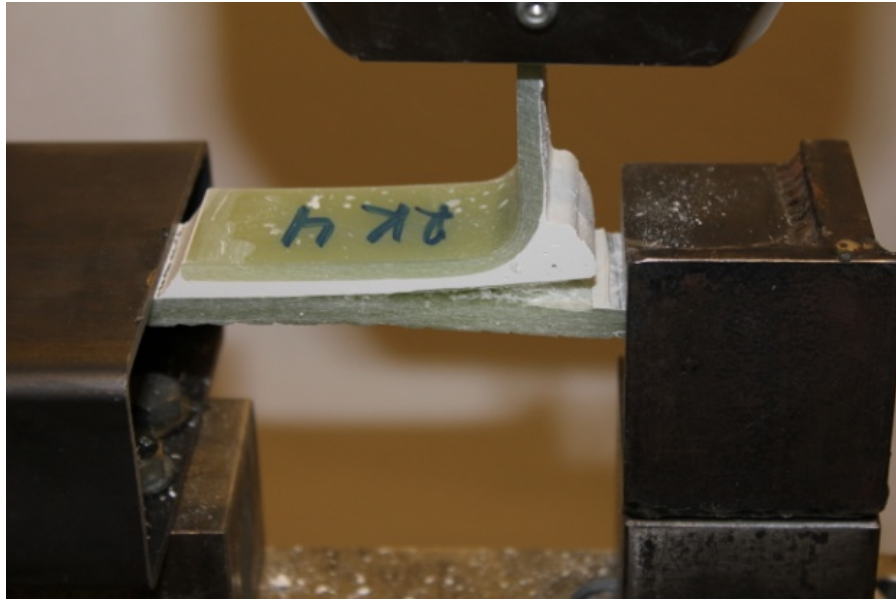
Kpl	Liima	Massa [kg]	Pudotuskorkeus [mm]	Pudotusten lkm	Staat. jäännöslujuus [kN]	Vauriomuoto
53	Klebe	32,7	1120	1	61,8	jäykisteen tyvinurkka
58	Klebe	32,7	1500	2	56,2	jäykisteen tyvinurkka
54	Klebe	32,7	780	20	59,9	hattu vedossa
32	Sika	32,7	780	20	-	
42	Plexus	32,7	780	20	-	

4.10 Repimiskokeet

Venejäykistepalkistojen liimaliitosten mitoitusta käsittelevä standardi (ISO 12215) ei huomioida repiviä jännityksiä tai paikallisia jännityspiikkejä. Mitoitus perustuu keskimääräiseen leikkausjännitykseen liimasaumassa sekä suureen varmuuskertoimeen.

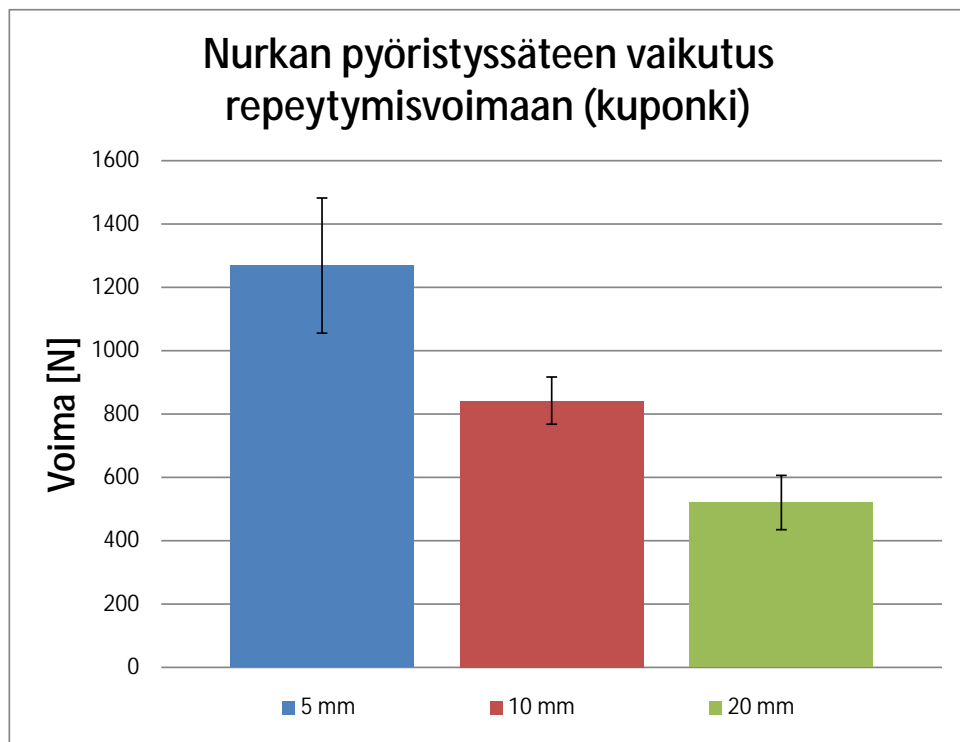
Repivän kuormituksen vaikutusta liimasaumaan selvitettiin pienten 30 mm leveiden kuponkikoekappaleiden ja isompien 150 mm leveiden koekappaleiden avulla. Kokeilla pyrittiin selvittämään laipan pyöristyksen ja liimatyyppin vaikutukset

repimisljuuteen. Leveillä kappaleilla pyrittiin selvittämään kriittinen vauriokoko ja vaurioiden vaikutus repimisljuuteen.

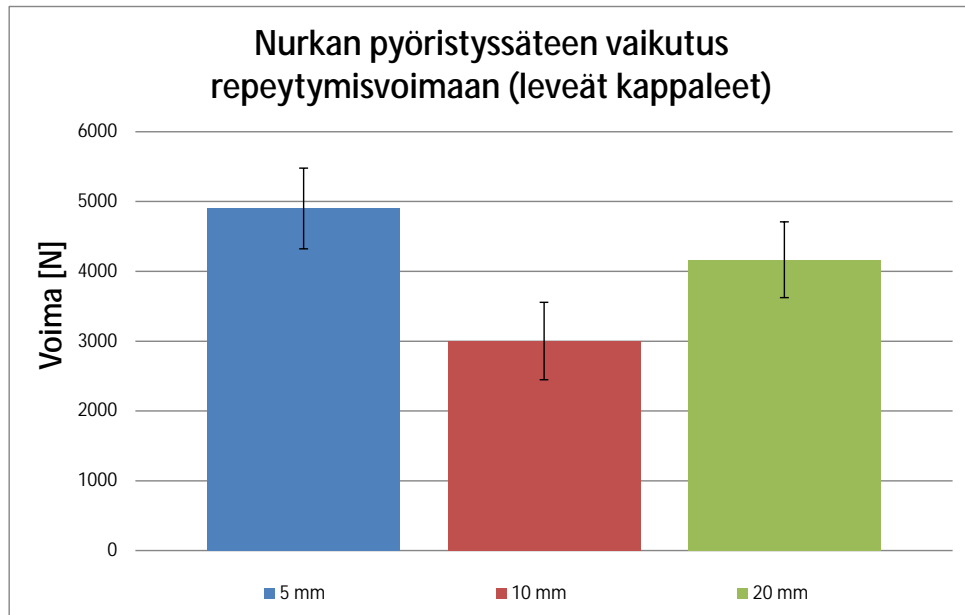


Kuva 77. Repimiskoejärjestely.

Kuva 78 ja Kuva 79 esittävät koetulokset jäykisteen nurkan pyörityssäteen vaikutuksista kokeessa mitattuun maksimivoimaan. Nurkan pyörityssäteen kasvattaminen heikensi repimisljuutta.

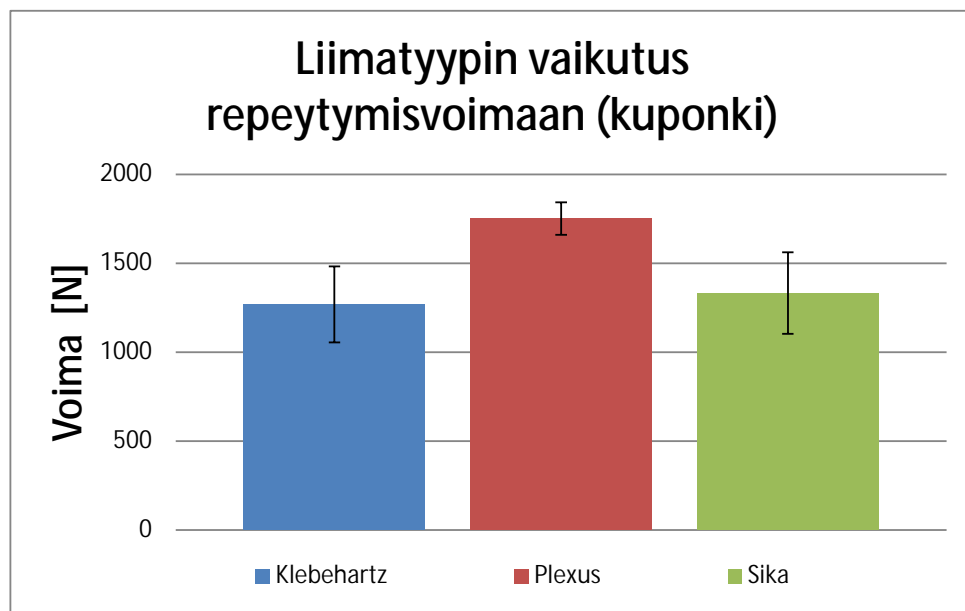


Kuva 78. Jäykisteen nurkan pyörityssäteen vaikutus repeytymisvoimaan (kuponkikoekappale).

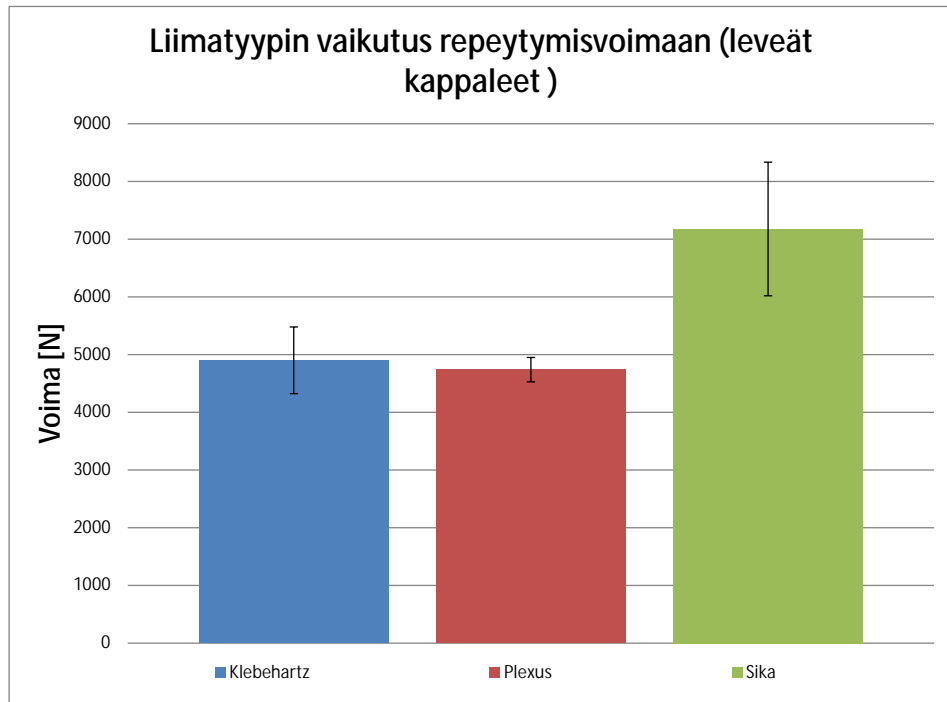


Kuva 79. Jäykisteen nurkan pyöristyssäteen vaikutus repeytymisvoimaan (leveä koekappale).

Kuva 80 ja Kuva 81 esittävät koetulokset liimatyypin vaikutuksista kokeessa mitattuun maksimivoimaan. Leveillä kappaleilla joustavalle liimalle mitattiin selvästi korkein murtokuorma, sen sijaan kuponkikappaleille liimatyypin vaikutus ei vaikuttanut selvästi.

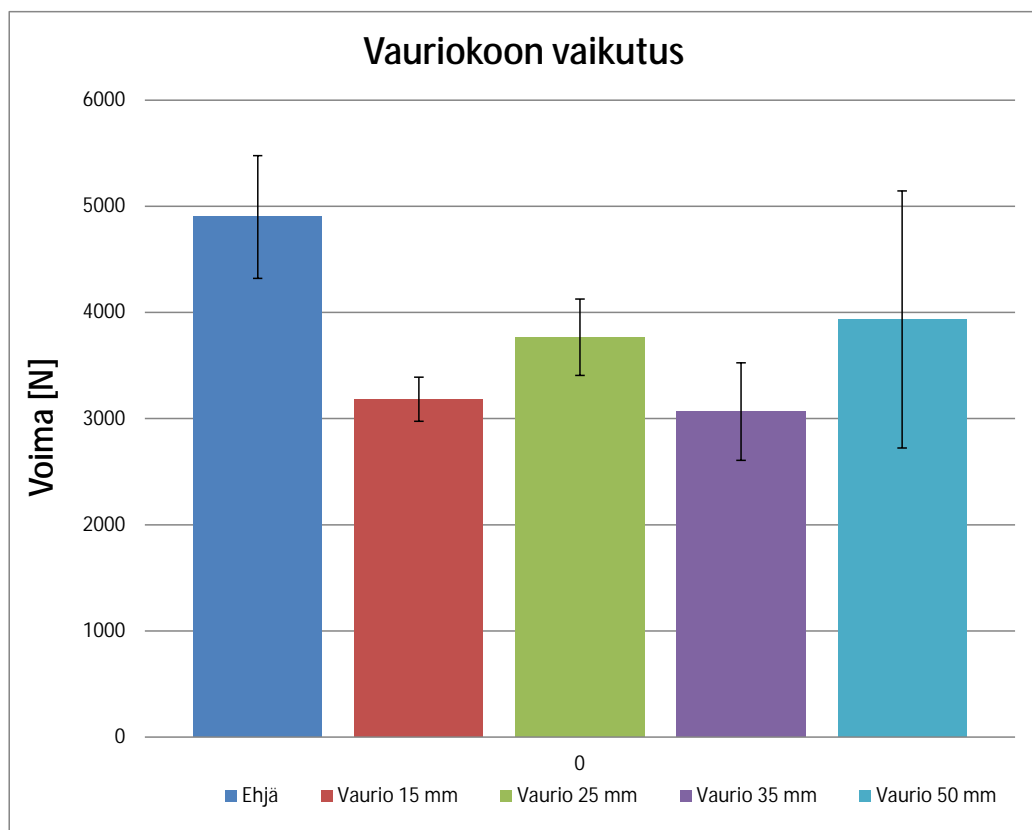


Kuva 80. Liimatyypin vaikutus repeytymisvoimaan (kuponkikoekappale).



Kuva 81. Liimatyypin vaikutus repeytymisvoimaan (leveä koekappale).

Kuva 82 esittää koetulokset jäykisteen nurkan pyöristyssäteen vaikutuksista kokeessa mitattuun maksimivoimaan. Vaurioitetuille koekappaleille mitatut maksimivoimat putosivat keskimäärin n. 30 % ehjään verrattuna. Vauriokoon kasvataminen 15 mm:stä 50 mm:n ei näkynyt selvästi tuloksissa. Koetuloksissa esiintyi melko suurta hajontaa erityisesti suurimmalla vauriokoolla.



Kuva 82. Vauriokoon vaikutus repeytymisvoimaan (leveä koekappale).

5 Havainnot ja niiden analysointi

Mallit kuvasivat kokeita varsin luotettavasti. Mallien antamat taipumat ovat hyvin lähellä vastaavia taipumia kokeissa ja liimasauman jännitysarvot ovat oikeaa suuruusluokkaa. Mallit ovat kuitenkin lineaarisia, eivätkä vastaa koetulosta tarkasti enää ensimmäisten vaurioiden syntymisen jälkeen, koska vaurioituminen syö energiaa ja jakaa kuormitusta uudelleen. Valitettavasti ennako-oletus liimasauman heikkoudesta vaikutti siten, ettei laminaattien jännityksiä tutkittu koekappaleiden suunnitteluvaiheessa. Näin ollen kolmipistetaivutus- ja viisiviivakokeet epäonnistuivat - liimasaumoja ei saatu rikki ennen kuin laminaatti petti. Laminaatit olivat liian ohuita ja heikkoja suhteessa liimasauman lujuuteen. Toisaalta nämä kokeet osoittivat, että liimasauma voidaan tehdä riittävän lujaksi venerakenteita ajatellen. Laminaatit eivät näet olleet merkittävästi tavanomaisia venelaminaatteja ohuempia tai heikompia.

Se, ettei laminaatti pettänyt esikokeissa, johtuu palkin päiden erikoisesta tuenasta, joka tuotti ylimääräistä repivää kuormaa liimasaumaan. Palkin laippa delaminoitui ja sen lisäksi adheesio laipan ja liiman väliltä petti. Huonoon tuentatapaan jouduttiin sen takia, että esikokeissa käytettiin päistään viistettyjä palkkeja. Myöhemmissä kokeissa viisteitä ei käytetty.

Esikokeessa puuttui liimaa kohtalaisen pituiselta alueelta kuormituskohdan lähettyvillä ja tämä näkyi palkin laipan delaminaationa ja liiman adheesio pettämisenä suunnilleen mallin osoittamalla alueella (Kuva 49). Tämä osoittaa että hatun sisäpuolinen purse on kriittinen kohta liimasauman lujuuden kannalta.

Varsinaisissa kokeissa viisteitä ei käytetty ja murtokuorma oli paljon suurempi kuin esikokeissa. Liimasaumaa ei saatu pettämään, vaan kuormaa kasvatettaessa palkin uuman alaosaan syntyi vaakasuoraa vauriota, sitten myös uumassa alkoi näkyä pystysuuntaista raidoittumista laajalla alueella ja lopulta uuma katkesi keskeltä. Tämä osoittaa, että kun liimaus tehdään kunnolla kovettuneisiin laminaatteihin, joiden pinnat on huolella puhdistettu, ja liimauksessa huolehditaan, että liimaa on koko laipan alueella ja hatun sisäpuolinen purse on riittävä, liimasauma kestää kyseisessä kuormitustapauksessa enemmän kuin katkokuitulaminaatti.

Mallien tuloksista merkillepantavia ovat seuraavat:

Koko veneen mallin tuloksissa jännitykset liimasaumassa olivat selvästi pienempiä kuin kokeiden malleissa. Tämä johtuu kolmesta tekijästä: erilaisesta kuormituksesta, liiman ja laminaattien jäykkyyseroista sekä liimasauman paksuudesta. Koko veneen mallissa käytettiin 10 mm paksua liimasaumaa. Ohuemmalla liimasaumalla jännitykset olisivat suurempia. Liimasauman jäykkyys mallissa oli Plexuksen luokkaa. Lisäksi koekappaleiden mallien geometria tehtiin yksityiskohtaisemmin. Isossa mallissa niin tarkka geometria ei olisi ollut mahdollinen.

Pohjakosketuksessa tai teliltä nostossa syntyy kuormituskohtaan voimakas paikallinen puristus, jolloin palkin uuma puristuu liimasauman reunaa vasten ja tämä puolestaan synnyttää vähän matkan päähän tästä laipan alle liimasaumaan repivän kuormituksen alueen. Repivä jännitys voi irrottaa liiman laminaatista tai delaminoida laminaatin, ja toisaalta puristus voi rikkoa palkin uuman alaosan. Kokeissa havaittiin jälkimmäinen ilmiö selvästi, edellisestä saatiin vain viitteitä, koska liimasauma ei kuormittunut tarpeeksi. Tuennan lähelle syntyy myös suurten jänni-

tysten alue, liimasauman hatun puoliseen reunaan puristusalue ja sen lähelle repivien jännitysten alue. Tuennan lähellä suurten jännitysten alueen muoto oli erittäin pitkänomainen palkin pituussuuntaan. Laipan ulkoreunan lähelle syntyi vastaavanlaiset puristus- ja vetoalue, mutta jännitykset näissä olivat pienempiä. Myös viisivivataivutuksessa oli nähtävissä laipan kummassakin reunassa puristusalue ja sen vieressä vetoalue. Tässäkin tapauksessa liimasauman hatun puolinen reuna oli kriittinen. Näihin vaikuttavat kuitenkin laipan paksuus ja jäykkyys. Jos laippa on kovin paksu ja jäykkä, ei laipan taipumista juuri tapahdu, vaan laippa vain kallistuu uuman puristaessa liimasauman hatun puolista reunaa. Tällöin vetoalue hatun lähellä heikkenee, kun taas puristus hatun lähellä kasvaa ja uumavaurion mahdollisuus voi kasvaa (toisaalta jäykempi ja paksumpi uuma kestää tätä paremmin). Lisäksi laipan ulkoreunaan syntyy enemmän repivää jännitystä. Puristusjännitykset olivat kolmipistetaivutuksen malleissa hyvin suuria ja ylittivät liiman lujuuden, mutta kokeissa liima lähinnä puristui kokoon ilman näkyviä vaurioita.

Purseen vajaus tai puuttuminen liimasauman hatun puolisessa reunassa kasvattaa jännityksiä riippumatta laipan paksuudesta ja jäykkyydestä. Siksi kyseisen purseen riittävydestä on huolehdittava levittämällä riittävästi liimaa ja käyttämällä tarpeeksi täyttävää liimaa.

Liimasauman paksuus vaikuttaa merkittävästi jännityksiin liimasaumassa sekä palkkiin ja paneeliin kohdistuviin repiviin jännityksiin. Paksummalla liimakerroksella jännitykset ovat pienempiä ja repivän jännityksen osuus on pienempi. Jos liimasauma on kovin ohut (alle 2 mm), jännitykset liimasaumassa ovat erittäin suuria ja rakenne pettää pienemmällä kuormalla kuin hieman paksummalla liimasaumalla. Tämä todennettiin kokeissakin, Plexus-liimalla sauma jäi joistain kohdin vain 1 mm paksuiseksi ja näiden kappaleiden repimislujuus jäi pienemmäksi kuin muiden. Näin ollen alle 1,5 - 2 mm liimasaumaa kannattaisi välttää. Tämä vaatii liimalta täyttävyyttä.

Käsinlaminoidussa tapauksessa jännitykset ovat hieman pienempiä kuin ruiskulaminoidussa tapauksessa, koska palkki ja paneeli ovat jäykempiä.

Tasokuormitustapauksessa kuormitustila oli lähempänä viisivivakuormituksen jännitystilaa kuin kolmipistetaivutuksen jännitystilaa. Näin ollen viisivivakuormitus on kolmipistetaivutusta parempi kuvaamaan slamming-kuormitusta. Kolmipistetaivutus sen sijaan soveltuu pohjakosketuksen tai teliltä noston kuormituksen kuvaamiseen. Molemmissa palkin ja paneelin olisi oltava merkittävästi jäykempiä kuin tässä tutkimuksessa tehdyissä kokeissa.

6 Johtopäätökset

Kirjallisuusselvityksen perusteella termografia osoittautui lupaavimmaksi veneiden liimasaumojen tarkastusmenetelmäksi. Laboratoriokokeissa käytetyllä yksinkertaisella kuvausmenetelmällä havaittiin lasikuitulaminaattien liimasaumoista vaurioita minimissään n. 5 - 10 mm:n halkaisijaan asti. Hiilikuitulaminaattien kohdalla tulokset olivat hieman heikompia. Käytetty kuvausmenetelmä osoittautui liian hitaaksi hiilikuiduille, joiden hyvä lämmönjohtavuus tasoittaa nopeasti pinnalle syntyviä lämpötilaeroja. Käytetyllä menetelmällä ei myöskään selvästi havaittu särömäisiä delaminaatiovaurioita rakenteista. Kokonaisuutena voidaan

todeta yksinkertaisen menetelmän tarkkuuden riittävän tuotantoveneiden liimasaumojen tarkastukseen.

Veneen runkoon liimatun sisämoduulin liimasaumojen tarkastus vahvasti termografian olevan lupaava menetelmä liimasaumojen tarkastukseen venetuotannossa. Tarkastuksessa sisämoduulin liimasaumoista löydettiin laajoja alueita, joissa liimattujen pintojen välillä ei ollut tartuntaa. Lämpökamerat ovat kehittyneet merkittävästi viimeisen vuosikymmenen aikana. Myös kameroiden hintataso on pudonnut merkittävästi. Kokeissa käytettiin hyvin karkeaa infrapunalampuilla toteutettua lämmitysmenetelmää ja yksinkertaista käsikäyttöistä lämpökameraa. Kehittämällä hienostuneempi lämmitysmenetelmä liimasaumojen tarkastus tehokkaasti venetuotannossa termografian avulla on tutkimuksen valossa mahdollista.

Liimattujen koekappaleiden kuormitustesteissä liimasauma ei kuormittunut riittävästi staattisissa taivutuskokeissa. Käytetyt laminaatit olivat melko ohuita katkokuitulaminaatteja, eivätkä ne siirtäneet riittävästi kuormitusta liimasaumaan. Kokeellisesti ei näin ollen pystytty varmentamaan kaikkia mallinnuksen tuloksia. Iskukokeet vahvistivat, että kuormitusnopeudella on merkitystä liimasauman kuormittumiseen. Iskut osoittautuivat vaarallisemmiksi kuin staattinen kuormitus. Iskukokeissa liimasaumaan syntyi vaurioita, jotka etenivät laminaattiin.

Repimiskokeissa liimasaumaan työstetyt vauriot alensivat lujuutta. Kuitenkaan vaurion koon kasvattamisesta ei seurannut repimislujuuden alenemista. Vaurion synnyttämä epäjatkuvuuskohta näyttää synnyttävän liimasaumaan jännityskeskittymiä, jonka vaikutus lujuuteen ei merkittävästi muutu vauriokoon kasvaessa. Kuponkikokeilla tehtyjen repimiskokeiden perusteella näyttää siltä, että jäykisteen nurkan pyöristyssäteen kasvattaminen pienentää repimislujuutta.

Pitkäaikaiskestävyys, erityisesti viruminen ovat ongelmallisia liimaliitoksissa. Väsyminen ja viruminen sekä olosuhdealtistukset jäivät tässä tutkimuksessa kokeiden ulkopuolelle. On todennäköistä, että käytössä olevilla valmistusmenetmillä veneiden palkistojen liimasaumoihin jää paikoittain jäännösjännityksiä, joiden vaikutus liimasaumojen lujuuteen voi olla merkittävä.

Kokonaisuutena voidaan todeta, että kuponkikokeet ovat edelleen luotettavimpia liimaliitoksien ominaisuuksien tutkimiseen. Liimaliitosten laajemmat kokeelliset tutkimukset erilaisten parametrien kuten kuormitustyyppien, materiaalien, ja olosuhteiden vaikutuksesta on syytä tehdä mahdollisimman yksinkertaisten kuponkikokeiden avulla. Viisiviivataivutus- ja kolmipistetäivutuskokeista voidaan saada lisätietoa rakenteen käyttäytymisestä, mutta niiden mitta- ja jäykkyysuhteet on ensin suunniteltava huolella FE-mallinnuksen avulla, jotta liimasauma saadaan kriittiseksi.

Joustavalla liimalla jännitykset liimasaumassa jäävät alhaisemmiksi kuin jäykällä liimalla. Liian joustavakaan liima ei kuitenkaan saa, olla koska silloin liikkeet kasvavat liian suuriksi ja toistuva kuormitus voi rikkoa rakenteen.

Useiden rakenneliimojen ominaisuudet ovat riittäviä katkokuitulaminaattien liittämiseen. Tässä tutkimuksessa käytetyillä liimoilla liimasauma ei näyttäisi olevan kovin herkkä liimasauman virheille. Pohjapalkistojen liimauksessa esiin tulleet vauriot ja käytännön ongelmat vaikuttavat useimmiten liittyvän valmistustekniik-

kaan. Erityisesti valmistuksessa on huolehdittava siitä että laminaatit ovat kovetuneet ja liimapinnat huolella puhdistettu ennen liimausta.

Purseen puuttuminen laipan ja paneelin liitoskohdan sisäosasta on kriittinen vika, jos sillä on pituutta ja jos kolo ulottuu palkin laipan alle. Tällöin palkin uuma pyrkii ruttaantumaan liiman reunan yli ja palkin laipan alle syntyvä vetojännitys kasvaa.

Liian ohutta (alle 1,5 - 2 mm) liimasaumaa kannattaa välttää, koska siinä jännitykset liimasaumassa kasvavat paljon suuremmiksi kuin paksummalla liimasaumalla.

Jos palkki päätetään paneelikenttään, syntyy palkin pään lähelle suuria vetojännityksiä. Tällöin on paneelin vahvistamisen lisäksi tavalla tai toisella jaettava liimasauman kuormitusta (paksuussuuntaisia vetojännityksiä) laajemmalle alueelle. Mahdollisia tapoja ovat laippojen leventäminen tai kotelon muotoisen insertin asentaminen palkin kotelon sisälle. Insertti on näistä tehokkaampi, mutta vaikeampi toteuttaa.

7 Lähdeviitteet

1. Small craft - Hull construction and scantlings. Part 5: Design pressures for monohulls, design stresses, scantling determination-*International Standard ISO 12215-5* Switzerland 2008.
2. Small craft - Hull construction and scantlings. Part 6: Structural arrangements and details.*International Standard ISO 12215-6* Switzerland 2008.
3. Advanced Structural Imaging, Inc.www.asi-nde.com.
4. JR Technology Limitedwww.jrtech.co.uk.
5. WichiTech Industries, Inc.www.wichitech.com.
6. *FAA Inspection Research Activities for Composite Materials*2006.