

Joonas Rautalin

# INSERTTIKIINNITYKSET KERROSRAKENTEISSA

Vapaasti muunneltavan kiinnitysmenetelmän  
kehittäminen kansikiskoille

Opinnäytetyö

Veneteknologian koulutusohjelma

Marraskuu 2016



**KYAMK**

University of Applied Sciences

<b>Tekijä</b> Joonas Rautalin	<b>Tutkinto</b> Insinööri	<b>Aika</b> Marraskuu 2016
<b>Opinnäytetyön nimi</b> Inserttikiinnitykset kerrosrakenteessa Vapaasti muunneltavan kiinnitysmenetelmän kehittäminen kansikiskoille		57 sivua 29 liitesivua
<b>Toimeksiantaja</b> Boomeranger Boats Oy		
<b>Ohjaaja</b> Terho Halme		
<b>Tiivistelmä</b> <p>Kiinnikkeiden asentaminen kerrosrakenteeseen vaatii yleensä rakenteellisia muutoksia kiinnityspisteiden kohdalla. Koska muutokset jälkikäteen ovat aina työläisiä toteuttaa, kiinnityspisteiden paikat on määritettävä ennalta. Tämän opinnäytteen tarkoitus oli selvittää vaihtoehtoinen kiinnitysmenetelmä kansikiskoille sekä testata kiinnitysten lujuus kokeellisesti. Tavoitteena oli löytää kokonaiskustannuksiltaan järkevä vaihtoehto, joka mahdollistaisi kiinnikkeiden sijoittelun tuotannon loppuvaiheessa tai jälkiasennuksena. Tutkittavaksi kiinnitysmenetelmäksi valittiin kierreinserit, joiden lujuuksia verrattiin rakenteen sisäisiin vastarautoihin sekä liimakiinnitykseen.</p> <p>Tämä työ perustuu kirjallisuusselvitykseen sekä koekappaleille suoritettuihin kuormituskokeisiin. Aikaisemmin luotujen, hunajakennorakenteisiin perustuvien laskentamallien luotettavuus selvitettiin vertailemalla testituloksia laskennalliseen menetelmään. Lisäksi kehitettiin mitoitusprosessi kansikiskojen kiinnityksille sekä luotiin pohjaa mitoittavien voimien arviointimenetelmän kehittämiseksi.</p> <p>Laskennallisella mitoitusmenetelmällä saadut lujuusarvot olivat vetotesteissä saatuja arvoja pienempiä. Laskentatavassa mitoittavana tekijänä oli ydinaineen leikkauslujuus, eikä liimavalun ja pintalaminaattien välistä liimaliitosta otettu huomioon, mikä voi selittää laskentamenetelmän konservatiivisempia arvoja. Positiiviset testitulokset ja kierreinserittien edut verrattuna rakenteen sisäisiin vastarautoihin kannustivat toimeksiantajaa laajemman testin järjestämiseen sekä mahdolliseen käyttöönottoon.</p>		
<b>Asiasanat</b> kerrosrakenne, insertti, kansikisko, työvene		

Author	Degree	Time
Joonas Rautalin	Bachelor of Engineering	November 2016
<b>Thesis Title</b>		
Inserts in Sandwich Structure Development of Adaptable Fastening System for Deck Rails		57 pages 29 pages of appendices
<b>Commissioned by</b>		
Boomeranger Boats Oy		
<b>Supervisor</b>		
Terho Halme, Lecturer		
<b>Abstract</b>		
<p>Sandwich structure usually requires some modifications around the high stress fixing points. Because these modifications are always very work intensive to do afterwards, positions of all fixings should be known beforehand. The objective of this thesis was to find a cost effective solution that would allow positioning of the fixings to be determined in a later phase of production. Threaded inserts were chosen for fastening system in this study. The strength of threaded insert was compared to a sandwich structure with flat bar insert and adhesively bonded fastener.</p>		
<p>The thesis is based on literature research and pull tests conducted for the test samples. Existing design model was created for honeycomb structures and the validity of this model was established by comparing test results to the theoretical method. A design process was created for the fixings of the deck rails. A foundation was also laid for further development of the evaluation method for design forces.</p>		
<p>The strength values calculated with the theoretical model were lower than values measured in the pull tests. In the theoretical model, the limiting factor was the shear strength of the core material. The strength of the potting material and adhesion between the face sheets and core were ignored. This may explain the conservative values of the theoretical model compared to test results. Promising test results and benefits of the threaded inserts encouraged to organize more allocated tests that may lead later implementation.</p>		
<b>Keywords</b>		
sandwich structure, insert, deck rail, work boat		

## SISÄLLYS

## SELITTEET

## SYMBOLIT

1	JOHDANTO.....	8
2	TYÖVENEET.....	9
2.1	Yleistä työveneistä.....	9
2.2	Suunnittelua ohjaava säännöstö.....	9
2.3	RIB-työveneen rakenne.....	10
3	INSERTIKIINNITYKSET KERROSRAKENTEISSA.....	10
3.1	Yleistä insertikiinnityksestä.....	10
3.2	Kerroslevyn rakenne ja ominaisuudet.....	11
3.3	Kerroslevyjen materiaalit.....	13
3.3.1	Pintakerrokset.....	13
3.3.2	Ydinaineet.....	13
3.4	Kerrosrakenteen mitoitus veneissä.....	15
3.5	Kerroslevyn kuormitus ja murtuminen.....	16
3.5.1	Pintalaminaatin pettäminen.....	16
3.5.2	Ydinaineen leikkautuminen.....	16
3.5.3	Leikkauspoimuttuminen.....	17
3.5.4	Nurjahdus.....	17
3.5.5	Kuormituspainauma.....	18
3.5.6	Pinnan rypistyminen.....	18
3.5.7	Paikallisten kuormien vaikutus.....	19
3.6	Kiinnittäminen kerroslevyyn.....	20
3.6.1	Läpipultattavat kiinnikkeet.....	20
3.6.2	Rakenteen sisäiset kiinnikkeet.....	22
3.6.3	Pintalaminaattiin kiinnittyvät kiinnikkeet.....	22
3.7	Insertit.....	23

3.7.1	Inserttityypit .....	24
3.7.2	Materiaalit.....	26
3.7.3	Kiinnitystavat .....	27
3.8	Kiinnikkeisiin kohdistuvat ulkoiset voimat .....	28
3.8.1	Voimien arviointi sovelletulla FMAW-mitoitusmenetelmällä.....	28
3.8.2	Voimien arviointi miehistöistuimien mitoituksen perusteella .....	30
3.8.3	Mitoitus esimerkki yksinkertaistetulla menetelmällä .....	31
3.8.4	Mitoitus esimerkki momenttimenetelmällä.....	31
3.8.5	Kiinnikkeisiin kohdistuvat rasitukset .....	32
3.9	Inserttien kuormankantokyky .....	36
3.9.1	Vaikuttavat tekijät .....	36
3.9.2	Insertin vetolujuuden arviointimenetelmä .....	37
3.9.3	Kiinnitysgeometria .....	39
3.9.4	Lähekkäin olevien inserttien keskinäiset vaikutukset .....	40
3.10	Inserttien murtumatyypit .....	42
4	MITOITUSMENETELMÄ KANSIKISKOJEN KIINNITTÄMISEKSI .....	44
5	INSERTTIEN TESTIMENETELMÄT .....	45
6	INSERTTIEN TESTAUS.....	46
6.1	Aikaisemmat testit ja menetelmän kehitys .....	46
6.2	Käytetyt menetelmät .....	46
6.2.1	Vetokoe .....	46
6.2.2	Taivutuskoe.....	47
6.2.3	Vääntökoe .....	48
6.3	Testikappaleiden suunnittelu ja valmistus.....	48
6.3.1	Testilaminaatin suunnittelu ja valmistus .....	48
6.3.2	Inserttien suunnittelu .....	49
6.3.3	Inserttien asennus.....	50
6.4	Testien suoritus ja tulokset .....	52
6.4.1	Vetokokeet .....	52

6.4.2	Taivutuskokeet .....	53
6.4.3	Vääntökokeet .....	53
6.5	Virhearviointi .....	53
7	PÄÄTELMÄT .....	54
	LÄHTEET .....	56

## LIITTEET

Liite 1. Kerroslevypalkin vertailu

Liite 2. Viranomaisveneestä kerätty kiihtyvyydata

Liite 3. Mitoituspainheet

Liite 4. Testilaminaatin mitoitus

Liite 5. Insertti A piirustus

Liite 6. Insertti B piirustus

Liite 7. Testipöytäkirja

Liite 8. Case study: Kansikiskojen kiinnitysmenetelmien vertailu

Liite 9. Koestettujen kappaleiden murtumatyytit

## SELITTEET

NASA	National Aeronautics and Space Administration. Yhdysvaltojen siviili-ilmailun tutkimuksesta ja avaruusohjelmasta vastaava virasto.
ESA	European Space Agency. Euroopan avaruusjärjestö.
ECSS	European Cooperation for Space Standardization. ESA:n, kansallisten avaruusjärjestöjen, Euroopan teollisuusjärjestöjen välinen yhteistyöryhmä standardien luomiseksi ja ylläpitämiseksi.
NAS	Amerikkalaisen toimialajärjestön Aerospace Industries Association (AIA) luoma standardi Ilmailu- ja avarusteollisuuden osien valmistajille.
FMAW	Finnish Maritime Work Boat Guidelines. Työveneohjeisto.
IMO	International Maritime Organization. Kansainvälinen merenkulkujärjestö.
HSC Code	International Code of Safety for High-Speed Craft. IMO:n nopeita aluksia koskeva säännöstö.

## SYMBOLIT

$B_C$	Runkoleveys palteen kohdalta	[m]
$m_{LDC}$	Aluksen massa täydellä kuormalla	[kg]
$L_{WL}$	Vesilinjapituus täydellä kuormalla	[m]
$\beta_{0,4}$	Pohjan V-kulma 40 % vesilinjapituudesta perästä mitattuna	[°]
$V$	Aluksen maksiminopeus täydellä kuormalla	[solmua]
$n_{CG}$	Dynaaminen kuormakerroin	[g]

## 1 JOHDANTO

Tämä työ tarkastelee kierreinserttien soveltuvuutta kansihelojen, erityisesti kansikiskojen kiinnittämiseen kerrosrakenteisessa veneen kannessa. Tavoitteena on löytää korvaava, kustannustehokas menetelmä rakenteen sisään laminoitaville kierteitettävälle vastarautoille. Koska kerrosrakenteella pyritään keveyteen, käytetään niiden ydinaineena yleensä kevyitä vaahto- tai kennolevyjä, jotka tyypillisesti eivät kestä suurta puristusta. Siksi rakenteen täytyy olla kiinnityspisteiden kohdalta muokattu kiinnityksille soveltuviksi. Jos kiinnityspisteiden paikat muuttuvat tai niitä tulee lisää kannen valmistuksen jälkeen, tarkoittaa se työläisiä muutostöitä kansirakenteessa. Tämä korostuu erityisesti sellaisissa tapauksissa, joissa kannen alapuolelle ei rakenteellisista syistä ole pääsyä.

Kierreinsertit mahdollistavat kiinnikkeiden paikkojen päättämisen tuotannon myöhäisessä vaiheessa, kannen jo ollessa asennettuna paikoilleen. Insertit mahdollistavat yksinkertaisemmän kansirakenteen ilman kohdennettuja vastarautoja tai muita rakenteellisia muutoksia kiinnikkeiden kohdalla. Tämä mahdollistaa vakiokomponenttien määrän lisäämisen tuotannossa sekä auttaa siirtymisessä kohti modulaarisempaa valmistusta.

Kerroslevyihin asennettavista kiinnikkeistä löytyy runsaasti tutkimustietoa, mutta se on keskittynyt lähes yksin omaan avaruusteknologia-teollisuuden ja lentokoneteollisuuden tarpeisiin. Näiden teollisuuden alojen käyttämät materiaalit ja tarpeet poikkeavat siinä määrin veneteollisuudesta, että kohdennetulle tutkimukselle venealan yleisesti käyttämille materiaaleille on perusteltua.

Tässä työssä selvitetään aikaisemman tutkimustiedon, teorian ja laskentamenetelmien luotettavuus veneteollisuuden tyypillisesti käyttämällä materiaaleilla, sekä kehitetään mitoitusmenetelmä insertikiinnityksille. Laskentamenetelmän luotettavuutta arvioidaan vertaamalla koekappaleille tehtyjä vetokokeiden tuloksia laskennallisiin lujuuksiin.

Työn runsaalla kuvituksella on pyritty havainnollistamaan inserttien ja kerroslevyjen rakennetta sekä niihin kohdistuvia voimia. Nämä kuvat on luotu SolidWorks- ja SolidWorks Composer-ohjelmilla.



## 2 TYÖVENEET

### 2.1 Yleistä työveneistä

Työvene on tarkoitettu palvelemaan miehistöä turvallisesti ja tehokkaasti sille määritetyillä työtehtävillä. Työveneiden yleinen määrittely on hankalaa, koska tehtävien erilaisuus vaikuttaa ratkaisevasti käytettävän veneen kokoon, tyyppiin, kansijärjestelyyn ja varusteluun. Suunnittelussa huomiota kiinnitetään erityisesti turvallisuuteen, käyttövarmuuteen ja ergonomiaan. Työn tuottavuutta voidaan lisätä huomioimalla työhyvinvointiin ja yleiseen viihtyvyyteen vaikuttavat tekijät. Näitä ovat esimerkiksi kehoon kohdistuva värinä, melu, ympäristön vaikutukset ja valaistus. (American Bureau of Shipping 2012, 1.)

Työveneiden tehokasta käyttöä ja tuottavuutta voidaan parantaa muunneltavalla kansijärjestelyllä. Yksi keino tähän on kannelle asennettavat kuormakiskot, joihin varusteita tai penkkejä voidaan kiinnittää työtehtävän asettaman tarpeen mukaan. Rajallinen kansitila on tällöin aina tehokkaasti käytettävissä, eikä tehtävillä tarpeetonta kuormaa tarvitse kuljettaa mukana.

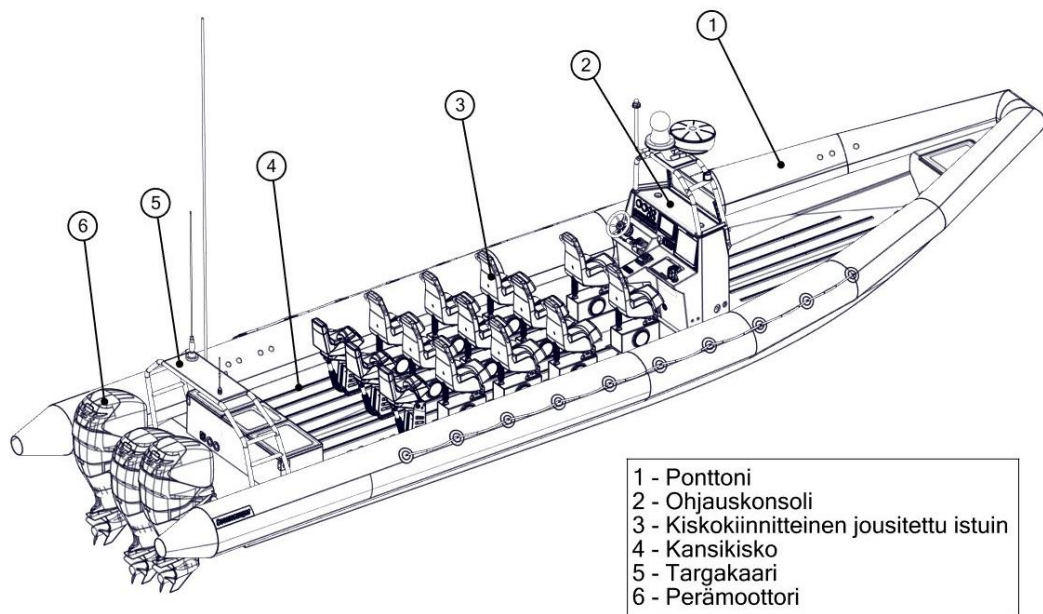
### 2.2 Suunnittelua ohjaava säännöstö

Suomessa työveneiden suunnittelua ohjaa VTT Expert Services OY:n ja Liikenteen Turvallisuusvirasto Trafín yhteistyönä laadittu säännöstö ammattiveneiden turvallisuudelle ja ympäristöystävällisyydelle. Tämä ohjeisto toimii työveneiden suunnittelun perustana sekä sääntöpohjana ammattiveneemääräykselle, joka on tulossa voimaan vuoden 2016 – 2017 aikana. Ammattiveneemääräyksen voimaan tulon myötä ammattiveneiden tarkastukset tulevat muuttamaan pääosin pakolliseksi. Tämän määräyksen ulkopuolelle jäävät kuitenkin mm. Puolustusvoimien alukset.

Ammattiveneohjeisto koskee 5,5 – 24 metriä pitkiä ammattialuksia ja perustuu pitkälti huviveneiden EU:n huvivenedirektiivin mukaista CE-sertifiointia varten laadittuihin ISO-standardeihin. Ammattiveneiltä vaaditun käyttövarmuuden vuoksi vaatimustaso on pääosin vastaavia ISO-standardeja korkeampi. (VTT Expert Services OY 2016.)

## 2.3 RIB-työveneen rakenne

RIB-veneessä on jäykkä pohjarakenne sekä siihen partaalla kiinnittyvä ilma- tai vaahtotäytteinen kelluke, eli ponttoni. Joustava ponttoni ottaa vastaan aaltojen iskuja, sekä antaa veneelle hyvän alkuvakavuuden. Ponttonin ja jäykän V-pohjan yhdistelmä tekee RIB-veneestä merikelpoisen ja yleisen venetyypin niiden viranomaisten ja kaupallisten toimijoiden keskuudessa, jotka tarvitsevat nopeaa operointikykyä vaativissa meriolosuhteissa. (Pike 2011.)



Kuva 1. Esimerkki RIB-työveneen rakenteesta

## 3 INSERTTIKIINNITYKSET KERROSRAKENTEISSA

### 3.1 Yleistä inserttikiinnityksestä

Kerroslevyissä käytettävien inserttien tutkimus- ja kehitystyötä ovat tehneet eri avaruus- ja ilmailualan järjestöt, organisaatiot ja yritykset kuten ESA, NASA ja ECSS. Laajamittaiseen testaamiseen perusteella on voitu luoda teoriaa ja laskentamalleja inserttien lujuuksien arvioinnille ja niiden kerrosrakenteisiin välittämille voimille. Näitä teorioita ja laskentamalleja luotaessa on tutkittu kennorakenteisiin kerroslevyihin asennettuja inserttejä. Veneissä käytettävissä kerrosrakenteissa ydinaineena käytetään tyypillisemmin vaahtotettuja muoveja, joten kennorakenteille luodut laskentamallit ja testeihin perustuvat mitoituskaaviot eivät välttämättä ole luotettavia arvioitaessa vaahtoytimellisiä rakenteita.

ISO 15084-standardi määrittelee vaatimukset ankkurointiin, kiinnittymiseen ja veneen hinaamiseen käytettäville heloille, sekä niitä koskeville rakenteille. Standardi ja ammattiveneohjeisto eivät ota kantaa muiden kansikiinnikkeiden, kuten inserttien mitoitukseen. Niistä mahdollisesti aiheutuvien pistemäisten kuormien vaikutusten arviointi jää suunnittelijalle ja veneen valmistajalle. Kerrosrakenteita koskevia sääntöjä ja periaatteita on kuitenkin noudatettava.

### 3.2 Kerroslevyn rakenne ja ominaisuudet

Kerroslevyn rakenne koostuu tyypillisesti kahdesta, suhteellisen ohuesta pintalaminaattikerroksesta, joiden välissä on matalatiheyksinen ydinaine tai muu kevyt rakenne. Pintalaminaatit kantavat levytason suuntaiset puristus- ja veto- rasitukset, levyä kuormittavan taivutusmomentin, sekä paikalliset paineen kuormat. Ydinaine on pintakerrokset toisistaan kiinteästi erottava väliaine, joka kantaa levypintaan nähden kohtisuorat leikkaus- ja puristusvoimat. Kerroslevyä voidaanakin verrata I-palkkiin, jossa palkin uuma vastaa kerroslevyn ydintä ja laipat pintalaminaatteja.

Kerroslevylaminaateilla voidaan toteuttaa kevyitä ja jäykkiä rakenteita, jotka eivät yleensä vaadi ulkopuolista lisätuentaa kuten palkistoa. Niiden avulla voidaan yksinkertaistaa ja optimoida rakenteita sekä saavuttaa muitakin etuja, kuten eristää lämpöä ja ääntä. Kerrosrakenteet ovat suosittuja erityisesti painokriittisissä sovelluksissa, ja niitä käytetään yleisesti myös veneteollisuudessa. Keventämällä veneen kokonaismassaa voidaan parantaa veneiden polttoainetaloutta, kasvattaa huippunopeutta, laskea tarvittavaa moottoritehoa, lisätä kuormankantokykyä tai muuttaa veneen painopistettä. (DIAB Group AB 2012, 5 – 10; SANDCORE 2006, 11.)

Kerroslevyn hyvistä ominaisuuksista huolimatta myös sen heikkoudet on otettava huomioon. Suhteellisen ohuiden pintakerrosten kantaessa tason suuntaisen puristus- ja leikkausvoiman, on se altis nurjahdukselle ydinaineen antaessa periksi. Ohuista pintakerroksista johtuen se kestää huonosti pistemäisiä kuormia kuten iskuja. Koska kevyet ydinainemateriaalit kestävät tyypillisesti huonosti puristusta ja niiden leikkauslujuus on suhteellisen huono, on kiinnikkeiden asentaminen kerroslevyyn haasteellista ja vaatii yleensä rakenteellisia muutoksia. (Lares 2012, 5; Gay 2014, 69.)

Kerroslevyn suurin etu umpilaminaattiin verrattuna on mahdollisuus parantaa lujuutta ja jäykkyyttä ilman merkittävää painon lisäystä. Tämä voidaan tehdä kasvattamalla pintalaminaattien etäisyyttä toisistaan, eli paksuntamalla ydinainetta. Kevyen ydinaineen ansiosta tällä tavoin saavutettu taivutusjäykkyyden paraneminen aiheuttaa vain vähäisen painon lisäyksen. Tätä voidaan havainnollistaa vertailemalla umpilaminaattipalkin ja kerroslevypalkin välistä taivutusjäykkyyden ja painon eroa. (Larson, Eliasson & Orych 2014, 264.)

Palkin taivutusjäykkyys  $D$  voidaan laskea kaavasta (ECSS Secretariat 2011, 113):

$$D = b \left[ E_f \left\{ \frac{t_f^3}{6} + \frac{t_f(t_c+t_f)^2}{2} \right\} + E_c \frac{t_c^3}{12} \right] \quad (1)$$

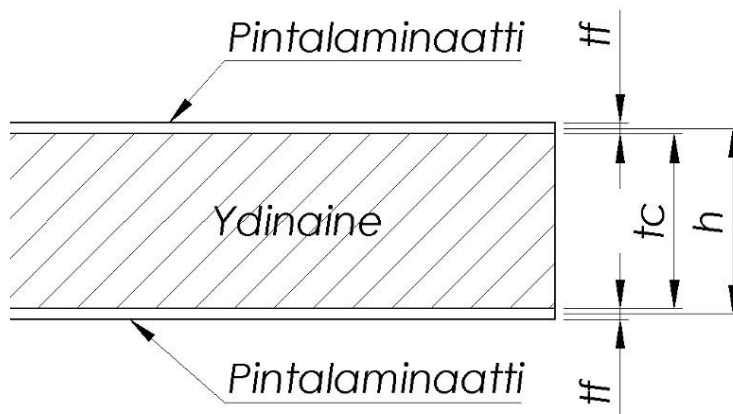
$E_f$  = Pintalaminaatin kimmomoduuli

$E_c$  = Ydinaineen kimmomoduuli

$t_f$  = Pintalaminaatin paksuus

$t_c$  = Ydinaineen paksuus

$b$  = Palkin leveys



Kuva 2. Kerroslevyn mitat

Lisäämällä palkin paksuutta 20 mm ydinaineen avulla saadaan yli 10-kertainen taivutusjäykkyys umpilaminaattipalkkiin verrattuna. Ydinaineen lisäämisestä johtuva painon lisäys on 33 %, mikä on suhteellisen vähän verrattuna saavutettuun jäykkyyden kasvamiseen. Käytettäessä erittäin kevyttä ydinainetta kuten hunajakennorakennetta kokonaispainon nousu on vielä tätä merkittävästi pienempi (liite 1).

Kerroslevypalkin leikkausjäykkyys  $S$  saadaan arvioitua seuraavan kaavan avulla (SANDCORe 2006, 25):

$$S = bhG_c \quad (2)$$

, missä

$b$  = palkin leveys

$h$  =  $t_f + t_c$

$G_c$  = ydinaineen liukukerroin

### 3.3 Kerroslevyjen materiaalit

#### 3.3.1 Pintakerrokset

Toivottuja ominaisuuksia pintakerroksilta ovat (ECSS Secretariat 2011, 111.):

- korkea jäykkyys
- korkea veto- ja puristuslujuus
- hyvä iskunkesto
- käyttöympäristön rasitusten kuten UV-säteilyn ja lämmön kesto
- pinnan laatu.

Lujitemuovi on veneteollisuudessa yleisin kerrosrakenteissa käytetty pintamateriaali ja siksi tässä työssä ei tarkastella muita materiaaleja. Lujitteina käytetään yleisimmin lasikuitua, mutta joissakin erityistä lujuutta ja keveyttä vaativissa kohteissa myös hiili- ja aramidikuitujen käyttö on perusteltua. Matriisina lujitemuovissa käytetään joko polyesteri-, vinyyliesteri- tai epoksihartseja. (Marshall 2010, 12.)

Lujitemuovin etuna on, että kerroslevyn lujuusominaisuuksia voidaan muokata suhteellisen helposti ja vapaasti pintakerrosten laminaattien avulla. Rakenteita voidaan optimoida paino- ja lujuusvaatimusten mukaisesti siten, että rakenteita vahvistetaan vain paikallisesti sieltä, minne suuremmat rasitukset kohdistuvat. (Armstrong ym. 2005, 3.)

#### 3.3.2 Ydinaineet

Ydinaineen toivottuja ominaisuuksia ovat (ECSS Secretariat 2011, 111-112):

- matala tiheys
- korkea kohtisuora jäykkyys ja lujuus pintakerrokseen nähden
- korkea leikkausjäykkyys ja leikkauslujuus

- käyttötarkoituksen mukainen lämmönjohtokyky.

Veneiden valmistuksessa käytettäville ydinaineille on asetettu vaatimuksia, jotka niiden on täytettävä. On suositeltavaa että ydinaineet testataan joko veneen valmistajan, tai ydinaineen valmistajan toimesta vaatimustenmukaisia testimenetelmiä käyttäen. Tiheyden testaamiseen käytetään standardia ISO 845, leikkauslujuuden ISO 1922 ja leikkausmoduulin ASTM C393. Jotta ydinainevalmistajan testeihin perustuvia mekaanisia arvoja voidaan käyttää, on näistä testeistä oltava sertifikaatit. Ellei mekaanisia ominaisuuksia ole määritetty kokeellisesti, käytetään ammattivenesäännöstön murtovenymään ja ominaispainoon perustuvia arvoja.

Ydinaineiden on kestettävä ISO 12215-5-standardissa ja ammattivenesäännöstössä määritellyt tason suuntaiset ja tasoon nähden kohtisuorat puristus-, veto- ja leikkausvoimat. Ydinaineen valinnassa tulee huomioida myös materiaalin väsymisen kesto ja yhteensopivuus käytettävän laminoitihartsin kanssa. Jos valmistusmenetelmänä käytetään alipaine-infuusiota, on ydinaineeksi valittava tähän menetelmään sopiva tuote. Lujuusrakenteissa käytettävien ydinaineiden on lisäksi täytettävä ISO 12215-2-standardin ”Grade 1” -vaatimukset. (VTT Expert Services OY 2016, 95 – 96.)

Kerroslevyjen ydinaineiden valmistuksessa materiaali ja rakennevaihtoehdot ovat lähes rajattomat. Veneteollisuudessa käytettävät ydinaineet voidaan jakaa tyypiltään kolmeen ryhmään:

- a. Hunajakenko
- b. Vaahtoydinaine
- c. Balsa.

### **Hunajakennot**

Hunajakennot ovat ilmailu- ja avaruusteollisuuden yleisesti käyttämiä ydinaineita. Erilaisia materiaali- ja kennorakennevaihtoehtoja on runsaasti käyttötarkoituksen ja lujuusvaatimusten mukaan. Kalliin hintansa ja vaativamman valmistustapansa vuoksi ne eivät ole yleisiä veneteollisuudessa, mutta niitä voidaan käyttää kilpa- ja erikoisveneissä, joissa painon säästöllä saavutetut edut katsotaan korkeampia kustannuksia suuremmiksi. (Haapanen 2011, 53 – 54.)

## Vaahtoydinaineet

Veneenvalmistuksessa käytetään pääsääntöisesti vaahdotettuja muoveja, joista tyypillisimpiä ovat lineaarinen ja ristisilloitettu PVC-vahto (polyvinyylidikloridi), sekä SAN- ja PET-vahto (styreeniakrylinitriili ja polyetyleenitereftalaatti). Rakenteellisissa osissa käytettäessä, vaahtoydinaineiden täytyy olla tyypiltään umpisoluisia. (ISO 12215-5 2008, 63 – 64.)

## Balsa

Balsaa käytetään edelleen veneissä ydinaineena huolimatta sen hygroskooppisista ominaisuuksista ja alttiudesta lahoamiselle. Riittävän puristus- ja leikkauslujuuden saavuttamiseksi balsan syyt on suunnattu kohtisuorasti pintakerrokseen nähden. Käytettäessä balsaa rakenteellisissa osissa, täytyy varmistaa että se on vapaa orgaanista materiaalia tuhoavista eliöistä. Sen lisäksi balsan on oltava tasalaatuista ja kosteusprosentin 12 % ja 15 % välillä. (ISO 12215-2 2002, 2 – 3; ISO 12215-5 2008, 63.)

### 3.4 Kerrosrakenteen mitoitus veneissä

Kerrosrakenteiden mitoitus ammattiveneissä riippuu suunnittelussa käytetystä säännöstä. Teknisiä standardeja ja suunnittelua ohjaavia sääntöjä luovat ja ylläpitävät eri kansalliset organisaatiot, sekä kansainväliset luokituslaitokset. Tämä työ tarkastelee mitoitusta Suomalaisen ammattiveneesäännösten näkökulmasta. Koska mielenkiinto on pääasiassa inserttien lujuudessa, ei syvempää perehtymistä rakenteiden mitoitussääntöihin tässä yhteydessä katsota aiheelliseksi.

Ammattiveneesäännöstö määrittelee vähimmäisvaatimukset kerroslevypaneelille, jotka perustuvat mitoituspaineeseen, pintalaminaattien ja ydinaineen lujuusominaisuuksiin, paneelin kokoon, geometriaan ja kaarevuuteen, sekä näistä johdettuihin kertoimiin. Säännöstössä paneelille määritellään (VTT Expert Services OY 2016, 107-109):

- taivutusvastuksen vähimmäisvaatimus
- suurimmat sallitut puristusjännitykset pintakerroksissa
- vähimmäisvaatimus kimmomoduulille
- vähimmäisvaatimus kerroslevypaneelin paksuudelle
- ydinaineen pienin sallittu puristuslujuus
- minimilujitemäärä paikalliskuormia varten.

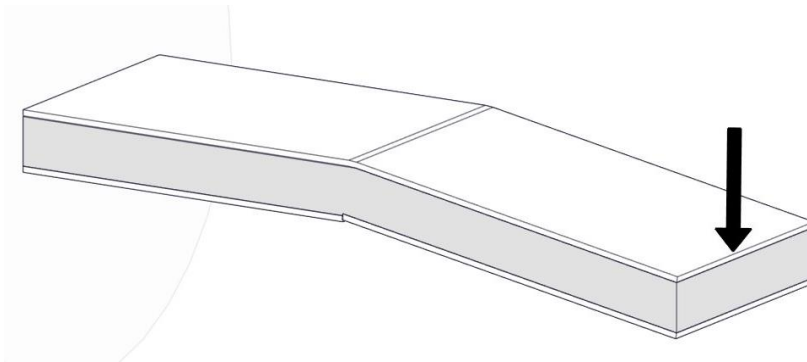
### 3.5 Kerroslevyn kuormitus ja murtuminen

Kerrosrakenteen murtumatyyppi voidaan ennakoida siihen kohdistuvan, murtumiseen johtavan kuorman suunnan perusteella. Hajoamistapaan vaikuttavat myös kappaleen geometria ja käytettyjen materiaalien ominaisuudet. Nämä seikat määrittelevät siten kerrosrakenteen kuormankantokyvyn rajat. Murtumatyyppit voidaan jakaa kahteen ryhmään (ECSS Secretariat 2011, 116):

1. Yleiset: yleisillä kuormilla syntyneet murtumat
2. Paikalliset: paikallisilla kuormilla syntyneet murtumat.

#### 3.5.1 Pintalaminaatin pettäminen

Kerroslevyn pinta taipuu tai murtuu, kun tason suuntaiset kuormat ylittävät jommankumman pintalaminaatin lujuuden. Tämä on tyypillinen murtumistapa taivutuksessa. Lujitemuovin puristuslujuutta voidaan pitää taivuttavilla kuormilla kriittisimpänä, olettaen että kerroslevy on symmetrinen. (Haugum, Pløen, 2014, 30.)

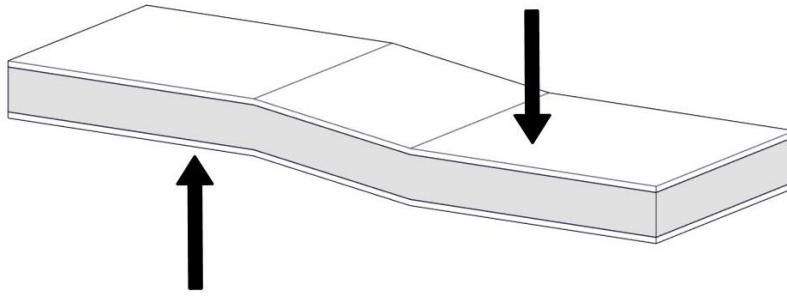


Kuva 3. Murtumatyyppi: Pintalaminaatin pettäminen

#### 3.5.2 Ydinaineen leikkautuminen

Yksinkertaisen kerroslevypalkin kolmen pisteen taivutuksessa leikkausjännitys vaihtelee parabolisesti pintalaminaatin ja ydinaineen lävitse. Pintakerrosten ollessa paljon jäykempiä ja ohuempia kuin ydinaine, voidaan leikkausjännityksen katsoa olevan lineaarinen koko kerroslevypalkin paksuudelta. (Petras 1998, 17.)

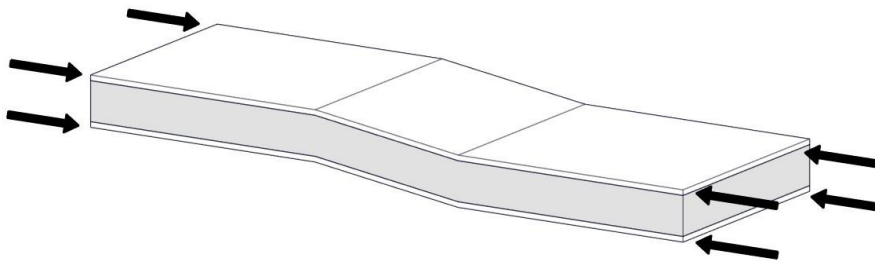




Kuva 4. Murtumatyyppi: Ydinaineen leikkautuminen

### 3.5.3 Leikkauspoimuttuminen

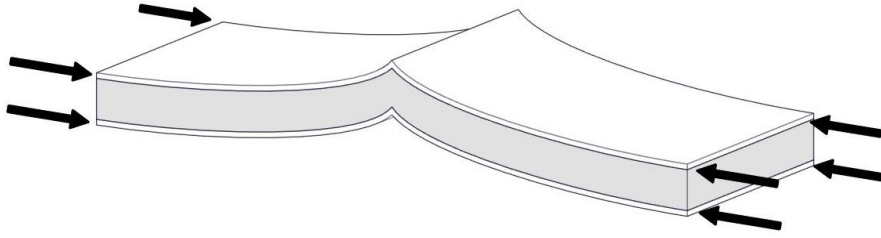
Leikkauspoimuttuminen muistuttaa paikallista hajoamistapaa, mutta se on yleisen nurjahduksen muoto, missä nurjahduksen aallonpituus on vain hyvin lyhyt. Tämän tyyppinen hajoaminen johtuu ydinaineen matalasta leikkausmoduulista. Pintalaminaatin ja ydinaineen välinen sidos on riittävän vahva, mutta poimuttuminen ilmenee yhtäkkisesti ja yleensä aiheuttaa ydinaineen leikkautumisen. On myös mahdollista, että pintalaminaatit irtoavat ydinaineesta. Kerroslevystä voidaan tehdä paremmin leikkauspoimuttumista vastustava paksumalla tai käyttämällä korkeamman kimmomoduulin ydinainetta. (Haugum ym. 2014, 32; Larson ym. 2014, 267.)



Kuva 5. Murtumatyyppi: Leikkauspoimuttuminen

### 3.5.4 Nurjahdus

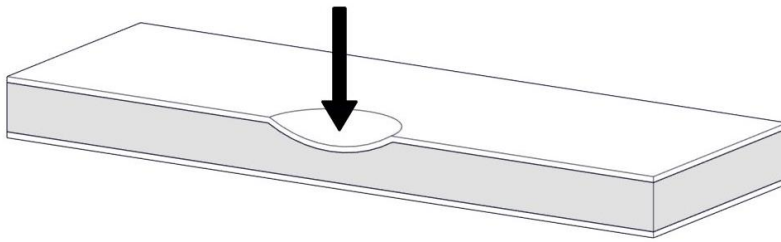
Nurjahdus voi esiintyä tason suuntaisilla puristuskuormilla, jos pintalaminaatit ovat liian ohuita ja kerroslevy pääsee taipumaan. Nurjahdusta voidaan välttää kasvattamalla pintalaminaattien paksuutta, tai käyttämällä paksumpaa tai korkeamman kimmomoduulin ydinainetta. (Larson ym. 2014, 266.)



Kuva 6. Murtumatyyppi: Nurjahdus

### 3.5.5 Kuormituspainauma

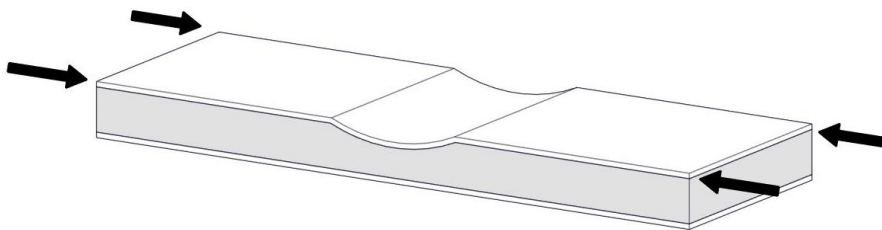
Paikallisilla, pistemäisillä kuormilla ydinaineen läpi kohdistuu leikkaus ja tasoon nähden kohtisuora puristuskuorma. Kuormituspainaumilta voidaan yleensä välttyä käyttämällä riittävän puristuslujuuden omaavaa ydinainetta kohdissa, johon pistemäisiä kuormia oletetaan kohdistuvan. (Haugum ym. 2014, 34.)



Kuva 7. Murtumatyyppi: Kuormituspainauma

### 3.5.6 Pinnan rypistyminen

Jos kerroslevyä kuormitetaan tason suunnassa ja pintalaminaatin sekä ydinaineen puristuslujuudet ja eivät ole riittävän korkeat, voi pintalaminaatti painua ydinaineeseen (Larson ym. 2014, 267).



Kuva 8. Murtumatyyppi: Pinnan rypistyminen

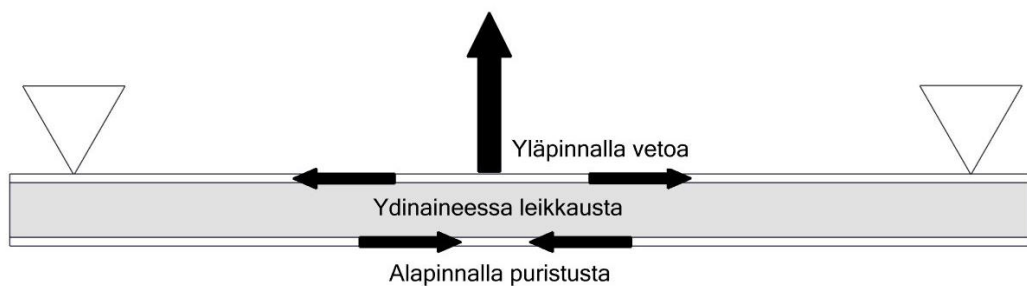
### 3.5.7 Paikallisten kuormien vaikutus

Veneen kansirakennetta tarkasteltaessa kiinnostus on erityisesti kiinnikkeiden kanteen kohdistamista paikallisista kuormista. Kuormat ovat pääsääntöisesti kohtisuoria tasoon nähden ja aiheuttavat kanteen leikkausvoiman lisäksi taivuttavan voiman. Kannen kiinnitystapa ja sen alapuolinen rakenne vaikuttavat siihen, kuinka helposti kansilaminaatti pääsee taipumaan. Taivuttavan voiman aiheuttamia rasituksia kerrosrakenteessa voidaan havainnollistaa palkkiteorian avulla.

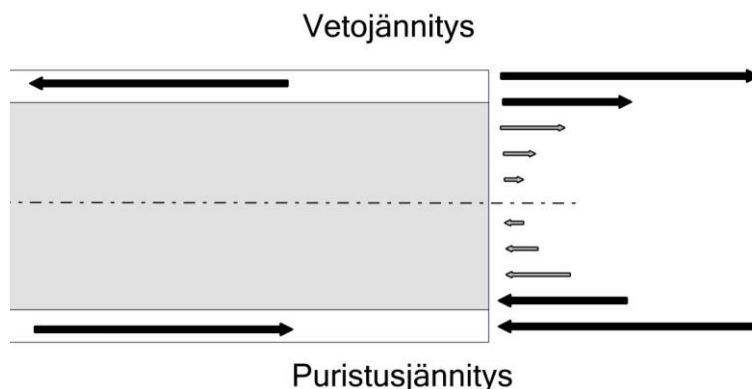
Paikallisesti kuormitettuun, päistään tuettuun kerroslevypalkkiin kohdistuvat rasitukset taivutuksessa jakautuvat veto- ja puristusjännitykseksi kerroslevypalkin pintakerrokseen. Kohdistettaessa palkkiin kohtisuora vetävä voima, pintakerros venyy ja siihen kohdistuu vetojännitys. Alapuolinen pintaan vastavasti puristuu ja siihen kohdistuu puristusjännitys. Pintakerrokset venyvät tai puristuvat jännittyen Hooken lain mukaan sitä enemmän, mitä kauempana ne sijaitsevat neutraaliakselista. Palkin neutraaliakselilla ei synny jännityksiä lainkaan ja ydinaineeseen kohdistuu vain leikkausvoima.

$$\text{Hooken laki: } \sigma = E\varepsilon \quad (3)$$

$E$  Pintakerroksen kimmomoduuli  
 $\varepsilon$  Suhteellinen venymä



Kuva 9. Kerroslevyn rasitukset kolmen pisteen taivutuksessa



Kuva 10. Jännityksen jakautuminen kerroslevyyn Hooken lain mukaisesti

Lujitemuovimateriaaleilla puristuslujuus on tyypillisesti vetolujuutta heikompi, joten taivutuksessa sitä on pidettävä rajoittavana lujuutena. Muita mahdollisia paikallisesta taivutuksesta aiheutuvia murtumatyyppejä ovat (ECSS Secretariat 2011, 118):

- ydinaineen leikkausmurtuma
- ydinaineen painuminen kasaan
- pintakerroksen irtoaminen ydinaineesta.

### 3.6 Kiinnittäminen kerroslevyyn

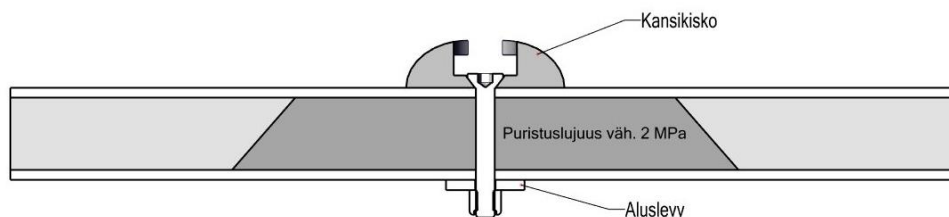
Paikallisesti kuormitettavia kiinnityksiä voidaan tehdä kerroslevyyn usealla eri tavalla. Jotta kiinnikkeiden kyky kantaa kuormaa olisi mahdollisimman suuri, on kerroslevyyn kohdistuvat kuormat pystyttävä jakamaan laajalle alalle kerroslevyn pintalaminaatteihin. Kerroslevykiinnikkeet voidaan jakaa kolmeen ryhmään:

- Läpipultattavat
- Rakenteen sisäiset
- Pintalaminaattiin kiinnittyvät

#### 3.6.1 Läpipultattavat kiinnikkeet

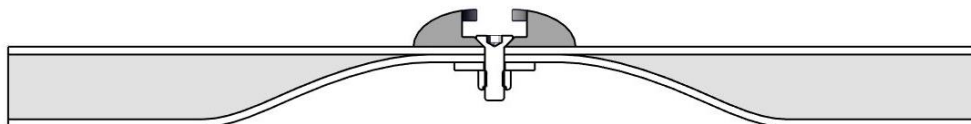
Läpipulttaus on yleinen tapa kiinnittää kansiheloja kerrosrakenteisten veneisiin, jolloin kiinnityksistä tulee luotettavia ja vahvoja. Läpipulttauksessa on kuitenkin otettava huomioon ydinaineen puristuslujuus, joka ei kestä suurta puristuskuormaa, vaikka kuorma jaettaisiin suurella aluslevyllä. Siksi ydinaine on kiinnikkeen kohdalla korvattava puristuslujuudeltaan riittävän vahvalla materiaalilla. Riittävä puristuslujuus ydinaineelle on ammattiveneohjeiston mukaan 2 MPa, kun ISO 12215-6-standardissa vastaava vaatimus on 5 MPa. Korkeasti

kuormitettujen helojen kohdalla myös pintalaminaatit tulee vahvistaa paikallisesti.



Kuva 11. Kansikiskon kiinnitys läpipulttaamalla. Ydinaine on vahvistettu paikallisesti

Vaihtoehtoinen tapa muuttaa kerroslevyn rakennetta kestävämmän kiinnikkeestä aiheutuva puristuskuorma, on tuoda se kiinnikkeen kohdalta umpilaminaatiksi. Koska kerrosrakenteen tuominen umpilaminaatiksi aiheuttaa taivutusjäykkyyteen ja lujuuteen epäjatkuvuutta, on muutos tehtävä riittävän jouhevasti. Ydinaineen viistäminen tulee tehdä siten, että sen pituuden suhde paksuuteen on 3:1.

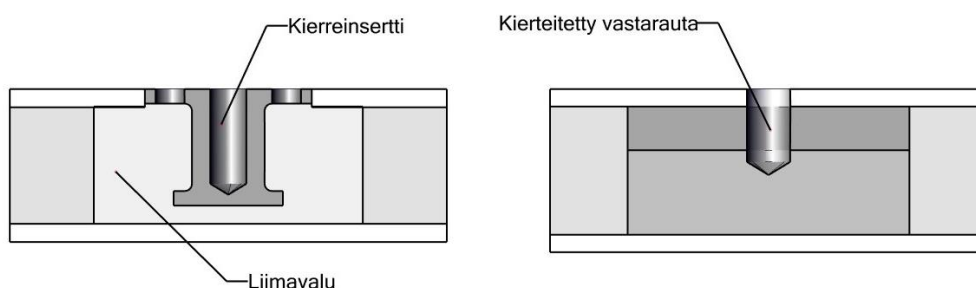


Kuva 12. Kansikiskon kiinnitys läpipulttaamalla. Rakenne on tuotu jouhevasti umpilaminaatiksi kiinnikkeen kohdalla

Läpipulttaus vaatii aina pääsyn rakenteen toiselle puolelle, jotta vastakappale, yleensä mutteri, voidaan kiinnittää pulttiin. Joissakin tapauksissa veneen kansirakenne ei kuitenkaan tätä salli, eikä läpipulttausta siksi voida käyttää. Kanteen tehty reikä on aina myös mahdollinen vuotokohta ja reitti veden kulkeutumiselle pilssiin, vaikka siihen kiinnitetty hela olisikin asianmukaisesti tiivistetty. Tämän vuoksi läpipulttausta ei aina haluta käyttää, vaikka se olisi mahdollista. (ISO 12215-6 2008, 25; VTT Expert Services OY 2016, 75 – 78, 92; Lake, Joughin 2008)

### 3.6.2 Rakenteen sisäiset kiinnikkeet

Rakenteen sisäisiä kiinnikkeitä ovat esimerkiksi vastaraudat, jotka on laminoitu kerrosrakenteen sisään, sekä erilaiset kierteelliset insertit ja kierteitetävät liimavalut. Näiden kiinnikkeiden lujuuteen vaikuttavia tekijöitä ovat materiaalin ominaisuudet, koko ja geometria, sekä tapa millä ne ovat rakenteessa kiinni. Rakenteen sisäisten kiinnikkeiden suunnittelussa tulee huomioida, että ne eivät heikennä rakenteen kokonaislujuutta.



Kuva 13. Leikkauskuva kierreinserdistä ja kierteitetystä vastaraudasta

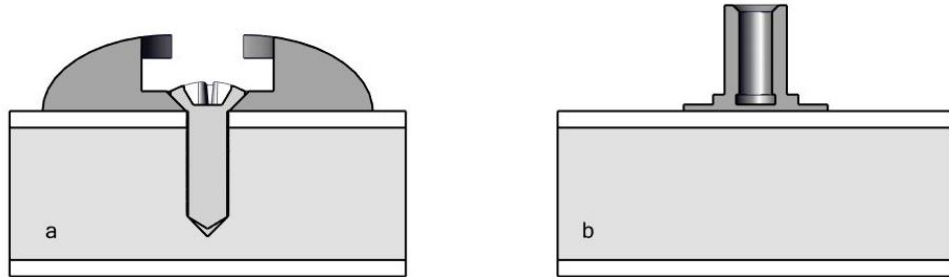
### 3.6.3 Pintalaminaattiin kiinnittyvät kiinnikkeet

Pintalaminaattiin kiinnittyviä kiinnikkeitä ovat esimerkiksi ruuvit ja nitit. Tämä on hyvin yksinkertainen kiinnitystapa, koska se ei ole riippuvainen pinnan alapuolisesta rakenteesta. Ruuveja ja nittejä käytettäessä ydinaineeseen tulee aina asennettaessa vauriokohta, mikä altistaa sen halkeamien kehittymiselle myöhemmin. Koska ainoastaan pintalaminaatti kantaa tämän tyyppisten kiinnikkeiden kuorman, ovat ne kaikista kiinniketyypeistä heikoimpia.

Ruuvien huonona puolena on myös se, että nittejä ei voida avata ja kiinnittää useita kertoja. Sisäpuolisilla kierteillä varustetut nitit sen sijaan sallivat toistuvan irrotuksen ja kiinnityksen. Huonojen lujuusominaisuuksien vuoksi tulee tämän tyyppisiä kiinnityksiä käyttää vain kevyesti kuormitetuissa kohteissa. Rajana voidaan pitää 1 kg:n painoista kappaletta. (Ribeiro-Ayeh 2002, 4 – 5.)

Kerroslevyn pintaan voidaan tehdä kiinnitys myös suoraan liimaamalla. Liimaliitoksen etuna on, että siihen kohdistuvat kuormat voidaan jakaa mekaanista kiinnitystä tasaisemmin ja suuremmalle alalle. Liimaliitoksella on myös hyvä kyky vastustaa väsymistä ja vaimentaa tärinää. Kerroslevyyn liimaliitoksella tehdyn kiinnityksen lujuus perustuu liiman lujuusominaisuuksien lisäksi myös

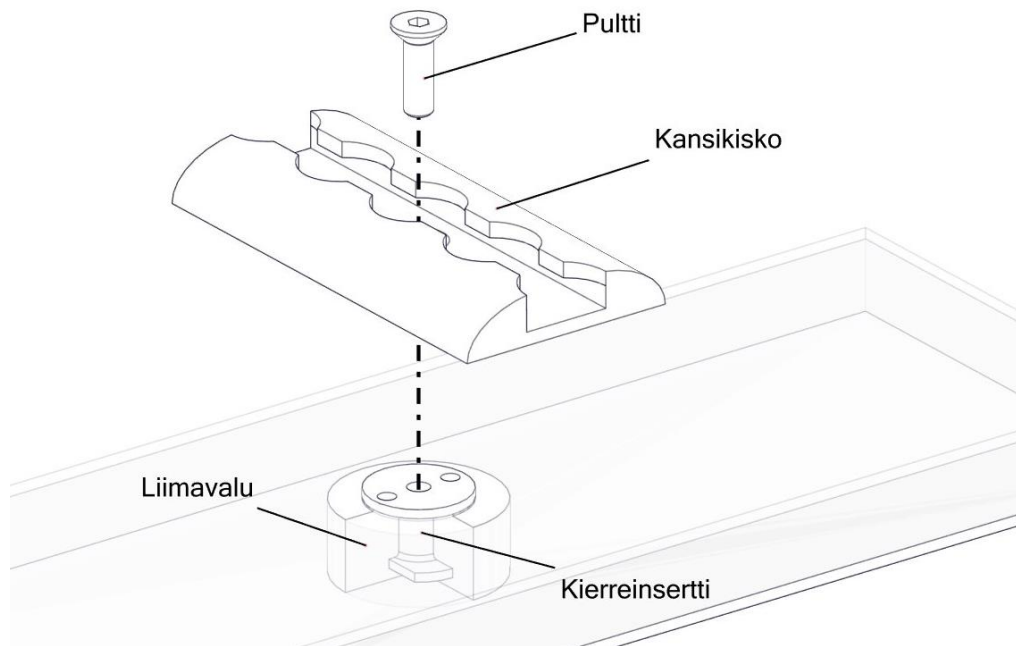
liiman ja liimattavan pinnan väliseen adheesioon, pintalaminaatin ja ydinaineen välisen liitoksen lujuuteen, sekä ydinaineen vetolujuuteen. (Ebnesajjad & Landrock 2009, 2 – 3.)



Kuva 14. a) Ruuvikiinnitys pintalaminaattiin b) Kierreinsertti liimattu laminaatin pintaan

### 3.7 Insertit

Insertti on osa kiinnitysmenetelmää, joka mahdollistaa rakenteiden ja osien kiinnittämisen kerroslevyyn siten, että ne ovat uudelleen irrotettavissa. Menetelmä koostuu kerroslevyyn upotetusta ja kiinni valetusta tai mekaanisesti kiinnitetystä kierteitetystä insertistä sekä siihen kiinnitettävästä pultista tai muusta kierteellisestä osasta. Inserttien tehtävä on johtaa siihen kohdistuvat voimat kerrospaneeliin mahdollisimman tasaisesti. Koska pintakerrokset ovat tyypillisesti ohuita, on voimat pyrittävä jakamaan mahdollisimman laajalle alalle. Insertin kuormankantokykyyn vaikuttavat merkittävimmät tekijät ovat sen kokonaispäästä ja korkeus. (ECSS Secretariat 2011, 66, 75; Heimbs, Pein 2009.)

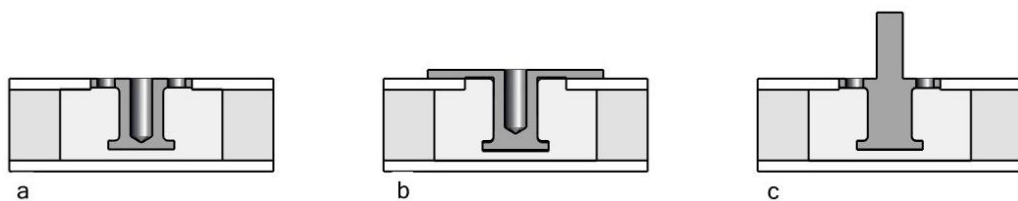


Kuva 15. Inserttikiinnityksen periaate

### 3.7.1 Inserttityypit

Insertin valinnassa ensimmäinen määrittävä tekijä on sen käyttötarkoitus ja se kuinka suurille kuormille se altistuu. Nämä samat vaatimukset on otettava huomioon myös itse kerroslevyssä, johon insertti asennetaan. Muita insertin valintaan vaikuttavia tekijöitä ovat (Shur-Lok 1996, 5 – 6):

- kerroslevyn kokonaispaksuus
- pintalaminaattien paksuus
- ydinaineen tyyppi ja materiaali
- inserttiin asennettavan pultin koko
- halutaanko läpi menevä vai päästään umpinainen insertti
- halutaanko että insertti on asennettu levypinnan tasoon (Kuva 16 a) vai tason päälle (Kuva 16 b)
- halutaanko sisäpuolisen kierteen sijaan ulkopuolinen kierretappi (Kuva 16 c)
- materiaali ja korroosionkesto.



Kuva 16. Inserttien päiden vaihtoehtoja: a) Pinnan tasoon asennettu b) Laipallinen pää c) Kierretapillinen pää



ECSS jaottelee insertit kolmeen ryhmään (A – C), joka perustuu niiden asennustapaan:

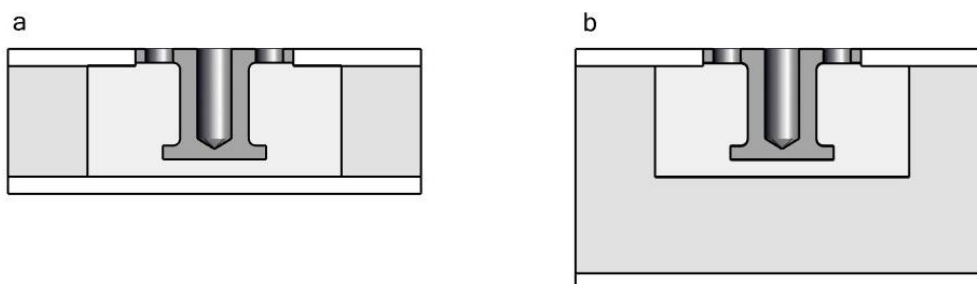
- A. Valmistuksen yhteydessä asennetut insertit
- B. Kerroslevyyn jälkiasennuksena valetut insertit
- C. Kerroslevyyn jälkiasennuksena mekaanisesti kiinnitetyt insertit.

### Ryhmä A

Ryhmän A insertit ovat kerroslevyn ydinaineen paksuisia ja niitä käytetään yleensä suhteellisen ohuissa kerroslevyissä. Inserteissä ei tyypillisesti ole valmista kierteellistä reikää, vaan reikä ja kierteet tehdään jälkikäteen. Tällaisia ovat esimerkiksi kerroslevyn sisään laminoidut vastaraudat tai pehmeän vaahtoydinaineen korvaaminen kiinnityskohdasta korkean puristuslujuuden omaavalla materiaalilla. Ydinaineen korkea puristuslujuus mahdollistaa läpipulttaamisen ilman ydinaineen puristumista kasaan. Veneteollisuudessa ryhmän A tyyppisiä inserttejä käytetään esimerkiksi korkeasti kuormitettujen helojen, kiinteiden varusteiden ja moottoriasennusten yhteydessä.

### Ryhmä B

Tyypillinen B ryhmän insertti koostuu sylinterimäisestä rungosta, jonka molemmissa päässä on laipat. Laipat yhdessä kapeamman sylinterimäisen rungon kanssa muodostavat mekaanisen liitoksen insertin ja kerroslevyn välille. Tästä johtuen siihen kohdistuvat kuormat eivät ole vain liima-aineen ja insertin välisen adheesiovarassa. Alapuolisen laipan geometrialla on parannettu sen kykyä vastustaa leikkausvoimia kierrettäessä. Tämä on voitu tehdä esimerkiksi reiättämällä alapuolinen laippa tai tekemällä pyöreään laippaan suorat sivut. Ryhmän B insertit ovat yleisimpiä kennolevyrakenteissa hyvien lujuus- ja asennusominaisuuksien vuoksi. Ne voidaan asentaa siten, että insertti on valettu kiinni koko ydinaineen paksuudelta tai vain osittain.

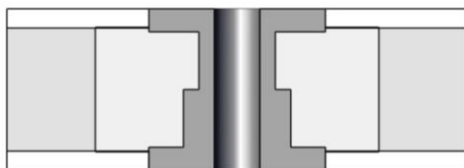


Kuva 17. Valutyyppi: a) täysin valettu b) osittain valettu

Ryhmän B insertit valetaan kiinni kerroslevyn sisään epoksiliimalla. Menetelmä perustuu ECSS:n luomaan standardiin, mutta myös toisenlaisia menetelmiä ja liimoja inserttien kiinnittämiseen voidaan käyttää, jos tämän standardin vaatimusta ei tarvitse täyttää.

### Ryhmä C

Ryhmän C insertit ovat kaksiosaisia ja kiinnitetään mekaanisesti kerroslevyyn sen molemmilta puolilta. Jos kerroslevy on pysyvästi asennettu siten, että sen toiselle pinnalle ei ole pääsyä, ei tämän tyyppistä inserttiä voida käyttää. C ryhmän insertit kestävät huonosti kuormaa, koska sillä ei ole suoraa yhteyttä kerroslevyn ytimeen. Koska mekaaninen liitos ei estä inserttiä pyörimästä, ei siihen voida kohdistaa kiertävää voimaa ilman liimaliitosta. Kaksiosainen mekaanisesti kiinnitettävä insertti on aina valittava käytettävän kerroslevyn paksuuden mukaan, toisin kuin B ryhmän, jotka eivät välttämättä vaadi kerroslevyn syvyyistä upotusta. Edellä mainituista syistä inserttien mekaaninen kiinnitystapa ei ole suositeltavaa. (ECSS Secretariat 2011, 68, 70 – 72.)



Kuva 18. Kerroslevyn läpi asennettava insertti

### 3.7.2 Materiaalit

Veneiden käyttöympäristössä, erityisesti suolaisessa vedessä kiinnikkeiltä vaaditaan hyvää korroosionkestoa. Käytännössä tämä tarkoittaa hyvän korroosionkeston omaavia, koneistukseen soveltuvia alumiiniseoksia. Näitä ovat esimerkiksi eräät 6000- ja 7000 -sarjan alumiiniseokset. Alumiinin korroosionkestoa ja liimausominaisuuksia voidaan parantaa anodisoinnilla, missä galvanisella käsittelyllä saadaan alumiinin pinnalle ohut, kova ja sähköä johtamaton oksidikerros. Inserttimateriaalina voidaan käyttää myös haponkestävää, sekä passivoituja ruostumattomia teräslaatuja. (ECSS Secretariat 2011, 81.)

### 3.7.3 Kiinnitystavat

Inserttityypistä riippuen se voidaan asentaa paikalleen jo kerroslevyn valmistuksen yhteydessä, tai jälkiasentaa kiinnivalamalla. Jälkiasennus voidaan tehdä myös mekaanisesti. Valamalla kiinnitettävät insertit voidaan jakaa liimätätön syvyyden perusteella täysin valettuihin ja osittain valettuihin. Tässä työssä keskitytään täysin kiinni valamalla kiinnitettyihin insertteihin sekä niiden ominaisuuksiin.

Yleisimmin inserttien kiinni valamisessa käytetään kaksikomponenttisia epoksiliimoja. Niiden ominaisuuksia voidaan muokata halutuksi riippuen käytettävästä asennustavasta. Liiman viskositeettiä voidaan kasvattaa kevyillä lisäaineilla kuten mikropalloilla, jolloin liimasta saadaan kevyempi ja huonommin juokseva. Käytettäessä paksunnettuja liimoja, voidaan asennuksia tehdä myös pystysuorilla pinnoilla. Liimat valetaan useimmiten ruiskuttamalla pienistä rei'istä insertin yläpuolisesta laipasta, mikä asettaa rajoituksia liiman viskositeetille. Kun liimaa pursotetaan toisen aukon kautta insertin ympärillä olevaan täytettävään tilaan, pääsee liiman syrjäyttämä ilma purkautumaan toisesta aukosta. Täytettävän tilan ollessa täysi purkautuu ylimääräinen liima toisesta aukosta ulos. Paksujen liimojen pursottamiseen tarvitaan yleensä paineilma, tai sähkötoiminen liimapistooli.

#### **Täysin valettu**

Täysin valetussa kiinnitysmenetelmässä suurinta mahdollista valusyvyyttä rajoittaa ydinaineen paksuus. Liimavalu on enimmillään ydinaineen paksuinen ja kiinnittyy tällöin myös kerroslevyn pintalaminaatteihin. Täysin valettuna pidetään kuitenkin vielä sellaista inserttiä, jossa valukorkeuden ja ydinaineen paksuuden erotus ei ole yli 7 millimetriä (Kuva 19 a). Sama vaatimus koskee insertin korkeutta.

#### **Osittain valettu**

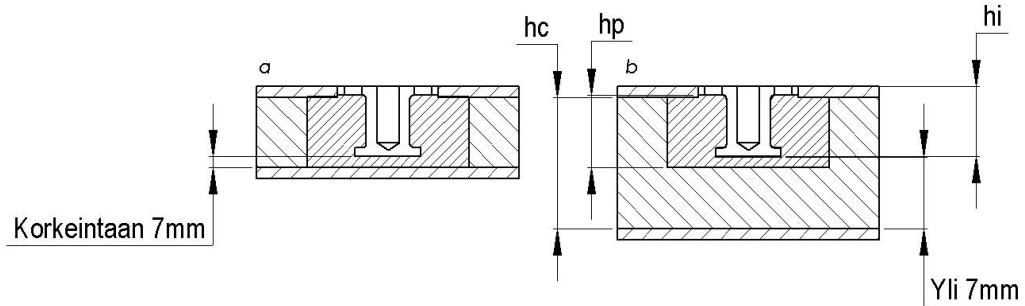
Osittain valetussa menetelmässä ydinaineen paksuudesta poistetaan vain osa, eikä liimavalu ulotu alapuolen pintalaminaattiin. Osittain valettuna pidetään sellaista, jossa insertin korkeuden ja ydinaineen paksuuden erotus on yli 7 millimetriä. Valun korkeuden on oltava vähintään 7 mm inserttiä korkeampi (Kuva 19 b).

- Insertti on täysin valettu kun,  $h_c \leq h_i + 7\text{mm}$
- Insertti on osittain valettu kun,  $h_c > h_i + 7\text{mm}$

$h_p$  = Valukorkeus

$h_i$  = Insertin korkeus

$h_c$  = Ydinaineen paksuus



Kuva 19. Valutavan määrittely: a) täysin valettu b) Osittain valettu

(ECSS Secretariat 2011, 96, 98, 105.)

### 3.8 Kiinnikkeisiin kohdistuvat ulkoiset voimat

#### 3.8.1 Voimien arviointi sovelletulla FMAW-mitoitusmenetelmällä

Veneissä rakenteisiin kohdistuvien todellisten voimien ennalta arviointi voi olla hankalaa, eikä niitä välttämättä pystytä määrittämään tarkasti etukäteen. Kiinnikkeiden mitoittamiseksi, täytyy niihin kohdistuvia voimia pystyä kuitenkin ennakoidaan. Yhtenä vaihtoehtona veneeseen kohdistuvien kuormien ja kiihtyvyyksien arvioimisessa voidaan käyttää ammattiveneohjeiston mukaista rakennemitoitusta. Ammattiveneohjeisto määrittelee kannelle mitoituspaineen, joka toimii rakennesuunnittelun perustana. Kansipaineen mitoitus perustuu veneen mittoihin, nopeuteen, suunnittelukategoriaan, mitoitettavan paneelin kokoon, sekä näistä johdettuihin eri kertoimiin. Lisäksi kansipaineeseen vaikuttaa se, onko kansi suunniteltu lastikanneksi.

Veneeseen kohdistuvat kiihtyvyydet määritellään dynaamisen kuormakerroimen avulla. Tämä kerroin ilmaisee kiihtyvyyden  $g$ -voimana, joka syntyy veneen osuessa aaltoon, tai pudotessaan aallon harjalta alas. Yksi  $g$  vastaa maan vetovoimaa  $9,81 \text{ m/s}^2$ . Liukuvarunkoisen moottoriveneen dynaaminen kuormakerroin saadaan seuraavien kaavojen avulla:

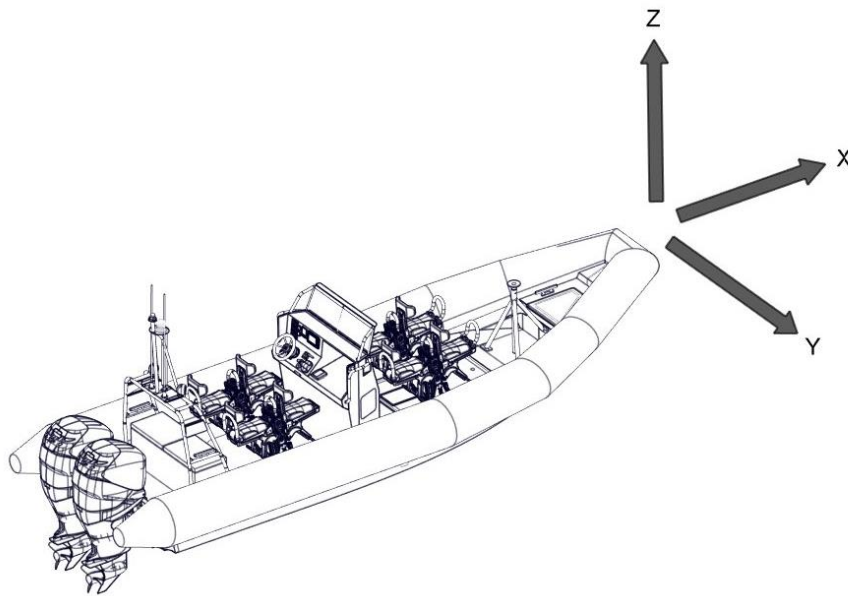
$$n_{CG} = 0,32 \times \left( \frac{L_{WL}}{10 \times B_C} + 0,084 \right) \times (50 - \beta_{0,4}) \times \frac{V^2 \times B_C^2}{m_{LDC}} \quad (4)$$

Jos kaavasta 4 saatu tulos  $\leq 3,0$ , käytetään tätä arvoa dynaamisena kuormakertoimena. Mikäli tulos on suurempi kuin 3,0, voidaan käyttää joko tätä tai kaavasta 5 saatua tulosta.

$$n_{CG} = \frac{0,5 \times V}{m_{LDC}^{0,17}} \quad (5)$$

Dynaamisena kuormakertoimena käytetään korkeintaan 7 g:n kiihtyvyyttä, vaikka laskentakaava antaisikin suuremman arvon. Perusteluna tälle on, että tätä suuremmilla kiihtyvyyksillä miehistön ei ole turvallista operoida alusta ilman erityisvarusteita, kuten jousitettuja istuimia. Nopeissa kilpa- tai viranomaisveneissä suuremmat kiihtyvyydet on syytä kuitenkin ottaa huomioon, vaikka standardi ei sitä velvoittaisikaan. Todelliset veneeseen kohdistuvat kiihtyvyydet voidaan haluttaessa selvittää kiihtyvyyssanturin avulla. (VTT Expert Services OY 2016, 76.)

Laskentakaavat antavat vain veneen pohjaan kohdistuvan, enimmäkseen Z-suuntaisen kiihtyvyyden. Kansikiinnikkeitä kuormittavat, kansivarusteisiin kohdistuvat kiihtyvyydet ovat taas pääsääntöisesti X- ja Y-suuntaisia, jotka syntyvät esimerkiksi veneen käännöksissä ja törmäyksissä aaltoihin. Viranomaiskäytössä olleesta veneestä kerätyn kiihtyvyystiedon perusteella X ja Y-suuntaisten kiihtyvyyksien keskiarvot olivat 67 % ja maksimiarvot 90 % Z-suuntaisista kiihtyvyyksistä. Tämä kiihtyvyystieto oli kerätty Suomenlahdella, jossa aallonpituus on valtamerien aaltoja merkittävästi lyhempi ja olosuhteet verrattain vaatimattomat. Lyhyestä aallonpituudesta johtuen vene hyppii aallon harjalta toiselle ja kuormitus on tyypiltään rytyyttävää. Valtamerien pitkällä aallonpituudella vene voi kovassa vauhdissa pudota aallon harjalta aallon pohjalle ja siten kiihtyvyydet muodostuvat suuremmiksi. Suomenlahdella mitatut kiihtyvyyshuiput jäivät alle 4 g:n. Mittausolosuhteista ja rajallisesta datamäärästä johtuen mittaustieto ei ole riittävän luotettavaa käytettäväksi pysty- ja vaakasuuntaisten voimien suhdeluvun arvioimiselle.



Kuva 20. Koordinaatisto veneeseen kohdistuvien voimien suunnista

### 3.8.2 Voimien arviointi miehistöistuimien mitoituksen perusteella

Kansainvälinen merenkulkujärjestö IMO on luonut nopeita aluksia koskevan säännösten (HSC Code), joka määrittelee myös veneiden miehistöpenkeiltä sekä niiden varusteilta ja kiinnityksiltä vaadittavat kokeet. Staattisissa kuormituskokeissa voima on kohdistettava 350 mm istuimen pohjan yläpuolelta seuraavasti:

1. eteenpäin voimalla 2,25 kN
2. taaksepäin voimalla 1,5 kN
3. sivulle voimalla 1,5 kN
4. pystysuoraan alas voimalla 2,25 kN
5. pystysuoraan ylös voimalla 1,5 kN.

Tämä staattisen kuormituksen vaatimus on suhteellisen matala, eikä sen mukaan mitoitettun kiinnityksen käyttövarmuus ole riittävä vaativissa olosuhteissa. Dynaamisen kuormituksen testaaminen vaatii törmäyskokeiden suorittamista, minkä avulla riittävästä lujuudesta voidaan varmistua.

Kiinnikkeisiin kohdistuvat kuormat muodostuvat kiihtyvyyden lisäksi myös niihin kiinnitettävien varusteiden massasta, kiinnityspisteiden lukumäärästä, sekä geometriasta. Yksinkertaisessa arviointimenetelmässä määritetään kiinnitettyyn kappaleeseen kohdistuva kokonaisvoima Newtonin II lain perusteella kaavasta  $F=ma$ . Kun kokonaisvoima jaetaan kiinnikkeiden lukumäärällä, saadaan maksimivoima kiinnikettä kohden. Tämä yksinkertaistettu menetelmä ei

ota huomioon kappaleen geometriaa ja painopistettä. (ECSS Secretariat 2011, 417-418.)

### 3.8.3 Mitoitusesimerkki yksinkertaistetulla menetelmällä

Kiinnikeisiin kohdistuvia voimia penkin kiinnityksessä voidaan tarkastella esimerkin avulla. A-kategoriaan suunnitellun veneen mitoituksessa käytetään maksimikiikhtyvyyttä ( $n_{CG} = 7$ ) ja vaakasuuntaisten voimien suhdelukuna 0,9.

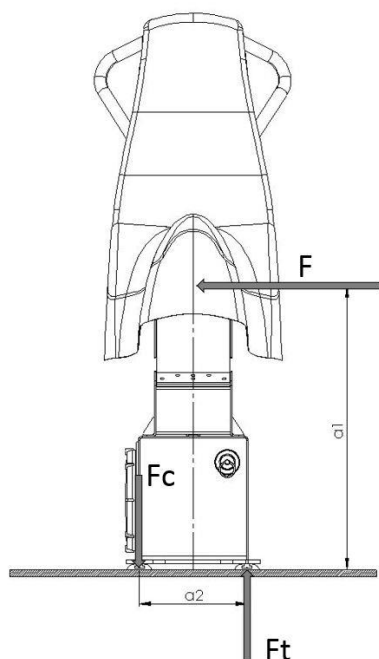


Kuva 21. Penkin kiinnitys neljästä pisteestä

Penkin ja matkustajan massa	$m$	=	150kg
Kiihtyvyyys	$a$	=	$0,9 \times 7 \times 9,81 \text{m/s}^2 = 61,8 \text{m/s}^2$
Voima	$F$	=	9270N
Kiinnikkeiden lukumäärä	$n_k$	=	4
Maksimi voima kiinnikettä kohden	$F/n_k$	=	2318N

### 3.8.4 Mitoitusesimerkki momenttimenetelmällä

Todellista kuormitustilannetta paremmin vastaava arviointi voimien kiinnikkeisiin kohdistavista rasituksista saadaan huomioimalla kiinnitetyn kappaleen geometria. Kun penkissä turvavyö kiinni istuvaan matkustajaan kohdistuu äkillinen vaakakiihtyvyyys, aiheutuu tästä vaakavoima turvavyön kiinnityspisteiden korkeudelle. Tämä voima aiheuttaa momentin kansitasoon ja edelleen voimaparin kiinnikkeisiin. Tätä voidaan havainnollistaa seuraavan esimerkin avulla:



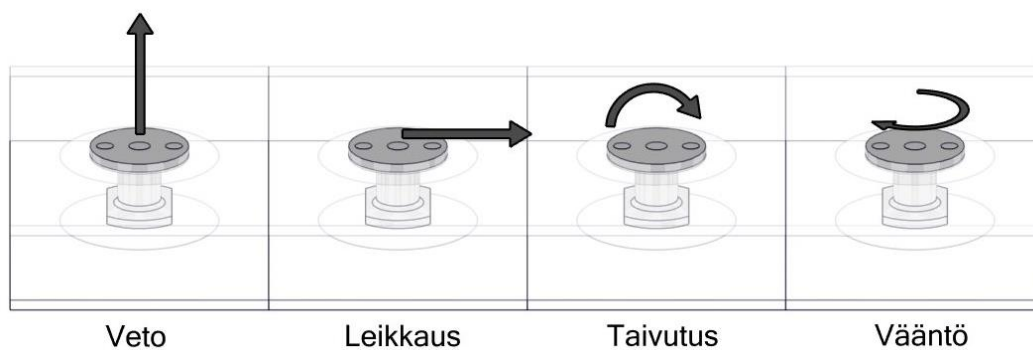
Kuva 22. Voimien kohdistuminen penkkiin

Penkin ja matkustajan massa	$m$	=	150kg
Kiihtyvyyys	$a$	=	61,8m/s <sup>2</sup>
Voima	$F$	=	9270N
Kiinnikkeiden etäisyys	$a2$	=	0,22 m
Painopisteen korkeus kiinnitystasosta	$a1$	=	0,6 m
Momentti kansitasossa	$Mk$	=	5562 Nm
Veto ja puristus kiinnikkeissä	$Fc = Ft$	=	25,3 kN
Maksimi voima kiinnikettä kohden	$F/n_k$	=	12,6 kN

### 3.8.5 Kiinnikkeisiin kohdistuvat rasitukset

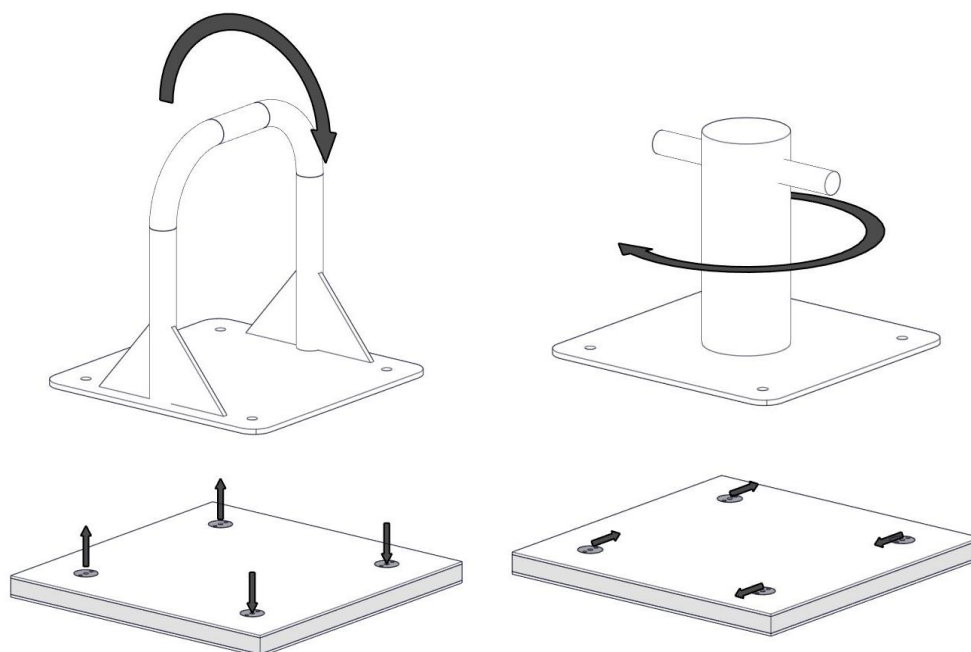
Kiinnikkeisiin voi kohdistua joko veto-, puristus-, leikkaus-, taivutus-, tai kiertokuormia. Rasitukset voivat olla myös edellä mainittujen yhdistelmiä ja kiinnikkeisiin kohdistuvien voimien suuntaan voidaan vaikuttaa suunnittelulla. Tyypillisimmät kriittiset kuormitussuunnat ovat joko veto-, tai leikkausvoimia, koska puristus- ja taivutuskuormia voidaan välttää suurilla kiinnitysalloilla sekä käyttämällä useita kiinnityspisteitä. Vetolujuutta pidetään kriittisimpänä ja kiinnikkeet yleensä mitoitetaan sen mukaisesti. Kiertävä rasitus syntyy käytännössä vain kiinnikkeeseen asennettavaa pulttia väännettäessä.





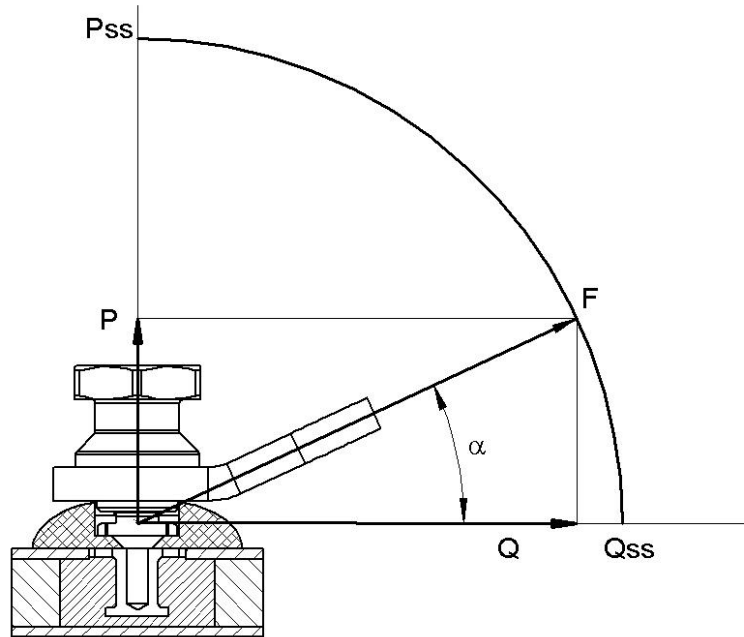
Kuva 23. Insertin rasiusten suunnat

Koska kiinnikkeillä on tyypillisesti heikko taivutuslujuus, on taivuttavia kuormia syytä välttää. Kiinnittämällä kappale useasta pisteestä, taivuttavat voimat voidaan muuttaa joko veto-, tai puristuskuormaksi. Vastaavasti useasta pisteestä kiinnitettyä kappaletta kierrettäessä kohdistuu kiinnikkeisiin leikkausvoima.



Kuva 24. Taivuttavan ja kiertävän voiman kuormitus suunnat neljän pisteen kiinnityksessä

Kansikiskoja käytettäessä varusteet kiinnitetään lähes aina useammasta pisteestä, joten taivutus- ja kiertokuormilta pääsääntöisesti vältytään. Poikkeuksena ovat tapaukset, joissa kuorma sidotaan kannelle käyttäen kuormansidontaliinoja. Tällaisessa tapauksessa kiinnikkeeseen kohdistuva voima ei ole kohtisuora tasoon nähden, eikä tason suuntainen, vaan jotain tältä väliltä. Tämä voima voidaan kuitenkin jakaa veto- ja leikkaussuuntaisiin komponentteihin.



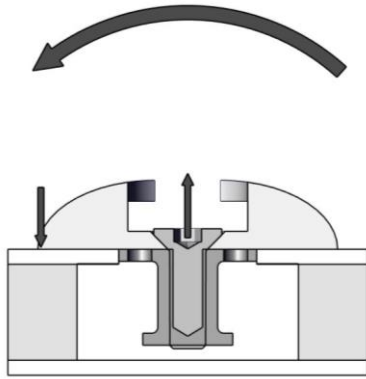
Kuva 25. Vinon kuorman jakaminen komponentteihin

$$\begin{aligned}
 P &= F \sin \alpha &= & \text{Tasoon nähden kohtisuora komponentti} \\
 Q &= F \cos \alpha &= & \text{Leikkaussuuntainen komponentti} \\
 F & &= & \text{Kulmassa kohdistuva voima} \\
 \alpha & &= & \text{Tason ja kohdistuvan voiman välinen kulma}
 \end{aligned}$$

Kun tiedetään kiinnikkeen suurin sallittu kuormitus vetosuunnassa ( $P_{SS}$ ) ja leikkaussuunnassa ( $Q_{SS}$ ), voidaan laskea suurin sallittu kuorma halutulla kulmalla ( $F_{SS}$ ) seuraavan kaavan avulla (ECSS Secretariat 2011, 211; Ribeiro-Ayeh 2002, 7):

$$|F_{SS}| = \frac{P_{SS}Q_{SS}}{\sqrt{P_{SS}^2 \cos^2 \alpha + Q_{SS}^2 \sin^2 \alpha}} \quad (6)$$

Insettien huono taivutuksen kesto voidaan ottaa huomioon myös siihen kiinnittävän vastakappaleen kontaktipinta-alassa. Riittävän suurella alalla voidaan taivuttavia voimia jakaa osin veto- ja puristussuuntaisiksi.



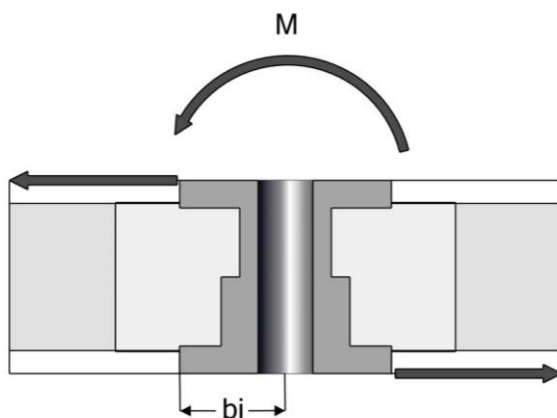
Kuva 26. Voimien jakautuminen veto- ja puristussuuntaiseksi taivuttavalla kuormalla

Rakenteen läpi ulottuvilla inserteillä taivuttava momentti kohdistaa myös puristuksen kerroslevyn pintalaminaatteihin, jotka kantavat osan taivutuskuormasta (Kuva 28). Sen vuoksi tämän tyyppiset insertit kestävät merkittävästi suurempia taivuttavia kuormia. Suurin sallittu taivutuskuorma ( $M_{ss}$ ) voidaan laskea kaavasta (ECSS Secretariat 2011, 150, 153, 206):

$$M_{ss} = P_{ssc} b_i \quad (7)$$

$P_{ssc}$  = Suurin sallittu puristuskuorma pintalaminaatissa

$b_i$  = Insertin säde



Kuva 27. Momentin aiheuttama puristuskuorma pintalaminaateissa

### 3.9 Inserttien kuormankantokyky

#### 3.9.1 Vaikuttavat tekijät

Insertin kuormankantokykyyn merkittävimmin vaikuttavat tekijät ovat liimavalun todellinen säde ( $b_R$ ) ja valusyvyys. Vaahtodynäineellisissä kerroslevyissä todellinen säde on helposti määritettävissä, mutta hunajakennorakenteissa liimavalun säde saadaan sitä varten kehitetyn laskentakaavan avulla. Kennolevyn rakenteesta johtuen liimavalun ala riippuu kennojen koosta ja rikottujen seinämien lukumäärästä. Tämä ala voidaan muuttaa vastaamaan todellista valun sädettä.

$$b_R = \sqrt{\frac{N_{PC} \times F_C}{\pi}} \quad (8)$$

$N_{PC}$  = Täytettyjen kennojen lukumäärä

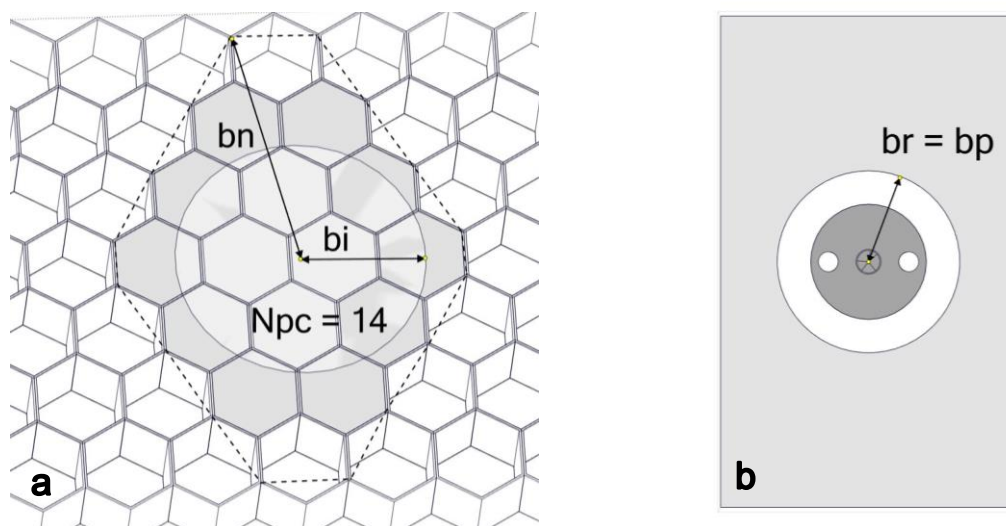
$F_C$  = Yhden kennon ala

$F_C$  =  $0,95 \times 0,75 \times S_c^2 \cos \alpha$

0,95 = Kennojen epätäydellisestä muodosta johtuva kerroin

$S_c$  = Kennon nimellinen koko

$\alpha$  = Kuusikulmaisessa kennossa  $30^\circ$



Kuva 28. Liimavalun tehollisen säteen laskeminen hunajakennorakenteessa (a) ja vaahtodynäineellisessä rakenteessa (b)

Laskettaessa inserttien kuormankantokykyä käytetään tehollista valun sädettä ( $b_p$ ). Vaahtoydinainetta käytettäessä tämä on sama kuin todellinen säde. Hunajakennoissa otetaan huomioon kennojen jäykemmät, kaksinkertaiset seinämät ja valun tehollinen säde lasketaan insertin keskipisteestä mitattujen etäisyyksien keskiarvosta näihin kennon seinämiin. (ECSS Secretariat 2011, 98 – 101.)

$$b_p = \frac{1}{n} \sum b_n \quad (9)$$

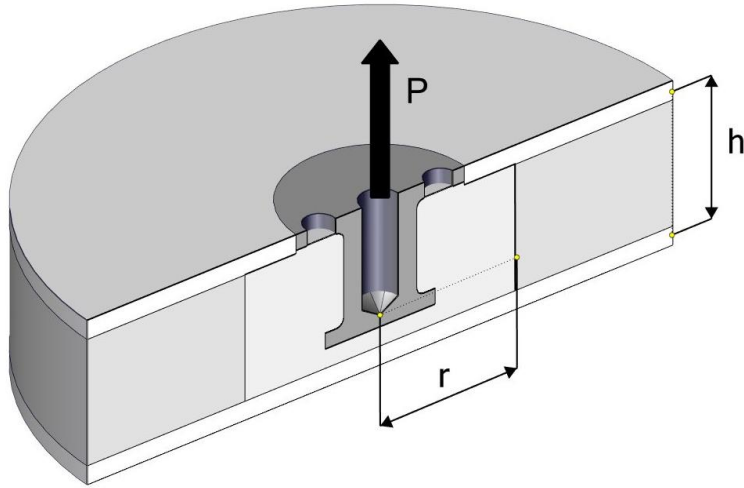
$b_n$  = Etäisyys kaksinkertaiseen seinämään

### 3.9.2 Insertin vetolujuuden arviointimenetelmä

Kerroslevyyn kiinnitetyn insertin kuormankantokyvyn laskenta perustuu pitkälti koetuloksiin, joista laskentakaavat on voitu johtaa. Omia laskentamenetelmiä ovat luoneet eri yhteistyöjärjestöt ja kaupalliset toimijat. Tässä työssä käytetään ECSS:n kehittämää laskentatapaa, jota voidaan pitää luotettavana menetelmänä hunajakennorakenteille. Vaahtoydinaineellisille kerroslevyille tehtyjen vetokokeiden tuloksia vertailemalla voidaan arvioida laskentamenetelmän luotettavuutta myös näillä materiaaleilla.

Inserttikiinnityksen tarkka analyttinen arviointi on hankalaa, koska kerroslevyn osien, insertin ja liimavalun keskinäinen vuorovaikutus insertin lähietäisyydellä on hyvin monimutkaista. Poikkeuksena tästä on tasoon nähden kohtisuorien, staattisen kuormankeston arviointi. Tämän suuntaisilla kuormilla lähes poikkeuksetta inserttikiinnityksen hajoamistapa on leikkausmurtuma ydinaineen ja liimavalun rajapinnan läheisyydessä. Tämä on kohta, johon suurin leikkausjännitys kohdistuu. Laskentatapa ei ota huomioon liimavalun ja pintalaminaattien välistä adheesiota ja sitä kautta myös pintalaminaatteihin kohdistuvia leikkausvoimia. (ECSS Secretariat 2011, 344.)

Ydinaineeseen kohdistuvan leikkausvoiman laskentaan käytetään pyöreää kerroslevyä, jonka keskelle on kiinnitetty insertti. Oletuksena laskentakaavan käytölle on, että kerroslevyn pinnat ovat ohuita suhteessa ydinaineeseen ja insertti on täysin valettu.



Kuva 29. Leikkausjännityksen laskemiseen tarvittavat mitat

Ydinaineen leikkausjännitys  $\tau_c$  saadaan lasketta kaavasta:

$$\tau_c = \frac{P}{2\pi r h} \quad (10)$$

$P$  = Inserttiin kohdistuva voima

$r$  = Säde, miltä etäisyydellä jännitystä lasketaan

$h$  = Pintalaminaattien etäisyys keskikohdasta mitattuna

Leikkausjännitys pysyy vakiona koko ydinaineen paksuudelta. Suurimman leikkausjännityksen ( $\tau_{cmax}$ ) ollessa lähellä ydinaineen ja liimavalun rajapintaa ( $r=b_p$ ), voidaan todeta että:

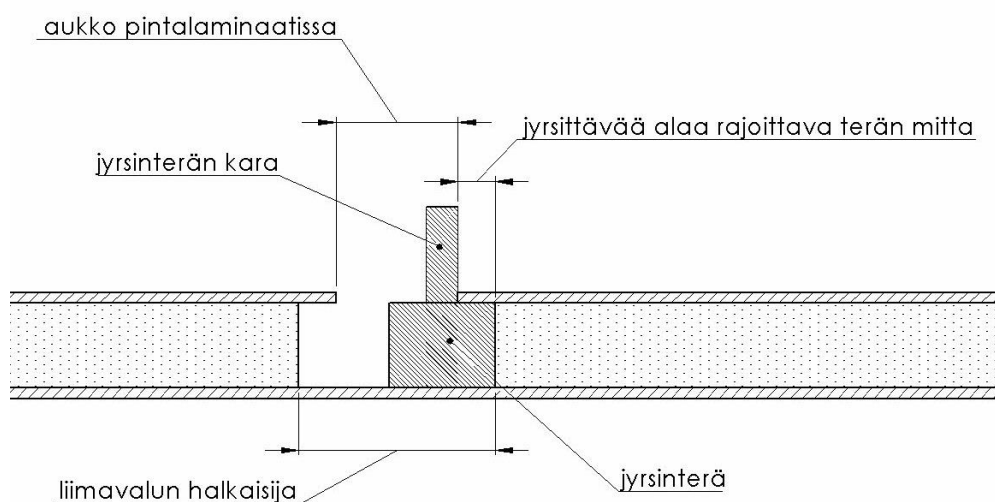
$$\tau_{cmax} = \tau_c(r = b_p) = \frac{P}{2\pi b_p h} \quad (11)$$

Leikkausmurtuma syntyy kun ydinaineena käytetyn materiaalin leikkauslujuus ( $\tau_{crit}$ ) ylittyy. Insertin suurimpana sallittuna kuormana ( $P_{crit}$ ) voidaan pitää:

$$P_{crit} = 2\pi b_p h \tau_{crit} \quad (12)$$

Kaavasta voidaan todeta, että insertin kuormankantokykyä voidaan parantaa kasvattamalla leikkauspinta-alaa tai valitsemalla ydinaineeksi materiaali, jolla on parempi leikkauslujuus. Leikkauspinta-alaa voidaan suurentaa joko kasvattamalla liimavalun sädettä, tai paksuntamalla kerroslevyä. Liimavalun säteen

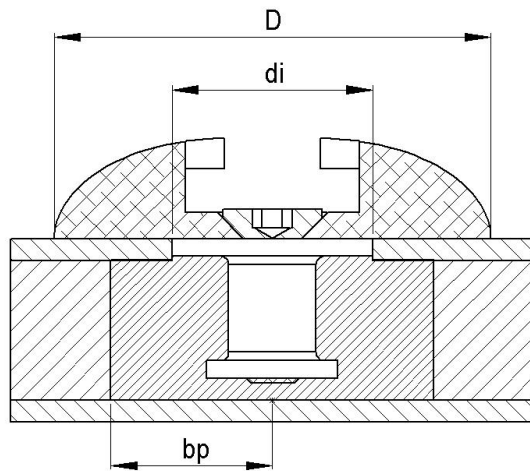
kasvattaminen kennolevyissä tarkoittaa ylimääräisten kennon seinämien puhkaisemista, mutta vaahtodynaineilla liimavalun sädettä voidaan kasvattaa jyrsimällä ydinainetta laajemmalla alueella. Suurinta mahdollista sädettä liimavalulle rajoittaa ydinaineen poistoon käytettävä jyrsimen terä, koska terän on mahduttava insertin kokoisesta pintalaminaattiin tehdystä aukosta. (ECSS Secretariat 2011, 98-100, 345-349)



Kuva 30. Ydinaineen jyrsimä ja sitä rajoittavat tekijät

### 3.9.3 Kiinnitysgeometria

Oikein suunnitellussa kiinnityksessä inserttiin kiinnitettävän vastakappaleen kontaktipinta-alan on oltava vähintään liimavalun halkaisijan kokoinen (kuva 32). Pienimpänä sallittuna halkaisijana voidaan pitää insertin halkaisijaa. On tärkeää, että insertti on asennettu aivan pinnan tasoon. Kohollaan ollessaan sen taivutuksen kesto on heikompi, koska siihen kiinnitetty kappale ei tällöin osallistu taivutuskuormien jakamiseen puristuskuormaksi pintalaminaattiin. (ECSS Secretariat 2011, 150, 153.)



Kuva 31. Kiinnitettävän vastakappaleen kokovaatimukset

Liimavalun halkaisija =  $2 \times b_p$

Vastakappaleen leveys =  $D$

Insertin halkaisija =  $d_i$

### 3.9.4 Lähekkäin olevien inserttien keskinäiset vaikutukset

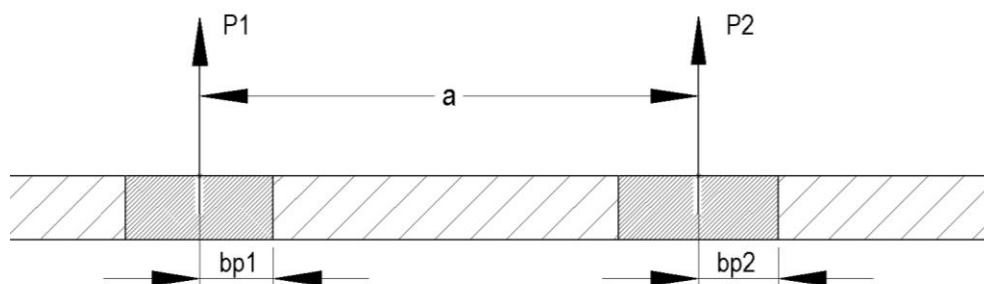
Kuormitettaessa kahta lähekkäin olevaa inserttiä samaan suuntaan niiden kyky kantaa kuormaa heikkenee. Rajana lyhimmälle etäisyydelle, jossa insertit eivät enää ole toistensa vaikutusalueella, pidetään:

$$a > 5(b_{p1} + b_{p2}) \quad (13)$$

$a$  = Inserttien keskipisteiden etäisyys

$b_{p1}$  = Insertti 1. valun säde

$b_{p2}$  = Insertti 2. valun säde



Kuva 32. Lähekkäin olevien inserttien mitat



Mikäli insertit ovat keskenään tätä lähempänä, alenee niiden kuormankantokyky kertoimen  $\eta_{IS1}$  mukaan:

$$\eta_{IS1} = \frac{b_{p1}/b_{p2}}{1 + b_{p1}/b_{p2}} \left( 1 + \frac{a}{5b_{p1}} \frac{1}{1 + b_{p1}/b_{p2}} \right) \quad (14)$$

Kahden vierekkäisen insertin alentunut kyky kantaa kuormaa ( $P_{SSa}$ ) on siten:

$$P_{SSa} = \eta_{IS1} P_{SS1} \quad (15)$$

$$P_{SS1} = \text{Normaali kuormankantokyky}$$

Kuormitettaessa lähekkäin olevia inserttejä vastakkaisiin suuntiin käytetään kerrointa 0,9.

Sarjaan asennettuihin insertteihin vaikuttavat ensisijaisesti niiden viereiset insertit. Sarjan päissä olevat lasketaan samalla tavoin kuin kahden vierekkäisen insertin lujuudet. Keskellä olevien inserttien alentunut lujuus lasketaan lähimpien inserttien alennuskertoimien avulla. Molemmilla puolilla oleville inserteille lasketaan omat kertoimet kaavojen 14 ja 15 avulla. Samaan suuntaan kuormitettaessa, sarjaan asennettujen inserttien alentunut kuormankantokyky saadaan selvitettyä kaavalla (ECSS Secretariat 2011, 218-219, 221 – 224):

$$P_{SSa} = P_{SS1} (\eta_{ISv} + \eta_{ISO} - 1) \quad (16)$$

$$P_{SS1} = \text{Normaali kuormankantokyky}$$

$$\eta_{ISv} = \text{Vasemman puoleisen insertin alennuskerroin}$$

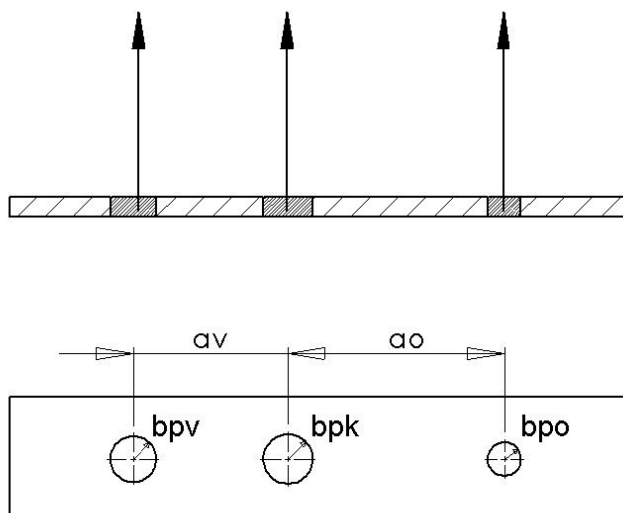
$$\eta_{ISO} = \text{Oikean puoleisen insertin alennuskerroin}$$

Vastakkaisilla kuormitussuunnilla käytetään kaavaa:

$$P_{SSa} = P_{SS1} (\eta_{ISv} + \eta_{ISO} - 1) \eta_{IC} \quad (17)$$

$$\eta_{IC} = 0,9 \text{ kun } a \leq 5(b_{p1} + b_{p2})$$

$$\eta_{IC} = 1,0 \text{ kun } a > 5(b_{p1} + b_{p2})$$



Kuva 33. Samaan suuntaan kuormitetut, sarjaan asennetut insertit

bpv = Vasemman puoleisen insertin valun säde

bpk = Keskimmäisen insertin valun säde

bpo = Oikean puoleisen insertin valun säde

av = Vasemman puoleisen insertin etäisyys keskimmäisestä

ao = Oikean puoleisen insertin etäisyys keskimmäisestä

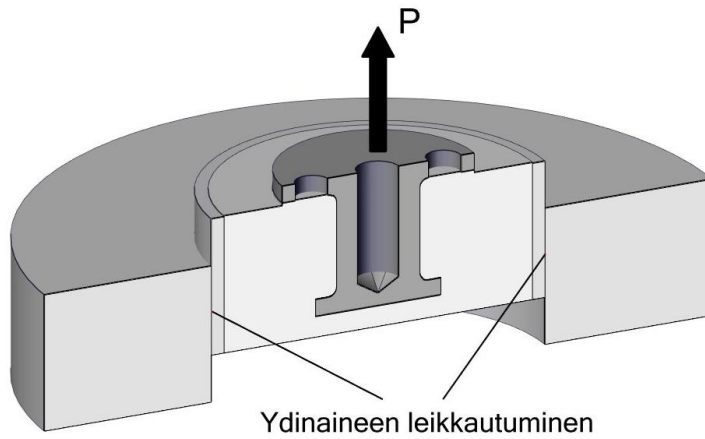
### 3.10 Inserttien murtumatyypit

#### Kohtisuora vetokuorma

Kuormitettaessa tasoon nähden kohtisuoralla vedolla on täysin valetun insertin mahdolliset murtumatyypit seuraavat:

- ydinaineen leikkausmurtuma
- vetomurtuma liimavalussa
- liimavalun ja alapuolisen pintalaminaatin välinen adheesiomurtuma.

Tyypillisin hajoamistapa on ydinaineen leikkausmurtuma, jota käytetään mitoituksessa rajoittavana tekijänä. Murtuma syntyy ydinaineeseen lähelle liimavalun ja ydinaineen rajapintaa. Liimavaluun kohdistuvat rasitukset ovat yleensä pieniä ja käytettävien materiaalien lujuusominaisuudet yleensä riittävät. Liimavalun vetomurtuman sekä liimavalun ja pintalaminaatin välisen adheesiomurtuman syynä on yleensä virhe valuprosessissa.

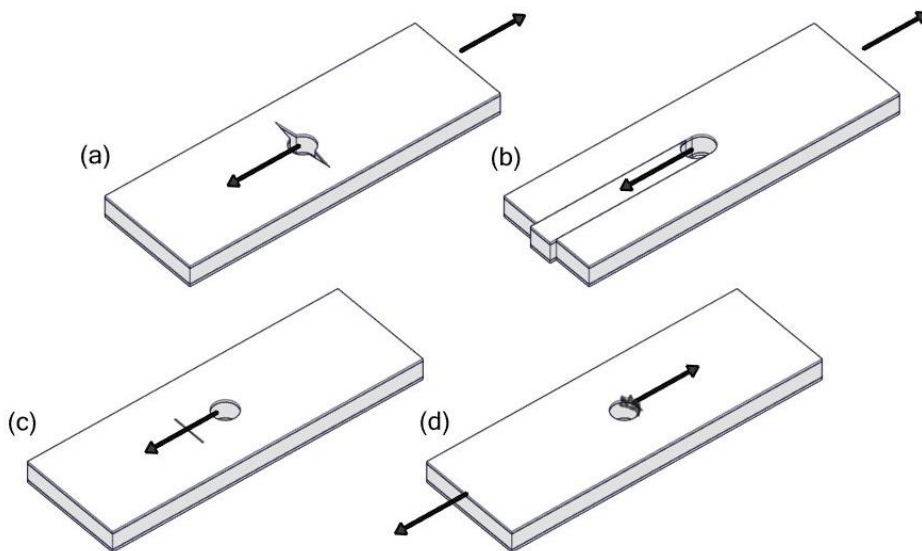


Kuva 34. Tyypillinen insertin hajoamistapa vetokuormalla

### Tason suuntainen kuorma

Tason suuntaisella kuormalla on täysin valetun insertin mahdolliset hajoamistavat seuraavat:

- vetomurtuma
- leikkausmurtuma
- puristusupotus
- ruhjoutuminen



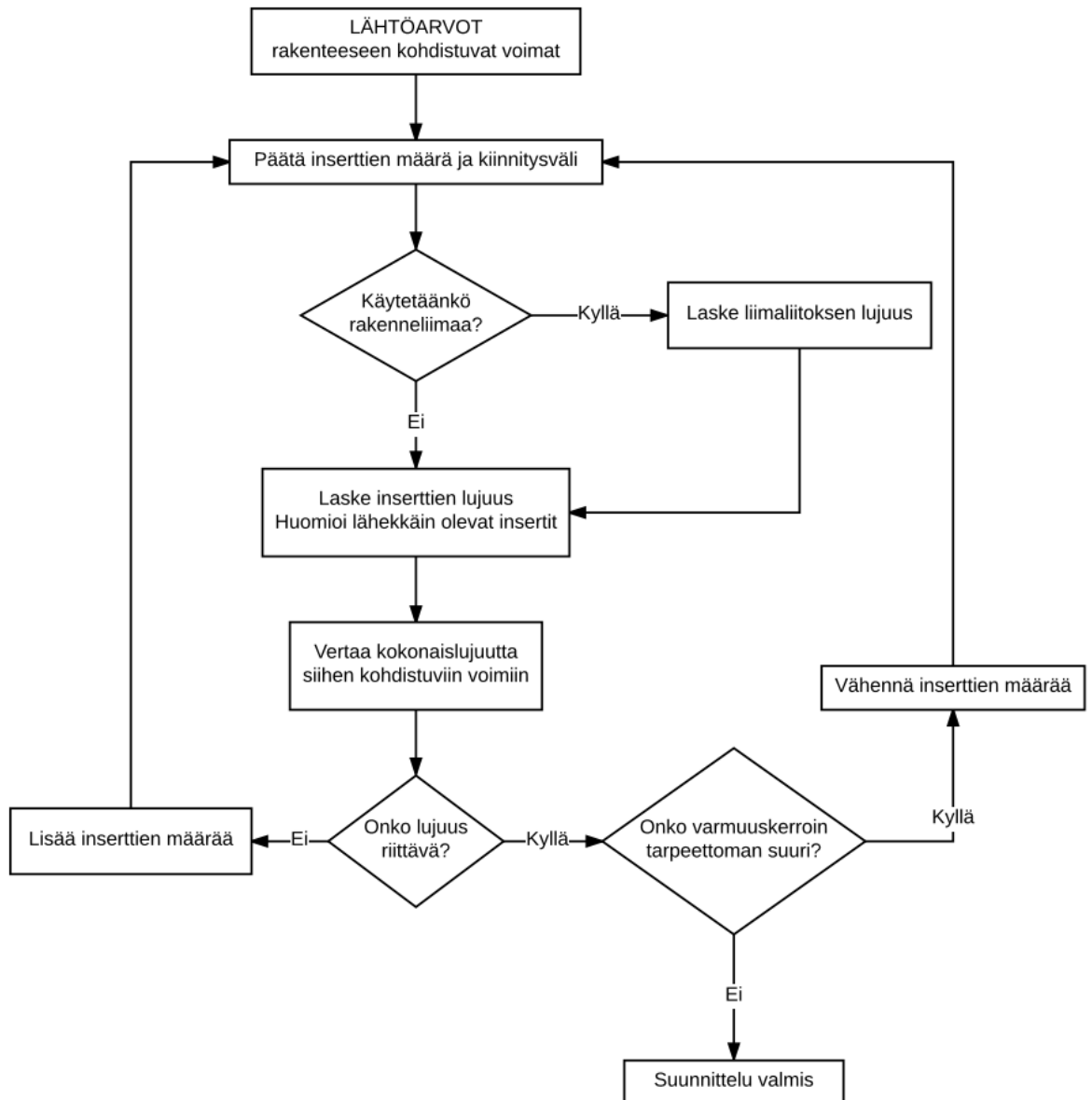
Kuva 35. Tason suuntaisilla kuormilla syntyvät vauriotyypit. a) Vetomurtuma b) Leikkausmurtuma c) Puristusupotus d) Ruhjoutuminen

Vetomurtuma alkaa reiän vierestä ja ulottuu suhteellisen pitkälle. Leikkausmurtuma ilmenee vain kappaleissa, joissa kuormituskohta on lähellä vapaata levyn reunaa. Puristusupotus ilmenee kun puristuskuorma aiheuttaa paikalli-

sen nurjahduksen. Tämä ei yleensä johda rakenteen täydelliseen hajoamiseen. Myös ruhjoutuminen on paikallista, eikä yleensä aiheuta rakenteen hajoamista. (ECSS Secretariat 2011, 162-164, 166.)

#### 4 MITOITUSMENETELMÄ KANSIKISKOJEN KIINNITTÄMISEKSI

Mitoitusmenetelmä perustuu olettamukseen, että käytettävät insertit asennetaan täysin valamalla eikä niiden mittoja voida muuttaa. Inserttien koon muuttamisen sijaan lujuutta voidaan lisätä tai vähentää inserttien määrällä ja asennusvälillä. Jos lähtöarvoilla ei saavuteta riittävän lujaa kiinnitystä, lisätään kiinnikkeiden määrää. Jos lähtöarvoilla saadaan tarpeettoman suuri varmuuskerroin, voidaan kiinnitystä optimoida vähentämällä inserttien määrää. Tämä on helppo toteuttaa erityisesti kansikiskojen kiinnityksessä, jossa kiinnityspisteitä on hyvin tiheästi ja siten joustavasti valittavissa. Jos katsotaan tarpeelliseksi, inserttejä voidaan tarvittaessa koneistaa erikokoisina.



Kuva 36. Inserttikiinnityksen suunnittelun prosessikaavio

## 5 INSERTTIEN TESTIMENETELMÄT

ECSS on Euroopan avaruustutkimus ja teknologiakeskuksen (ESTEC) rahoittamana kehittänyt inserttien hyväksyntätestiohjelman (IATP). Testeillä on luotu taulukkoarvoja inserttien vetolujuuksista ja suosituksia oikean inserttikoon valinnassa eri materialeilla ja vahvuuksilla. Tämä testistandardi ei sellaisenaan sovellu veneen kansirakenteeseen asennettujen inserttien lujuuksien arvioimiseen. Tätä varten on haluttu kehittää veneen kansirakenteelle kohdennettu testimenetelmä. Martin Nuutisen kehittämässä menetelmässä käytetään ECSS:n luoman testistandardin periaatteita, mutta se ottaa myös huomioon veneen kansirakenteen ja kiinnikkeisiin kohdistuvien kuormien tyypillisimmät suunnat.

## 6 INSERTTIEN TESTAUS

### 6.1 Aikaisemmat testit ja menetelmän kehitys

Inserteille tehtävät vetotestit antavat hyvän lähtökohdan rakenteen lujuuden arvioinnille, mutta kiinnikkeisiin veneen käyttötilanteessa kohdistuvat todelliset kuormat ja voimien suunnat saattavat kuitenkin poiketa yksittäisille inserteille tehdyistä vetokokeista. Tämän vuoksi tarkempi arvio inserttien kuormankes-  
tosta on suositeltavaa selvittää todellisia käyttötilanteita vastaavilla lisätes-  
teillä.

Inserttejä veneen kansirakenteessa on testattu aikaisemmin Nuutisen kehittä-  
mällä menetelmällä. Testeissä kartoitettiin inserttien käyttömahdollisuuksia ja  
lupaavat tulokset antoivat syyn lisätutkimukselle, sekä testimenetelmän edel-  
leen kehittämiseksi. Aikaisemmin suoritetuissa testeissä rajoittavaksi tekijäksi  
taivutuskokeessa osoittautui pulttien lujuus, eikä siten inserttien taivutuslu-  
juutta saatu mitattua. Myös käytetyn koelaitteen suurin mahdollinen kuorma oli  
5kN, mikä rajoitti vetokokeita. Taivutuskokeessa todettu epäkohta on korjattu  
tämän työn testeihin pienellä muutoksella testijärjestelyssä siten, että taivut-  
tava voima kohdistuu ensisijaisesti inserttiin, ei pulttiin.

### 6.2 Käytetyt menetelmät

Testimenetelmäksi valittiin veto-, taivutus- ja vääntökoe. Koska kansikiskojen  
kiinnityspisteisiin ei kohdistu suuria leikkausvoimia, ei puhdasta leikkausta tes-  
tattu. Myöskään puristuskuormia ei testattu, koska kansikiskot jakavat kuormat  
laajalle alalle ja insertit olivat tyypiltään täysin valettuja.

#### 6.2.1 Vetokoe

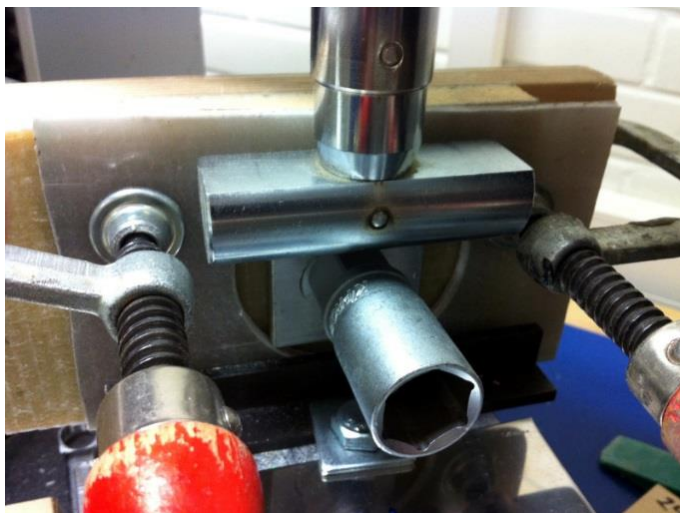
Vetokokeella pyrittiin määrittämään inserttien suurin sallittu kuorma kohtisuo-  
ralla vedolla. Kokeessa testikappale asetettiin testitelineeseen, jossa kerros-  
laminaattilevy oli tuettu päistään. Insertti oli asennettu keskelle koekappaletta  
ja kiinnitetty vetolaitteeseen pultilla. Veto kohdistettiin koekappaleeseen veto-  
koneen yläleukaan kiinnitetyn ketjun välityksellä, mikä tasasi niiden välistä,  
mahdollisesti epätarkasta asemoinnista syntyvää jännitystä.



Kuva 37. Vetokokeessa käytetty menetelmä

### 6.2.2 Taivutuskoe

Taivutuskokeessa simuloitiin kansikiskoon kohdistuvaa taivuttavaa voimaa, joka voi syntyä esimerkiksi kuormaliinojen välityksellä. Inserttiin kiinnitettiin kansikiskon mittoja vastaava aluslevy, jotta voimat jakautuisivat kuten kisko-kiinnityksessä. Koekappale tuettiin testilaitteeseen siten, että se ei päässyt taipumaan rasituskokeen aikana. Taivuttava voima kohdistettiin inserttiin pultilla kiinnitettyyn metalliholkkiin 20 mm etäisyydellä testilaminaatin pinnasta. Tämä on kuormaliinan kiinnityspisteen etäisyys insertistä sen ollessa kiinnitettynä kuormakiskon kiinnikkeeseen. Metalliholkin tehtävä oli jakaa asennuspulttiin kohdistuva voima aluslevyyn. Tähän koejärjestelyyn päädyttiin, koska aikaisemmissa testeissä suoraan pulttiin kohdistuvat voimat taivuttivat vain pulttia, eikä insertin taivutuslujuutta tällöin saatu selvitettyä.



Kuva 38. Taivutuskokeessa käytetty menetelmä

### 6.2.3 Vääntökoe

Kiertäviä voimia aiheutuu vain kierrettäessä pulttia kiinni inserttiin. Kiertokokeella selvitettiin kuinka suuren kiertävän momentin inserttiin voi kohdistaa. Koe suoritettiin kiinnittämällä koekappale ruuvipenkkiin ja inserttiin kiinnitettyä pulttia väännettiin momenttiavaimella, kunnes jokin osa rakenteessa petti.



Kuva 39. Vääntökokeessa käytetty menetelmä

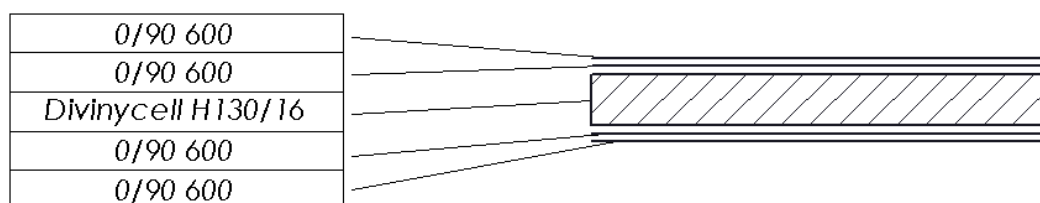
## 6.3 Testikappaleiden suunnittelu ja valmistus

### 6.3.1 Testilaminaatin suunnittelu ja valmistus

Vetokokeita varten mitoitettiin uusi kansilaminaatti ammattiveneesäännösten mukaisesti (liite 4). Mitoituksessa otettiin huomioon markkinoilla olevien inserttien vaatima upotussyvyyden vähimmäisvaatimus, sekä niiden kohdistamat leikkausvoimat ydinaineeseen. Referenssinä mitoituksessa käytettiin 12 metriä pitkää RIB-venettä (liite 3).



Testipaneeli on kerroslevy, jonka pintalaminaattina on 2 x 600 g/m<sup>2</sup> kudottu lujite ydinaineen molemmin puolin. Ydinaineena on 16 mm paksu PVC-vahto, jonka tiheys on 130 kg/m<sup>3</sup>. Valmistustavaksi valittiin alipaineinfuusio paremman lujitepitoisuuden saavuttamiseksi ja koekappaleiden tasalaatuisuuden varmistamiseksi. Koekappaleita varten valmistettiin yhteensä neljä paneelia, jotka sahattiin sirkkelillä 300 x 100 mm mittaisiksi paloiksi.



Kuva 40. Testilaminaatin rakenne

### 6.3.2 Inserttien suunnittelu

Testejä varten suunniteltiin kaksi erilaista inserttiä, A ja B. Molemmat optimoitiin lujuus- ja asennusominaisuuksiltaan, sekä äärimitoiltaan kerrosrakenteeseen sopiviksi. Insertti A perustui standardoituun NAS 1832-tyyppiseen inserttiin, mitä oli muokattu yksinkertaisemmaksi koneistuskustannuksia silmällä pitäen. Insertissä on yläpuolinen laippa, joka asettuu pintalaminaatin tasoon. Siihen on tehty reiät liiman pursotusta varten ja alapuolisen laipan muotoiltu vastustaa kiertämisestä tulevia leikkausvoimia. Insertin kapeampi, sylinterimäinen uuma muodostaa mekaanisen liitoksen insertin ja liimavalun välille (liite 5).

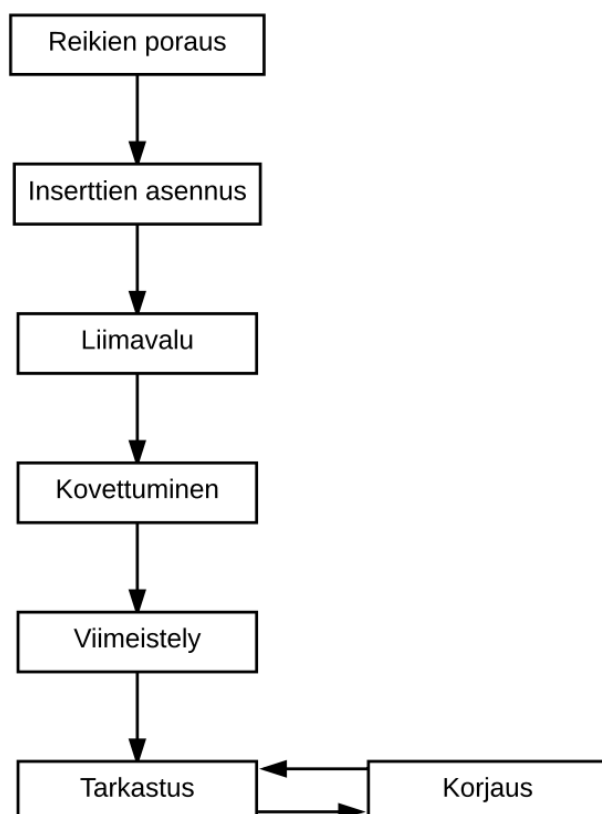
Insertti B on tarkoitettu asennettavaksi paikalleen kerroslevyn valmistuksen yhteydessä. Insertissä on rei'itys ulkokehällä hartsin kuljetusta varten infuusion aikana. Reiät luovat samalla mekaanisen kiinnityksen kiertäviä voimia vastaan. Tämän tyyppinen insertti ei vastaa tämän työn ydinkysymykseen jälkiasennettavista kiinnikkeistä, mutta tämä haluttiin ottaa mukaan referenssinä ja mahdollisena vaihtoehtona niille kiinnityspisteille, joiden paikoista voidaan olla varmoja jo kansilaminaattia valmistettaessa (liite 6). Molemmat insertit koneistettiin alumiinista.

### 6.3.3 Inserttien asennus

#### Testisarjat 1

Koekappaleeseen merkittiin sen keskikohta, minkä jälkeen pintalaminaattiin tehtiin insertin laipan kokoinen reikä reikäsahalla. Reiän teossa reikäsahan terää tuettiin ulkopuolisella jigillä, koska kohdistava terä reikäsahan keskellä olisi tällöin rikkonut alapuolisen laminaatin. Ydinaine poistettiin pintalaminaattien välistä koko paksuudeltaan siten, että alapuolinen laminaatti jäi ehjäksi. Ydinaineen poistoon käytettiin tätä varten muokattua, paineilmatoimista yläjyr-sintä. Poistetun ydinaineen ympyräalan säde inserttiasennuksissa oli 7 mm suurempi kuin pintalaminaattiin tehdyn reiän säde.

Inserttityyppi A valettiin kiinni epoksiliimalla. Liimaa pursotettiin ensin koekappaleeseen tehtyyn asennusaukkoon, jonka jälkeen insertti asennettiin paikalleen. Lopuksi valu viimeisteltiin pursottamalla liimaa laipassa olevan reiän kautta, kunnes insertin ympärillä oleva tila oli täytetty. Tästä voitiin varmistua kun laipan toisesta reiästä alkoi pursuta liimaa. Käytetyn liiman alhaisen viskositeetin vuoksi sillä kesti hetken tasoittua, jonka jälkeen liimaa vielä lisättiin, jotta valu olisi täydellinen.



Kuva 41. Inserttien asennusprosessikaavio

## **Testisarjat 2**

Inserttityyppi A valettiin kiinni vinyyliesterillä. Kiinnitysmenetelmä oli identtinen verrattuna koestettavaan sarjaan 1.

## **Testisarjat 3**

Inserttityyppi B laminoitiin kiinni rakenteeseen. Kerroslevyä valmistettaessa ydinaineesta poistettiin insertin kokoinen pala reikäsahalla, minkä jälkeen insertti painettiin paikalleen. Kierteet suojattiin pienellä vahapalalla ja teipillä. Tämän jälkeen kerroslevy valmistettiin normaalisti alipaine-infuusiolla. Kierre avattiin poraamalla senkkiterällä kovettunut pintalaminaatti puhki kierteen kohdalta.

## **Testisarjat 4**

Inserttityyppi B testattiin myös jälkiasennettuna. Tässä menetelmässä pintalaminaattiin tehtiin insertin kokoinen reikä ja ydinaine poistettiin kuten inserttityyppi A:n kanssa. Insertti liimattiin paikalleen epoksiliimalla siten, että koepalaan tehtyyn aukkoon pursotettiin reilusti liimaa, jonka jälkeen insertti painettiin paikalleen. Kun insertti oli painettu pohjaan saakka, pursusi ylimääräinen liima kehällä olevista rei'istä, mitä voitiin pitää merkinä riittävästä liimamäärästä.

## **Testisarjat 5**

Testilaminaatin valmistusvaiheessa sen sisään laminoitiin 50 x 6 mm alumiininen suorakaideprofiili, jonka kohdalle laitettiin korkean puristuslujuuden ydinaine. Näin kerroslevyn paksuus pysyisi muuttumattomana, eikä alumiiniprofiiliin kiristettävä kiinnike puristaisi ydinainetta kasaan. Reikä ja kierteet tehtiin koepalaan jälkikäteen.

## **Testisarjat 6**

Kerrosrakenteen sisään asennettavien inserttien lisäksi haluttiin testata pintaan liimattavan kiinnikkeen lujuus. Tätä varten valmistettiin kansikiskon mittojen mukainen kiinnike alumiinisesta suorakaideprofiilista ja siihen mutterilla kiristettävästä senkkipultista. Kiinnike liimattiin testilaminaattiin yksikomponenttisellä MS-polymeeriliimalla. Liima levitettiin kiinnikkeen alapintaan ja kiinnike painettiin kiinni testilaminaattiin käsivoimin. Liimaukseen ei kohdistettu muuta puristavaa voimaa.

## 6.4 Testien suoritus ja tulokset

Veto- ja taivutuskokeet suoritettiin Kymenlaakson ammattikorkeakoulun komposiittilaboratoriossa Kotkassa. Testilaitteena käytettiin Tira 2810 -vetokonetta. Vääntökoe suoritettiin Boomeranger Boats Oy:n tuotantotiloissa momenttiavaimella.

### 6.4.1 Vetokokeet

Vetokokeissa yllättäväksi murtumatyypiksi osoittautui kerroslevyn pintalaminaatin puristusmurtuma. Testimenetelmän tuennasta ja koekappaleiden mitoista johtuen koekappaleet pääsivät taipumaan verrattain helposti, mikä oli useassa tapauksessa syynä koelaminaatin murtumiseen ennen inserttiä. Ydinaineen leikkausmurtumaan tarvittava voima oli kuitenkin samaa suuruusluokkaa koelaminaatin murtolujuuden kanssa.

A-insertin vetokokeissa murtumatyyppeinä olivat joko kerroslevyn pintalaminaatin puristusmurtuma, tai ydinaineen leikkausmurtuma (Liite 9/1). Epoksilla ja vinyyliesterillä valettujen inserttien välillä ei ollut merkittävää eroa ja vaihtelu sarjojen sisäisissä murtolujuuksissa oli alle 15 %.

B-insertin murtolujuus rakenteen sisään laminoituna oli A:n keskiarvoa 12 % heikompi. Murtumatyyppinä kaikissa tapauksissa oli koekappaleen taipumisesta johtuva pintalaminaatin puristusmurtuma. A:ta heikompa laminaatin murtolujuutta voi selittää B:n suurempi koko, joka aiheuttaa rakenteellista epäjatkuvuutta ja rasituskeskittymiä koekappaleen taivutuksessa. Epoksilla liimattu B-insertti oli merkittävästi sisään laminoitua heikompi ja kaikissa koestetuissa kappaleissa murtumatyyppinä oli insertin ja ydinaineen välinen adhesiomurtuma (liite 9/1).

Koekappaleet, joiden sisään oli laminoitu alumiiniset suorakaideprofiilit, kestivät vetoa verrattain heikosti. Kerroslevyn taivutusjäykkyys oli rakenteesta johtuen huono, joten koelaminaatti pääsi vedettäessä taipumaan helposti. Murtumatyyppinä oli koelaminaatin delaminoituminen alumiiniprofiilin kohdalta (liite 9/2).

Kerroslevyn pintaan MS-polymeeriliimalla liimattujen kiinnikkeiden murtolujuus oli sekä A- että B-inserttien lujuutta parempi siitäkin huolimatta, että kokeessa huomattiin liiman kovettuneen vain osittain. Kovettuneen liimaliitoksen ala oli

68 % kiinnikkeen pinta-alasta. Murtumatyyppinä neljässä koekappaleessa oli liima-aineen koheesiomurtuma ja yhdessä tapauksessa kerroslevyn pintalaminaatin puristusmurtuma (Liite 9/2). Kokeellisesti mitattu liiman lujuus vastasi valmistajan ilmoittamaa murtolujuutta.

#### 6.4.2 Taivutuskokeet

Liimakiinnikettä lukuun ottamatta kaikki testatut insertit kestivät paremmin taivuttavia voimia kuin vetoa. A-insertin tyypillisin murtumatyyppi oli ydinaineen leikkautuminen. Kaikissa epoksilla liimattujen B-inserttien tapauksissa murtumatyyppi oli ydinaineen ja insertin välisen liimaliitoksen adheesiomurtuma. Sisään laminoituna B-insertti kesti suurimman rasituksen. Murtumatyyppinä oli joko kierteiden murtuminen tai ydinaineen leikkautuminen.

Koekappaleiden tuenta testilaitteistossa oli järjestetty siten, että koekappaleita, joiden rakenteen sisään oli laminoitu alumiiniprofiilit, taivutuslujuutta ei ollut mahdollista mitata. Liimakiinnikkeiden murtumatyyppi oli kaikissa tapauksissa liima-aineen koheesiomurtuma.

#### 6.4.3 Vääntökokeet

Vääntökokeet tehtiin A- ja B-inserteille. Kahdessa tapauksessa B-insertin kierre murtui, mutta kaikissa muissa vääntökokeissa katkesi pultti. Pultit kestivät keskimäärin 30–45 Nm:n väännön (liite 9/3).

#### 6.5 Virhearviointi

Käytetty testimenetelmä mahdollisti koekappaleiden kuormittamisen identtisellä tavalla ja testiolosuhteet olivat stabiilit. Mittaustulokset olivat yksiselitteisiä, murtumien ollessa selkeitä ja yhtäkkisiä. Liimaliitosten koestamisen yhteydessä todettiin, että liima ei koekappaleissa ollut täysin kovettunut. Kovettuneen liiman pinta-ala oli kuitenkin selvästi mitattavissa. Muita koekappaleiden valmistuksesta johtuvia virheitä ei havaittu.



lannetta veneen kannessa. Myös pitkäaikaisen rasituksen keston selvittäminen kokeellisesti on suositeltavaa, vaikka aikaisempi tutkimustieto ei anna syytä epäillä inserttikiinnitysten väsymistä.

Inserttikiinnityksille suunnitellun kansilaminaatin valmistaminen on merkittävästi nopeampaa, kun sisään laminoitavat, tarkkuustoleransseja vaativat vastaraudat jäävät pois. Ydinaineen poistaminen laminaattien välistä asennusprosessin aikana vaatii tarkkuutta ja on vaarana, että laminaatti vaurioituu työvaiheen aikana. Siksi inserttien käyttöönotto tuotannossa vaatii oikeiden työkalujen hankkimista ja opettelua niiden käyttöön. Menetelmällä saavutettu rakenteen painon alennus ei ole merkittävä. Referenssiveneessä, jonka kansipinta-ala on 11m<sup>2</sup>, saavutetaan vain n. 19 kg painon säästö verrattuna sisään laminoituihin vastarautoihin.

Veneeseen kohdistuvia vaakavoimia on vaikea arvioida ilman laajamittaisia kiihtyvyyssmittauksia eri käyttöolosuhteissa. Väärät kiihtyvyyssarvot mitoituksessa voivat johtaa inserttien ylimitoitamiseen, tai pahimmassa tapauksessa kiinnitysten murtumiseen. Jotta insertit voitaisiin tarkemmin mitoittaa halutun varmuuskertoimen mukaisesti, on kiihtyvyydataa kerättävä runsaasti myös vaativissa olosuhteissa.

## LÄHTEET

- American Bureau of Shipping. 2012. Crew Habitability on Workboats. ABS.
- Armstrong, K., Cole, W. & Bevan, G. 2005. Care and repair of advanced composites. SAE International.
- DIAB Group AB. 2012. DIAB guide to core and sandwich. DIAB Group AB.
- Ebnesajjad, S. & Landrock, A. 2009. Adhesives Technology Handbook. Norwich: William Andrew Inc.
- ECSS Secretariat. 2011. Space engineering, Insert design handbook. Noordwijk, NL: ESA-ESTEC.
- Gay, D. 2014. Composite Materials: Design and Applications, Third Edition. Boca Raton: CRC Press.
- Haapanen A. 2011. TULVA – Tulevaisuuden venealahankkeen loppuraportti. Kymenlaakson ammattikorkeakoulu.
- Haugum, H. & Pløen, M. 2014. Dimensjonering, analyse og testing av inserts i karbonfiber kompositt sandwich chassis. NTNU.
- Heimbs, S. & Pein, M. 2009. Failure behavior of honeycomb sandwich corner joints and inserts. Composite Structures.
- Hexcel Composites. 2000. Honeycomb sandwich design structures. Hexel Composites.
- ISO 12215-5. 2002. Small craft – Hull construction and scantlings – Part 2: Materials: Core materials for sandwich construction, embedded materials.
- ISO 12215-5. 2008. Small craft - Hull construction and scantlings - Part 5: Design pressures for monohulls, design stresses, scantlings determination.
- ISO 12215-6. Small craft - Hull construction and scantlings - Part 6: Structural arrangements and details.
- Lares, A. 2012. Insert and Manufacturing for Foam-Core Composite Sandwich Structures. Ottawa: Carleton University.
- Larson, L., Eliasson, R. & Orych, M. 2014. Principles of Yacht Design. Camden: International Marine / McGraw-Hill Education.
- Lake, S. & Joughin, D. 2008. Core Transitions. Professional Boat Builder Dec/Jan 2008, 97.
- Marshall, R. 2010. Fiberglass boat repairs illustrated. Camden: International Marine / McGraw-Hill Education.
- Petras, A. 1998. Design of Sandwich Structures. Cambridge: Robinson College.



Pike, D 2011. RIB: The origins and evolution of the rigid inflatable boat. Professional BoatBuilder #131, 60.

Ribeiro-Ayeh, S. 2002. On The Strength of Bi-Material Interfaces. Stockholm: Kungliga Tekniska Högskolan

SANDCORE. 2006. Best Practice for Sandwich Structures in Marine Applications. SANDCORE. Saatavissa: [http://www.transport-research.info/sites/default/files/project/documents/20130201\\_105501\\_16344\\_RevisedBPGv1-00---Report-Format.pdf](http://www.transport-research.info/sites/default/files/project/documents/20130201_105501_16344_RevisedBPGv1-00---Report-Format.pdf) [viitattu 7.4.2016].

Shur-Lok. 1996. Design Manual: Fasteners for Sandwich Structure. Shur-Lok Corporation.

VTT Expert Services OY. 2016. Ammattiveneäännöstö.

**Paneelien tekninen määrittely**

Umpilaminaatin paksuus	2,4 mm
Umpilaminaatin paino	4,14 kg/m <sup>2</sup>
Kerroslevyn pintalaminaattien yhteispaksuus	2,4 mm
Kerroslevyn ydinaineen paksuus	20 mm
Kerroslevyn kokonaispaksuus	22,4 mm
Kerroslevyn pintalaminaattien yhteispaino	4,14 kg/m <sup>2</sup>
Kerroslevyn ydinaineen paino (tiheys 80kg/m <sup>3</sup> )	1,6 kg/m <sup>2</sup>
Kerroslevyn kokonaispaino	5,74 kg/m <sup>2</sup>
Laminaatin kimmomoduuli $E_f$	17040 MPa
Ydinaineen kimmomoduuli $E_c$	65 MPa
Palkin leveys $b$	100 mm

Kerroslevypalkki		
$E_f$ = pintalaminaatin kimmomoduuli	17040	Mpa
$E_c$ = ydinaineen kimmomoduuli	65	Mpa
$t_f$ = pintalaminaatin paksuus	2,4	mm
$t_c$ = ydinaineen paksuus	20	mm
$h$ = $t_f + t_c$	22,4	mm
$b$ = palkin leveys	100	mm
= palkin paino	5,74	kg/m <sup>2</sup>
$D$ = taivutusjäykkyys	1032376981	Nmm <sup>2</sup>
	1032	Nm <sup>2</sup>

Umpilaminaattipalkki		
$E_f$ = pintalaminaatin kimmomoduuli	17040	Mpa
$E_c$ = ydinaineen kimmomoduuli	0	Mpa
$t_f$ = pintalaminaatin paksuus	4,8	mm
$t_c$ = ydinaineen paksuus	0	mm
$b$ = palkin leveys	100	mm
= palkin paino	4,14	kg/m <sup>2</sup>
$D$ = taivutusjäykkyys	98313984	Nmm <sup>2</sup>
Taivutusjäykkyyksien suhde	11	Nm <sup>2</sup>
Painon nousu kerrospaneelissa	33 %	

Liite 2

COG (T)	A(x) RMS	A(y) RMS	A(z) RMS	A(xyz) RMS	
average		89,6	106,7	133,8	205,4
average g		0,1	0,1	0,1	0,2
max		1752	2526	1958	3634
max g		1,8	2,5	2,0	3,6
horizontal/vertical (average)		0,67			
horizontal/vertical (max)		0,89			
horizontal/vertical (peak)		0,91			

<b>Design pressure</b>			
<b>C-</b>	<b>1100 P166</b>		
	Loaded displacement (kg)	$m_{LDC}$	7275
	Waterline length (m)	$L_{WL}$	8,38
	Hull length (m)	$L_H$	11,00
	Beam between chines (m)	$B_C$	2,65
	Long side of panel from drawing (mm)	$l$	2200
	Short side of panell from drawing (mm)	$b$	450
	Panel aspect ratio	$l/b$	4,89
<b>7.4</b>	Long. pressure distr. Factor	$k_L$	1,000
<b>7.4</b>	Design area (m <sup>2</sup> )	$A_d$	0,506
<b>7.5</b>	Area reduction factor, displacement	$k_{ARD}$	0,635
<b>7.5</b>	Area reduction factor, planing	$k_{ARP}$	0,466
	Design category factor	$K_{DC}$	0,8
	Cargo t/m <sup>2</sup>	$Q$	0,2
		$P_{DMCARGO}$	6,0
		$P_{DMBASE}$	17,5
<b>8.1.6</b>	Motor craft deck pressure, design	$P_{DM}$	8,9

Sandwich laminate stack analysis ISO 12215-5 Annex H				
Design pressure	Panel short dimension	Design shear force	Design bending Mt	
$P$	$b$	$F_d/mm$	$M_d$	
kN/m <sup>2</sup>	mm	N/mm	Nmm/mm	
9,0	450	2,0	152	
1	2	3	4	5
<i>Ply</i>	<i>Definition</i>	<i>Fibre</i>		
No.		Dry mass	type	Content
		kg/m <sup>2</sup>		$\psi$
		input	G,C,A	C.1
1 outer	Rov 600	0,600	G	0,58
2	Rov 600	0,600	G	0,58
3	-	0,000	G	0,58
4	Divinycell H130	0,000		0,50
5	-	0,000	G	0,58
6	Rov 600	0,600	G	0,58
7	Rov 600	0,600	G	0,58
Total	Fiber	2,40		0,580
	Resin (kg)	1,74		Average
	Core	2,08		
	Total weight	6,22		
<b>FMAW requirements</b>				
Minimum skin laminate thickness on sandwich panel (table 10.1)				
<b>6.1</b>	$t/(t_{inner}+t_{outer})$	7,71		
	$EI_{inner}/EI_{outer}$	1		
	$W_{min}$	0,93	kg/m <sup>2</sup>	

Liite 4/2

1	6	7	8	9	10
<i>Ply</i>	<i>Modulus</i>	$\sigma_{ut}, \sigma_{uc}$	<i>Interlaminar</i>	$\sigma_{tcd} / \sigma_{tcu}$	$\sigma_{tcd}$
No.	$E_i$		$\tau_{u \text{ interlaminar}}$	$\tau_d / \tau_u$	
	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>		N/mm <sup>2</sup>
	Table C.5			Table 7	(7)*(9)
1 outer	17040	260	12	0,5	129,9
2	17040	260	12	0,5	129,9
3	17040	260	12	0,5	129,9
4	131,6	1,95	14	0,5	0,97
5	17040	159	12	0,5	79,5
6	17040	159	12	0,5	79,5
7	17040	159	12	0,5	79,5
Total	17040				
	Average				

1	11	12	13	14	15
<i>Ply</i>	<i>Interlaminar</i>	<i>Thickness</i>	$E_i * t_i$	<i>Dist. <math>z_{g_i}</math></i>	$E_i * t_i * z_{g_i}$
No.	$\tau_d$	$t_i$		from outside	
	N/mm <sup>2</sup>	mm	N/mm	mm	N
	(8)*(9)	Eq. C.1 to C.3	(6)*(12)	Calc	(13)*(14)
1 outer	6,2	0,60	10163	0,30	3031
2	6,2	0,60	10163	0,89	9093
3	6,2	0,00	0	1,19	0
4	0,79	16,00	2106	9,19	19356
5	6,2	0,00	0	17,19	0
6	6,2	0,60	10163	17,49	177769
7	6,2	0,60	10163	18,09	183831
Total		18,39	42759	9,19	393080
				$Z_{NA}$	

Liite 4/3

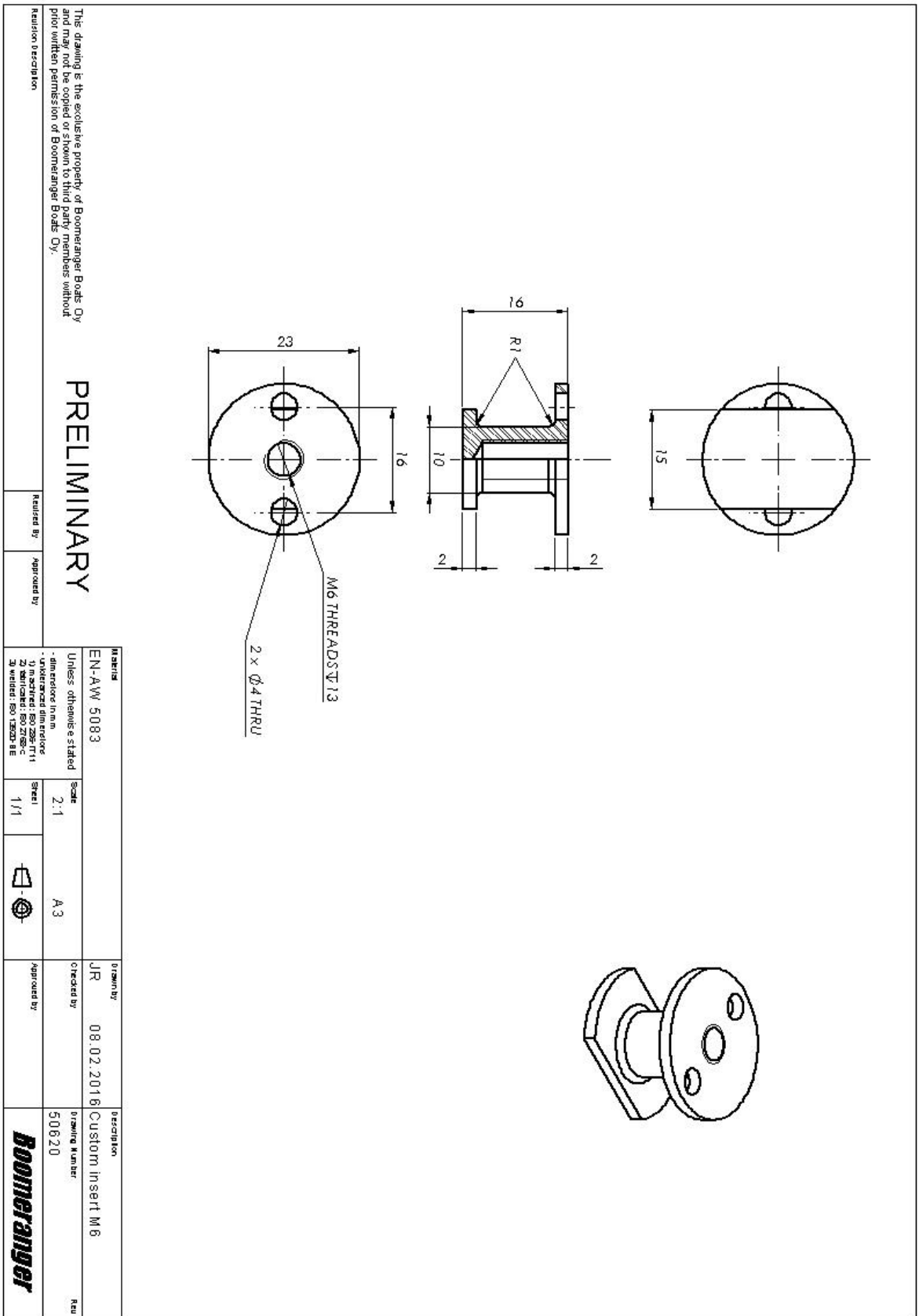
1	16	17	18	19	20
<i>Ply</i>	$E_i * t_i * z_{g_i}^2$	$E_i * t_i^3 / 12$	$(EI)_i$	$z_{crit} \text{ from}$	$SM_i$
No.			from outside	$z_{NA}$	
	Nmm	Nmm	Nmm <sup>2</sup>	mm	mm <sup>3</sup> /mm
	(14)*(15)	(13)*(12) <sup>3</sup> /12	(17)+(16)	Calc	Calc
1 outer	904	301	1205	-9,19	19,50
2	8135	301	8436	-8,60	20,85
3	0	0	0	-8,00	22,40
4	177939	44918	222857	8,00	-2900,90
5	0	0	0	8,00	-22,40
6	3109381	301	3109683	8,60	-20,85
7	3325056	301	3325357	9,19	-19,50
Total	6621414	8825396,55	6667538	3053995	-5,86854E-05
			$EI_{base}$	$EI_{NA}$	

1	21	22	23	24	25
<i>Ply</i>	$\sigma_i$	<i>Compliance</i>		<i>Location</i>	<i>z calc</i>
No.		factor		of	from
	N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_d / \sigma_i$		$\tau$	NA
	Calc	(10)/(21)			mm
1 outer	7,8	16,67	Tens	between 1 - 2	8,60
2	7,3	17,83	Tens	between 2 - 3	8,00
3	6,8	19,16	Tens	between 3 - 4	8,00
4	-0,1	18,60	Comp	between 4 - 5	-8,00
5	-6,8	11,73	Comp	between 5 - 6	-8,00
6	-7,3	10,91	Comp	between 6 - 7	-8,60
7	-7,8	10,21	Comp	outside 7 -	-9,19
Total	-2587846,482				

Liite 4/4

1	26	27	28	29		
<i>Ply</i>	<i>First mt Q</i>	<i>Shear flow</i>	$\tau_i$ <i>average</i>	<i>Compliance</i>		
No.		q		factor		
	Nmm	N/mm	N/mm <sup>2</sup>	$\tau_d/\tau_i$		
	calc	$F*(26)/EI_{NA}$	(27)/1	(11)/(27)		
1 outer	-90400	-0,1	-0,1	-103,0	$\sigma_t$ maximum outer ply	
2	-174738	-0,1	-0,1	-53,3		
3	-174738	-0,1	-0,1	-53,3		
4	-174738	-0,1	-0,1	-6,8	$\tau$ is maximum at NA	
5	-174738	-0,1	-0,1	-53,3		
6	-90400	-0,1	-0,1	-103,0		
7	0	0,0	0,0		$\tau = 0$ top and bottom	
Total						





The drawing is the exclusive property of Boomeranger Boats Oy and may not be copied or shown to third party members without prior written permission of Boomeranger Boats Oy.

**PRELIMINARY**

Material	EN-AW 5083	Scale	2:1	Sheet	1/1	Drawn by	JR	Checked by	08.02.2016	Description	Custom Insert M6	Rev	
Unless otherwise stated				A3		Approved by		Drawing Number	50620				
- dim evidence in mm													
- UNK dimension dim evidence													
1) in inch: ISO 225:11													
2) in inch: ISO 225:12													
3) in inch: ISO 225:13													
4) in inch: ISO 225:14													
5) in inch: ISO 225:15													
6) in inch: ISO 225:16													
7) in inch: ISO 225:17													
8) in inch: ISO 225:18													
9) in inch: ISO 225:19													
10) in inch: ISO 225:20													
11) in inch: ISO 225:21													
12) in inch: ISO 225:22													
13) in inch: ISO 225:23													
14) in inch: ISO 225:24													
15) in inch: ISO 225:25													
16) in inch: ISO 225:26													
17) in inch: ISO 225:27													
18) in inch: ISO 225:28													
19) in inch: ISO 225:29													
20) in inch: ISO 225:30													

**Boomeranger**

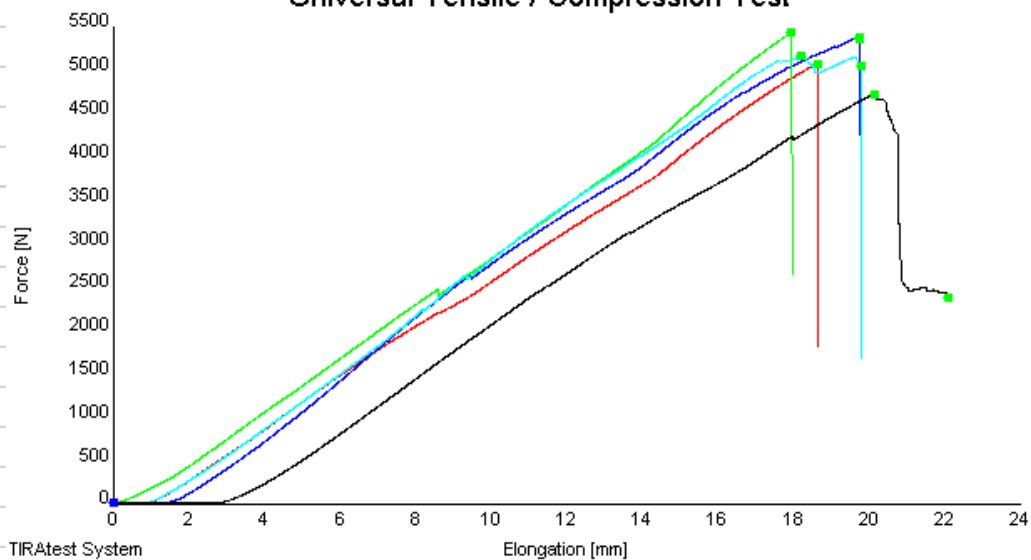


**Murtumatyyppien lyhenteet**

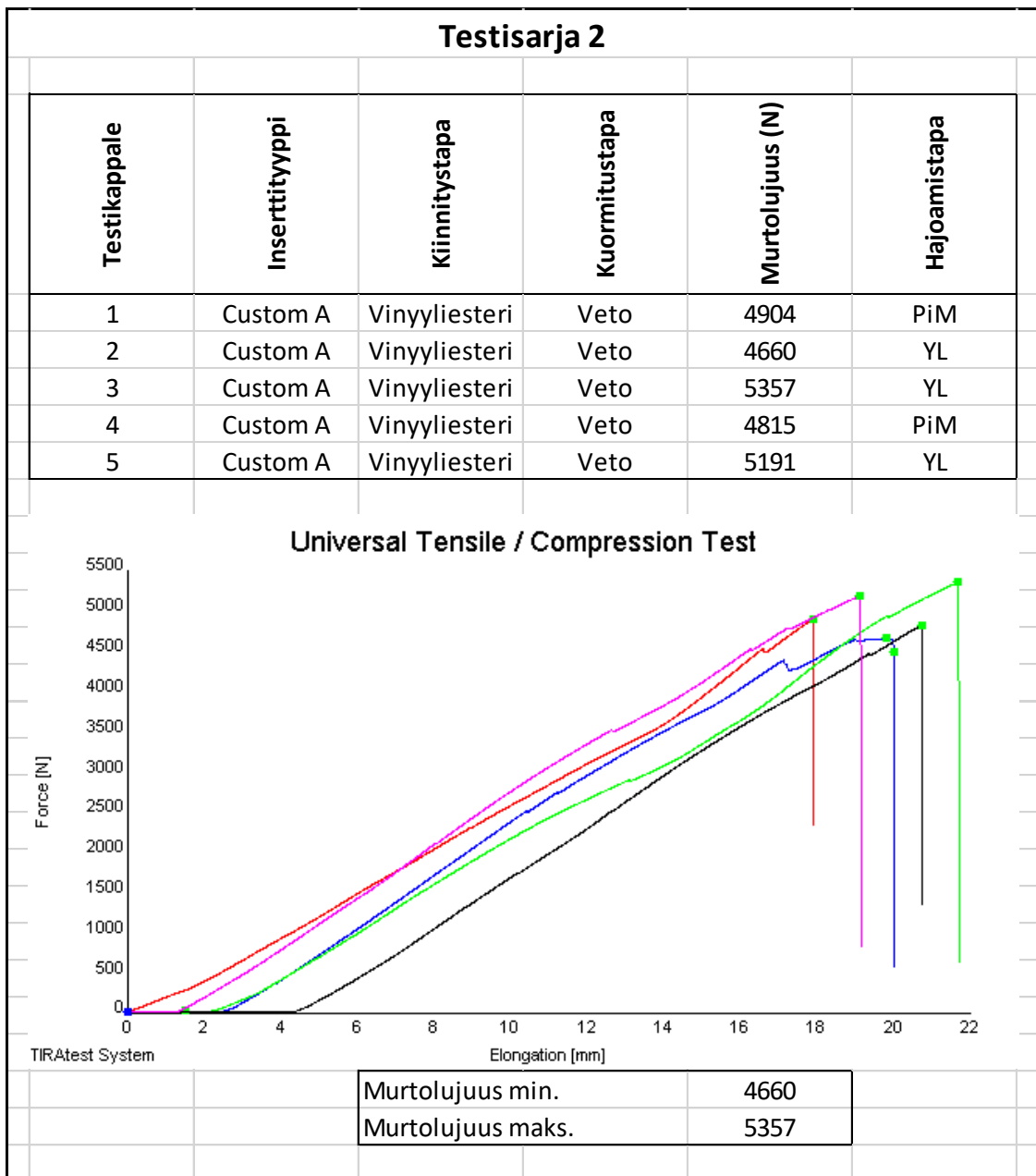
Taivutuksesta johtuva pintalaminaatin murtuminen	PiM
Ydinaineen leikkautuminen	YL
Insertin ja ydinaineen välinen adheesio	AD
Delaminoituminen	DL
Liiman koheesiomurtuma	LK
Pintalaminaatin leikkautuminen	PL
Kierteiden murtuminen	KM
Pultin murtuminen	PuM

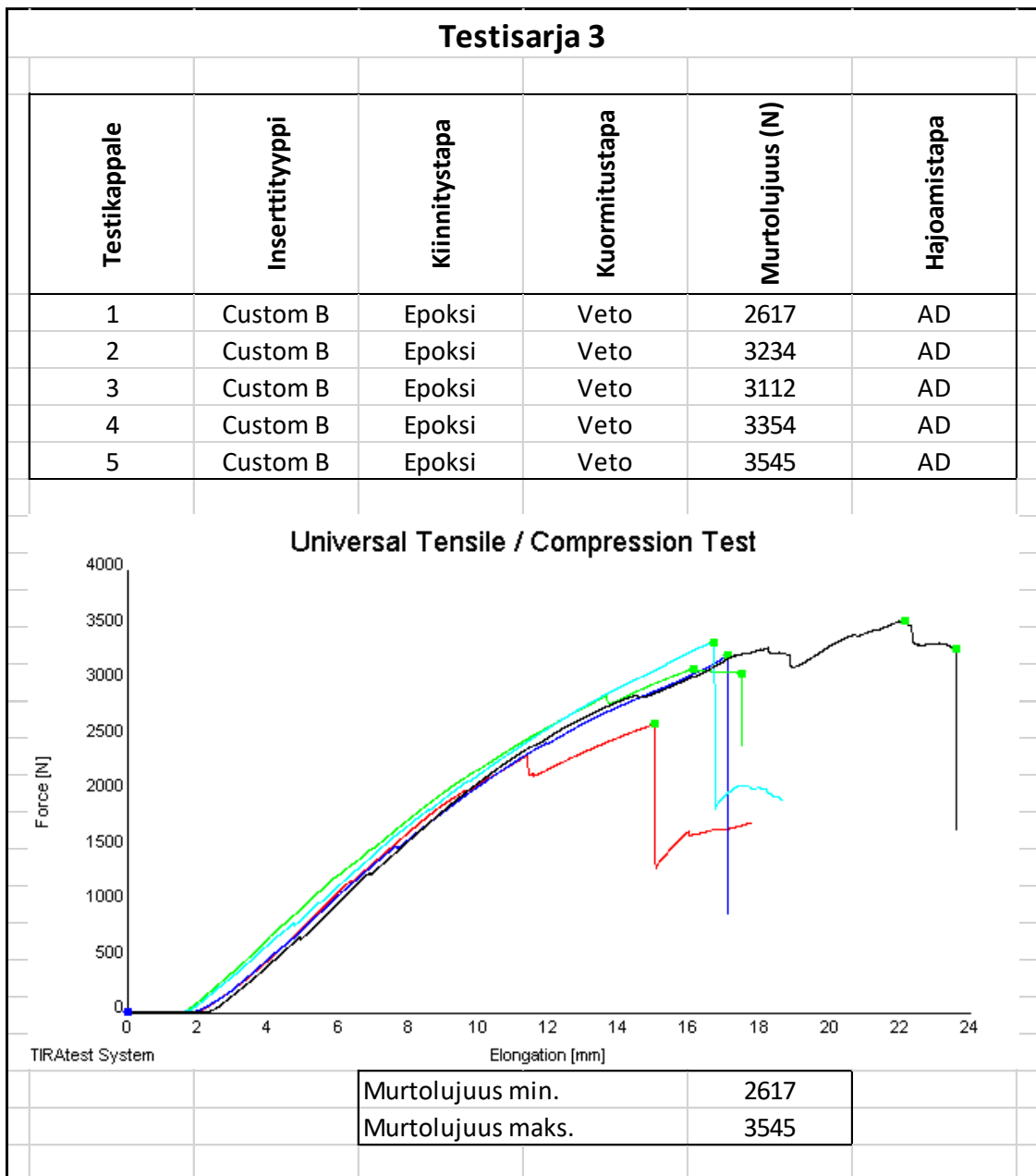
**Testisarja 1**

Testikappale	Inserttityyppi	Kiinnitystapa	Kuormitustapa	Murtolujuus (N)	Hajoamistapa
1	Custom A	Epoksi	Veto	5082	PiM
2	Custom A	Epoksi	Veto	5393	PiM
3	Custom A	Epoksi	Veto	5434	PiM
4	Custom A	Epoksi	Veto	5173	PiM
5	Custom A	Epoksi	Veto	4732	YL

**Universal Tensile / Compression Test**

Murtolujuus min.	4732
Murtolujuus maks.	5434

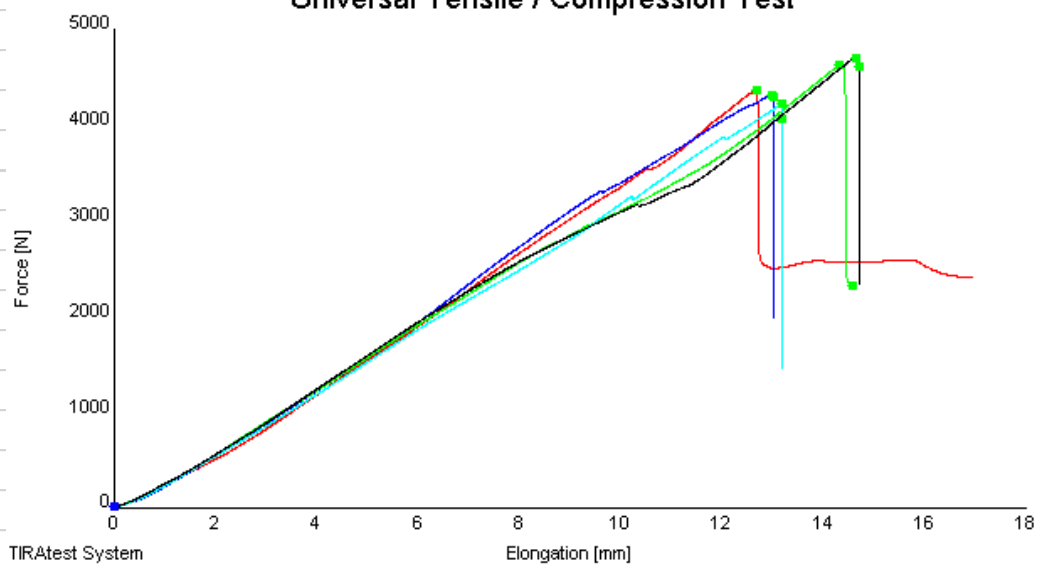




### Testisarja 4

Testikappale	Insertityyppi	Kiinnitystapa	Kuormitustapa	Murtolujuus (N)	Hajoamistapa
1	Custom B	Laminoitu	Veto	4363	PiM
2	Custom B	Laminoitu	Veto	4317	PiM
3	Custom B	Laminoitu	Veto	4626	PiM
4	Custom B	Laminoitu	Veto	4225	PiM
5	Custom B	Laminoitu	Veto	4707	PiM

### Universal Tensile / Compression Test



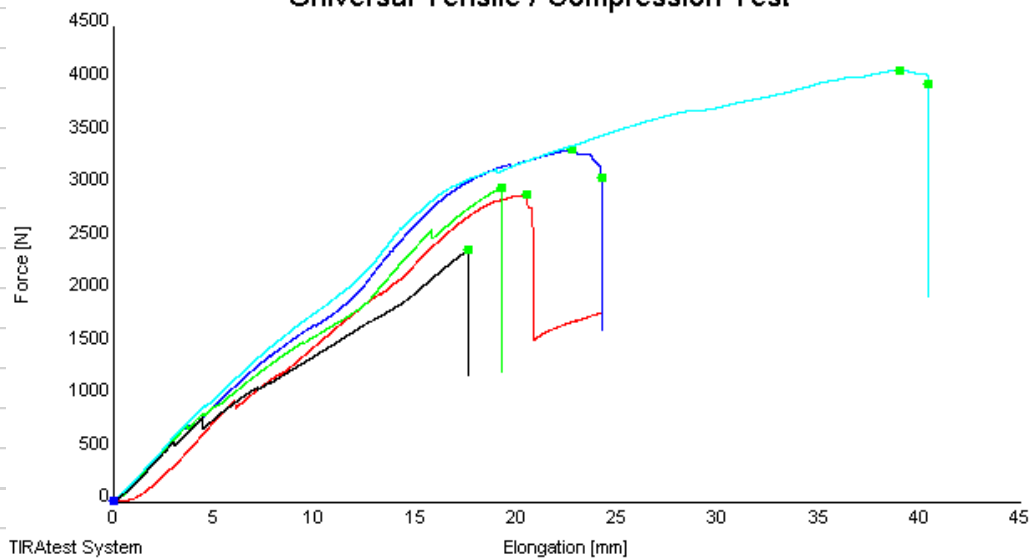
TIRAtest System

Murtolujuus min.	4225
Murtolujuus maks.	4707

### Testisarja 5

Testikappale	Insertityyppi	Kiinnitystapa	Kuormitustapa	Murtolujuus (N)	Hajoamistapa
1	Latta	Laminoitu	Veto	2910	DL
2	Latta	Laminoitu	Veto	3345	DL
3	Latta	Laminoitu	Veto	2978	DL
4	Latta	Laminoitu	Veto	4090	DL
5	Latta	Laminoitu	Veto	2390	DL

### Universal Tensile / Compression Test

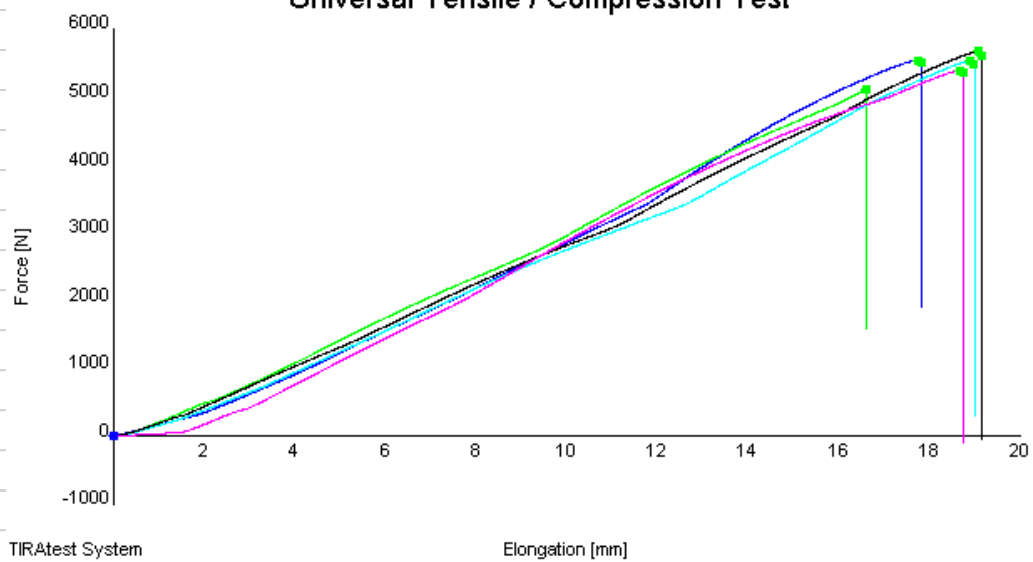


Murtolujuus min.	2390
Murtolujuus maks.	4090

### Testisarja 6

Testikappale	Insertityyppi	Kiinnitystapa	Kuormitustapa	Murtolujuus (N)	Hajoamistapa
1	Pinta	Liimaus	Veto	5543	LK
2	Pinta	Liimaus	Veto	5111	PiM
3	Pinta	Liimaus	Veto	5532	LK
4	Pinta	Liimaus	Veto	5669	LK
5	Pinta	Liimaus	Veto	5393	LK

### Universal Tensile / Compression Test



TIRAtest System

Elongation [mm]

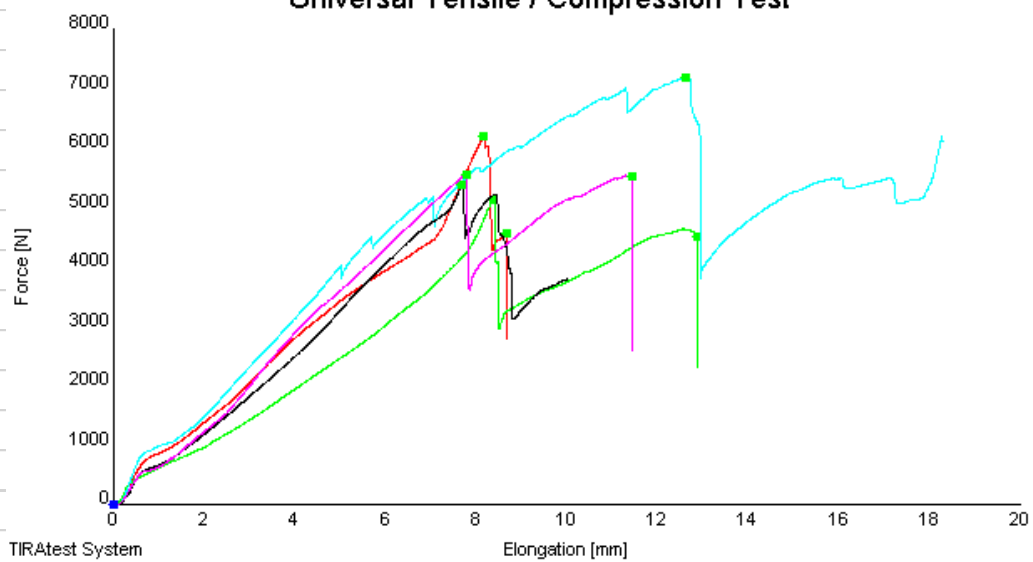
Murtolujuus min.	5111
Murtolujuus maks.	5669



### Testisarja 7

Testikappale	Insertityyppi	Kiinnitystapa	Kuormitustapa	Murtolujuus (N)	Hajoamistapa
1	Custom A	Epoksi	Taivutus	6210	YL
2	Custom A	Epoksi	Taivutus	4998	YL
3	Custom A	Epoksi	Taivutus	7195	YL
4	Custom A	Epoksi	Taivutus	5371	YL
5	Custom A	Epoksi	Taivutus	5556	YL

### Universal Tensile / Compression Test

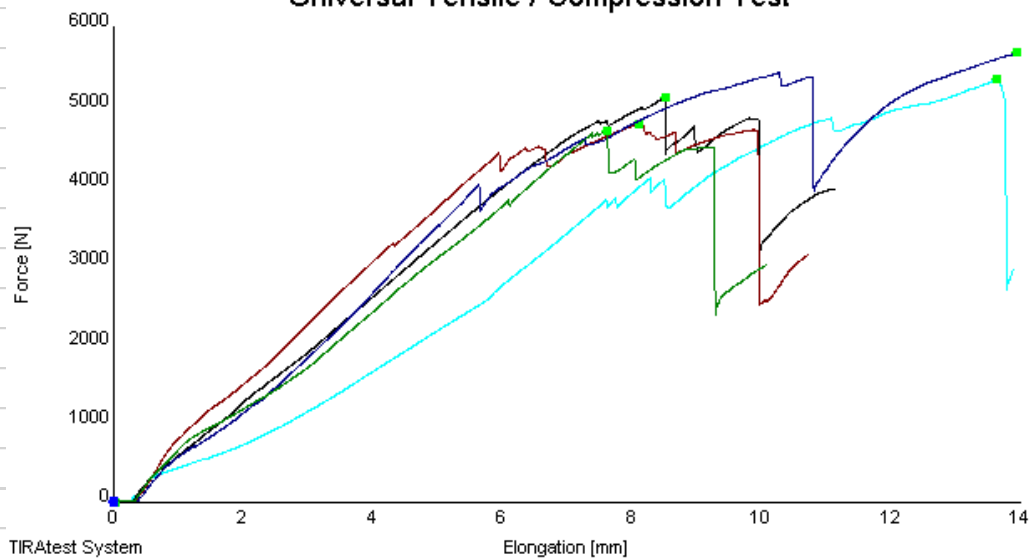


Murtolujuus min.	4998
Murtolujuus maks.	7195

### Testisarja 8

Testikappale	Insertityyppi	Kiinnitystapa	Kuormitustapa	Murtolujuus (N)	Hajoamistapa
1	Custom A	Vinyyliesteri	Taivutus	5338	YL
2	Custom A	Vinyyliesteri	Taivutus	5111	YL
3	Custom A	Vinyyliesteri	Taivutus	4780	YL
4	Custom A	Vinyyliesteri	Taivutus	5427	PL
5	Custom A	Vinyyliesteri	Taivutus	4699	YL

### Universal Tensile / Compression Test



TIRAtest System

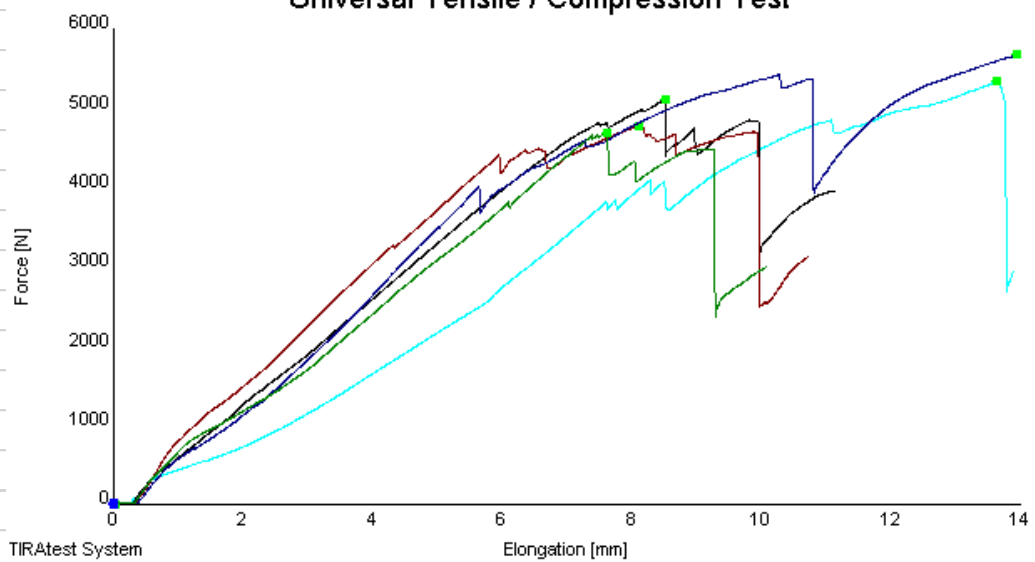
Murtolujuus min.	4699
Murtolujuus maks.	5427



### Testisarja 10

Testikappale	Insertityyppi	Kiinnitystapa	Kuormitustapa	Murtolujuus (N)	Hajoamistapa
1	Custom B	Laminoitu	Taivutus	7967	KM
2	Custom B	Laminoitu	Taivutus	7502	KM
3	Custom B	Laminoitu	Taivutus	7997	YL
4	Custom B	Laminoitu	Taivutus	5870	KM
5	Custom B	Laminoitu	Taivutus	7744	YL

### Universal Tensile / Compression Test



TIRAtest System

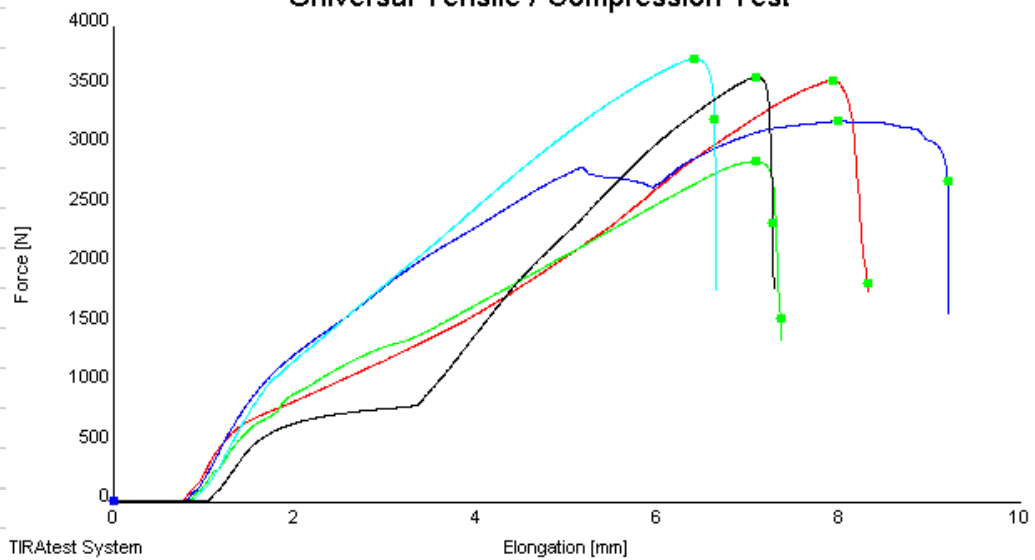
Murtolujuus min.	5870
Murtolujuus maks.	7997



### Testisarja 12

Testikappale	Insertityyppi	Kiinnitystapa	Kuormitustapa	Murtolujuus (N)	Hajoamistapa
1	Pinta	Liimaus	Taivutus	3548	LK
2	Pinta	Liimaus	Taivutus	3207	LK
3	Pinta	Liimaus	Taivutus	2866	LK
4	Pinta	Liimaus	Taivutus	3732	LK
5	Pinta	Liimaus	Taivutus	3580	LK

### Universal Tensile / Compression Test

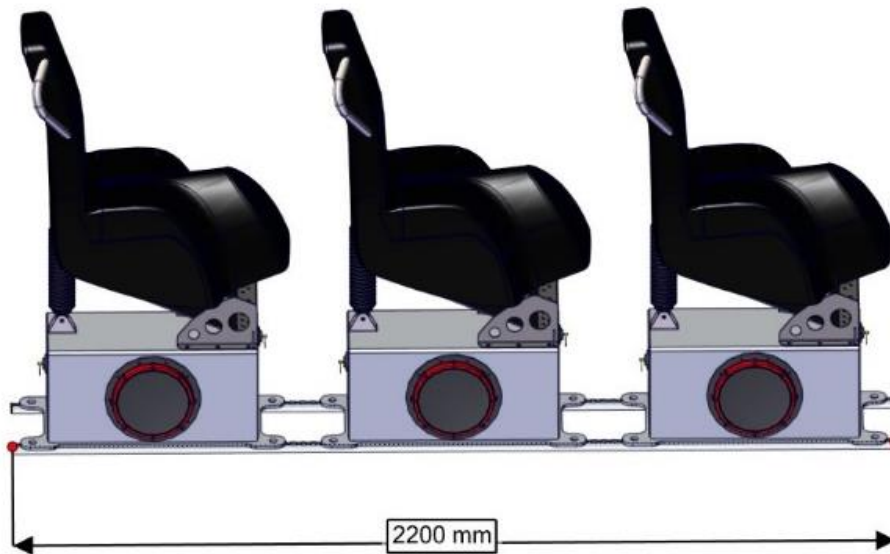


TIRAtest System

Murtolujuus min.	2866
Murtolujuus maks.	3732

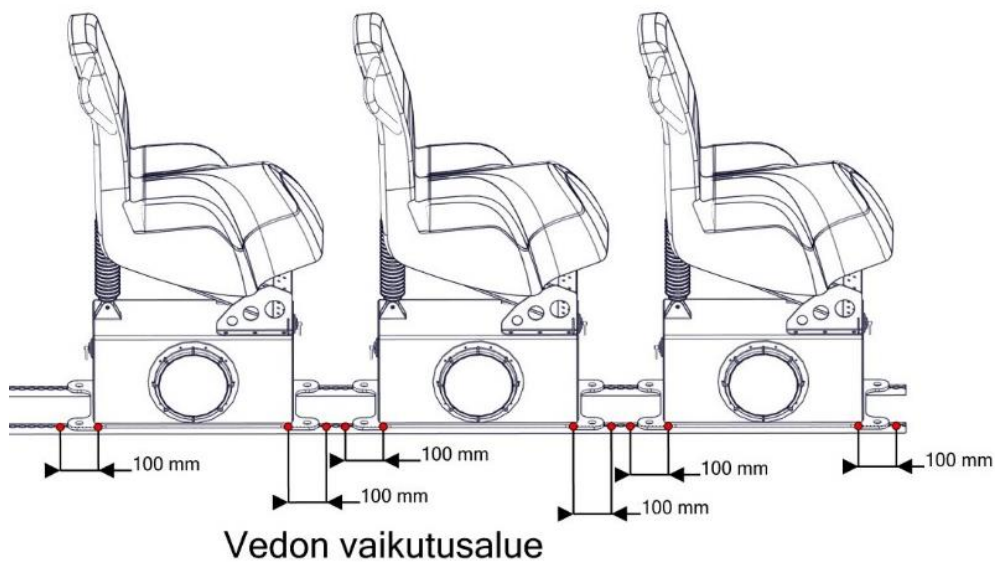


## Case study: Kansikiskojen kiinnitysmenetelmien vertailu



### Pelkkä liimaus

Penkkien lukumäärä	3 kpl
Paino (penkki + matkustaja)	150 kg
Paino yhteensä	450 kg
Kansikiskojen lukumäärä	2 kpl
Penkin kiinnityspisteitä yhteensä	12 kpl
Maksimi kiihtyvyyys	7 g
Maksimi voima yhteensä	30902 N
Maksimi voima kiinnityspistettä kohden	2575 N
Kansikiskojen tehollinen pituus (Arvioitu vedon vaikutusalue 100mm matkalla kiinnityspisteiden kohdalla)	1200 mm





Kansikiskojen leveys	50 mm
Liimapinta-ala	120000 mm <sup>2</sup>
Liiman lujuus	3,2 MPa
Suurin sallittu liitokseen kohdistettava voima	384000 N
Kiinnityksen varmuuskerroin	12,4

**Pelkät insertit**

Penkkien lukumäärä	3 kpl
Paino (penkki+matkustaja)	150 kg
Paino yhteensä	450 kg
Kiinnityspisteitä yhteensä	12 kpl
Maksimi kiihtyvyys	7 g
Maksimi voima kiinnityspistettä kohden	2575 N
Maksimi voima yhteensä	30902 N
Kansikiskojen pituus	2200 mm
Inserttien lukumäärä yhteensä	10 kpl
Inserttejä per kisko	5 kpl
Inserttien väli	550 mm
Valun halkaisija	18,5 mm
Lähekkäin olevien inserttien vaikutus	Ei
Kansilaminaatin paksuus	17 mm
Ydinaineen paksuus	16 mm
Ydinaineen tiheys	130 kg/m <sup>3</sup>
Ydinaineen leikkauslujuus	2,2 MPa
Insertin laskennallinen lujuus	4347 N
Inserttien lujuus yhteensä	43473 N
Kiinnityksen varmuuskerroin	1,4

**Painovertailu****Vastarautakiinnitys**

	kpl	pituus	yht
Vastarauta 1 (4650x50x6)	4	4650	18600 mm
Vastarauta 2 (4050x50x6)	4	4050	16200 mm
Vastarauta 3 (800x50x6)	2	800	1600 mm
Vastarauta 4 (1100x50x6)	2	1100	2200 mm
Vastarauta 5 (1600x50x6)	2	1600	3200 mm
Pituus yhteensä			41800 mm
Tilavuus yhteensä			12540000 mm <sup>3</sup>
			0,01254 m <sup>3</sup>
EN-AW 6082 tiheys			2700 kg/m <sup>3</sup>
Vastarautojen paino yhteensä			33,9 kg

**Divinycell**

Pinta-ala 1			4603947 mm <sup>2</sup>
Pinta-ala 2			4603947 mm <sup>2</sup>
Pinta-ala 3			2119723 mm <sup>2</sup>
Pinta-ala yhteensä			11327617 mm <sup>2</sup>
Paksuus			12 mm
Tilavuus			135931404 mm <sup>3</sup>
			0,1359314 m <sup>3</sup>
Tiheys			80 kg/m <sup>3</sup>
Paino			10,9 kg

Paino yhteensä (vastaraudat + ydinaine)

44,7 kg

**Inserttikiinnitys**

Inserttien lukumäärä	76 kpl
Insertin paino	5,6 g
Tilavuus	15883 mm <sup>3</sup>
Tiheys	0,00156 g/mm <sup>3</sup>
Paino	24,777 g
Paino yhteensä (insertit + valu)	2308,688 g
	2,3 kg

**Divinycell**

Pinta-ala 1	4603947 mm <sup>2</sup>
Pinta-ala 2	4603947 mm <sup>2</sup>
Pinta-ala 3	2119723 mm <sup>2</sup>
Pinta-ala yhteensä	11327617 mm <sup>2</sup>
Paksuus	16 mm
Tilavuus ennen inserttejä	181241872 mm <sup>3</sup>
Poistettu tilavuus (valu)	141346,54 mm <sup>3</sup>
Tilavuus inserttien kanssa	181100525 mm <sup>3</sup>
	0,1812419 m <sup>3</sup>
Tiheys	130 kg/m <sup>3</sup>
Paino	23,6 kg

Paino yhteensä (ydinaine + insertit+ valu)

25,9 kg

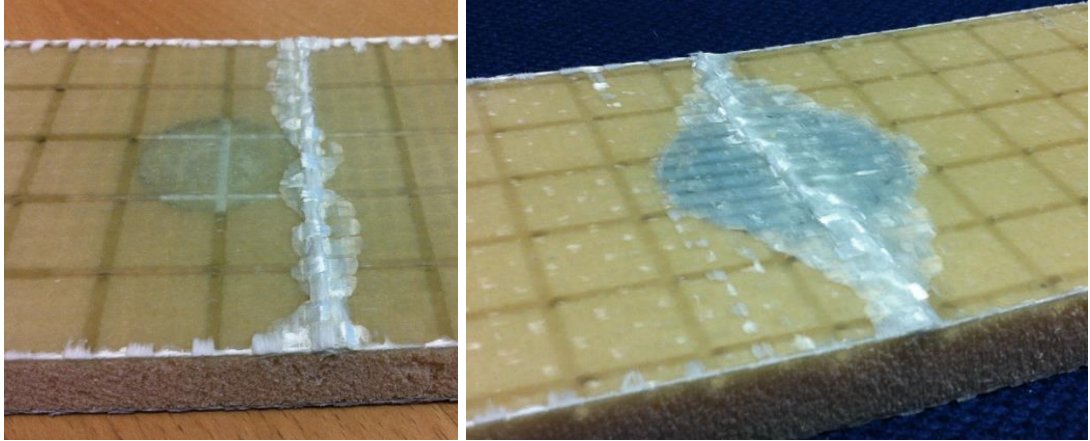
**Painoero**

18,9 kg

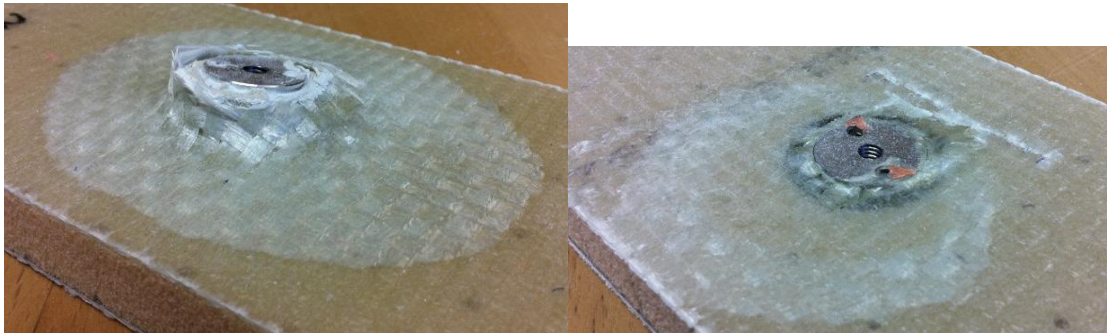
44 %

## Koestettujen kappaleiden murtumatyypit

### 1. Taivutuksesta johtuva pintalaminaatin puristusmurtuma



### 2. Ydinaineen leikkausmurtuma



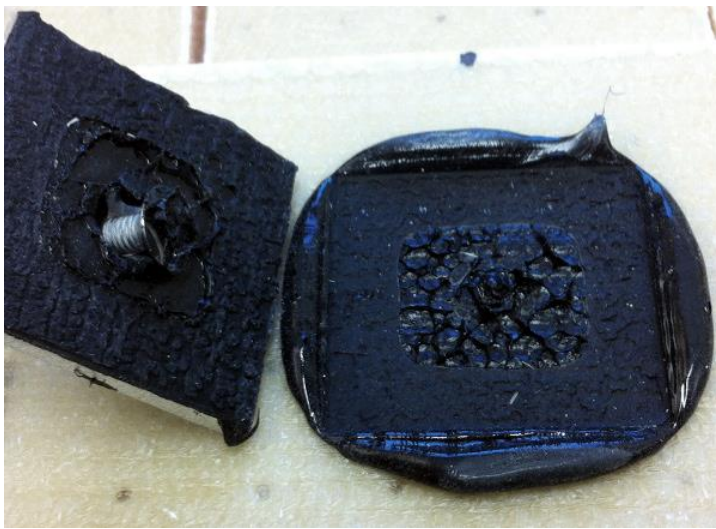
### 3. Insertin ja ydinaineen välinen adheesiomurtuma



4. Delaminoituminen



5. Liiman koheesiomurtuma



6. Pintalaminaatin leikkautuminen



7. Pultin murtuminen

