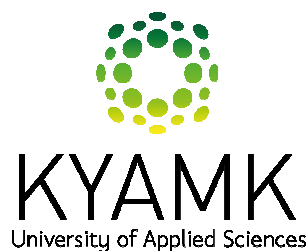


Otto-Aapeli Lappalainen

**POLYKLOOROPREENILIIMA-AINEEN  
MEKAANISET OMINAISUUDET**  
RIB-veneeseen ponttonin kiinnitys runkoon  
liimaliitoksella

Opinnäytetyö  
Veneteknologian koulutusohjelma

Huhtikuu 2016



Tekijä/Tekijät	Tutkinto	Aika
Otto-Aapeli Lappalainen	Insinööri (AMK)	Huhtikuu 2016
Opinnäytetyön nimi Polykloropreeniliima-aineen mekaaniset ominaisuudet RIB-veneeseen ponttonin kiinnitys runkoon liimaliitoksella		61 sivua 0 liitesivua
Toimeksiantaja Boomeranger Boats Oy		
Ohjaaja Terho Halme		
<p data-bbox="140 790 1399 824"><b>Tiivistelmä</b></p> <p data-bbox="140 846 1399 1081">RIB-veneeseen ponttoni kiinnitetään runkoon tavanomaisesti liimaliitoksella. Liimaliitoksen lujuusominaisuuksista ei ole kuitenkaan kattavasti tutkittua tietoa eri tuotanto- ja käyttöolosuhteissa. Tässä opinnäytetyössä oli tarkoituksena selvittää RIB-veneeseen ponttoni-runko-liimaliitokseen kohdistuvia voimia ja paineita, sekä tutkia liimaliitoksen mekaanisia ominaisuuksia eri lämpötiloissa, liima-aineen kovettumisajoilla ja liimiliitoksen pituudella. Työn tarkoitus oli myös luoda kuitulujitemuovi-kuitulujitekangas-liimaliitoksen testaamiseen hyvin soveltuva testimenetelmä olemassa olevien standardoitujen testimenetelmien pohjalta.</p> <p data-bbox="140 1115 1399 1283">Tutkimus toteutettiin laajana kirjallisuustutkimuksena, sekä arvioimalla olemassa olevien testistandardien soveltuvuutta kuitulujitemuovi-kuitulujitekangas-liimaliitoksen testaamiseen. Työssä koestettiin kuitulujitemuovi-kuitulujitekangas-liimaliitoksella tehtyjä koepaloja sovelletulla testimenetelmällä, jolla pyrittiin simuloimaan käytön aiheuttamaa leikkaavaa rasiitusta liitokseen.</p> <p data-bbox="140 1317 1399 1518">Työssä kehitettiin sovellettu testimenetelmä liimaliitoksen koestamiseen, sekä sovellettiin olemassa olevaa veneen rakennemitoitus standardia ponttoniin kohdistuvan hydrodynaamisen paineen laskentaan. Sovelletulla testimenetelmällä saatujen tulosten pohjalta lämpötilan nousu ja liian lyhyt kovettumisaika vaikuttavat negatiivisesti liimaliitoksen mekaanisiin ominaisuuksiin. Kokeilla pystyttiin varmistamaan, ettei liimiliitoksen pituuden lisäyksellä tietyn pisteen jälkeen saavuteta liimaliitoksen lujuusominaisuuksien huomattavaa parantumista.</p>		
<p data-bbox="140 1933 1399 1966"><b>Asiasanat</b></p> <p data-bbox="140 1966 1399 1982">polykloropreeniliima, neopreeniliima, ponttoni, RIB-vene, liimaliitos, liimiliitos</p>		

Author	Degree	Time
Otto-Aapeli Lappalainen	Bachelor of Engineering Boat Technology	April 2016
Thesis Title		61 pages 0 pages of appendices
Mechanical Properties of Polychloroprene Adhesive RIB Pontoon – Hull Joint by Adhesive		
Commissioned by		
Boomeranger Boats Oy		
Supervisor		
Terho Halme, Lecturer		
Abstract		
<p>The pontoon is commonly attached to the hull in a RIB with an adhesive joint. The mechanical properties of such joint have not been studied before comprehensively in different manufacturing and operating circumstances. The objective of this thesis was to evaluate the forces and pressures that affect RIB's pontoon – hull joint, and to study the mechanical properties of such joint in different temperatures, curing times and joint lengths. The objective of this thesis was also to develop a test method that applies well to testing an adhesive joint between fiber-reinforced-plastic and fiber-reinforced-polymer fabric, based on existing standardized test methods.</p> <p>The thesis was conducted as an extensive literature research, and as an evaluation of applying existing standardized test methods on an adhesive joint between fiber-reinforced-plastic and fiber-reinforced-polymer fabric. The applied test method was used to measure shear stress of the adhesive joint between fiber-reinforced-plastic and fiber-reinforced-polymer fabric.</p> <p>The applied test method was developed in this thesis to test the adhesive joint between fiber-reinforced-plastic and fiber-reinforced-polymer fabric. An existing boat structural design standard was applied to calculate the hydrodynamic pressure on the pontoon. Based on the test results from the applied test method, the rise of temperature and a shorter curing time of polychloroprene adhesive have a negative effect on the mechanical properties of the adhesion joint. The applied test method verified that the increase of the joint lap length does not improve the mechanical properties of the adhesive joint after a certain point.</p>		
Keywords		
polychloroprene adhesive, Neoprene adhesive, RIB, adhesive joint, adhesive lap joint		

## CONTENTS

1	JOHDANTO .....	1
2	RIB-VENE .....	1
2.1	RIB-veneeseen historia .....	1
2.2	Yleistä RIB-veneestä .....	3
2.2.1	RIB-veneeseen rakenne .....	5
2.2.2	Ponttonin rakenne .....	6
3	PONTTONIN KIINNITYS VENEEN RUNKOON LIIMALIITOKSELLE .....	6
3.1	Standardin asettamat vaatimukset ponttonin kiinnitykselle .....	6
3.2	Liimaliitoksen vertailu muihin ponttonin kiinnitysmenetelmiin .....	7
3.3	Liimaliitoksen hyödyt ja haitat .....	9
3.4	Liimaliitoksen yleiset ominaisuudet .....	9
3.5	Tartunnan parantaminen polymeeri-materiaaliin esikäsittelyn avulla .....	12
3.6	Liimaliitoksen suunnittelu .....	16
3.6.1	Yleistä .....	16
3.6.2	Liimaliitoksen kuormitus ja liitosgeometria .....	17
3.6.3	Liimaliitoksen hajoaminen .....	20
3.6.4	Liimaliitoksen parantaminen .....	22
3.7	Ponttoneissa ja niiden kiinnityksessä esiintyvät polymeerit .....	25
3.8	Liima-aineiden ominaisuudet ja kiinnitystekniikat .....	28
3.8.1	Kovettuminen .....	28
3.8.2	Liima-aineiden kiinnitystekniikat .....	30
3.9	Liima-aineiden vaihtoehdot ja niiden ominaisuudet .....	31
3.10	Ponttonin materiaalivaihtoehdot ja niiden ominaisuudet .....	34
3.11	Liimaliitokseen vaikuttavat ulkoiset voimat .....	38
3.11.1	Hydrostaattiset voimat .....	38
3.11.2	Hydrodynaamiset voimat .....	39
4	LIIMALIITOKSEN JA PONTTONIN MEKAANISIIN OMINAISUUKSIIN VAIKUTTAVAT OLOSUHTEET .....	41
4.1	Tuotantoympäristö .....	41

4.2	Käyttöympäristö .....	42
5	LIIMALIITOKSEN TESTIMENETELMÄT .....	45
5.1	Testimenetelmät rasituksen mukaan .....	45
5.1.1	Vetojännitys.....	45
5.1.2	Leikkausjännitys.....	45
5.1.3	Repimislujuus.....	46
5.1.4	Halkaisulujuus .....	47
5.1.5	Viruminen.....	47
5.1.6	Väsyminen .....	48
5.1.7	Iskunkesto.....	48
6	LIIMALIITOKSEN TESTAUS .....	48
6.1	Käytetty testimenetelmä .....	48
6.1.1	Koestettavat kappaleet, niiden mitat ja koepalojen välisen liimaliitoksen toteutus.....	49
6.1.2	Koestettava alue ja kokeen nopeus .....	50
6.1.3	Koetilanne .....	51
6.1.4	Murtumatyyppi.....	51
6.2	Koekappaleiden valmistus .....	52
6.3	Kokeen suoritus ja testitulokset .....	54
6.4	Virhearviointi.....	59
7	LOPPUPÄÄTELMÄT .....	60

## LIITTEET

Liite 1. Materiaali A laminoitipöytäkirja

Liite 2. Koekappaleiden liimauspöytäkirja

Liite 3. Voima-venymäpiirroset ja keskiarvoisen voiman laskemiseen määritetyt venymäalueet

Liite 4. Vetokokeen mittauspöytäkirja

## SELITYSLUETTELO

Gelcoat	Väripigmenttiä sisältävä hartsi
CR	Polykloropreeni, kauppanimi Neopreeni
CSM	Kloorisulfonoitu polyeteeni, kauppanimi Hypalon
PU	Polyuretaani
PVC	Polyvinyylikloridi
RIB	<i>Rigid Inflatable Boat</i> , suom. jäykkä ilmatäytteinen vene

## 1 JOHDANTO

Tässä insinööriyössä tarkastellaan RIB-veneiden ponttonin kiinnitystä runkoon liimaliitoksella. RIB-veneiden yleisin ponttonin kiinnitysmenetelmä runkoon on liimaliitos, mutta sen lujuusominaisuuksista ei ole tarpeeksi tutkittua tietoa eri tuotanto-olosuhteissa tai käyttöympäristössä. Tutkimus keskittyy yhteen yleisimmistä ponttonimateriaaleista ja liima-aineista, eli polykloropreeniin (Neopreeni).

Lämpötilan nousu vaikuttaa yleensä negatiivisesti liima-aineen mekaanisiin ominaisuuksiin. Liima-aineiden valmistajilta ei kuitenkaan saa aina yksityiskohtaista tietoa liima-aineen mekaanisista ominaisuuksista eri lämpötiloissa eri ainepareilla.

Liiman kovettumisaika vaikuttaa liima-aineen mekaanisiin ominaisuuksiin. Liima-aineiden valmistajat antavat yleensä suositusaikoja, joiden sisällä liima-aineen tulisi olla saavuttanut tietyt mekaaniset ominaisuudet. Valmistajat eivät kuitenkaan ilmoita tarkkoja arvoja liima-aineen mekaanisista ominaisuuksista tietyn kovettumisajan jälkeen. Kovettumisajan tietäminen on varsin tärkeää venetuotannossa, jottei liimaliitosta rasiteta ennen aikojaan vahingoittaen sitä.

Insinööriyön tarkoituksena on tutkia ja soveltaa testimenetelmiä, ja kehittää oikean tyyppinen testimenetelmä ponttoni-runko-liimaliitoksen arvioimiseen. Työn tarkoituksena on lopulta mitata koepaloilla lämpötilan, liima-aineen kovettumisajan ja liimaliitoksen pituuden vaikutusta liimaliitoksen mekaanisiin ominaisuuksiin.

## 2 RIB-VEENE

### 2.1 RIB-veneiden historia

RIB-veneiden historia ulottuu 1960-luvulle, jolloin Ranskan ja Yhdistyneiden Kuningaskuntien meripelastusseurat hankkivat ensimmäisiä kumiveneitä sisävesille ja suojaisille rannikoille. Vanhat uppoumarunkoiset meripelastusveneet olivat suuria, hitaita ja kömpelöitä. Uudet pienet ja ketterät kumiveneet täydensivät vanhojen avomerellä paremmin toimivien isojen veneiden toimintaa. (Pike 2013,10.)

Kumiveneissä oli tasainen kumikankaasta valmistettu pohja, mikä teki veneen käytön aallokossa vaikeaksi sekä aiheutti pohjan kulumisen, kun venettä vedettiin rannalta veteen. Huomattiin kuitenkin, että kumiveneiden ponttonikellukkeilla oli kyky luoda parempi vakavuus sekä absorboida aallokon aiheuttamia iskuja. Eräät meripelastajat kokeilivat jäykkää vaneripohjaa pohjan kulumisen estämiseksi. Pohjaan kohdistuva hydrodynaaminen paine oli kuitenkin suurempi, kuin mitä vaneripohja kesti ja pohja hajosi helposti. Samaan aikaan maailmalla pienveneiden rungoissa alkoi yleistyä aiempaa syvempi v-pohja ja kokeilujen kautta syntyi ensimmäinen RIB-vene, jossa oli v-pohja vanerirunko. V-pohjasta tuli niin syvä, että kannen ja rungon väliin sai mahtumaan vaadittavat pitkittäiset jäykisteet, jolloin runko kesti hydrodynaamisen rasituksen. (Pike 2013,11-12.)

Atlantic 21-RIB-konseptivene debytoi 1969 moottorivenekisassa ja sijoittui kaikkien hämmästykseksi hyvin. Vene näytti, että suuri pituus-leveysuhde paransi veneen toimintaa kovassa aallokossa. Pienten muutosten jälkeen veneestä tuli Yhdistyneiden Kuningaskuntien meripelastuksen kulmakivi lähes 30 vuodeksi suojaisilla rannikoilla. Vene toi mukanaan myös uusia haasteita, joista syntyi uusia innovaatioita, kuten satulatuolin sekä veneen oikaisevan hätäjärjestelmän. Satulatuoli kehitettiin veneen kuljettajalle, jotta tämä voi keskittyä ajamiseen eikä pystyssä pysymiseen. Oikaiseva hätäjärjestelmä kehitettiin, kun veneiden koko kasvoi eikä venettä voinut enää oikaista lihasvoimalla. Järjestelmässä oli targakaareen kiinnitetty ilmatäytteinen pussi, joka saatiin tarvittaessa pumpattua täyteen ilmaa aiheuttaen nosteen ja oikaisten kaatuneen veneen takaisin pystyyn. (Pike 2013,13-14.)

Kehitys johti jatkuvasti isompiin ja raskaampiin veneisiin, jotka lopulta soveltuivat avomeriolosuhteisiin, aina Pohjanmerelle saakka. Laivoilla bensiinin kieltävät turvallisuusmääräykset johtivat diesel-koneiden asennuksiin RIB-veneissä. Markkinoille tuli sekä sisämoottori-vesijetti, että dieselsisäperämoottori propulsiojärjestelmällä varustettuja veneitä. (Pike 2013,14.)

1970-luvulta lähtien RIB-veneet alkoivat yleistyä viranomaiskäytössä Euroopassa ja Pohjois-Amerikassa, mutta varsinainen kasvu alkoi 1980-luvulla, jolloin RIB-veneitä alettiin nähdä kasvavissa määrin sotilas- ja viranomaiskäytössä. 2010-luvulle tultaessa RIB-veneitä on lähes kaikissa eri



käyttötarkoituksissa: meripelastus, lainvalvonta, sotilaskäyttö, luotsikäyttö, huvikäyttö sekä isompien huvialusten tender-veneinä. Tender-veneinä RIB-vene on luonnollinen vaihtoehto: pienessä veneessä ei tarvitse huolehtia lepuuttajista tai kiinnittymisestä varsinaiseen alukseen. Vain yksi käyttäjäryhmä – kalastajat – ei ole ottanut RIB-veneitä omaksensa, sillä kourut saattavat vahingoittaa ponttonia. (Pike 2013,15.)

RIB-veneiden runkomateriaalina käytettiin aluksi vaneria, mutta nopeasti siirryttiin lujitemuoviin. Sittemmin käyttöön on myös otettu polyeteeni sekä alumiini rungon valmistusmateriaalina. Ponttonit olivat alun perin synteettistä butadieeni-kumia, mutta sittemmin PVC-, polyuretaani- sekä hypalon-neopreeni-kankaat ovat syrjäyttäneet sen. (Pike 2013,11.)

RIB-veneet ovat kehittyneet yli 50 vuoden aikana harppauksin luoden uusia innovaatiota koko venealan käyttöön. Nykyisissä luotettavissa moderneissa veneissä suurin vaaranaiheuttaja on ammattitaidoton kuski ja miehistö. (Pike 2013,10.)

## 2.2 Yleistä RIB-veneestä

RIB-vene on seuraava kehitysaskel kumiveneestä. Erona kumiveneeseen on RIB-veneiden runko. Sen runko on jäykkä, materiaalina metalli (alumiini), lujitemuovi (lasikuitu- tai hiilikuitulujuitteinen) tai kestopuovi (polyeteeni). Rungon ympärillä laidoissa on kiinni ponttoni, joka luo nosteen veneen laidoille aiheuttaen veneelle suuren alkuvakavuuden. (Pike 2013,10.)

RIB-veneiden propulsiojärjestelmä on yleisimmin perämoottori, sisäperämoottori tai sisämoottori-vesijettivetolaite.

RIB-veneellä on ominaisuuksia, jotka tuovat sille tietyt käyttöominaisuudet. Suuri vakavuus mahdollistaa veneen turvallisen käytön suurissa nopeuksissa sekä huonossa kelissä. Tästä syystä vene on yleinen sotilas- ja viranomaiskäytössä. Ponttonin luoma telakoitumisen helppous toiseen veneeseen on omiaan edistämään käyttöä viranomaistarkoituksiin. (Pike 2013,10.)

RIB-veneiden luonteenpiirteet:

- vakaa
- turvallinen
- luotettava
- nopea

### RIB-vene ISO-standardissa

RIB-veneet ovat osa ilmatäytteisten veneiden standardeja ISO 6185-1, ISO 6185-2, ISO 6185-3, ISO 6185-4. Standardeissa ilmatäytteiset veneet on jaettu kymmeneen eri tyyppiin seuraavien ominaisuuksien mukaan (ISO 6185-4:2011,6):

- kellukkeen luoma noste (yksikkönä kilonewton, kN)
- moottoriteho (yksikkönä kilowatti, kW)
- rungon rakenne (jäykkä vai joustava)
- pituus (yksikkönä metri, m)

Sovellettava standardi:	ISO 6185-1	ISO 6185-2	ISO 6185-3	ISO 6185-4
KELLUKKEEN NOSTE (kN)	12	Jäykistetyt materiaalit	Vain jäykistetyt materiaalit	Vain jäykistetyt materiaalit
	1,8	Jäykistetyt tai jäykistämät-tömät materiaalit	Jäykistetyt tai jäykistämät-tömät materiaalit	
	Standardin ulkopuolelle jäävät veneet, joissa kellukkeiden aiheuttama noste alle 1,8 kN			
	4,5	15	75	
	MOOTTORIN TEHO (kW)			

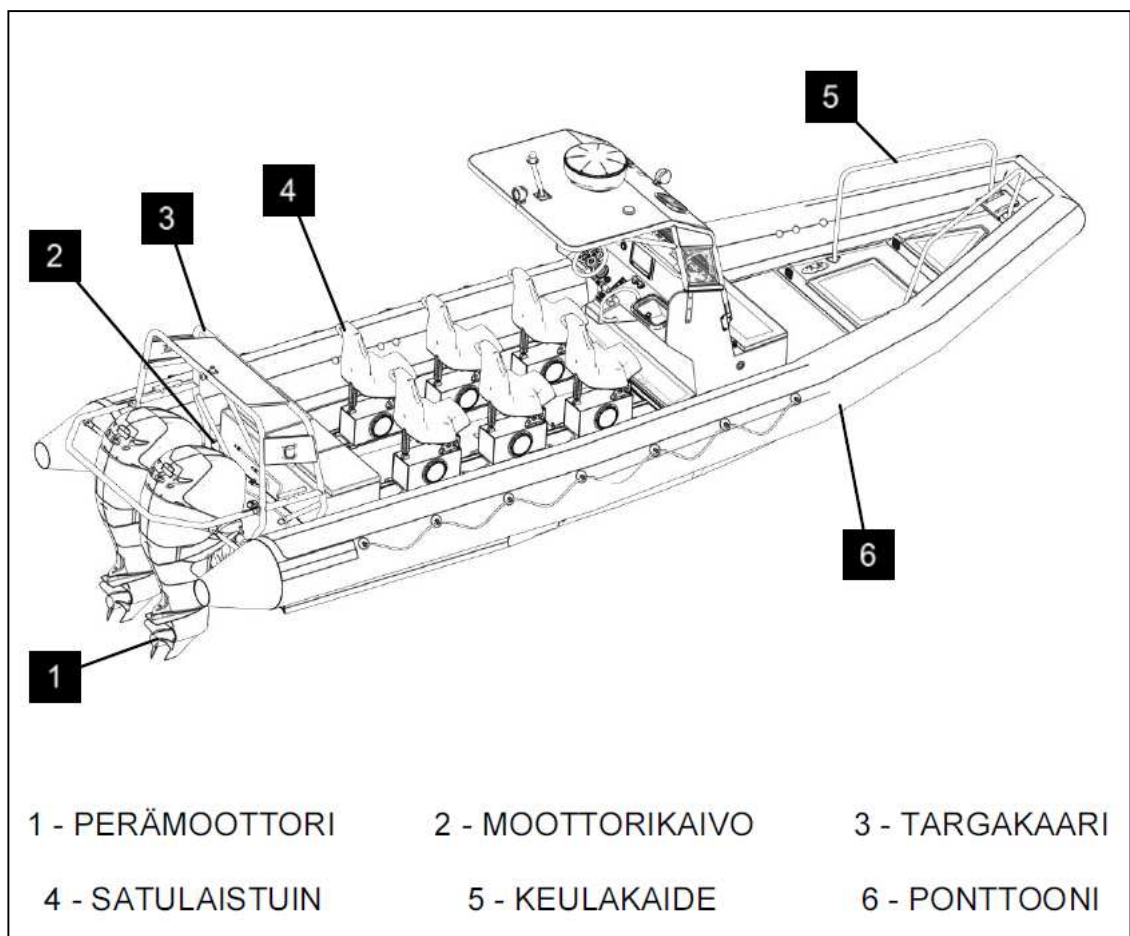
Kuva 1. Ilmatäytteisten veneiden luokittelu eri ISO-standardin osiin. (ISO 6185-4:2011,vii):

Nopeiden ja isojen RIB-veneiden suunnitteluun käytetään ISO 6185-4-standardia, moottoritehosta riippuen. ISO 6185-1- ja ISO 6185-2-standardit soveltuvat lähinnä ”kumiveneiden” suunnitteluun, sillä niissä konetehon tulee jäädä alle 15 kilowatin.

Kellukkeiden nosteen jäädessä alle 1800 N:n, veneeseen ei voida soveltaa ilmatäytteisten veneiden standardeja.

### 2.2.1 RIB-veneiden rakenne

RIB-veneessä on kaksi rakennetta: jäykkä runko sekä joustava kellukerakenne, eli ponttoni. Ponttoni voi olla joko ilma- tai vaahtotäytteinen. Ponttonin luoman nosteen tulee olla vähintään 50 % vaaditusta veneen kokonaisnosteesta. Ilma- ja vaahtotäytteisen ponttonin luoma noste määritetään sen tilavuutena. Ilmatäytteisen ponttonin tapauksessa ilmaosastoissa tulee olla normaali käyttöpaine. (ISO-6185-4:2011,3,6.)



Kuva 2. Tyypillinen RIB-vene. (ISO 6181-4:2011,28)

## 2.2.2 Ponttonin rakenne

Sekä ilma- että vaahtotäytteisen ponttonin tulee olla kiinnitettynä runkoon molemmilta puolilta venettä, sekä styyrpuurin että paapuurin puolelta.

Ilmatäytteisen ponttonin tulee olla osastoituna vähintään viiteen eri osastoon, vaahtotäytteistä ponttonia ei tarvitse osastoida, mutta vaahtorakenteen tulee olla umpisoluista.

Ilmatäytteisessä ponttonissa jokaisen osaston maksimipituus on neljä metriä. Osastojen välinen tilavuusero saa poiketa keskimääräisestä osaston tilavuudesta enintään 20 %. Keskimääräinen osaston tilavuus lasketaan vähimmäisosastomäärän mukaan. Jos ponttonissa on yli 5 osastoa, tilavuuspoikkeamavaatimus ei koske ylimääräisiä osastoja viidennen osaston jälkeen. (ISO-6185-4:2011,3,17.)



Kuva 3. Tyypillinen ponttonin osastointi, jossa eri osastot on korostettu eri väreillä.

## 3 PONTTONIN KINNITYS VENEEN RUNKOON LIIMALIITOKSELLA

### 3.1 Standardin asettamat vaatimukset ponttonin kiinnitykselle

Ponttoni- runko-kiinnitykselle on määritetty kaksi eri testimenetelmää, joilla testataan, että ponttoni-runko-liitos kestää normaalissa käytössä. Alla

kuvattuna yksinkertaisempi testimenetelmä B, ISO 6185-standardin ponttoni-runko-liitoksen testimenetelmästä.

Valmistetaan 500 mm leveä koekappale, jossa ponttonin materiaali on kiinnitetty rungon materiaaliin käytetyllä kiinnitysmenetelmällä. Materiaaleja vedetään vastakkaisiin suuntiin, kunnes kappale menee rikki. Jotta testi on hyväksytty, liitoksen tulee pysyä ehjänä, ja koekappaleessa hajoamisen tulee tapahtua ponttoni- tai runkomateriaalissa. (ISO 6185-4:2011,22.)

### 3.2 Liimaliitoksen vertailu muihin ponttonin kiinnitysmenetelmiin

Liimaliitoksella on myös muita vaihtoehtoja. Yleisin vaihtoehtoinen kiinnitystapa ponttonin kiinnittämiseksi runkoon on kiinnittää siitä tulevat kankaat jäykkien lattojen väliin. Näin kangas jää latan ja rungon väliin puristuksiin (Kuva 4). Latat ovat kiinni rungossa pulteilla tai ruuveilla eli runkoliitos on siis mekaaninen. Tässäkin kiinnitystavassa käytetään liimaliitosta, kun runkoon kiinni tuleva kangas kiinnitetään liimaliitoksella ponttoniin. Kiinnitysmenetelmä ei ole tämän takia täysin mekaaninen.

Suurin etu mekaanisella kiinnityksellä on sen huollettavuus. Ponttoni on helppo irrottaa, kun runkoliitos on mekaaninen. Mekaanisen kiinnityksen soveltuvuus on hyvä myös, kun rungon materiaalin adheesio-ominaisuudet ovat rajalliset tai haastavat, kuten alumiinilla ja polyeteenillä. Molempiin materiaaleihin pystytään toteuttamaan ponttonin kiinnitys liimaliitoksella, mutta ne vaativat perusteellisen pintakäsittelyn liima-aineen tartunnan aikaansaamiseksi.

Mekaanisen kiinnityksen huonoin puoli verrattuna liimaliitokseen on, ettei se jaa ponttoniin kohdistuvia voimia yhtä laajalle alueelle. Pistekuormien syntyminen lattojen kiinnityspulttien tai ruuvien kohdalle on mahdollista, mikä saattaa rikkoa kiinnityksen ennen pitkään. Lattojen pinta-alan kasvattaminen voi olla haastavaa veneen runkomuodon takia. Liimaliitoksella ei ole vastaavia rajoituksia, sillä jännityksen pienentäminen pinta-alaa kasvattamalla on suhteellisen helppoa muodosta riippumatta. (Petrie 2000,25.)



Kuva 4. Ponttonin kiinnitys veneen runkoon mekaanisella kiinnityksellä. Ponttoniin on kiinnitetty liimaliitoksella kuitulujitekiinnityskangas, joka menee kestopuovilistan alle. Kestomuovilista puristaa kuitulujitekiinnityskankaan veneen runkoa vasten. Kestomuovilista on kiinni veneen rungossa teräspulteilla.

Mekaaninen kiinnitys vaatii tarkan suunnittelun ja toteutuksen. Hyvä mekaaninen kiinnitys vaatii tukevan läpiviennin, riittävän vahvat materiaalit käyttöympäristöön ja tasaisen kuormituksen. Mekaanisen kiinnityksen tulee myös estää värinän sekä kiinnitettävien materiaalien liukumisen, kulumisen ja erkanemisen synnyn. (Petrie 2000,581.)

### 3.3 Liimaliitoksen hyödyt ja haitat

Liimaliitoksen suurin etu on kyky jakaa kuormitus suurelle alueelle, ja aiheuttaa näin pienempi paine ja jännitys kiinnitettäville materiaaleille. Toinen huomattava etu muihin kiinnitysmenetelmiin on sen kyky muovautua kiinnitettävien pintojen mukaan, ilman että kiinnitettävien materiaalien paksuudella on suurta merkitystä. Liimaliitos voi toimia myös kahden eri lämpölaajenemiskertoimen omaavan materiaali välissä, estäen potentiaalisen jännityksen synnyn materiaalien välille. (Ebnesajjad & Landrock 2009,2.)

Muita hyviä puolia (Ebnesajjad & Landrock 2009,3.):

- Liimaliitos minimoi galvaanisen korroosion mahdollisuuden materiaalien välillä.
- Liimaliitoksella on kyky yleensä vastustaa metalleja paremmin väsymistä.
- Liimaliitos ei johda sähköä materiaalien välillä.
- Liimaliitos absorboi värinää ja tärähtelyä.
- Liimaliitos omaa hyvän lujuus/paino-suhteen.
- Liimaliitos on yleensä nopeampi ja halvempi, kuin mekaaninen kiinnitys.

Yksi liimaliitoksen suurin haitta on sen visuaalisen tarkastelun puute, ellei se ole läpinäkyvä. Tämän takia huonoa liitosta ei aina havaita. Pitkä kovettumisaika on myös merkittävä puute verrattuna mekaaniseen liitokseen. Käyttölämpötila rajoittaa liimaliitoksen soveltuvuutta joihinkin kohteisiin. (Ebnesajjad & Landrock 2009,4.)

Muita haittapuolia (Ebnesajjad & Landrock 2009,4.):

- Liimattavien pintojen pitää olla valmisteltu ja puhdistettu.
- Liimaliitos saattaa heikentyä ajan myötä ympäristön vaikutuksesta.
- Liima-aine saattaa aiheuttaa asennusvaiheessa terveyshaittoja työntekijöille.

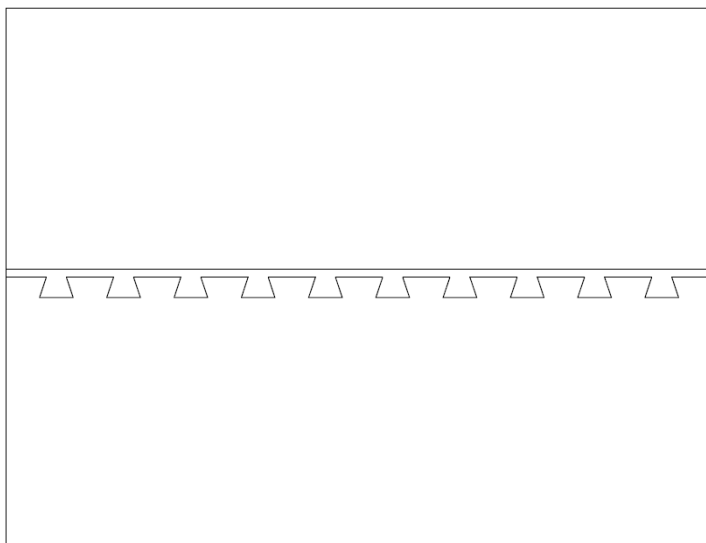
### 3.4 Liimaliitoksen yleiset ominaisuudet

Liimaliitoksen adheesiolla tarkoitetaan liima-aineen ja liimattavan materiaalin sidosvoimaa. Koheesiolla tarkoitetaan liima-aineen sisäistä voimaa. Kun adheesio- ja koheesio-arvot ovat lähellä toisiansa, syntyy yleensä hyvä liimaliitos (Ebnesajjad & Landrock 2009,10.)

Liimaliitoksen lujuus ja ominaisuudet ovat yleensä monien tekijöiden summa. Merkittävimmät tekijät jotka vaikuttavat polymeerien liimaliitoksen syntyyn ovat mekaanisia, kemiallisia (primäärisidokset, esim. kovalenttiset sidokset) ja fysikaalisia (kostuminen). Vähemmän tärkeitä tekijöitä ovat mm. elektrostaattinen tartuntatekijä ja kemiallinen tartuntatekijä (sekundäärisidokset, esim. van Der Waalsin voimat).

### **Mekaaninen tartuntatekijä**

Karhealla tai huokoisella tartuntapinnalla liima-aine täyttää liimattavan materiaalin pinnan mikroskooppisen epätasaisen pintarakenteen, ja kasvattaa liimaliitoksen pinta-alaa (Kuva 5). Liima-aineen tunkeutuminen epätasaiseen pinta-aineeseen luo mekaanisen ”ankkuroinnin”. Mekaaninen tartuntatekijä ei selitä liimaliitoksen tartuntaa tasaisilla pinnoilla, eikä yleensä ole ainoa tartuntatekijä liimaliitoksissa. (Ebnesajjad & Landrock 2009,7.)



Kuva 5. Mekaaninen tartuntatekijä

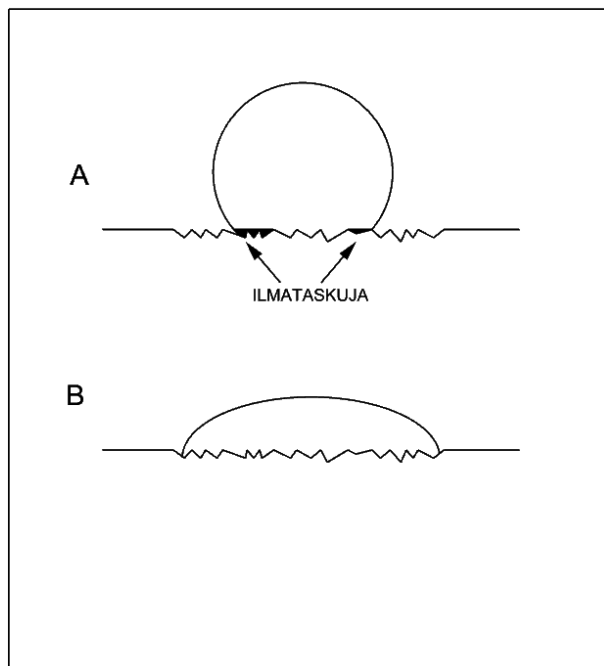
### **Elektrostaattinen tartuntatekijä**

Liima-aineen ja liimattavan materiaalin elektronegatiivisuuksien ero luo rajapinnassa elektrostaattiset voimat, kun toisesta materiaalista tulee positiivisesti ja toisesta negatiivisesti varautunut. Elektrostaattinen tartuntatekijä on havaittu metalli-polymeeri-liimaliitoksissa, mutta ei polymeeri-polymeeri-liitoksissa yhtä voimakkaana. (Ebnesajjad & Landrock 2009,8.)



## Diffuusiortuntatekijä

Liima-aine ja liimattava materiaali muodostavat molekyyli sidoksia aineiden rajapinnassa. Diffuusiortunta tapahtuu lähinnä pitkäketjuisilla polymeereillä. Diffuusio tapahtuu yleensä korkeammassa lämpötiloissa, jolloin aineiden molekyyli ketjut ovat aktiivisempia. Diffuusion voi saavuttaa myös liuottamalla liimattavaa materiaalia niin, että molekyyli ketjut vapautuvat ja ovat valmiita muodostamaan molekyyli sidoksia liima-aineen molekyylien kanssa. (Ebnesajjad & Landrock 2009,9.)



Kuva 6. Kostumistartuntatekijän vaikutus liiman levittymiseen karhealla pinnalla. A) Liimattavalla materiaalilla on alhainen pintaenergia, minkä takia liima-aine levittyy huonosti. B) Liimattavalla materiaalilla on korkea pintaenergia, minkä takia liima-aine levittyy hyvin.

## Kostumistartuntatekijä

Kostumistartunnassa liima-aineen on tarkoitus levittyä liimattavan materiaalin pinnalla mahdollisimman lähelle sitä. Liima-aineen tulee siis täyttää liimattavan materiaalin karhea ja huokoinen pinta (Kuva 6). Jotta tämä onnistuu, liima-aineella tulee olla liimattavan materiaalin pintaenergiaa alhaisempi pintajännitys. Huonossa kostumistartunnassa liima-aine ei levity liimattavan materiaalin huokoiseen pinta-rakenteeseen ja liimaliitoksen pinta-ala jää pienemmäksi, kuin hyvässä kostumistartunnassa.

Kostumistartuntatekijä vaikuttaa ratkaisevasti van Der Waalsin voimaan, jossa lähekkäin olevat molekyylit vetävät toisiaan puoleensa.

Kostumistartunta on paras metallien liimaliitoksissa ja huonoin alhaisen pintaenergian omaavien muovien liimaliitoksissa. Liimattavan materiaalin pintakäsittelyllä voidaan kasvattaa pintaenergiaa, jonka ansiosta liima-aineen pintajännityksen ja liimattavan materiaalin pintaenergia välinen ero kasvaa ja liima-aine levittyy materiaalin pintaan paremmin. (Ebnesajjad & Landrock 2009, 10.)

### **Kemiallinen tartuntatekijä**

Kemiallinen tartuntatekijä vaikuttaa liimaliitoksen lujuuteen primääri- ja sekundäärivoimilla. Primäärivoimat liimaliitoksessa ovat kovalenttisiä sidoksia tai ionisidoksia. Sekundäärivoimia ovat mm. van Der Waalsin voimat, dipoli-dipoli-sidokset sekä vetysidokset. Kemiallisen tartuntatekijän ero diffuusio tartuntatekijään on, että kemiallisessä tartuntatekijässä syntyy atomitason sidoksia, kun diffuusiosta sidokset tapahtuvat molekyyllitasolla. (Ebnesajjad & Landrock 2009, 11.)

Kovalenttisten sidosten synty on mahdollista, kun liima-aineena ja liimattavana materiaalina käytetään kertamuoveja. Liima-aineen tulee olla ristiinsilloittunut. Joissain tapauksissa pintakäsittelyllä pitää, tai voidaan luoda olosuhteet, jossa näiden aineiden välille syntyy kovalenttinen sidos. (Ebnesajjad & Landrock 2009, 12.)

### **3.5 Tartunnan parantaminen polymeeri-materiaaliin esikäsittelyn avulla**

Yleisimmin polymeerien esikäsittely on pintakäsittelyä. Ideaalitulanteessa materiaalia ei tulisi pintakäsittellä niin, että sen pinnalle syntyy toinen kerros. Liima-aineen ja liimattavan materiaalin väliin syntyvä toinen kerros (tartuntakerros) on usein heikompi, kuin liima-aine tai liimattava materiaali. Pintakäsittelyyn päädytään kuitenkin usein, kun liimaliitoksesta tulisi vielä huonompi ilman pintakäsittelyä. Pintakäsittelyn tarpeeseen vaikuttavat monet muuttujat, eikä käytettyjä menetelmiä voida yleistää kaikille tietyn koostumuksen omaaville liima-aineelle tai liimattaville materiaaleille. Pintakäsittely on osa laajempaa liimaliitoksen suunnitteluprosessia, jossa

määritellään käytettävät materiaalit, liima-aineet, käyttöympäristö, liitokseen vaikuttavat voimat sekä muut rasitukset. (Ebnesajjad & Landrock 2009,35-36.)

Tärkein ero liimaliitoksen kannalta muovien ja metallien välillä on niiden pintaenergia. Muoveilla on selvästi pienempi pintaenergia kuin metalleilla ja tämän takia ne yleisesti liimautuvat huomattavasti ilman erillistä pintakäsittelyä. Huomattavaa on, että pintakäsittelyllä muutetaan vain materiaalin pinnan ominaisuuksia liimaliitoksen parantamiseksi, ja materiaalin yleiset lujuusominaisuudet pysyvät ennallaan. (Ebnesajjad & Landrock 2009,49.)

Liimattavan polymeeri-materiaalin pintakäsittely on joko mekaanista, kemiallista ja fysikaalista. Mekaaninen pintakäsittely tarkoittaa pinnan karhennusta. Tärkeimmät kemialliset pintakäsittelyn muodot ovat pinnan puhdistaminen (rasvan poisto) ja etsaus. Tärkeimmät fysikaaliset pintakäsittelyt ovat korona- sekä liekkikäsittely. (Ebnesajjad & Landrock 2009,50.)

### **Mekaaninen pintakäsittely (pinnan karhennus)**

Pinnan karhennus toteutetaan hiekkapuhalluksella tai pinnan hiomisella. Käsittelyssä materiaalin pinnasta poistuu huonosti kiinni oleva aines, sekä liima-alue kasvaa pinnan muuttuessa tasaisesta karheaksi. Pinnan karhennuksen jälkeen materiaali tulee puhdistaa karhennuksen aikana syntyneestä pölystä ja epäpuhtauksista. (Ebnesajjad & Landrock 2009,51.)

### **Pinnan puhdistus (rasvanpoisto)**

Polymeerimateriaalin pinnalla oleva rasva, vaha ja muut epäpuhtaudet huonontavat adheesiota. Nämä aineet saadaan poistettua joko puhdistusaineella tai liuottimella. Liuotin voi olla ketoni, aseton tai metanoli, riippuen polymeeristä. Liuottimen ei tule heikentää itse polymeerin pintaa rasvanpoistossa, mutta tulee olla tarpeeksi voimakas, jotta se liuottaa kaikki epäpuhtaudet. (Ebnesajjad & Landrock 2009,51.)

## **Etsaus**

Polymeerimateriaalin pinnalle levitetään sille sopiva happo (esimerkiksi kromihappo), joka hapettaa materiaalin pintakerroksen. Hapettunut pintakerros omaa suuremman pintaenergian ja liima levittyy siihen paremmin. (Ebnesajjad & Landrock 2009,49-50.)

## **Koronakäsittely**

Koronakäsittelyssä liimattavan materiaalin pinta hapettuu, kun sen vieressä oleva ilmassa kiihdytetään korkeataajuuksisen ja -jännitteisen vaihtovirran luomassa sähkökentässä. Koronakäsittelyllä hapetetun pintakerroksen pintaenergia kasvaa ja pinnalle syntyy myös funktionaalisia ryhmiä, jotka voivat muodostaa kemiallisia sidoksia liima-aineen kanssa. Polymeerin molekyyliketjujen liikkeen takia funktionaaliset ryhmät pysyvät vapaana kuitenkin vain tietyn aikaa materiaalin pinnalla, jonka jälkeen ne tekevät sidoksia materiaalin sisään päin. Liimaliitos tulee tehdä ennen kuin tämä tapahtuu. Käsittely luo myös karheamman tartuntapinnan liimaliitokselle (Ebnesajjad & Landrock 2009,50-55.)

## **Liekkikäsittely**

Liekkikäsittelyssä liimattavan materiaalin pinta hapettuu, kun sen vieressä tapahtuu happipitoinen puhdas palamisreaktio. Liekkikäsittelyn haittana on sen vaatima tarkkuus. Liian runsas käsittely heikentää liimattavaa materiaalia, ja liian vähäinen käsittely ei hapeta pintaa tarpeeksi. Käsittely nostaa liimattavan materiaalin pintaenergiaa, joka parantaa liiman levittymistä materiaalille. Liekkikäsittely poistaa kontaminoituneen pintakerroksen ja heikot polymeerit pinnasta (Ebnesajjad & Landrock 2009,56.)

## **Tartuntapohjusteet ja -aineet**

Tartuntapohjusteita (eli *primer*) ja -aineita käytetään luomaan kerros liima-aineen ja liimattavan materiaalin välille. Tällä kerroksella tulee olla hyvä tarttuvuus sekä liimattavaan materiaaliin, että liima-aineeseen. Ero näiden

kahden välillä on, että tartuntapohjuste levitetään yleensä paksumpana kerroksena, kun tartunta-aine luo erittäin ohuen – jopa vain molekyyliketjun paksuisen – kalvon kiinnitettävän materiaalin pinnalle. Kummassakin käsittelyssä kerroksen paksuus on kuitenkin niin pieni, ettei paksuus vaikuta liimaliitoksen mekaanisiin ominaisuuksiin. Niiden tunkeutuminen liimattavaan materiaaliin voi olla niin voimakas, että ne muodostavat kemiallisen sidoksen liimattavan materiaalin kanssa. Yleensä tartunta-aine muodostaa kemiallisen sidoksen sekä liimattavan materiaalin että liima-aineen kanssa. Tartunta-aineen kemiallinen tartunta liima-aineeseen ja liimattavaan materiaaliin on yleensä voimakkaampi kuin liima-aineen sisäiset voimat. Toisin kuin muut pintakäsittelyt, tartuntapohjusteen ja –aineen käyttö luo liimaliitokseen orgaanisen kerroksen, joka lisää liimaliitoksen kemiallista kestävyyttä. (Petrie 2000,253-256.)

Tartuntapohjuste on tarkoitus levittää liimattavan materiaalin pinnalle ennen liimaliitoksen asennusta. Sillä on yleensä sama kemiallinen koostumus, kuin liima-aineella. Se omaa kuitenkin pienemmän viskositeetin ja pintaenergian, jotta se levittyy paremmin ja jotta liimattavan materiaalin kostuminen saavuttaa paremman tuloksen. Joidenkin polymeerien kanssa tartuntapohjusteet pehmentävät polymeerin pintaa ja voivat aiheuttaa vahvan molekulaarisen diffuusiosidoksen sen kanssa, tunkeuduttuaan liimattavaan materiaaliin. (Petrie 2000,257-258.)

Tartuntapohjusteiden käytölle on monia eri syitä, niitä tulee kuitenkin käyttää vasta kun muut pintakäsittelyt eivät auta, sillä se on ylimääräinen työvaihe. Liimattavan materiaalin pinta voi omata hyvät tartuntaominaisuudet muun pintakäsittelyn jälkeen (esimerkiksi koronakäsittelyn jälkeen), mutta se pitää suojata tartuntapohjusteella jotteivät saavutetut ominaisuudet katoaisi. Tartuntapohjusteen liima-ainetta alhaisemman pintaenergian ansiosta se levittyy varsinaista liima-ainetta paremmin alhaisen pintaenergian omaavalla liimattavalle materiaalille. Kovettunut tartuntapohjuste omaa alkuperäistä liimattavaa materiaalia korkeamman pintaenergian, mikä mahdollistaa liima-aineen paremman levittymisen sille. Tartuntapohjustetta käytetään myös, kun liimattava materiaali on heikko tai huokoinen tai liimaliitos tarvitsee paremman kemiallisen kestävyuden ympäristön aiheuttaman rasituksen takia. (Petrie 2000,255-256.)

Tartuntapohjusteet on yleensä luotu tietylle liima-aineelle tai liima-aineen ja liimattavan materiaalin luomalle parille. Tartuntapohjuste levitetään yleensä mahdollisimman nopeasti edellisen pintakäsittelyn jälkeen. Ennen liimaliitosta sen tulee olla joko tahmea tai kuiva, tartuntapohjusteesta riippuen. Ennen liima-aineen levitystä tartuntapohjusteen päälle, tartuntapohjusteen liuottimen tulee olla yleensä höyrystynyt pois ja kovettunut osittain. Tartuntapohjuste ei ole yleensä täysin kovettunut, kun liimaliitoksen asennus aloitetaan, vaan se kovettuu samaan aikaan liima-aineen kanssa. (Petrie 2000,256.)

**Tartunta-aineita** voidaan laittaa liima-aineen sekaan tai niitä voidaan käyttää kuin tartuntapohjusteita, eli levittää niitä liimattavan materiaalin pinnalle. Sekoitettuna liima-aineeseen tartunta-aineet nousevat liima-aineen pintaan luoden tartunnan liimattavaan materiaaliin liimaliitoksen asennuksessa. Jos tartunta-aine levitetään liimattavan materiaalin pintaan, kerroksen tulee olla mahdollisimman ohut. Tartunta-aine luo vahvoja kemiallisia kovalenttisia sidoksia liima-aineen ja liimattavan materiaalin kanssa. Tartunta-aine koostuu lyhyistä molekyyliketjuista, joiden toisessa päässä on epäorgaaninen funktionaalinen ryhmä ja toisessa orgaaninen funktionaalinen ryhmä. Orgaanisen funktionaalisen ryhmän tulee olla yhteensopiva liima-aineen kanssa ja epäorgaanisen ryhmän liimattavan materiaalin kanssa. Tartunta-aine luo siis kemiallisen sillan liima-aineen ja liimattavan materiaalin välille. (Petrie 2000,266.)

## 3.6 Liimaliitoksen suunnittelu

### 3.6.1 Yleistä

Liimaliitoksia suunniteltaessa on tärkeää, että liitos on tarkoitettu nimenomaan liimaliitosta varten. Muiden rakenteellisten liitostapojen kopioiminen suoraan liimaliitoksen asentamista varten ei yleensä johda haluttuun lopputulokseen. Muissa rakenteellisissa liitoksissa toimivat pistekuormat eivät sovellu liimaliitoksille, vaan kuormitus tulee jakaa isommalle alueelle.

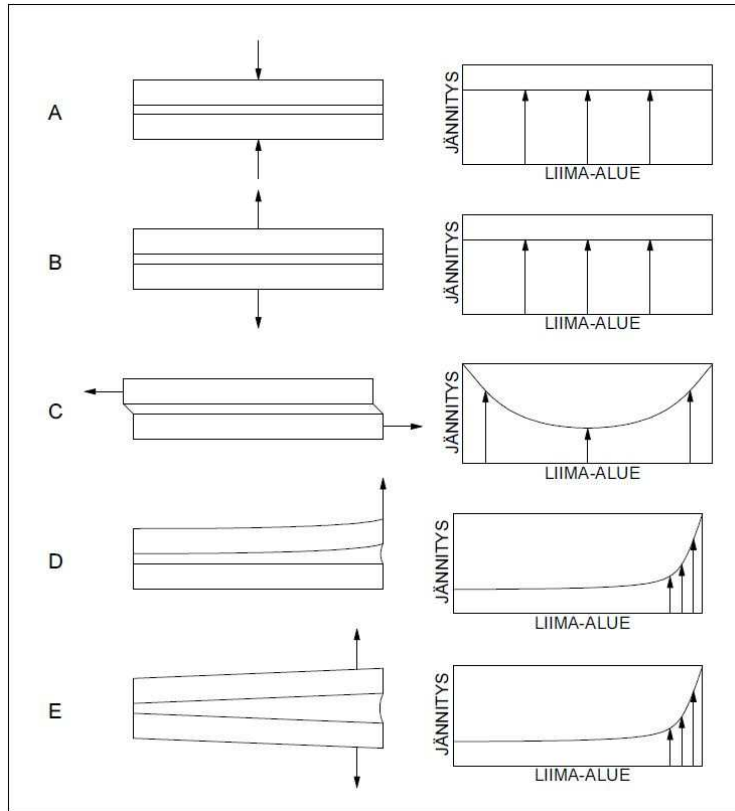
Liimaliitoksen toteutustavan sanelevat yleensä tuotanto-olosuhteet, tuotantokustannukset sekä liimaliitoksen estetiikka. Liimaliitoksen lujuusominaisuuksiin vaikuttaa pääasiassa liima-aineen ja materiaalin lujuusominaisuudet, jäännösjännitys sekä liitosgeometria.

Suunnittelussa tulee välttää pistekuormien syntymistä sekä kuormituksen kohdistumista jatkuvasti samalle alueelle. Jännösjännitys syntyy liima-aineen ja liimattavan materiaalin eri lämpölaajanemiskertoimista, ja siitä saattaa syntyä paikallisia jännityskeskittymiä. Toinen jännösjännityksen aiheuttaja on liima-aineen kutistuminen kovettumisen aikana liuotinten haihtumisen seurauksena. Liuottimen haihtuminen ja liima-aineen kovettumisessa mahdollisesti vapautuvat kaasut luovat myös uusia jännityskeskittymiä liima-aineen sisälle, jos kuplat jäävät liima-aineen sisälle. Liima-ainekseen jäävien ilma- ja haihtumiskuplien syntyyn vaikuttaa ratkaisevasti sen viskositeetti ja paksuus. Kummankin tekijän pienentyminen pienentää niiden syntymisen mahdollisuutta. Jännityskeskittymien arvioiminen on erittäin haasteellista eikä usein onnistu. Jännityskeskittymien poistaminen parantaa liimaliitoksen väsymislujuutta. (Ebnesajjad & Landrock 2009,183.)

### 3.6.2 Liimaliitoksen kuormitus ja liitosgeometria

Liimaliitokseen kohdistuva voima voi olla puristava, vetävä, leikkaava, kuoriva tai halkaiseva (Kuva 7). Liimaliitos kestää parhaiten puristavia, leikkaavia ja vetäviä voimia. Liimaliitos kestää huonosti halkaisevia ja repiviä voimia, ja tämän takia se tulee suunnitella niin, ettei näitä voimia pääse syntymään. Liimaliitokseen kohdistuvat iskut, sekä viruminen ja väsyminen, tulee ottaa myös huomioon suunnittelussa. (Petrie 2000,158-160.)

Teoriassa leikkausjännitys vaikuttaa liimaliitokseen tasaisesti koko liitoksen pinta-alalla. Käytännössä leikkausjännitys aiheuttaa kuitenkin suurimman jännityksen yksinkertaisessa liitoksessa sen päihin, keskikohdan jäädessä pienemmälle rasitukselle. (Petrie 2000: 96-97.) Liimaliitoksen kannalta leikkausjännitys on paras kuormitustapa. Liimaliitos tulisi suunnitella niin, että siihen kohdistuvista jännityksistä suurin on leikkausjännitys. (Ebnesajjad & Landrock 2009,184.)



Kuva 7. Liimaliitokseen eri kuormitustilanteet: A) Puristava B) Vetävä C) Leikkaava D) Repivä E) Halkaiseva

Vetojännitys on samankaltainen leikkausjännitykseen nähden eli jännitys kohdistuu tasaisesti koko liimaliitoksen pinta-alalle. Erona on, että siihen kohdistuu vetävä eikä leikkaava voima. Ongelma kuitenkin on, että kuormitus harvoin toteutuu juuri haluttuun suuntaan. Jos kuormitus ei tapahdu täysin kohtisuoraan liimaliitokseen nähden, jännitys ei kohdistu tasaisesti liimaliitoksen pinta-alaan nähden. Tästä seurauksena jännitystyyppi muuttuu repiväksi tai halkaisevaksi. Jos liimaliitos suunnitellaan vetäviä kuormia varten, tulee varmistaa, että kuormitus tapahtuu kohtisuorasti liimaliitokseen nähden. (Ebnesajjad & Landrock 2009, 185.)

Repimisvoima voi kohdistua liimaliitokseen, kun ainakin toinen liitettävistä materiaalista on taipuisa. Jännitys keskittyy liimaliitoksen toiseen reunaan erittäin pienelle pinta-alalle. Liitos pettää helposti, ellei se ole leveä tai siihen kohdistuva voima todella pieni. Kun liima-aineen kimmokerroin ja liimattavan materiaalin elastisuus kasvaa, tällöin kuormituksen alainen pinta-ala pienenee ja liimaliitokseen kohdistunut jännitys kasvaa. (Ebnesajjad & Landrock 2009, 185, 341-342.)



Halkaisuvoima on samankaltainen kuin repimisvoima. Molemmat liimattavat materiaalit ovat jäykkiä, ja kappaleeseen kohdistuva voima aiheuttaa jännityksen vain toiseen reunaan pienelle pinta-alalle. (Ebnesajjad & Landrock 2009, 185.)

Liima-aineen viruminen tapahtuu, kun liimaliitokseen kohdistuva staattinen kuormitus alkaa muuttaa liima-aineen rakennetta. Viruminen saattaa aiheuttaa liimaliitoksen ennenaikaisen murtuman. Kaikilla liima-aineilla tapahtuu virumista, virumislujudessa on kuitenkin huomattavia eroja eri liima-aineiden välillä. Liimaliitoksen mekaaniset ominaisuudet heikkenevät huomattavasti virumisen ja ympäristön yhteisvaikutuksesta. Liima-aineen kyky ristiinsilloittua vähentää virumista. Liima-aineet, joiden käyttölämpötila on lasiutumislämpötilan ( $T_g$ ) alapuolella, omaavat paremman virumiskeston kun aineet, joiden käyttölämpötila on lasiutumislämpötilan yläpuolella. (Petrie 2000, 160-161.)

Liimaliitoksen väsyminen tarkoittaa jaksollisesta kuormituksesta aiheutuvaa liima-aineen tai liimattavan materiaalin mekaanisten ominaisuuksien heikentymistä, josta saattaa seurata liimaliitoksen murtuminen. Väsymislujuuteen vaikuttaa liima-aine, sen kovettumisolosuhteet, liimaliitoksen liitosgeometria, sen kuormitustapa sekä kuormituksen jaksollisuus. Liimaliitoksilla on yleisesti hyvä väsymiskesto, sillä liimaliitoksessa kuormitus jakautuu suurelle pinta-alalle. Usein liimaliitoksen hajotessa väsymiskuormituksen takia, koheesiomurtuma tapahtuu liimattavassa materiaalissa eikä liima-aineessa. (Petrie 2000, 26, 158.)

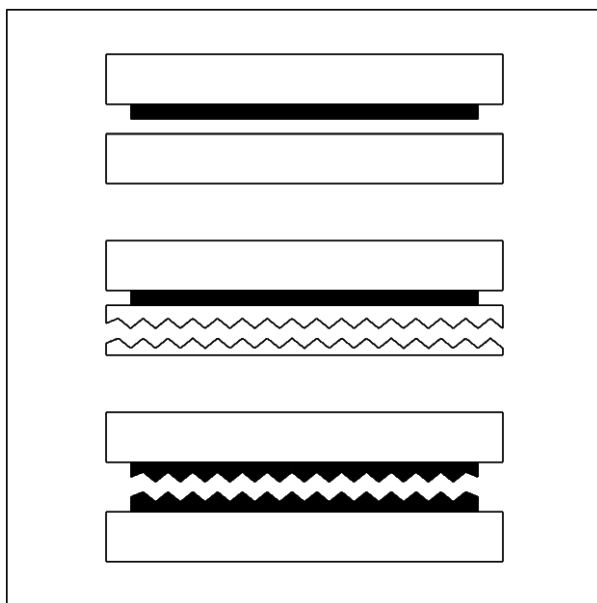
Liima-aineen iskunkestävyydellä tarkoitetaan liima-aineen ominaisuutta absorboida siihen kohdistuvia äkillisiä voimia eli iskuja. Iskunkestävyys on tärkeä ominaisuus, sillä liima-aineet ovat yleisesti herkkiä iskuille muiden polymeerien tavoin. Liima-aineen paksuutta kasvattamalla iskunkestävyys paranee, sillä liima-aineella on kyky absorboida siihen kohdistuva äkillinen voima. (Petrie 2000, 159-160.)

Liima-aineiden lujuusominaisuuksissa on suuria eroja. Epoksit kestävät hyvin suuria veto-, puristus- ja leikkauskuormia jatkuvassa kuormituksessa. Niillä on myös hyvä väsymislujuus. Jäykät liima-aineet, kuten epoksit, ovat hauraita eivätkä kestä repiviä tai halkaisevia kuormia. Elastomeereilla on paremmat lujuusominaisuudet repiviin ja halkaiseviin kuormiin nähden, mutta häviävät

jäykille liima-aineille leikkaus- ja vetokuormituksen kestossa. Elastomeerit kestävät jäykkiä liima-aineta paremmin värinää ja iskuja. (Ebnesajjad & Landrock 2009,186-187.)

### 3.6.3 Liimaliitoksen hajoaminen

Liimaliitoksen murtumistapa luokitellaan yleensä kolmeen eri tyyppiin (Kuva 8). Jos liimaliitoksessa liima-aine hajoaa, kyseessä on koheesiomurtuma. Jos liimattava materiaali murtuu ilman, että liimaliitokselle käy mitään, kyseessä on koheesiomurtuma liimattavassa materiaalissa. Jos liimaliitos hajoaa liima-aineen ja liimattavan materiaalin rajapinnasta niin, että liima-aine ja liimattava materiaali irtoavat toisistaan, kyseessä on adheesiomurtuma. (Petrie 2000,4.)



Kuva 8. Ylhäältä adheesiomurtuma, koheesiomurtuma liimattavassa materiaalissa ja (liima-aineen) koheesiomurtuma

ASTM D5573-standardi määrittelee kuitulujitemuovin liimaliitoksille eri murtumistyyppisiä. Standardi erittelee tarkemmin missä osassa kuitulujitemuovin rakennetta murtuma on tapahtunut, jolloin koheesiomurtuma tarkoittaa pelkästään liima-aineen koheesiomurtumaa. Liimaliitoksen murtuma voi olla yleisesti käsitettyjen adheesio- ja koheesiomurtuman lisäksi (ASTM D5573 2012,1-2):

- *ohut koheesiokerrosmurtuma*, missä liima-aine murtuu pinnasta, liima-ainetta jää hieman kuitulujitemuovin pinnalle
- *kuitukerrosmurtuma*, missä kuitulujitemuovin laminaattikerrokset murtuvat irti toisistaan, eli interlaminaarinen murtuma
- *ohut kuitukerrosmurtuma*, missä kuitulujitemuovin pintalaminaattikerros hajoaa
- *laminaattimurtuma*, missä kuitulujitemuovi murtuu liimaliitoksen ulkopuolella
- *tartuntapohjuste-liima-aine-murtuma*, missä murtuma tapahtuu liima-aineen ja tartuntapohjusteen välillä
- *tartuntapohjuste-laminaatti-murtuma*, missä murtuma tapahtuu tartuntapohjusteen ja laminaatin välillä
- *yhdistelmä-murtuma* (Kuva 9), missä liimaliitoksen murtuminen on tapahtunut vähintään kahdella eri tavalla



Kuva 9. Tyypillinen yhdistelmä-murtuma kuitulujitekankaassa suurennettuna mikroskoopilla.

Liimaliitoksen murtumistyyppien tunnistaminen on tärkeää, jotta voidaan tunnistaa murtumisen syy ja parantaa liimaliitosta. Ideaalitulanteessa liimaliitoksen murtuminen johtuu joko liima-aineen tai liimattavan materiaalin koheesiomurtumasta. Tällöin liimattavan materiaalin ja liima-aineen liitos on vahvempi kuin liima-aineen tai liimattavan materiaalin sisäiset voimat. Liimaliitokselle ominaista murtumatyyppi tärkeämpi tekijä on kuitenkin

liimaliitoksen murtolujuus. Murtumatyyppin tunnistaminen on kuitenkin hyvä työkalu liimaliitoksen analysointiin ja parantamiseen. (Ebnesajjad & Landrock 2009,14,16.)

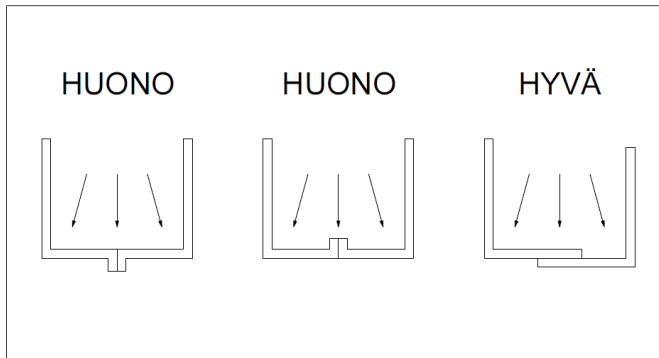
Liimaliitoksen kestämissä kannalta sen suunnittelussa tulee huomioida miten eri voimat kohdistuvat liitokseen ja kuinka usein. Jatkuva kuormitus voi rikkoa liitoksen ennen aikaisesti vaikka sen pitäisi laskennallisesti kestää kuormituksen aiheuttama voima. Suunnittelussa on tärkeää huomioida myös liimaliitokseen kohdistuva kosteus ja lämpö valittaessa liima-ainetta. Liimaliitoksen kyky vastustaa repiviä ja kuorivia voimia on huomattavasti heikompi kuin kyky vastustaa puristavia-,leikkaavia- ja vetäviä voimia. Liimaliitoksen lujuusominaisuuksien arvioimiseksi tietyissä olosuhteissa on aina hyvä tehdä lujuuskokeita, joissa simuloidaan käyttöympäristön ja liimaliitokseen kohdistuvien voimien yhteisvaikutusta liimaliitokseen. (Ebnesajjad & Landrock 2009,17,197.)

#### 3.6.4 Liimaliitoksen parantaminen

Kasvattamalla liimaliitoksen pinta-alaa saadaan vähennetty siihen kohdistuvaa jännitystä. Pinta-alan kasvattamisesta ei kuitenkaan ole hyötyä, ellei liimaliitokseen kohdistuva jännitys kohdistu mahdollisimman suurelle pinta-alalle liimaliitoksen pinta-alasta. Kestävämpi liitos syntyy, kun molempia pystytään kasvattamaan. (Ebnesajjad & Landrock 2009,185.)

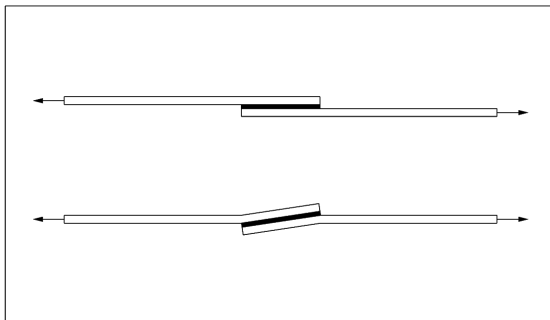
Liimaliitoksen kuormituksen tulee kohdistua liima-aineeseen siitä sunnasta, missä sillä on parhaat lujuusominaisuudet. Liimaliitokseen kohdistuvat halkaisu- ja repimiskuormat tulee minimoida. Yleensä jäykillä liima-aineilla on parempi leikkauslujuus ja elastisilla liima-aineilla parempi repimislujuus. (Petrie 2000,104.)

Yksinkertaisessa liimaliitoksessa liimaliitokseen kohdistuva leikkaava voima aiheuttaa suurimman jännityksen liimaliitoksessa sen päissä. Liimaliitoksen leveyttä kasvattamalla saadaan kasvatettua liitoksen lujuusominaisuuksia. Liimaliitoksen limityksen pituutta kasvattamalla ei synny vastaavaa hyötyä tietyn rajan jälkeen. Liima-aineen vaihto elastisempaan vähentää jännityseroa, kun elastisempi liima-aine jakaa jännityksen suuremmalle alueelle. (Ebnesajjad & Landrock 2009,187-188,197,201.)



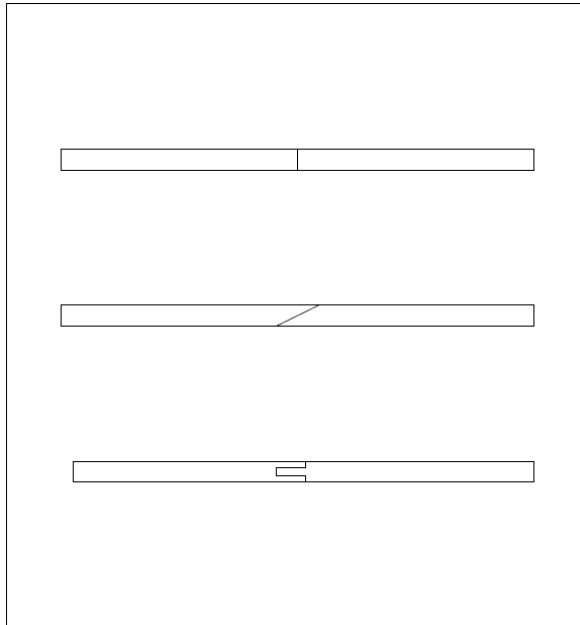
Kuva 10. Liimaliitoksen parantaminen nuolien osoittamat voimat huomioiden. Hyvässä esimerkissä halkaiseva kuormitus on muuttunut leikkaavaksi.

Joustavilla liimattavilla materiaaleilla tulee kiinnittää huomiota liitostyyppiin. Joillain liitostavoilla (esimerkiksi yksinkertainen limiliitos) liimattava materiaali joustaa kuormituksen suuntaan, ja kuormituksen tyyppi muuttuu leikkaavasta repiväksi tai halkaisevaksi (Kuva 11). Liimattavan materiaalin kimmokertoimen ja sen paksuuden kasvaessa joustavuus ja kuormituksen suunnan muutos pienenevät. (Petrie 2000, 102-103.)



Kuva 11. Ylemmässä kappaleessa jäykkä materiaali ja alemmassa joustava materiaali.

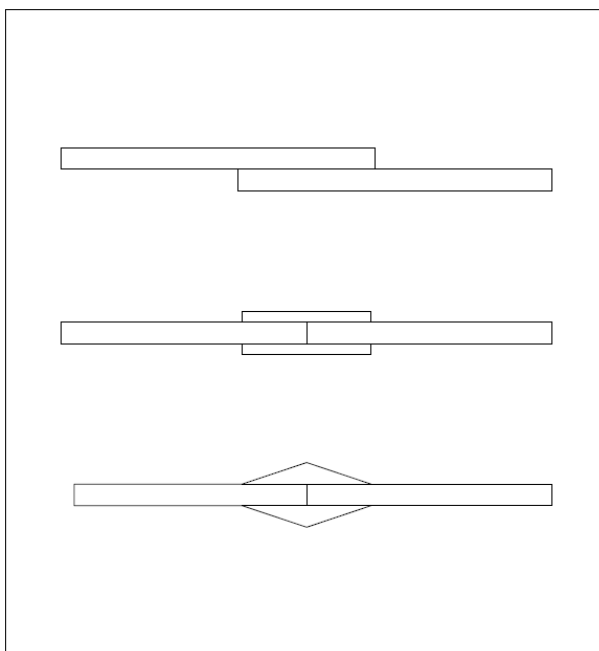
Päittäisliitoksessa kiinnitettävät kappaleet liimataan toisiinsa kiinni päädyistä. Yksinkertainen päittäisliitos ei kestä taivutusta, sillä sitä taivutettaessa vetävä voima muuttuu halkaisevaksi. Yksinkertaisen päittäisliitoksen liimaliitoksen pinta-ala on myös verrattain pieni. Muokkaamalla kiinnitettävien materiaalien päätyjä saadaan kuitenkin hyviä liitoksia kuten viistetty- tai porrastettu päittäisliitos. Näissä halkaisevan voiman syntyminen estetään kiinnitettävän materiaalin muodolla ja liimaliitoksen pinta-ala kasvaa. (Ebnesajjad & Landrock 2009, 186, 189.)



Kuva 12. Eri tyyppisiä päättäisliitoksia, ylhäältä: yksinkertainen-, viistetty- ja porrastettu päättäisliitos.

Limiliitoksissa kiinnitettävät kappaleet liimataan toisiinsa limittäin.

Yksinkertainen limiliitos on helppo ja toimiva liitostapa, siinä syntyy kuitenkin suuret leikkausjännitykset liimaliitoksen reunoihin. Kaksinkertainen limiliitos ja kaksinkertainen viistetty limiliitos jakavat liimaliitoksessa olevan jännityksen tasaisemmin ja lisäävät sen pinta-alaa. (Ebnesajjad & Landrock 2009, 186, 190.)



Kuva 13. Eri tyyppisiä limiliitoksia, ylhäältä: yksinkertainen-, kaksinkertainen- ja kaksinkertainen viistetty limiliitos.

### 3.7 Ponttoneissa ja niiden kiinnityksessä esiintyvät polymeerit

#### **Polyuretaani**

Polyuretaani (PU) voi olla kestopuovi tai kertamuovi. Ponttonin kiinnityksessä käytettävät polyuretaaniliimat ovat yleensä kertamuoveja, kun polyuretaanista valmistetut ponttonit ovat yleensä elastomeerikestopuovia. (Prisacariu 2011,6)

Polyuretaanissa yhdistyy erilaisia molekyyliarakenteita, mikä tekee siitä lohkopolymeerin. Tämä luo polyuretaanille sen fysikaaliset ominaisuudet. Polyuretaanin rakenteen on ryhmittynyt sattumanvaraisessa järjestyksessä isosyanaatti ja polyoli. Isosyanaatti toimii lohkopolymeerissä kovana osana ja polyoli pehmeänä. Kovien ja pehmeiden lohkojen välinen suhde määrittää polyuretaanin fysikaaliset ominaisuudet. (Prisacariu 2011,4.)

Isosyanaatin rakenne määrittää paljon polyuretaanin ominaisuuksia, se voi olla joko aromaattinen tai alifaattinen. Isosyanaatissa on NCO-ryhmä, joka muodostaa polyuretaanin reagoimalla polyolin hydroksyyliiryhmän (-OH) kanssa. Aromaattisessa isosyanaatissa esiintyy reaktiivinen bentseeni-rengas, johon NCO-ryhmä on kiinnittynyt. Alifaattisen isosyanaatin rakenne on stabiilimpi, siinä NCO-ryhmä on isosyanaatin hiiliketjun päässä. (Prisacariu 2011,8-9.)

Suurin osa käytetyistä polyuretaaneissa käytetyistä isosyanaateista on aromaattisia. Aromaattiset isosyanaatit luovat polyuretaanille hyvät lujuusominaisuudet, mutta heikon UV-valon keston. UV-valon kestoa voidaan nostaa stabilointiaineilla. Alifaattisilla isosyanaateilla antavat polyuretaanille luonnostaan paremman UV-valon keston ja kemiallisen keston. (Prisacariu 2011,10.)

Polyuretaanin polyoli on yleensä polyesteri tai polyeetteri. Polyolin vaikutus polyuretaanin ominaisuuksiin on huomattava. Polyesterit antavat polyuretaanille hyvät lujuus-, kulutus-, liuottimen kesto-, hapettumisen kesto- sekä lämpötilan kesto-ominaisuudet. Polyeetterit luovat polyuretaanille paremman keston hydrolyysia vastaan ja kemikaaleja vastaan, kuin polyesterit. (Prisacariu 2011,13.) Hydrolyysi tapahtuu, kun ympäröivä lämpötila ja suhteellinen ilmankosteus ovat korkealla. Tällöin vesi tai kosteus alkavat liuottaa polyuretaanin rakennetta. (Ebnesajjad & Landrock 2009,305.)

Polyesterit ovat alttiimpia biologisten organismien (esimerkiksi homeitiöt) aiheuttamalle hajoamiselle, kun polyeettereillä on huomattavasti parempi vastustuskyky biologisia organismeja vastaan. Usein on vaikea erottaa johtuuko hajoaminen hydrolyysistä vai biologisesta organismista, kun molemmat ovat läsnä samankaltaisessa ympäristössä. (Ebnesajjad & Landrock 2009,333.)

Polyuretaanilla on erinomainen otsonin kesto ja hyvä sään kesto. Se kestää hyvin myös alifaattisia ja kloorattuja hiilivetyjä. Vaikkei polyuretaanilla ole hyvä hydrolyysin kesto, se kestää hyvin vettä eikä turpoa upotuksessa. Polyuretaanilla on heikko UV-valon kesto. Se ei myöskään kestä happoja, ketoneita, estereitä tai eettereitä. Alkoholit turvottaa ja pehmentää polyuretaania. (Schweitzer 2007,502-510.)

### **Neopreeni**

Polykloropreeni, eli Neopreeni (CR), on ensimmäinen kaupallisesti menestynyt synteettinen kumi. Neopreeni on kloorattu butadienikumi, ja omaa pitkälti samat ominaisuudet, kuin luonnonkumi. Sillä on kuitenkin luonnonkumia huomattavasti parempi kemikaalien ja sään kesto. (Tammela 1990,318.) Neopreenia käytetään ponttonin kangasmateriaalissa sekä liimoissa. (Polymarine)

Neopreenilla on erinomainen UV-valon-, sään- ja otsonin-kesto. Neopreeni ei hapetu helposti, joten se omaa hyvät ominaisuudet hapettumisesta johtuvaa vanhenemista vastaan. Neopreenille ei tapahdu merkittäviä muutoksia vaikka se on ulkoilmassa pitkitetyn ajanjakson. (Schweitzer 2007,460.)

Neopreeni ei absorboi vettä ja tämän takia voi olla käytössä täysin upotettuna ilman että sen ominaisuudet muuttuvat. Neopreenia on saatavana umpinaisena- ja avonaisena solurakenteena. Vaikkei Neopreeni itsessään absorboi vettä, avonaista solurakennetta ei tule käyttää kohteissa, joissa se saattaa kastua. (Schweitzer 2007,461.)

Neopreenilla on hyvä kesto liuottimia, vahoja, rasvoja ja öljyjä vastaan. Neopreeni kestää hyvin myös heikkoja happoja, alifaattisia hiilivetyjä (esimerkiksi alkoholit). Neopreenilla on huono kesto ketoneita (esimerkiksi



asetoni) sekä aromaattisia (esimerkiksi tolueeni) ja kloorattuja (esimerkiksi hyönteismyrkyt) hiilivetyjä vastaa. (Schweitzer 2007,460-461.)

## **Hypalon**

Hypalonia, eli kloorisulfonoitua polyeteeniä (CSM), käytetään ponttonin-kangasmateriaalissa päällimmäisenä kerroksena. (Polymarine)

Hypalon on monessa suhteessa samanlainen Neoprenin kanssa. Sillä on kuitenkin paremmat ominaisuudet joissain tapauksissa, kuten parempi kemikaalien ja otsonin kesto. Hypalonilla on hyvä kulumisen kesto eikä sillä tapahdu virumista staattisessa kuormituksessa. Hypalonilla on laaja käyttölämpötila, aina -40°C lämpötilasta 150°C saakka. (Schweitzer 2007,478.)

Hypalonilla on hyvä öljyn ja polttoaineen kesto korkeassa lämpötilassa. Hapettavien aineiden kesto on myös hyvä. Suolaliuoksella tai vedellä ei ole mainittavaa vaikutusta Hypaloniin. (Schweitzer 2007,478.)

Hypalonilla on huono kesto ketoneita ja aldehydejä (esimerkiksi formaldehydi-liima) vastaan. Hypalon ei myöskään kestä alifaattisia, aromaattisia tai kloorattuja hiilivetyjä. Hypalon ei ole täysin ilmatiivis. (Schweitzer 2007,476.)

## **PVC**

PVC, eli polyvinyylidikloridi, on yksi eniten käytetyistä kestopuoveista. Sitä käytetään ponttonimateriaalina. PVC:n koostumusta voidaan muokata helposti eri täyte- ja pehmitin aineilla. Pehmittimillä PVC:sta saadaan kumimainen ja joustava. Vaikka PVC kestää hyvin orgaanisia liuottimia, pehmittimet ja täyteaineet saattavat liueta niihin. (Seppälä 2005,186.)

Korkein käyttölämpötila on yleensä alle 100°. PVC on altis kylmäaurastumiselle alle 0°C lämpötilassa. PVC on altis UV-valon kiihdyttämälle lämpövanhenemiselle. PVC ei ylläpidä palamista (Järvelä et al 1983,57,64.)

PVC omaa hyvän vastustuskyvyn happoja, vahvoja emäksiä, polttoaineita, alkoholeja ja hiilivetyjä vastaan. PVC kestää huonosti aromaattisia ja kloorattuja hiilivetyjä. (Schweitzer 2007,121.)

	TPU	CR	CSM	PVC
<b>Ketonit</b>	0	1	0	0
<b>Aromaattisethiilivedyt</b>	1	1	1	1
<b>Alifaattiset hiilivedyt</b>	3	3	1	2
<b>Hapot</b>	0	1	2	3
<b>Öljyt</b>	2	1	1	3

Taulukko 1. Koottuna eri polymeerien korroosio-ominaisuuksia eri aineita kohtaan. 0 = huono, 3 = erinomainen. (Schweitzer 2007,121,460-461,476-478,502-510.)

### 3.8 Liima-aineiden ominaisuudet ja kiinnitystekniikat

Elastomeeri liima-aineilla on erinomaiset iskunkestävyys- ja venymis-ominaisuudet. Lujuusominaisuudet ovat yleensä heikommat muihin liima-aineisiin verrattuna, mutta niiden repimislujuus on huomattavasti parempi plastisempiin liima-aineisiin nähden. Elastomeeri liima-aineet eivät koskaan sula täysin. Suurin osa elastisista liima-aineista on vesi- tai liuotinpohjaisia, mutta on olemassa myös kemiallisesti kovettuvia elastomeeri liima-aineita. (Ebnesajjad & Landrock 2009,72.)

Elastomeeri liima-aineita käytetään, kun liimaliitos on altis liikkumiselle, iskuille ja epätasaiselle kuormitukselle. Elastomeeri liima-aine sopii kohteisiin, joissa liimattavilla materiaaleilla on eri lämpölaajenemiskerroin ja käyttöympäristön lämpötila on vaihteleva. Elastomeeri liima-aineet ovat kesto- tai kertamuoveja. (Petrie 2000,285.)

#### 3.8.1 Kovettuminen

Liima-aineen kovettuminen voi olla joko kemiallinen- tai fysikaalinen-reaktio. Kovettuminen voi olla myös näiden reaktioiden yhdistelmä. Liima-aineen kovettumismekanismi vaikuttaa liimaliitoksen mekaanisiin ominaisuuksiin eri olosuhteissa. Tuotantotaloudellinen ja –tekninen haaste on haluttujen

mekaanisten ominaisuuksien saavuttaminen rajatuilla resursseilla ja tuotantotekniikoilla. (Petrie 2000,289-291.)

### **Kemiallinen kovettuminen**

Kemiallisesti kovettuvat liima-aineet voivat olla joko yksikomponentti tai multikomponentti liima-aineita. Multikomponentti liima-aineissa on vähintään kaksi eri ainetta, jotka ova omissa astioissansa ennen liimaliitoksen tekoa. Kun liimaus aloitetaan, komponentit sekoitetaan keskenään oikeassa suhteessa. Nostamalla lämpötilaa voidaan yleensä nopeuttaa kovettumisreaktiota, jotkin liima-aineet vaativat korotettua lämpötilaa kovettumisreaktion saavuttamiseksi. (Petrie 2000:291-294.)

Katalyytti kovetteisessa yksikomponentti liima-aineessa on valmiiksi sekoitettuna katalyytti ja kovettaja. Tämä vaatii kuitenkin yleensä liima-aineen säilytyksen kylmässä, sillä polymeroituminen alkaa lämpötilan noustessa. (Petrie 2000,294-295.)

Kosteuskovetteinen yksikomponentti liima-aine kovettuu ympäröivän ilmakosteuden avulla. Ilmankosteus diffusoituu liima-aineeseen ja reagoi sen molekyylien kanssa aiheuttaen polymeroitumisreaktion. Liima-aineen tulee olla kosketuksissa ilman kanssa, jotta reaktio tapahtuu kunnolla. Jos liimattavat materiaalit ovat ilmatiiviitä, ilmankosteus ei pääse diffusoitumaan liima-aineeseen muualta kuin liima-aineen reunoilta, eikä kovettumisreaktio tapahdu kunnolla. Reunoilta kovettunut liima-aines estää ilmankosteuden diffuusion pidemmälle rakenteeseen. Tämän takia on tärkeää, että ilmankosteus pääsee diffusoitumaan ainakin toisessa liimattavista materiaaleista. Kovettumisreaktio kiihtyy ilmakosteuden kasvaessa. (Petrie 2000,295-296.)

### **Fysikaalinen kovettuminen**

Fysikaalisen liima-aineen kovettuminen tapahtuu, kun liima-aineesta haihtuu vesi tai liuotin ja jäljelle jää vain liima-aine. Haihtumalla kovettuvat liima-aineet ovat joko vesi- tai liuotinpohjaisia. Vesi- ja liuotinpohjaisissa liima-aineissa vesi tai liuotin on seostettu liima-aineeseen alentamaan sen viskositeettia ja

parantamaan levittymistä ja liimattavan materiaalin kostumista. Veden tai liuottimen poistuminen liima-aineesta tapahtuu haihtumalla tai diffuusiolla liimattavaan materiaalin. Tämän takia toisen materiaalin on hyvä olla huokoinen käytettäessä usempia kiinnitystekniikoita, kun liima-aine on vesi- tai liuotinpohjainen. Huokoinen liimattava materiaali auttaa veden tai liuottimen diffuusoitumista pois liima-aineesta. (Petrie 2000,300.)

Vesi- ja liuotinpohjaiset liima-aineet voivat luoda liimaliitoksen eri tavoilla. Liima-aine voi kovettua sellaisenaan veden tai liuottimen haihduttu täysin, tai se voi luoda tartuntapinnat osittaisen haihtumisen jälkeen. Vesipohjaisella liima-aineella on liuotinpohjaista liima-ainetta huonompi alkutarttuvuus liimaliitoksen tekovaiheessa. Kovettuneella liuotinpohjaisella liima-aineella on parempi kosteuden kesto, kuin vesipohjaisella liima-aineella. (Petrie 2000,300,313-314.)

### 3.8.2 Liima-aineiden kiinnitystekniikat

Liima-aineen kiinnitystekniikka on riippuvainen käytetystä liima-aineesta. Vesi- ja liuotinpohjaisille liima-aineille pätee seuraavat liimaustekniikat:

#### **Märkäliimaus**

Märkäliimausta käytetään yleensä, kun liimattavien materiaalien pinta on huokoinen tai karhea. Liima levitetään vähintään toiselle liimattavaista pinnoista ja pinnat liitetään yhteen, kun liima on vielä märkä tai tahmea. (Ebnesajjad & Landrock 2009,153.)

#### **Kontaktiliimaus**

Kontaktiliimausmenetelmässä käytetään liuotinpohjaisia liima-aineita. Liimattaville pinnoille levitetään liima-aine, ja kun tarpeeksi suuri määrä liima-aineen liuotinta on haihtunut ja liimapinta muuttunut tahmeaksi, liimattavat pinnat liitetään yhteen ja liima-aineesta rippuen liitokseen kohdistetaan mekaaninen paine. Käytettäessä kontaktiliimaus-menetelmää vähintään

toisen liimattavista pinnoista tulee olla huokoinen tai karhea (Ebnesajjad & Landrock 2009,153,219.)

### **Liutinin reaktiointi**

Liima-aine levitetään liimattaville pinnoille ja annetaan kuivua. Kun liimapinnat ovat kosketuskuivia ne pyyhitään liuottimella, joka reaktivoi liima-aineen ja liimapinnat muuttuvat tahmeaksi. Liimaliitos toteutetaan liittämällä tahmeat liimapinnat yhteen ja liima-aineesta riippuen kohdistamalla liitokseen mekaaninen paine. Liuotinin reaktiointi liimaustekniikassa käytetään liuotinpohjaisia liima-aineita. (Ebnesajjad & Landrock 2009,154.)

### **Lämpöreaktiointi**

Liima-aine levitetään vähintään yhdelle liimattavista pinnoista ja annetaan kuivua. Liima-aineen kuivuttua sitä lämmitetään kunnes se on muuttunut tahmeaksi ja pehmeäksi. Liimattavat pinnat liitetään yhteen, kun liima-aine on vielä lämmin. Liima-aineesta riippuen liitokseen kohdistetaan mekaaninen paine. Liimaliitoksella on hyvät mekaaniset ominaisuudet heti, kun liima-aineen lämpötila on pudonnut käyttölämpötilaan. (Ebnesajjad & Landrock 2009,154.)

## 3.9 Liima-aineiden vaihtoehdot ja niiden ominaisuudet

### **Neopreeni**

Neopreeniliima-aine on elastomeerikestomuovi. Osa Neopreeniliima-aineista voidaan luokitella rakenneliimoiksi. Neopreeniliima-aine voi olla joko vesi- tai liuotinpohjainen. Liuotinpohjainen Neopreeniliima-aine saavuttaa hyvät mekaaniset ominaisuudet nopeasti. Se soveltuu sekä jäykkien, että joustavien materiaalien liittämiseen. Neopreeniliima-aine soveltuu erittäin hyvin Neopreeni-, Hypalon-, polyuretaani- sekä jäykän PVC-materiaalin liimaamiseen. Neopreeniliima-aineella on paras soveltuvuus yleisesti elastomeerien liimaamiseen. (Ebnesajjad & Landrock 2009,74,178.)

Neopreeniliima-aineella on hyvä repimis- ja leikkauslujuus. Metallien välisessä liimaliitoksessa Neopreeniliima-aine kestää jopa 20 – 35 MPa leikkausjännityksen. Kestomuovien liimaliitoksissa Neopreeniliima-aine kestää hieman yli 2 MPa leikkausjännityksen, pinnan hionnalla saavutetaan marginaalinen leikkauslujuuden paraneminen. Kovettunut liima-aine on kestävä liima-aineita jäykempi, mutta elastisempi kuin epoksi- ja fenoli-liima-aineet. Liima-aineelle syntyy vain pieniä muodonmuutoksia äkillisissä kuormitustilanteissa, eli Neopreenilla on hyvä iskunkesto. Neopreeniliima-aine saattaa virua jatkuvassa yli 2 MPa staattisessa kuormituksessa. Jatkuvan kuormituksen tulee olla alle 0,7 MPa. Kovettuneen liima-aineen alin käyttölämpötila on  $-50^{\circ}\text{C}$ . Täydellinen kovettuminen kestää viikkoja. (Petrie 2000,397-398,706.)

Liutin pohjainen Neopreeniliima-aine liimataan yleensä avoin kontaktiliimausmenetelmällä, mutta voidaan toteuttaa myös liutin reaktiointimenetelmällä. Neopreeniliima-aineen kovetumisreaktio perustuu liuottimen haihtumiseen. Liimaliitosta toteutettaessa liima-aineeseen tulee kohdistaa mekaaninen paine. (Petrie 2000,443,750.)

### **Polyuretaani**

Polyuretaaniliima-aine on kerta- tai kestävä muovi elastomeeri. Suurin osa polyuretaaniliima-aineista voidaan luokitella rakenneliimoiksi.

Polyuretaaniliima-ainetta käytetään yleensä muovien, kumien, puun ja metallien liimaukseen. Heikosti ristiin silloittunut polymeerirakenne luo polyuretaaniliima-aineelle sen elastiset piirteet. (Ebnesajjad & Landrock 2009,73-74,79,96.)

Polyuretaaniliima-aineella on erittäin hyvä joustavuus, sekä iskunkesto- ja mekaaniset ominaisuudet. Mekaaniset ominaisuudet paranevat lämpötilan laskiessa  $-200^{\circ}\text{C}$  alle. Liima-aineella on erinomainen repimislujuus, leikkauslujuus ja vetolujuus, ja se kestää jopa 35 MPa leikkausjännityksen metalli-metalli-liitoksissa NTP-olosuhteissa. Polyuretaaniliima-aineella on erittäin hyvä tarttuvuus muoveihin. (Petrie 2000,431,705.)

Polyuretaanin mekaaniset ominaisuudet laskevat huomattavasti lämpötilan noustessa. Polyuretaaniliima-aineella on myös huono hydrolyysin kesto,

vaikka polymeerissä käytettäisiinkin hydrolyysille vastustuskykyisempää polyeetteri-polyolia. Hydrolyysissä liima-aineen iskunkestävyys- ja lujuusominaisuudet heikkenevät, kun kosteus ja vesi liuottavat liima-ainetta liimaliitoksesta. Pahimmassa tapauksessa vesi tunkeutuu liiman läpi liimaliitoksessa adheesion rajapintaan, jossa se syrjäyttää liima-aineen. Tämä on yleisin syy, miksi polyuretaani liima-aineella toteutettu liimaliitos pettää kosteassa ja kuumassa ympäristössä. (Ebnesajjad & Landrock 2009,97,292,305.)

Polyuretaaniliima-aineen joustavuuden ja hyvän liimatartunnan ansiosta se soveltuu hyvin joustavien muovien liimaliitoksiin, missä repimislujuus on erityisen tärkeä. Polyuretaaniliima-aineella liimattaessa polyuretaani muovia, jossa on reaktiivisia funktionaalisia ryhmiä, liimaliitokseen syntyy myös erittäin vahva kemiallinen sidos. (Ebnesajjad & Landrock 2009,12,138.)

**Kertamuovi polyuretaaniliima-aine** voi olla yksi- tai kaksikomponenttinen. Yksikomponentti liima-aine on liuotinpohjainen. Siihen on seostettu valmiiksi katalyytti. Liiman levittämisen jälkeen liuotin haihtuu ja polyuretaani alkaa kovettumaan kemiallisesti ilman kosteuden vaikutuksesta. Yksikomponentti liima-ainetta käytetään yleensä muovimateriaalien kanssa. Liitostekniikka on joko kontaktiliimausmenetelmä tai lämpö reaktiivointimenetelmä. Liitokseen pitää kohdistaa mekaaninen paine. (Petrie 2000,292,454.)

Kaksikomponentti liima-aine voi olla liuotinpohjainen tai ilman liuotinta. Katalyytti ja liima-aine ovat erillisissä astioissa, kemiallinen kovettuminen alkaa kun ne sekoitetaan keskenään. Polymeroitumista voidaan nopeuttaa nostamalla lämpötilaa. Liitostekniikka on yleensä märkäliimausmenetelmä, jolloin liitokseen ei tarvitse kohdistaa mekaanista painetta. (Ebnesajjad & Landrock 2009,83,139.)

**Kestomuovi polyuretaaniliima-aine** on yleisimmin liuotinpohjainen ja yksikomponenttinen. Liima-aineen hyöty on hyvien mekaanisten ominaisuuksien saavuttaminen heti liimaliitoksen asentamisen jälkeen. Polyuretaanissa käytetään useimmiten polyesteri-polyolia, jolla on alhainen sulamispiste. Tämä aiheuttaa kestomuovi polyuretaani liima-aineelle alhaisen käyttölämpötilan, polyesteri-polyolin sulaminen vaikuttaa polyuretaanin mekaanisiin ominaisuuksiin. (Chaundbury 2002,793-794.)

Kestomuovi polyuretaaniliima-ainetta käytetään lämpö reaktiointimenetelmällä, jolloin liuottimen annetaan haihtua ensin. Tämän jälkeen liima-ainetta lämmitetään kunnes se muuttuu tahmeaksi ja liimattavat pinnat liitetään yhteen. Liima-aineen rakenne kiteytyy jäähtyttyään. (Chaundbury 2002,793.)

### 3.10 Ponttonin materiaalivaihtoehdot ja niiden ominaisuudet

#### **Standardin asettamat vaatimukset ponttonimateriaaleille**

Standardi määrittää, että kaikkien ponttonissa käytettyjen materiaalien tulee olla täysin toimintakuntoisia  $-20^{\circ}\text{C}$  ja  $+60^{\circ}\text{C}$  välillä. Materiaalien tulee läpäistä seuraavat kokeet: nesteupotuskoe, otsonointikoe, kylmäaurastumiskoe ja repimiskoe. Nesteupotus- ja otsonointikokeissa materiaaleista altistetaan kokeille se puoli, joka on asennetussa veneessä ulospäin. (ISO 6185-4 2011, 6.)

Nesteupotuskokeessa mitataan materiaalien öljyn (IRM 901, standardi öljy) ja suolaveden (3%-massa suolakonsentraatio) absorptio-ominaisuuksia.

Nesteupotuskokeessa materiaalit upotetaan öljyyn (kesto  $22 \pm 0,25$  tuntia) ja 3% vahvaan suolaveteen (kesto yli 336 tuntia). Kokeet tehdään  $70 \pm 2^{\circ}\text{C}$  lämpötilassa. Koe on hyväksytty jos koemateriaalien massa ei ole kasvanut yli  $100 \text{ g/m}^2$ . (ISO 6185-4 2011,7.)

Otsonointikokeessa materiaalit altistetaan otsonille ( $0,5 \times 10^{-6}$  tilavuusosuus) 72 tunnin ajan  $30 \pm 2^{\circ}\text{C}$  lämpötilassa. Materiaalien tulee olla taivutettu niin, että taipuman halkaisija on 5-kertainen materiaalin paksuuteen nähden. Koe on hyväksytty, jos materiaalissa ei näy halkeamia 10-kertaisessa suurennoksessa. (ISO 3011 1997)

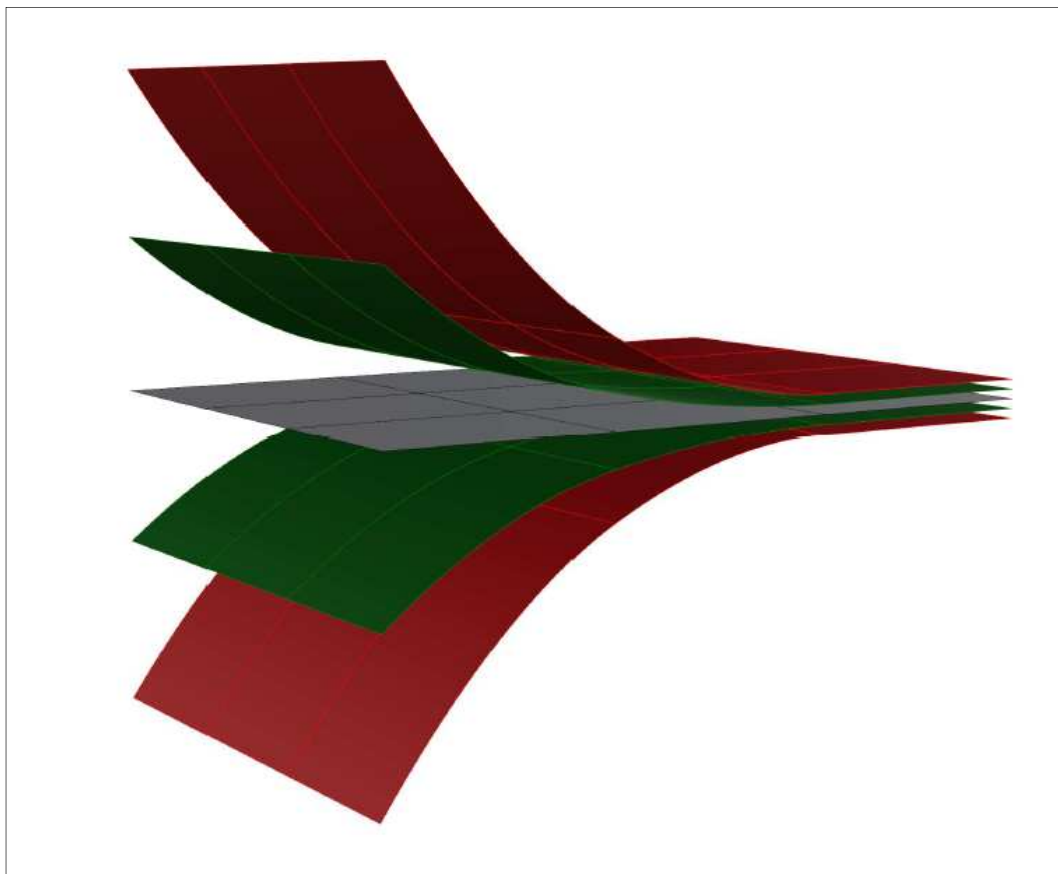
Ponttonin kankaalle suoritetaan repimiskoe ISO-2411 standardin mukaan. Repimiskokeella mitataan kankaan lujite- ja kulutuskerrosten välinen lujuus. Repimiskokeesta saadun minimiarvon tulee olla vähintään 40 N / 25 mm, jotta ponttonimateriaali täyttää standardin. ISO 6185-standardi sallii poikkeuksellisesti 25 mm testipalojen käytön kokeessa tarpeen vaatiessa (ISO 6185-4 2011,7.)



ISO 2411-standardin repimiskokeessa valmistetaan 50mm leveitä koekappaleita kymmenen kappaletta. Koekappaleita vedetään vastakkaisiin suuntiin (T-repimiskoe) ja jokaisesta kokeesta määrittävä tulos on keskimääräinen repimisvastus (eli repimisvoima). Lopuksi kymmenen koekappaleen sarjan tuloksista lasketaan aritmaattinen keskiarvo joka määrittää kankaan kerrosten välisen kuorimisvastuksen. (ISO 2411 2000.)

### Hypalon-Neopreeni

Hypalon-Neopreeni-kankaassa (*Hypalon over Neoprene*) ulkopuolinen kerros on hypalonia, jonka jälkeen tulee vähintään kaksi kerrosta Neopreenia, joiden välissä on lujitekerros (Kuva 14). Lujitekerros on yleensä polyesterikudosta. Eri kerrokset on liitetty yhteen kerrosten välisillä liimaliitoksilla. (Polymarine)



Kuva 14. Hypalon-Neopreeni-kankaan rakenne: uloimpana Hypalon-kerros (punainen) jonka jälkeen tulee Neopreeni-kerros (vihreä). Kankaan keskellä lujitekerros (harmaa).

Hypalon on kankaassa uloimpana kerroksena, sillä se omaa Neopreenia paremmat ominaisuudet säätä ja lämpövanhenemista vastaan. Hypalon ei ole täysin ilmatiivis, minkä takia kankaassa tulee käyttää myös Neopreenia. (Philip A. Schweitzer 2006,110.) Neopreenin huono puoli ponttonimateriaalina on sen taipumus kiteytymiseen jatkuvassa staattisessa kuormituksessa, mikä aiheuttaa materiaalin kovettumisen. Neopreeni viruu, jos jatkuva staattinen kuormitus on yli 2 MPa. (Järvelä et al 1983,287-288.)

Hypalon-Neopreeni-kangasta ei voi muovata lämmön avulla, ja tästä johtuen kankaat joudutaan kiinnittämään toisiinsa liimaliitoksilla. Hypalon- ja Neopreenielastomeereilla on muita elastomeereja korkeampi pintaenergia, ja tästä johtuen saavutetaan parempi materiaalin kostuminen liima-ainetta levitettäessä. Hypalon-Neopreeni-kankaan kanssa käytettäväksi liima-aineeksi soveltuu parhaiten Neopreeniliima-aine. (Petrie 2000,667,706.)

Neopreenimateriaalin pintakäsittely ennen liimaamista: (Petrie 2000:846.)

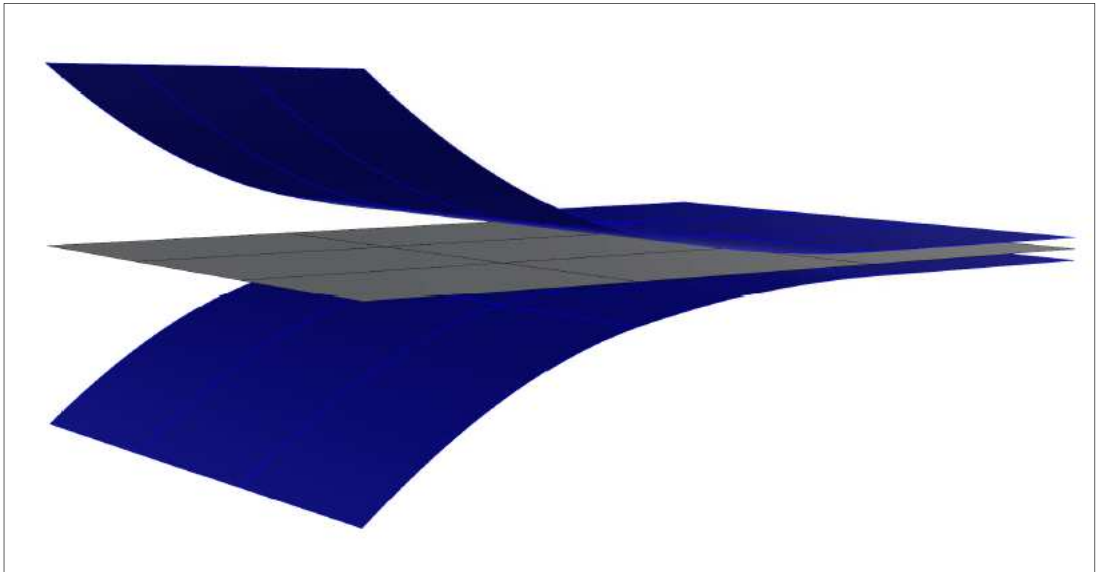
- materiaalin hionta P280 karkeudella
- materiaalin pyyhkiminen liuottimella (tolueeni, metanoli, isopropanoli) 5-10 minuutin ajan
- materiaalin liotus rikkihapossa (96% konsentraatio) 2-10 minuutin ajaksi
- materiaalin huuhteleminen kylmällä ja kuumalla vedellä
- materiaalin huuhteleminen tislattulla vedellä
- rikkihapon jäämien neutralisointi liottamalla materiaalia ammoniakki hydroksidi-liuoksessa (10% konsentraatio) 10 minuutin ajan

## **Polyuretaani**

Polyuretaani ponttonikankaassa kahden polyuretaanikerroksen välissä on lujitekerros, polyuretaanimateriaali on sulatettu yhteen lujitekerroksen jäädessä väliin (Kuva 15). Lujitekerros on yleensä polyesterikudosta. Käytetty polyuretaani on ns.TPE-polyuretaani (*thermo plastic elastomer*), eli kestopuovipolyuretaanielastomeeri. TPE-polyuretaani muodostaa vahvan rakenteen silloittamalla ristiin, synteettisten kertamuovikumien tapaan. Merkittävä ero kuitenkin on TPE-polyuretaanin kyky uudelleen silloittua sen jälkeen, kun silloitus on purettu lämpötilan avulla jo kertaalleen. Tämä mahdollistaa TPE-polyuretaanin uudelleen muokkaamisen lämmön avulla (esimerkiksi hitsaaminen tai prässäminen) ja tekee siitä kestopuovielastomeerin. TPE-polyuretaani-kankaasta valmistetut ponttonit

voidaan valmistaa yhtenäiseksi saumattomaksi kappaleeksi hitsaamalla. Hitsaaminen mahdollistaa korkean automaatioasteen ponttonien valmistuksessa. (Prisacariu 2011,6.)(Vanguard)

Polyuretaani kankaalle parhaiten soveltuva liima-aine on elastinen polyuretaani. Muita soveltuvia liima-aineita ovat Neopreeni- ja epoksipohjaiset liima-aineet. (Ebnesajjad & Landrock 2009,176.)



Kuva 15. Polyuretaanikankaan rakenne: polyuretaanikerrokset (sininen) ovat sulatettu yhteen, välissä lujitekerros (harmaa)

Elastisen polyuretaanimateriaalin pintakäsittely ennen liimaamista: (Petrie 2000,848.)

- materiaalin hionta P280 karkeudella
- materiaalin pyyhkiminen liuottimella (metanoli)
- tarvittaessa materiaalin käsittely kloorisilaani-pohjaisella tartunta-aineella

## PVC

PVC-kangas on samantyyppinen polyuretaanikankaan kanssa. Kankaan rakenteessa keskellä on polyesteri tai polyamidi lujitekerros, jonka ympärille on sulatettu PVC-materiaali. PVC:n ollessa kestopuovi, sitä voidaan muovata lämmön avulla. Kuten polyuretaanikankaasta valmistettu ponttoni, kestopuovi

PVC-kankaasta valmistettu ponttoni voi olla yhtenäinen, yhdeksi hitsattu kappale. (Polymarine)

PVC-kankaan liimaaminen on haasteellista sen pehmittimien takia. Pehmittimien diffusoituminen PVC-kankaasta liima-aineeseen muuttaa PVC-kankaan ominaisuuksia huomattavasti. Nitrilikumipohjaiset liima-aineet soveltuvat parhaiten PVC:lle. Muita hyviä liima-aineita ovat polyuretaani- sekä Neopreenipohjaiset liima-aineet. Eri PVC-laaduissa käytetään eri pehmentimiä mikä luo myös haasteen, sillä eri pehmentimet diffusoituvat eri liima-aineisiin. Jo 5% pehmentimen määrä PVC:ssa estää jäykkien liima-aineiden (kuten epoksi) käytön. Suurin osa elastisista liima-aineista soveltuu PVC:n liimaamiseen oikean pintakäsittelyn jälkeen. (Ebnesajjad & Landrock 2009:174.)

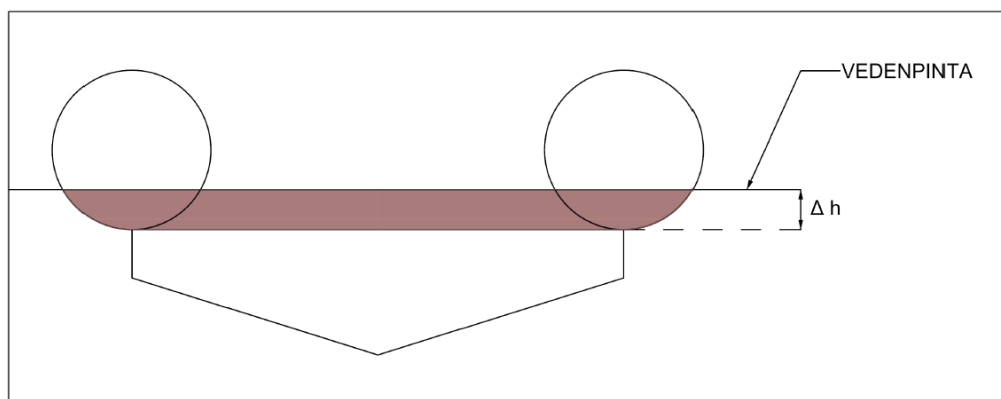
PVC-materiaalin pintakäsittely ennen liimaamista: (Petrie 2000,843.)

- materiaalin hionta P100 karkeudella
- materiaalin pyyhkiminen liuottimella (MEK)
- tarvittaessa materiaalin käsittely nitrili-fenoli-pohjaisella tartuntapohjusteella

### 3.11 Liimaliitokseen vaikuttavat ulkoiset voimat

#### 3.11.1 Hydrostaattiset voimat

Ponttoniin vaikuttava hydrostaattinen kuormitus aiheutuu vain, kun ponttoni on osittain tai kokonaan veden alla. Hydrostaattisen voiman voi laskea, kun tiedetään ponttonin alapinnan ja vedenpinnan välissä oleva tilavuus (Kuva 16).



Kuva 16. Vedenpinnan ja ponttonin alapinnan välinen etäisyys  $\Delta h$ , ruskealla väritettynä veden pinnan ja ponttonin alapinnan välinen pinta-ala.

### Standardin määrittämä koe hydrostaattisen kuormituksen kestoon

Standardissa on määritelty koe, jolla kokeillaan kestäkö ponttoni-runko-liitos veden aiheuttaman hydrostaattisen voiman, eli ponttoniin kohdistuvan nosteen.

Kokeessa valmistetaan 50mm leveä testipala, jossa ponttonimateriaali on kiinnitetty rungon materiaaliin, samalla tavalla ja samoilla materiaalivahvuuksilla kuin varsinaisessa veneessä. Jos veneessä on käytetty useampaa kuin yhtä kiinnitysmenetelmää, on kaikki menetelmät testattava erikseen. Testipalaa rasitetaan staattisella kuormalla yli 4 tunnin ajan 60°C lämpötilassa.

Kuorma ( $F_s$ ) lasketaan seuraavan kaavan mukaan:

$$F_s = 0,375 \times d \times (1,14 \times p + 0,14) \quad (1)$$

jossa	$F_s$	staattinen kuorma	[N]
	$d$	ponttonin maksimihalkaisija	[mm]
	$p$	ponttonin paine	[bar]

Jotta koe katsotaan hyväksytyksi, tulee ponttoni-runko-liitoksen kestää ilman, että liitos pettää tai liitokseen tulee visuaalisesti havaittavia fyysisiä muodonmuutoksia. (ISO 6185-4 2011,7)

#### 3.11.2 Hydrodynaamiset voimat

Ponttoni-runko-liimaliitokseen kohdistuvat hydrodynaamiset voimat voidaan laskea veneen rakennemitoitus standardin, ISO 12215-5 mukaan. Tällöin ponttoni ajatellaan omaksi rungoksi, jolloin voidaan laskea siihen kohdistuva peruspaine liukutilassa. Peruspaine on suurin laskennallinen pohjaan kohdistuva paine standardin mukaan, ja sitä sovelletaan sellaisenaan ponttonin paineen laskentaan.

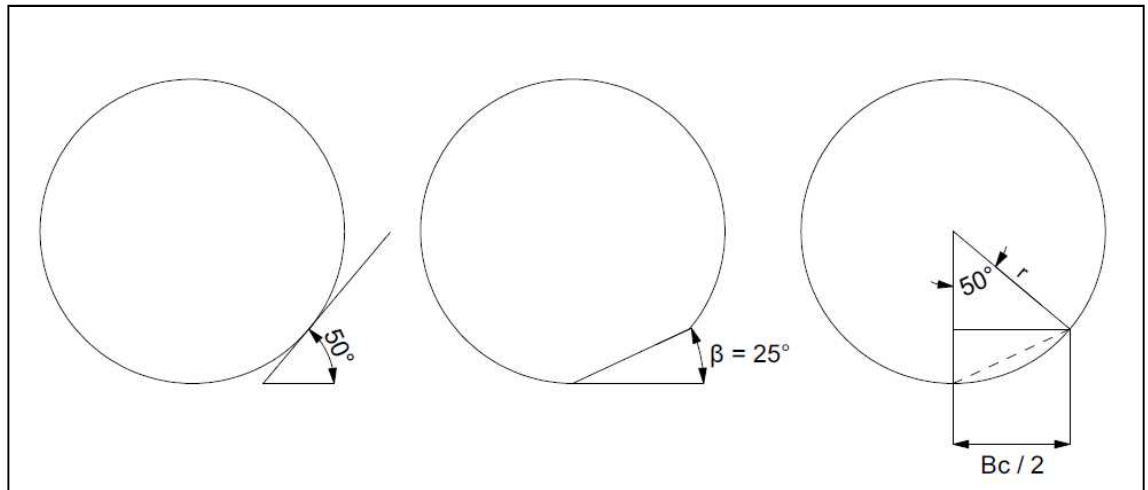
### Ponttonin laskennallinen leveys

Palteiden välinen etäisyys lasketaan standardin mukaan pyöreällä pohjalla siitä kohdasta, johon  $50^\circ$  kulmassa vaakasuorasta linjasta osuu tangentti. Tällöin pohjan v-kulmaksi ( $\beta$ ) tulee  $25^\circ$ . Tämän takia on järkevämpää puhua ponttonin laskennallisesta leveydestä, kuin palteiden välisestä etäisyydestä. (ISO 12215-5 2008,7.)

Palteen ja ponttonin keskikohdan välinen etäisyys:

$$\frac{B_C}{2} = \sin 50^\circ \times r \quad (2)$$

jossa	$B_C$	ponttonin laskennallinen leveys	[mm]
	$r$	ponttonin säde	[mm]



Kuva 17. Laskennallisen leveyden määrittäminen, kun tiedetään ponttonin halkaisija tai säde.

### Peruspaineen laskenta

Dynaamiseen peruspaineen laskemiseen tulee olla selvillä: kuormatun veneen massa ( $m_{LDC}$ ), ponttonin vesilinjan pituus ( $L_{WL}$ ), palteiden välinen etäisyys ( $B_C$ ), suunnittelukategoria sekä dynaaminen kuormituskerroin, eli kiihtyvyyys ( $\eta_{CG}$ ).

Kun vene suunnitellaan A-kategoriaan ja käytetään maksimikiihtyvyyttä ( $\eta_{CG} = 7$ ), peruspaine lasketaan seuraavasti: (ISO 12215-5 2008,15.)

$$p = \frac{0,8 \times m_{LDC}}{L_{WL} \times B_C} \quad (3)$$

jossa	$p$	dynaaminen peruspaine	[Pa]
	$m_{LDC}$	veneeseen kuormattu massa	[kg]
	$L_{WL}$	ponttonin vesilinjan pituus	[m]
	$B_C$	ponttonin laskennallinen leveys	[m]

## 4 LIIMALIITOKSEN JA PONTTONIN MEKAANISIIN OMINAISUUKSIIN VAIKUTTAVAT OLOSUHTEET

### 4.1 Tuotantoympäristö

Veneiden teollinen tuotanto luo haasteellisen ympäristön onnistuneen liimaliitoksen luomiseksi. Suurimmat haasteet Suomessa aiheutuvat pölystä, kemikaaleista ja tuotantoaikataulusta.

Teollisessa tuotannossa syntyvä pöly aiheuttaa kontaminaation liima-aineen pinnalle, kun liimattavia pintoja ei ole vielä liitetty yhteen. Pitkittänyt liitoksen aukioloaika nostaa kontaminaation riskiä. Primer-kerroksen tarve saattaa pitkittää huomattavasti liitoksen aukioloaikaa, mukaan tulee uusi työvaihe sekä primer-kerroksen kovettumis- tai kuivumisaika. Liimaliitoksen ollessa auki, joidenkin työvaiheiden välissä pinta voidaan puhdistaa oikealla liuottimella tai puhdistusaineella mikä puhdistaa myös pölyn pois pinnoilta.

Teollisessa tuotannossa käytettävät liuottimet saattavat myös heikentää liimaliitosta. Vaikkei varsinaisessa liimausprosessissa käytettäisi vääriä liuottimia, muualla käytettävien liuotinten höyryt saattavat vaikuttaa negatiivisesti liimaliitoksen onnistumiseen. Venetuotannossa käytettyjen irrotusaineiden ja vahojen jäämät lujitemuovipinnoilla heikentävät oleellisesti liimaliitosta.

Lämpötila ja ilmankosteus vaikuttavat oleellisesti liima-aineen kovettumiseen ja tartuntaan. Liima-aineilla on määritelty yleensä korkein ja alin sallittu ilmansuhteellinen kosteus sekä asennuslämpötila. Määriteltyjen raja-arvojen ulkopuolella liima-aine ei saavuta haluttuja ominaisuuksia ja asennus saattaa epäonnistua. Yleensä suurin sallittu suhteellinen ilmankosteus ei aiheuta ongelmia Suomen ilmastossa, mutta ongelmia ilmaantuu trooppisissa maissa. Myös veneen ponttonin huolto ulkona kesällä Suomessa voi olla haasteellista jos aurinko lämmittää ponttonin pintaa.

Veneen tuotantoaikataulu saattaa myös asettaa haasteita liimaliitoksen onnistumiselle. Liiman täydelliseen kovettumiseen vaadittu aika on yleensä pitkä, ja veneen siirtely ennen täydellistä kovettumista voi rasittaa liimaliitosta. Liima-aineesta riippuen, liimaliitos tosin saattaa saavuttaa hyvän lujuuden jo päivän kovettumisen jälkeen.

## 4.2 Käyttöympäristö

### **Säänkesto**

Sään kestolla tarkoitetaan yleensä UV-valon ja otsonin vaikutusta materiaaleihin. Otsonia syntyy sähkölaitteiden sähköpurkausten yhteydessä, sekä yläilmakehässä, josta sitä kulkee pieniä määriä myös maan pinnalle. Otsoni heikentää materiaaleja, joiden ketjut sisältävät kaksoissidoksia. Otsonivauriot voi havaita jännityksen alaisessa olevassa materiaalissa pieninä murtumina kohtisuorassa jännityksen suuntaa vastaan. UV-valo toimii lämpövanhenemisessä katalysaattorina (Kurri et al 2002,60.)

### **Vesi (kemiallinen)**

Veden absorptio vaikuttaa negatiivisesti joidenkin polymeerien lujuusominaisuuksiin pienentäen vetolujuutta ja kimmomoduulia. Veden absorptio tapahtuu yleensä huokoisilla muoveilla (solumuovi) sekä kestopuoveilla. (Kurri et al 2002,61.)



## **Lämpötila**

Lämpötila vaikuttaa ratkaisevasti liima-aineen ja ponttonin ominaisuuksiin. Riski fysikaalisen rakenteen tai kemiallisen koostumuksen muuttumisesta kasvaa altistumisajan pidetessä. Useimmille muoveille on määritelty pitkä- ja lyhytaikainen korkein käyttölämpötila. Valmistajan ilmoittamaan käyttölämpötilaan tulee kuitenkin suhtautua varauksella, sillä muovien lujuusominaisuudet saattavat muuttua radikaalisti, vaikka rakenne sinänsä vaikuttaa ehjältä. Muiden tekijöiden – kuten kemikaalien, kaasujen ja kosteuden – yhteisvaikutusta muovin fysikaalisiin ominaisuuksiin ei aina tiedetä. (Kurri et al 2002,59-60.)

Kertamuoveissa molekyylirakenne hajoaa, kun ylitetään materiaalin korkein käyttölämpötila. Kestomuovit eivät hajoa äkisti kuten kertamuovit, mutta lujuusominaisuudet saattavat pudota jopa viidesosaan normaalista, kun lämpötila nousee korkeimpaan käyttölämpötilaan. (Kurri et al 2002:59-60.)

Lämpötilan laskiessa polymeerien molekyyliketjujen liikkuvuus vähenee ja ne haurastuvat. Haurastuminen määrittää polymeerin alimman käyttölämpötilan. (Kurri et al 2002,60.)

## **Lämpövanheneminen**

Ponttonimateriaali ja liima-aine ovat alttiita peruuttamattomalle vanhenemisprosessille, joka kiihtyy lämpötilan noustessa. Hapettuminen tapahtuu kemiallisesti ympäröivässä ilmassa (hapessa). Hapettuminen voi joko pehmentää tai kovettaa materiaalia. Nämä ilmiöt syntyvät molekyylitason muutoksista materiaalissa. Pehmenemisessä materiaalin molekyyliketjut hajoavat, kun taas materiaalin kovettuessa materiaali verkoutuu kaksoissidoksilla. (Kurri et al 2002,60.)

Kun lämpövanhenemiseen vaikuttaa materiaalin hapensaanti, sitä voidaan hidastaa erilaisilla toimenpiteillä. Paksuntamalla materiaalia (pienentämällä pinta-alaa tilavuusyksikkö kohtaan) voidaan vähentää hapettumista. Muita keinoja estää hapensaanti on mm. upottaminen öljyyn tai veteen. UV-valo voimistaa hapettumisreaktiota. Myös eräät metallit, kuten kupari edesauttavat hapettumista. (Järvelä et al 1983,317.)

## Turpoaminen

Orgaanisten liuotinten diffuusoituminen kumikangasmateriaaleihin aiheuttaa materiaalin turpoamista, mikä on pysyvä fysikaalinen muodonmuutos.

Turpoaminen saattaa heikentää materiaalin mekaanisia ominaisuuksia.

Kumisekoitteissa materiaalissa turpoaminen tapahtuu elastomeeriverkossa, eikä täyteaineissa. Täyteaineet saattavat tosin ekstrahoitua, eli liueta pois.

Turpoaminen saattaa siis aiheuttaa lopulta kappaleen kutistumisen, jos ekstrahoituminen on voimakkaampaa kuin turpoaminen. (Järvelä et al 1983,320.)

Liuottavan orgaanisen aineen (esimerkiksi öljy) lämpötila vaikuttaa suuresti turpoamiseen. Turpoaminen on voimakkainta hiilivetytyyppisillä kumeilla, kuten Neopreenilla. (Järvelä et al 1983,321.)

	PU	CR	CSM
Otsoni, sää	3	2	3
Hydrolyysi	0	3	2
Hapetus	0	3	2
Öljyt	2	1	1
Vetolujuus	3	2	1
Repimislujuus	3	3	1
Kulumiskestävyys	3	3	2

Taulukko 2. Kumipolymeerien ominaisuuksien vertailu. 0 = huono, 3 = erinomainen) (Järvelä et al 1983,314,322.)

## Mekaaninen rasitus

Ponttonimateriaaliin ja liimaliitokseen muodostuvia mekaanisen rasituksen muotoja ovat väsyminen, viruminen sekä kuluminen.

Ponttonimateriaalin väsyminen voi ilmetä hiushalkeamina, delaminoitumisena tai kemiallisena hajoamisena. Väsyminen saattaa synnyttää hiushalkeamia kumimatriisin pintaan, joiden kehittymistä edesauttaa hapettuminen (otsoni tai lämpövanheneminen). Delaminoitumisessa ponttonimateriaalin lujitekerros irtaana kumimatriisista väsymisen seurauksena. Väsyminen saattaa ilmetä myös kemiallisena hajoamisena, kun ponttonimateriaali hajoaa vaimenemisen aiheuttamasta lämpötilan noususta. (Järvelä et al 1983,310-311.)

Ponttonimateriaalin kulumisen saattaa olla naarmuttavaa, lastuavaa tai pyrolyyttistä. Kulumisen saattaa aiheuttaa myös väsymiskulumista, kun jännitykset ovat niin pieniä etteivät ne sinällänsä aiheuta muodonmuutoksia, mutta pitkän toistuvan kulutuksen jälkeen materiaalin pinta väsyy ja hajoaa, jolloin pintakerros irtoaa pieninä hiukkasina. Lastuava kulumisen aiheutuu suurista kitkavoimista, jolloin pintakerroksesta irtoaa hiukkasia lastuina ja pinnalle syntyy aaltokuvio. Pyrolyyttisessä kulumisessa materiaali hajoaa lämpötilan nousun takia, eli materiaali pyrolisoituu. Materiaalin pyrolisoituminen aiheutuu, kun pintojen välinen liukunopeus ja kitkatyö ovat suuret. (Järvelä et al 1983,311-312.)

## 5 LIIMALIITOKSEN TESTIMENETELMÄT

Liimaliitoksen testimenetelmän valintaan vaikuttavat liimaliitokseen kohdistuvat kuormituksen. Liimaliitokseen voi kohdistua veto-, puristus-, leikkaus-, repimis- tai halkaisujännitys. Jos kuormitus on jatkuvaa tai äkillistä, tulee testata liimaliitoksen iskunkestävyys ja virumisenkesto. Liimaliitoksen käyttöympäristö (esimerkiksi käyttölämpötila ja UV-valo) vaikuttaa myös käytettyihin testimenetelmiin. (Ebnesajjad & Landrock 2009,399.)

### 5.1 Testimenetelmät rasituksen mukaan

#### 5.1.1 Vetojännitys

ASTM D897 on yleisesti käytetty testimenetelmä liimaliitoksen vetojännityksen mittaamiseksi. Vetojännityksen mittaaminen on yksi käytetyimmistä menetelmistä, vaikka harvoin liimaliitokseen kohdistuu pelkästään vetojännitys. Liima-aineen vetojännityksen kesto on yleensä huomattavasti pienempi, kuin liimattavan materiaalin (Ebnesajjad & Landrock 2009,399-340.)

#### 5.1.2 Leikkausjännitys

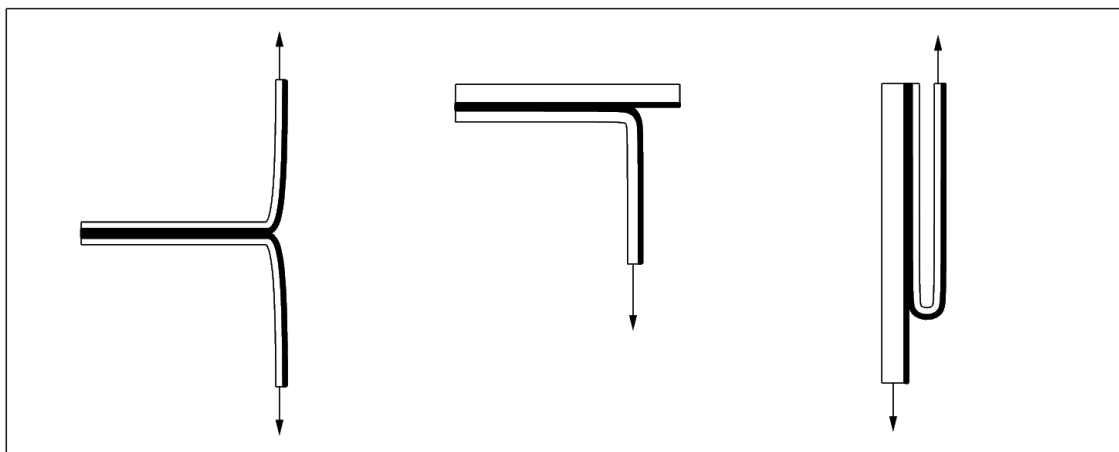
Leikkausjännitystä mitataan yleensä yksinkertaisesta liimaliitoksesta. Vaikei siihen kohdistuva leikkausjännitys ole puhdas leikkausjännitys, testit ovat

yleisiä niiden helppouden ja käytännöllisyyden vuoksi. Kun jännitys ei jakaannu yleensä tasaisesti, ja vaikka saaduista tuloksista voidaan laskea keskimääräinen jännitys, todellinen jännitys liimaliitoksen reunoilla on huomattavasti keskimääräistä jännitystä suurempi. Todellinen voima voi olla pääosin leikkaava tai vetävä, riippuen liimakerroksen paksuudesta ja liimattavan materiaalin jäykkyydestä. Leikkausjännitystestit ovat yleisiä, koska koepalat ovat yksinkertaisia ja simuloivat yleensä hyvin liimaliitoksen kuormitustilannetta ja liitosgeometriaa. Testien toistaminen on helppoa ja ne antavat luotettavia tuloksia. Käytettyjä standardoituja testimenetelmiä ovat mm. ASTM D1002 ja ASTM D3165. Kuitulujitemuoveille soveltuva testi on ASTM D5865. (Ebnesajjad & Landrock 2009,340-341.)

### 5.1.3 Repimislujuus

Repimislujuuskokeilla mitataan liimaliitokseen kohdistuvaa erittäin paikallista jännitystä. Liimaliitokseen kohdistuva repimisjännitys kasvaa, kun liimattavan materiaalin elastisuus ja liima-aineen kimmokerroin kasvavat. Koska jännitykseen vaikuttavan pinta-alan laskeminen tai arvioiminen on erittäin hankalaa ja vaihtelee materiaalien mukaan, tulos ilmoitetaan yleensä voimana per liimasauaman leveys, esimerkiksi N / cm. Elastisilla liima-aineilla repimislujuus riippuu liimakerroksen paksuudesta. Liimakerroksen paksuuden kasvaessa kuormittava voima jakaantuu isommalle alueelle sen elastisuuden takia, ja jännitys pienenee.

Repimislujuutta mitataan yleensä 90° tai 180° kulmissa, jolloin vähintään toisen liimattavan materiaalin tulee olla joustava. Jäykkiä, mutta taipuisia materiaaleja (esimerkiksi alumiini ohutlevy) voidaan mitata T-repimiskokeella. (Ebnesajjad & Landrock 2009,341-342.)



Kuva 18. Vasemmalta: T-repimiskoe, 90° repimiskoe ja 180° repimiskoe.

#### 5.1.4 Halkaisulujuus

Halkaisulujuuskoe on muunnos repimislujuuskoikeesta. Molemmat liimattavat materiaalit ovat täysin jäykkiä. Koekappaletta koestetaan sen toisesta päästä, johon yleensä halkaisuvoima keskittyy. Halkaisulujuuden mittaamiseksi liimaliitoksessa käytetään yleensä ASTM D3807 standardoitua testimenetelmää. (Ebnesajjad & Landrock 2009,342.)

#### 5.1.5 Viruminen

Kun liimaliitokseen kohdistuu jatkuva staattinen kuormitus, virumisenkesto on erittäin tärkeä varsinkin jos liimaliitokseen kohdistuu myös värinää. Liima-aineen valmistajat ilmoittavat harvoin virumisenkestoa, sillä kokeet ovat aikaa vieviä ja kalliita. Virumiskokeissa liimaliitosta kuormitetaan määrättyllä voimalla ja mitataan liimaliitoksessa tapahtuvia muodonmuutoksia määrätyn ajanjakson sisällä. Vaihtoehtoisesti liimaliitosta kuormitetaan määrättyllä voimalla ja määritetään aika, joka kuluu liimaliitoksen murtumiseen. Liima-aineesta, kuormittavasta voimasta ja kokeen ympäristöstä riippuen havaittavan muodonmuutoksen syntymiseen saattaa mennä erittäin pitkä aika. Mitattava muodonmuutos on yleensä liimaliitoksen venymä sekä mikroskooppiset halkeamat liima-aineessa. Virumisen mittaamiseksi liimaliitoksessa käytetään yleensä ASTM D2293 tai D2294 standardoitua testimenetelmää. (Petrie 2000,160-161.)

### 5.1.6 Väsyminen

Staattiset veto-, puristus- tai leikkausjännityskokeet eivät mittaa ajoittain toistuvaa liimaliitoksen kuormitusta. Väsymiskokeissa koekappaleeseen kohdistetaan syklinen, eli toistuva jaksottainen liimaliitosta kuormittava voima. Kuormitus on yleensä vetävä, mutta voi olla myös vetävä ja puristava tai taivuttava. Liimaliitoksen väsymislujuus ilmoitetaan yleensä liimaliitoksen lujuutena, joka kestää 10 miljoonaa kuormittavaa toistoa ennen murtumista. Väsymislujuuden mittaamiseksi liimaliitoksessa käytetään yleensä ASTM D3166 tai D1002 standardoitua testimenetelmää. (Petrie 2000, 157-158.)

### 5.1.7 Iskunkesto

Iskunkestävyysskoeksessa mitataan liima-aineen kykyä absorboida nopeasti kohdistuvia voimia eli iskuja. Kokessa liimaliitokseen kohdistetaan iskuja ja liimaliitokseen kohdistettu isku ilmoitetaan voimana per pinta-ala. Kokeiden toistaminen on erittäin vaikeaa eikä sitä tämän takia käytetä usein tuotanto-olosuhteissa. Iskunkeston mittaamiseksi käytetään ASTM 950 standardoitua testimenetelmää. (Petrie 2000, 157-158.)

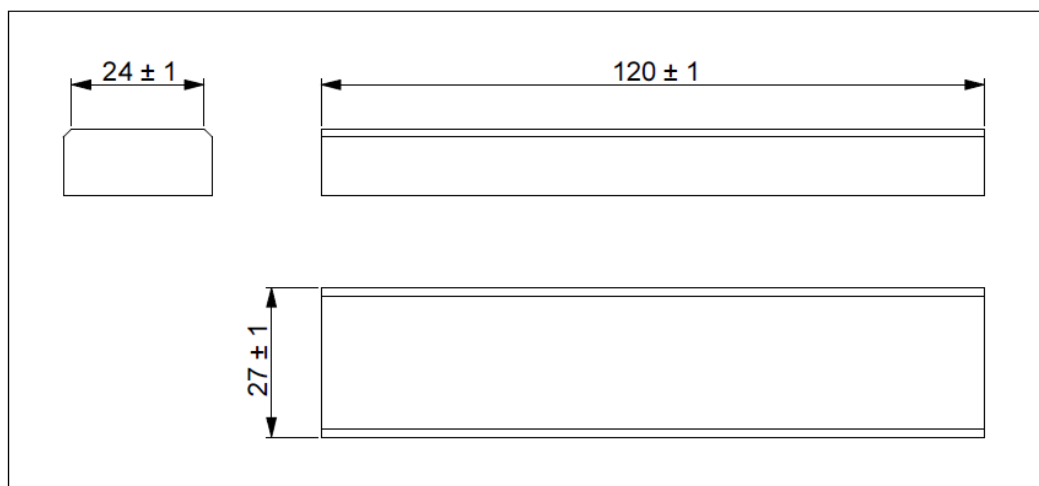
## 6 LIIMALIITOKSEN TESTAUS

### 6.1 Käytetty testimenetelmä

Testimenetelmäksi valittiin vetokoe, jolla pystytään mittaamaan liimaliitokseen kohdistuvia leikkaavia voimia. Kyseinen testimenetelmä valittiin, sillä se on yksinkertainen suorittaa ja se simuloi parhaiten todellista ponttoni-runko-liimaliitoksen rasiustilannetta. Standardeista ei löytynyt suoraan tarkoitukseen soveltuvaa vetokoetta, joten vetokoetta varten luotiin uusi testimenetelmä jossa sovellettiin eri standardien siihen soveltuvia osia ja menetelmiä yhteen. Sovellettu vetokoe ei mittaa puhtaasti leikkausjännitystä, sillä toinen liimattavista materiaaleista on elastinen ja liimaliitoksen tyyppi on yksinkertainen limiliitos.

## 6.1.1 Koestettavat kappaleet, niiden mitat ja koepalojen välisen liimaliitoksen toteutus

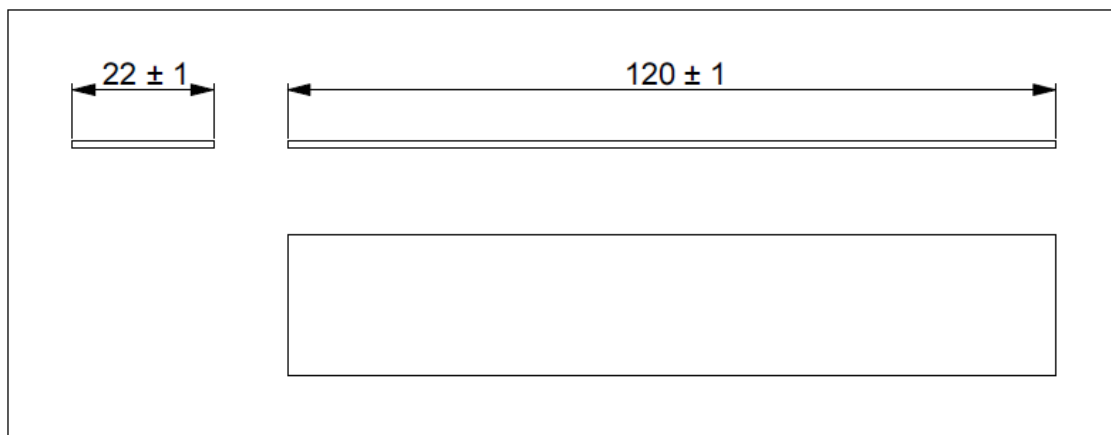
**Materiaali A** on kuitulujitemuovia, joka kuvastaa kokeessa veneen runkoa siitä kohdasta mihin ponttoni kiinnitetään. Materiaali A valmistetaan samalla tavalla kuin veneen runko, jotta se simuloi parhaiten runkomateriaalin kohdistuvia rasituksia. Koekappale A (Kuva 19) leikataan Materiaalista A. Koekappaleen leveys on 27 mm ja pituus 120 mm, virhetoleranssin ollessa 1 mm. Paksuus määrittäytyy veneen rungon rakenteen mukaan. Koekappaleen reunat viistetään hiomalla, jottei kappaletta leikatessa vahingoittunut kuitulujitemuovirakenne hajoa reunasta koetta suoritettaessa ja vääristä tuloksia.



Kuva 19. Koekappale A:n mitat

Kappale A:n liimattava alue tulee olla 24 mm leveä, jotta 22 mm leveä kangas kappale (B) mahtuu siihen. Ylimääräinen leveys johtuu haastavasta liimaustekniikasta, minkä johdosta tahmean liimattavan kankaan (kappale B) asemointi tahmealle kuitulujitemuovi pinnalle on erittäin haastavaa millimetrin tarkkuudella. Koska kokeessa testataan liuotinpohjaista liima-ainetta, jota levitetään erittäin ohuena kerroksena liimattavien materiaalien pinnalle, kappale A:n ylimääräinen leveys ja kappaleen B ympärille jäävä liima-aine ei vääristä mittatuloksia.

**Materiaali B** on kuitulujitekangasta. Koekappale B (Kuva 20) leikataan materiaalista B niin, että kappaleen leveys on 22 mm ja pituus 120 mm, virhetoleranssien ollessa 1 mm.



Kuva 20. Koekappale B:n mitat

Koekappaleiden liimaliitos toteutetaan samalla tavalla, kun se toteutetaan oikeassa ponttoni-runko-liimaliitoksessa, jotta tulokset ovat suoraan vertailukelpoisia sen kanssa. Koekappaleiden toteutustavassa voidaan poiketa varsinaisesta toteutustavasta, jos mitataan esimerkiksi eri tartuntapohjusteiden tai rasvanpoistoaineiden vaikutusta liimaliitoksen mekaanisiin ominaisuuksiin.

### 6.1.2 Koestettava alue ja kokeen nopeus

Koestettavan kappaleen liimaliitoksen pituus on sama, kun valmiissa tuotteessa. Näin ollen tulokset ovat suoraan vertailukelpoisia ponttoni-runko-liimaliitoksen lujuuteen, sillä liimaliitoksen pituus vaikuttaa jossain määrin liimaliitoksen mekaanisiin ominaisuuksiin.

Koe suoritetaan hitaasti nopeuden ollessa 10 mm / min. Tällöin kangasmateriaalissa ei pääse syntymään materiaalin kerrosten välistä pyrolyyttistä kulumista, jossa materiaalin kerrosten välinen kitkatyö lämmittää ja hajottaa materiaalin ennen aikojaan. Hitaampi vetonopeus antaa materiaalin sisäisen kitkatyön aiheuttaman lämpötilan nousun tasaantua ympäröivän viileämmän ilmamassan ansiosta.



### 6.1.3 Koetilanne

Koepalat laitetaan vetokoneen leukojen väliin niin, että leuat ovat samassa linjassa ja niiden välinen etäisyys on  $100 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ . Koepalan A-kappale pistetään kiinni alempaan leukaan niin, että B-kappaleeseen jää tasainen 1 mm väli. B-kappale pistetään ylempään leukaan niin, että väliin laitetaan A-kappaleen paksuinen korkokappale, jolloin kappaleiden välinen linja on suorassa kulman ollessa nolla astetta.

Jos kokeessa mitataan koekappaleen liimaliitoksen altistumista eri kemikaaleille koetilanne tulee suorittaa mahdollisimman nopeasti koekappaleen poistamisesta altistavasta tekijästä. Jos kokeessa mitataan ympäristöolosuhteiden vaikutusta koekappaleen liimaliitokseen tulee koetilanteessa koittaa pitää yllä mahdollisuuksien mukaan kappaleeseen vaikuttavan ja mitattavan olosuhteen vaikutus.

### 6.1.4 Murtumatyyppi

Hajonneesta kappaleesta tulee määrittää visuaalisesti murtumatyyppi. Murtumatyyppin luokittelu kuitulujitemuovi sekä kuitulujitekankaalle tehdään ASTM D5573-standardin mukaan. Koska ko. standardi on ei ole tarkoitettu kuitulujitekankaalle, sovelletaan eräitä murtumatyyppejä erilailla kankaisiin seuraavasti:

- *kuitukerrosmurtuma* (Kuva 22), kankaan kumipinnoite irtoaa kuitulujitekerroksesta täysin, vaurioittaen mahdollisesti samalla kuitulujitekerrosta
- *ohut kuitukerrosmurtuma* (Kuva 21), kumipinnoite hajoaa pinnasta niin, ilman että kuitukerros tulee näkyviin



Kuva 21. Vasemmalta: murtunut kuitulujitekangas, kuitulujitemuovi sekä mikroskoopilla suurennettu kuitulujitekankaan päämurtumatyyppi. Koekappaleen päämurtumatyyppinä *ohut kuitukerrosmurtuma*.



Kuva 22. Vasemmalta: murtunut kuitulujitekangas, kuitulujitemuovi sekä mikroskoopilla suurennettu kuitulujitekankaan päämurtumatyyppi. Koekappaleen päämurtumatyyppinä *kuitukerrosmurtuma*.

## 6.2 Koekappaleiden valmistus

### **Koestettavat materiaalit ja liima-aine**

Koestettavina materiaaleina oli Hypalon-Neopreeni-kuitulujitekangas sekä kuitulujitemuovilaminaatti. Kuitulujitemuovi koepalat käsiteltiin liima-aineen valmistajan määrittämällä tartuntapohjusteella valmistajan ohjeiden

mukaisesti. Hypalon-Neopreeni-kangas pintakäsiteltiin tavarantoimittajan ohjeiden mukaisesti. Koestettava liima-aine oli Neopreeniliima-aine.

### **Koekappale A**

Kuitulujitemuovilaminaatti laminoitiin muovipöydällä samalla tavalla, kun veneen runko laminoidaan runkomuottiin. Laminaatin pintaan tuli gelcoat-maali. Laminoitukertojen välissä laminaatti karhennettiin P80-karkeudella ennen seuraavien kerrosten laminoitua. Yhdellä laminoitukerralla laminoitiin 4-5 kerrosta (Liite 1). Lämpötila ja suhteellinen ilmankosteus pysyivät tasaisina valmistusprosessin ajan, lämpötilan pysyessä noin 20°C ja suhteellisen ilmankosteuden vaihdellen 26% – 28% välillä. Laminaattia käytettiin koekappaleiden valmistukseen kaksi viikkoa laminaatin valmistumisen jälkeen.

Laminaattilevystä ajettiin pöytäsiirkelillä 27 mm leveää rimaa. Rima katkottiin 120 mm pitkiä koepaloiksi pistosahalla. Pöytäsiirkeli repi leikkauksen yhteydessä gelcoat-pintaa noin 1 mm leveydeltä, minkä takia kappaleen reunat viistettiin hiomalla ne nauhahiomakoneella niin, ettei vaurioitunutta gelcoat-pintaa ollut havaittavissa visuaalisesti. Kappaleiden leveydeksi tuli 24 mm. Koepalojen leikkauksessa tapahtuneet mittavirheet olivat kohtalaisia, noin 1 mm suuruudeltaan.

### **Koekappale B**

Mattorullasta leikattiin 22 mm leveää soiroa lasipöydän päällä. Soirosta leikattiin 120 mm pitkiä koepaloja. Koepalojen leikkauksessa tapahtuneet mittavirheet olivat erittäin pieniä, alle 1 mm suuruudeltaan.

### **Liimaliitos**

A koekappaleille levitettiin tartuntapohjuste samalla kerralla. Liimaliitoksen toteuttamisessa noudatettiin valmistajan antamia ohjeita rasvanpoistossa, tartuntapohjustuksessa, sekä liimauksessa. Jokainen koesarja (5 kpl koepaloja) liimattiin samalla kerralla. Liimattaville kappaleille levitettiin liimakerros, jonka jälkeen odotettiin liuottimen haihtumista. Liimattavat pinnat

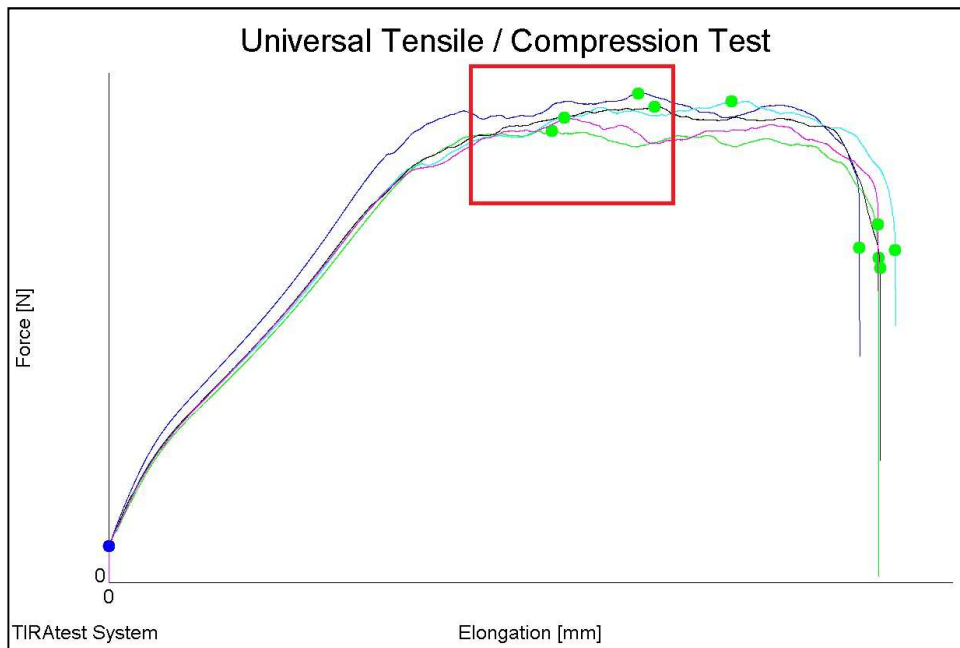
liitettiin yhteen ja liitos viimeisteltiin kohdistamalla siihen paine käsirullalla (Liite 2). Saman koesarjan koepalojen liimauksen avoinaika oli lähes sama, alle minuutin eroilla. Koesarjojen väliset liimauksen avoinajat olivat myös lähes identtiset. Liimaliitosta totetutettaessa lämpötilassa tai suhteellisessa ilmankosteudessa ei tapahtunut merkittäviä muutoksia, lämpötilan vaihdellen 22,5°C – 23°C välillä ja suhteellisen ilmankosteuden vaihdellen 20 – 28% välillä.

### 6.3 Kokeen suoritus ja testitulokset

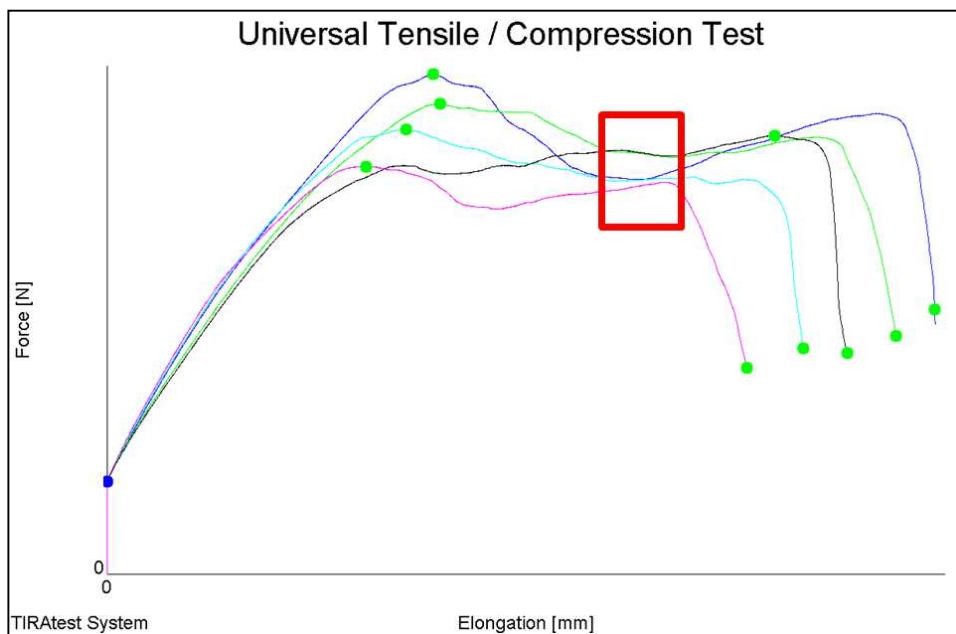
Kokeet suoritettiin Kymenlaakson ammattikorkeakoulun komposiittilaboratoriossa Kotkassa. Vetolaitteena käytettiin TiraTest 2000-vetokonetta. Vetokoneessa oli kiinteät asemoidut kiinnitysleuat, jotka saattavat aiheuttaa tuloksiin epätarkkuuksia epälineaarisuudesta johtuen. Kokeissa vallitsi tasainen lämpötila sekä suhteellinen ilmankosteus. Lämpötila oli koepäivinä 20,5°C – 21,5°C suhteellisen ilmankosteuden vaihdellen 22% - 25% välillä.

Koekappaleilla ei löytynyt varsinaista myötörajaa voima-venymäpiirroksista, sillä liimaliitos alkoi hajota kankaan hajotessa koekappaleen yläpäästä alaspäin venymän kasvaessa. Tämän johdosta jokaisessa koesarjassa koekappaleiden voima-venymäpiirroksista laskettiin voiman keskiarvo aina samalta venymän alueelta (Kuva 23). Kun lämpötila- ja kovettumisaika kokeiden luonteesta johtuen venyminen saattoi vaihdella sarjojen välillä huomattavasti, määriteltiin joillekin koesarjoille omat venymäalueet (Kuva 24). Venymäalue määriteltiin piirroksista alueelta, missä käyrän kulmakerroin on keskimäärin mahdollisimman lähellä nollaa (Liite 3).

*Lämpötilan vaikutus*-kokeissa epätasaisen lämmön jakautumisen takia koekappaleen voiman keskiarvon mittausväli määriteltiin venymäalueelta, jolla käyrät menivät mahdollisimman tasaisesti. Venymäalueen tasainen osuus ajoittui suurin piirtein murtuman tapahtuessa kappaleen keskikohdassa, josta mitattiin lämpömittarilla suurin kappaleeseen kohdistuva lämpötila ( $T_2$ , kuva 26). Käyrien tasaisuuden, alhaisempien voima-arvojen ja valitun venymäalueen sijainnin (keskikohta) perusteella pääteltiin, että liimaliitoksen lujuusarvot ovat valitulla alueella mitatun korkeimman lämpötilan mukaiset.



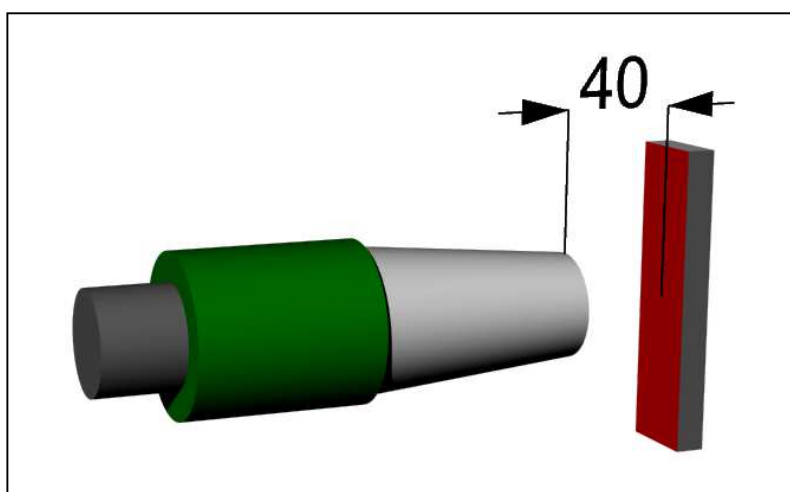
Kuva 23. Vetokokeessa saatu tyypillinen voima-venymäpiirros testattavilla materiaaleilla. Punaisella korostettuna venymäalue, jolta voiman keskiarvo on laskettu.



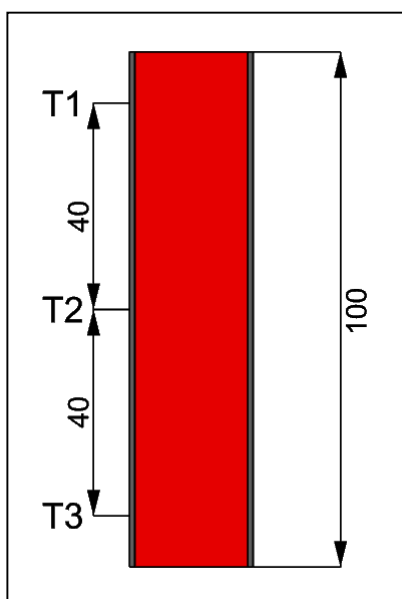
Kuva 24. Lämpötilan vaikutus-kokeiden tyypillinen voima-venymäpiirros. Punaisella korostettuna venymäalue, jolta voiman keskiarvo on laskettu.

## Lämpötilan vaikutus

Lämpötilan vaikutusta liimaliitoksen mekaanisiin ominaisuuksiin mitattiin viidellä eri koesarjalla, 20 asteen välein vaihteluvälillä 20°C – 100°C. Kappaleet esilämmitettiin uunissa, minkä jälkeen ne otettiin vetoleukoihin kiinni mahdollisimman nopeasti uunista. Lämpötilaa pyrittiin pitämään yllä Leister Triac AT lämpöpuhaltimella (Kuva 25), minkä lämpötilaa pystyttiin säätämään 5°C tarkkuudella. Koepaloilta mitattiin reunalta lämpötila ( $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$ ) Fluke II Thermometer-lämpötilamittarilla kolmesta eri kohdasta.

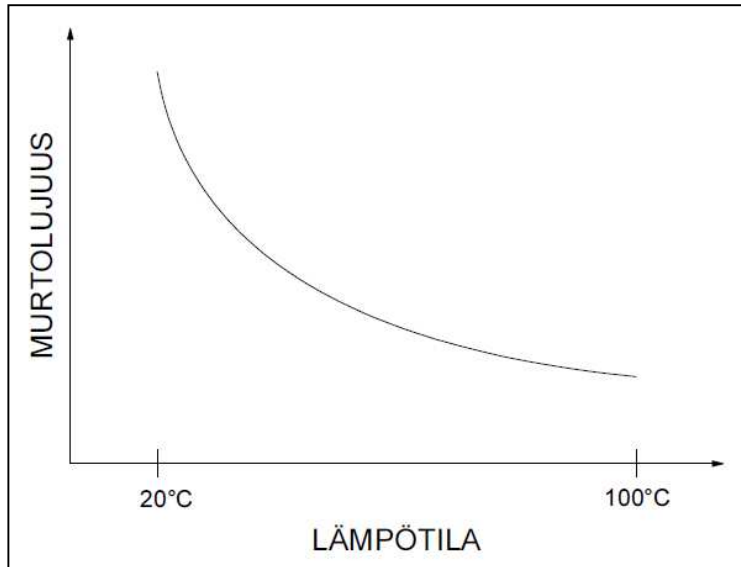


Kuva 25. Lämpöpuhaltimen etäisyys millimetreinä koekappaleesta. Lämpöpuhaltimen suuttimen keskikohta on linjattu koepalan keskikohtaan.



Kuva 26. Koekappaleen reunoista mitatut lämpötilat ja niiden etäisyydet toisistaan millimetreinä.

Lämpötilan vaikutus liimaliitoksen ominaisuuksiin oli huomattava (Kuva 25). Murtumatyyppi muuttui adheesiomurtumaksi tietyssä lämpötilassa (Kuva 26) ja liiman mekaaniset ominaisuudet laskivat huomattavasti (Liite 4).



Kuva 25. Murtolujuus lämpötilan funktiona.

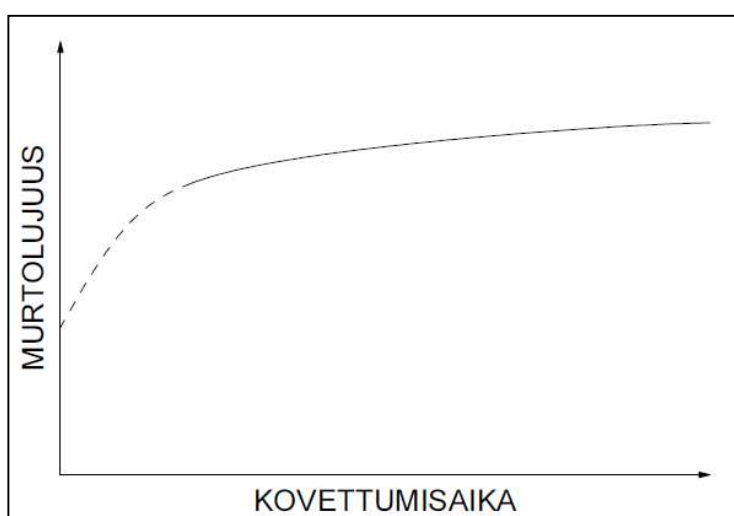


Kuva 26. Lämpötilan vaikutus-kokeiden murtumatyyppin muuttuminen adheesiomurtumaksi lämpötilan vaikutuksesta. Vasemmalta: murtunut kuitulujitekangas, kuitulujitemuovi sekä mikroskoopilla suurennettu kuitulujitekankaan murtumatyyppi (adheesiomurtuma).

## Kovettumisajan vaikutus

Kovettumisajan vaikutusta liimaliitoksen mekaanisiin ominaisuuksiin liimaliitokseen mitattiin neljällä eri koesarjalla: 24 tuntia, 48 tuntia, 72 tuntia ja 7 päivää vanhoilla koesarjoilla.

Kovettumisajan vaikutus liimaliitoksen mekaanisiin ominaisuuksiin on havaittava, muttei merkittävä (Kuva 27). Huomattavaa oli liimaliitoksen murtumatyyppin muuttuminen kovettumisajan muuttuessa (Kuva 28).



Kuva 27. Murtolujuus kovettumisajan funktiona. Katkoviivalla liiman toimittajan antaimien tietojen perusteella arvioidut, mutta ei mitatut arvot.



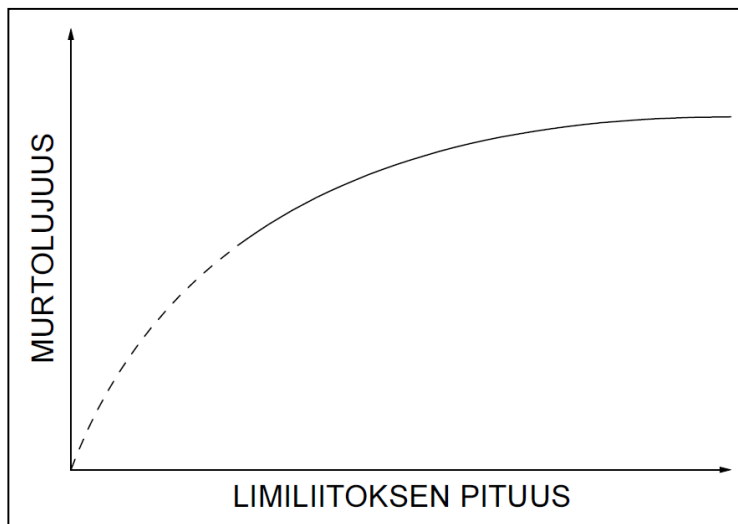
Kuva 28. *Kovettumisajan vaikutus*-kokeiden päämurtumatyyppin muuttuminen tartuntapohjuste-laminaattimurtumaksi kovettumisajan vaikutuksesta. Vasemmalta: murtunut kuitulujitekangas, kuitulujitemuovi sekä mikroskoopilla suurennettu kuitulujitekankaan päämurtumatyyppi (tartuntapohjuste-laminaattimurtuma).



## Liimaliitoksen limiliitoksen pituuden vaikutus

Liimaliitoksen limiliitoksen pituuden vaikutusta liimaliitoksen mekaanisiin ominaisuuksiin mitattiin neljällä eri koesarjalla: 20 mm, 40 mm, 60 mm ja 80 mm pitkällä limiliitoksilla.

Limiliitoksen pituuden vaikutus liimaliitoksen mekaanisiin ominaisuuksiin oli merkittävä (Kuva 29). Mittauksella pystyttiin määrittämään limiliitoksen pituus, jonka jälkeen liitoksen pituutta kasvattamalla ei saavuteta samassa suhteessa kasvavia hyötyjä.



Kuva 29. Murtolujuus limiliitoksen pituuden funktiona. Katkoviivalla arvioidut arvot.

## 6.4 Virhearviointi

### Kappaleiden valmistus

Kappaleiden valmistuksessa ei havaittu mitään merkittävää, mikä saattaisi heikentää mitattujen tulosten luotettavuutta. Kaikki kappaleet liimattiin samoissa tasaisissa tuontanto-olosuhteissa. Liima-aineen avoin aika liitettävissä kappaleissa liimauksen aikana oli myös sama, joidenkin kymmenien sekuntien tarkkuudella. Koekappale A:n pienillä (1 mm toleranssi) mittavirheillä ei oleteta olevan vaikutusta mittatuloksiin, sillä koekappale B määrittää liimaliitoksen leveyden ja pituuden. Koekappale B leikattiin erittäin tarkasti ja kappaleiden väliset leveyserot olivat erittäin pieniä.

Tuotantotekninen haaste, joka saattaa jossain määrin vaikuttaa liimaliitoksen mekaanisiin ominaisuuksiin on liuotinpohjaisen liima-aineen tasainen levitys. Liima-ainetta saatiin levitettyä aina silmämääräisesti sama, erittäin ohut kerros, mutta liimakerroksen paksuutta ei pystytty varmentamaan millään tarkalla menetelmällä. Jotta liimakerroksen paksuus olisi pystytty laskemaan tarkasti, olisi pitänyt määrittää kuivan liima-aineen tiheys. Kuivan liima-aineen tiheyden perusteella olisi voitu laskea liimakerroksen paksuus punnitsemalla koepalat.

### **Koeolosuhteet**

Koetilanteessa oli jotain mittauksen tarkkuuteen vaikuttavia ongelmia. Kiinnitysleukojen istukka irtosi aina välillä, eikä ollut samassa asennossa joka mittauksen välillä. Asennon vaihtelu oli kuitenkin erittäin pieni eikä sillä oleteta olevan merkittävää mittatulosten tarkkuutta heikentävää merkitystä.

*Lämpötilan vaikutus*-koesarjoissa oli erittäin haastavaa saada tasainen lämpötila koepalalle lämpöpuhaltimella. Lämpötila saattoi vaihdella kymmeniä asteita riippuen mistä osasta se mitattiin koekappaleen pinnalta.

Maksimilämpötilan mittaamisella ja voima-venymäpiirrosta lukemalla voitiin kuitenkin vetää luotettavia johtopäätöksiä suuntaa-antavista mekaanisista ominaisuuksista.

Koeolosuhteet olivat muuten tasaiset, lämpötilan ja suhteellisen ilmankosteuden pysyen lähes samana kaikkien mittausten aikana.

## **7 LOPPUPÄÄTELMÄT**

Työssä pystyttiin soveltamaan olemassa olevia standardoituja testimenetelmiä luomaan kuitulujitekangas-kuitulujitemuovi-liimaliitokselle paremmin soveltuva testimenetelmä laajan kirjallisuustutkimuksen perusteella.

Kirjallisuustutkimuksen perusteella pystyttiin myös määrittämään ponttoniin kohdistuva hydrodynaaminen paine, sekä määrittämään ponttoni-runko-liimaliitoksen suunnitteluun liittyviä periaatteita. Kirjallisuustutkimuksen avulla pystyttiin myös määrittämään liimaliitoksen ominaisuuksiin vaikuttavia eri tuotanto- ja käyttöympäristön tekijöitä.

Kokeilla vahvistettiin alkuperäisen oletuksen paikkansa pitävyys lämpötilan nousun negatiivisesta vaikutuksesta liimaliitoksen mekaanisiin ominaisuuksiin. *Lämpötilan vaikutus*-kokeilla pystyttiin määrittämään kohtuullisella tarkkuudella koestettavalle liima-aineelle ominaiset mekaaniset ominaisuudet eri lämpötiloissa, sekä arvioimaan rajalämpötila jossa murtumatyyppi muuttuu adheesiomurtumaksi.

Kokeilla vahvistettiin pidemmän kovettumisajan positiivinen vaikutus liimaliitoksen mekaanisiin ominaisuuksiin. Kokeilla pystyttiin määrittämään kovettumisaika, jonka jälkeen liima-aine on saavuttanut jo suurimman osan potentiaalisista mekaanisista ominaisuuksista.

*Limiliitoksen pituuden vaikutus*-kokeilla pystyttiin määrittämään käytetylle limiliitokselle ominainen pituus, jonka jälkeen pituuden kasvattamisesta ei ole varsinaista hyötyä.

Työn aikana syntyi myös jatkotutkimusaiheita. Työssä ei tarkasteltu liimaliitoksen repimislujuutta. Lämmön vaikutuksesta liimaliitoksen repimislujuuteen on aiheellista tehdä jatkotutkimuksia, ja selvittää heikkeneekö se samassa suhteessa leikkauslujuuden kanssa lämpötilan noustessa.

Työn tavoitteet saavutettiin ja työn toimeksiantajalle saatiin paljon uutta tutkimustietoa liimaliitoksen mekaanisista ominaisuuksista eri olosuhteissa ja liitostekniikoilla.

## LÄHTEET

Chaundbury, M., Pocius, A. 2002. Surfaces, Chemistry and Applications. Elsevier.

Ebnesajjad, S., Landrock, A. 2009. Adhesives Technology Handbook. Elsevier.

Järvelä, P., Lindberg, J., Törmälä, P. 1983. Polymeeritiede ja muoviteknologia. Osa II. Otakustantamo.

Kurri, V., Malén, T., Sandell, R., Virtanen, M. 2002. Muovitekniikan perusteet. Hakapaino.

Petrie, E. 2000. Handbook of Adhesives and Sealants. McGraw – Hill.

Pike, D. 2013. The Complete RIB manual: The Definitive Guide to Design, Handling and Maintenance. Adlard Coles Nautical.

Prisacariu, C. 2011. Polyurethane Elastomers. SpringerWienNewYork.

Schweitzer, P. 2007. Corrosion of Polymers and Elastomers. CRC Press.

Seppälä, J. 2005. Polymeeritekniikan perusteet. Otatieto.

Tammela, V. 1990. Polymeeritiede ja muoviteknologia. Osa III. Otatieto.

ASTM D5573:2012. Standard Practice for Classifying Failure Modes in Fiber-Reinforced-Plastic (FRP) Joints

ASTM D5868:2001. Standard Test Method for Lap Shear Adhesion for Fiber-Reinforced-Plastic (FRP) Bonding

ISO 2411:en. 2000. Rubber – or plastics – coated fabrics – Determination of coating adhesion

ISO 3011:en. 1997. Rubber – or plastics – coated fabrics – Determination of resistance to ozone cracking under static conditions

ISO 6185-4:en. 2011. Inflatable boats. Part 4: Boats with hull length of between 8 m and 24 m with a motor power rating of 15 kW and greater

ISO 12215-5:fi. 2008. Yksirunkoisten veneiden mitoituspainet, mitoitusjännitykset, mitoituksen määrittely.

Polymarine. ei pvm: <http://www.polymarine.com/advice/boat-fabric-guide/> [viitattu 17.4.2016]

Vanguard. ei pvm: <http://www.vanguardmarine.com/en/materials-technology/> [viitattu 17.4.2016]