



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

OSSI SYVÄNNE
MUOVIKOMPOSIITTIEEN HYÖDYNTÄMINEN AJONEUVON
RUNKORAKENTEESSA
Diplomityö

Tarkastaja: Jyrki Vuorinen
Tarkastaja ja aihe hyväksytty: Tek-
nisten tieteiden tiedekuntaneuvos-
tossa 9.1.2013

TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Materiaalitekniikan koulutusohjelma

SYVÄNNE, OSSI: Muovikomposiittien hyödyntäminen ajoneuvon runkorakenteessa

Diplomityö, 140 sivua, 19 liitesivua

Helmikuu 2013

Pääaine: Muovit ja elastomeerit

Tarkastaja: professori Jyrki Vuorinen

Avainsanat: Muovikomposiitit, hiilikuitu, matriisi, runkorakenteet

Muovikomposiittien hyödyntäminen ajoneuvojen rakenteissa on kasvava trendi, jossa erityisesti hiilikuitukomposiitit ovat tällä hetkellä nousemassa esille. Syynä ovat kasvavat ympäristövaatimukset ja toiveet polttoaineen kulutuksen alentumisesta. Pääasiallinen keino vastata tähän on painon alentaminen käyttämällä uusia materiaaleja. Tässä työssä kerrotaan perustietämystä komposiittien valmistukseen, käyttöön ja suunnitteluun liittyen. Erityispaino on pultruusiomenetelmän tutkimisella ja sen käytettävyyden selvittämisellä.

Työ on kaksiosainen: Työn alkuosioissa esitellään teoriaa kuitulujitettuihin muovikomposiittimateriaaleihin, näiden käyttöön ja suunnitteluun liittyen. Tämän lisäksi esitellään lyhyesti metallimateriaalit ja verrataan näitä muovikomposiitteihin. Tämän lisäksi esitellään pultruusio ja sen eri variaatiot sekä tutkitaan kuinka se vertautuu muihin menetelmiin ja erityisesti alumiiniprofiileihin.

Työn toinen osuus keskittyy mahdollisiin sovelluskohteisiin autoteollisuudessa. Osuudessa pyritään virtuaalisten esimerkkien avulla osoittamaan käyttökohteita pultruusiomenetelmälle ja tapoja pultruusioprofiilien liittämiseen. Pultruusion lisäksi esitetään myös muita vaihtoehtoisia tapoja valmistaa kantavia osia muovikomposiiteista. Työssä esitellään myös pultruusiota hyödyntävä konseptiauto.

Selvityksen perusteella pultruusiomenetelmällä voidaan valmistaa erittäin suuria kappaleita kustannustehokkaasti. Materiaalien ja lujitteiden kuitusuuntien muokkaaminen mahdollistaa monipuolisen ominaisuuksien räätälöimisen. Suurimmiksi rajoitteeksi osoittautuvat lähes poikkeuksetta saatava vakiopoikkileikkaus sekä jälkityösten hankaluus. Saatavat edut painon vähentämisessä alumiiniin verrattuna ovat ilman hyvää suunnittelua lähes olemattomat ja kustannukset nousevat usein suuremmiksi. Pultruusioprofiilien hyödyntäminen vaatiikin niiden muiden materiaaliominaisuuksien tai kokorajoitteiden hyödyntämistä, jotta saataisiin selkeää etua alumiiniin verrattuna. Komposiittien kannalta voikin olla hyödyllisempää tutkia muita menetelmiä ja hyödyntää pultruusiota ainoastaan rajallisissa tapauksissa.

ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Material Science

SYVÄNNE, OSSI: The use of plastic composites in vehicle's body structure

Master of Science Thesis, 140 pages, 19 Appendix pages

February 2013

Major: Plastics and elastomers

Examiner: Professor Jyrki Vuorinen

Keywords: Plastic composites, carbon fiber, matrix, body structures, pultrusion

The use of plastic composites in vehicles' structures is a growing trend where especially carbon fiber composites have taken their place in spotlights. The main reasons for this are the ever strickening pollution regulations and wishes of higher gas mileage. The main way of achieving this is by trying to lower the overall weight by use of new materials. This thesis presents the common knowledge concerning plastic composites and their use and design. Special notice is given to pultrusion manufacturing method and its feasibility in structural car parts.

The thesis consists two parts: In first part plastic composites, their use and design is presented. Metal materials are also shortly described and compared to plastic composites. Also pultrusion, its variations and how they compare to other methods is evaluated.

Second part is focused on possible uses of plastic composite in automotive structures. Virtual examples of how pultrusion and plastic composites could be used are shown. As a final example a concept vehicle that utilizes pultrusion is examined.

The study shows that pultrusion is economical way to manufacture large automotive parts. Materials and orientation of reinforcement can be varied to design specific properties to final products. Pultrusion is basically constrained to specific cross-section and lacks the possibility of postforming as mainly thermosetting materials are used. The advantages in weight compared to aluminium need advanced designing and usually raise costs greatly. To use pultrusion one should find other advantages gained from material properties or the lack of dimensional constrains to really gain advantage compared to aluminium profiles. Concerning pultrusion it could be more profitable to study other manufacturing methods and to use pultrusion only in very limited applications.

ALKUSANAT

Tämä työ on tehty Valmet Automotive Oy:n rahoittamana syksyn 2012 ja kevään 2013 välillä. Työ on tehty pääosin heidän toimitiloissaan Uudessakaupungissa.

Työn valmistumiseen ovat edesauttaneet lukuisat henkilöt. Valmet Automotive Oy:stä haluan kiittää mielenkiintoisesta aiheesta ja mahdollisuudesta tutustua autoteollisuuteen. Työ ei olisi ollut mahdollinen ilman tuotekehityksen henkilöstöä ja heiltä saatuja neuvoja ja ohjastusta autotekniikkaan liittyen. Ohjaajina toimineet Klaus Raunela ja Ville Hurskainen ansaitsevat erityismaininnan, sillä he ovat auttaneet minua koko kirjoitus-työn ajan tarkastamalla tekstiä ja neuvomalla minua ongelmallisissa asioissa.

Yliopiston puolelta haluan kiittää tarkastajaani Jyrki Vuorista ja ystävääni Markus Kakkosta, jotka ovat jaksaneet lukea työn läpi ja tehdä siihen ehdotuksia.

Työ ja edessä hämmöittävä valmistuminen ei olisi myöskään ollut mahdollinen ilman perheeni tai kihlattuni Jennin tukea.

Tampereella elokuussa 2013

Ossi Syväne

SISÄLLYS

1	Johdanto.....	1
2	Henkilöautojen Runko- ja korirakenteet	2
2.1	Erilaiset runkotyypit	2
2.2	Vaatimusprofiili	5
2.2.1	Turvallisuus.....	5
2.2.2	Lujuus- ja jäykkyysominaisuudet.....	6
2.2.3	Ympäristön aiheuttamat vaatimukset	6
2.2.4	Valmistettavuus, korjattavuus, sarjakoko ja kustannukset	7
2.2.5	Kehittyvän autoteollisuuden tarpeet ja vaateet.....	7
3	Materiaalit.....	8
3.1	Metallit.....	8
3.2	Komposiitit	8
3.2.1	Matriisiaineet.....	9
3.2.2	Lujitekuidut	14
3.2.3	Puolivalmisteet	19
3.2.4	Kerroslevyrakenteet.....	21
3.3	Vertailua eri materiaalien välillä	22
4	Pultruusio.....	27
4.1	Erilaiset variaatiot.....	28
4.2	Suunnittelurajoitteet	31
4.3	Toleranssit.....	33
4.4	Pultruusioprofiilit verrattuna alumiinisiin profiileihin	37
4.5	Ehdotuksia pultruusion kehittämiseksi.....	40
5	Muita valmistusmenetelmiä.....	42
5.1	Komposiittien valmistusmenetelmiä	42
5.2	Metalliosien valmistus	49
5.3	Vertailua eri menetelmien välillä	50
6	Komposiittien liittäminen, työstäminen ja pinnoitus	55
6.1	Adhesiivit	55
6.1.1	Liimatyyppejä ja lisäaineita	56
6.1.2	Pintojen käsittely	57
6.1.3	Liimasauman suunnittelu	58
6.2	Mekaaniset liitokset.....	62
6.2.1	Pultti-, niitti- ja ruuviliitokset.....	63
6.2.2	Napsautusliitokset ja geometriset lukitukset.....	66
6.3	Muita liitosmenetelmiä	68
6.4	Liittämismenetelmät autojen korirakenteissa.....	70
6.5	Komposiittien työstäminen	71
6.6	Maalaaminen ja pinnoittaminen	74
7	Muita komposiittien käytössä huomioitavia asioita.....	76
7.1	Suunnittelu	76

7.2	Käyttöturvallisuus ja terveysasiat.....	78
7.2.1	Valmistus ja työstö	78
7.2.2	Kolaritilanteet.....	78
7.3	Komposiittien vaurioituminen	79
7.4	Testaus	82
7.5	Korjattavuus	84
7.6	Elinkaari ja kierrätys.....	90
7.7	Sarjakoko ja kustannukset	94
7.8	Korroosio ja sen estäminen.....	94
8	Komposiittien käyttö autoteollisuudessa.....	96
8.1	Komposiiteista valmistettavia osia.....	96
8.2	Esimerkkejä autoteollisuudesta	97
8.3	Tutkimuksia ja patentteja.....	101
9	Esimerkkejä ja ehdotuksia korirakenteeseen liittyen	107
9.1	Materiaalin vaikutus rakenteeseen ja sen massaan.....	107
9.2	Akkukotelo.....	111
9.3	Puskuripalkki	115
9.4	Pohjalevyt ja muut suorat levypinnat	116
9.5	Liituskappaleet	117
9.5.1	Mahdolliset valmistusmenetelmät ja materiaalit.....	117
9.5.2	Päätyliitos.....	120
9.5.3	B-pilari ja sen liittäminen.....	122
9.6	Matkustamo.....	125
10	Yhteenveto.....	127
10.1	Jatkotutkimusehdotukset.....	129
	Lähteet.....	131
	LIITE 1: Taivutusjäykkyyden vertailu.....	140
	LIITE 2: menetelmävertailu	147
	LIITE 3: Konseptiauto	149
	Konseptin määrittely	150
	Konseptiauton rakenteen ja pakkauksen kehittyminen	152
	Konseptin arviointi.....	156

TERMIT JA NIIDEN MÄÄRITELMÄT

Hybridirakenne	<ol style="list-style-type: none">1. Useampaa eri lujitemateriaalia sisältävä komposiitti.2. Useampaa eri komposiitti- tai metallimateriaalia sisältävä rakennekokonaisuus.
Korirakenne	Auton kuormaa kantava rakenne, johon kiinnitetään muut osat kiinni. Voi sisältää myös ulkopaneelit. Katso: runko
Kuitulujite	Lankamainen lujite, jonka yksi dimensio on selvästi muita suurempi.
Matriisi	Komposiitin rakenneosa, joka pitää lujitteet yhdessä.
Muovikomposiitti	Kahden tai useamman materiaalin yhdistelmä, joiden välillä voidaan erottaa faasit ja jotka toimivat yhdessä.
Pakkaaminen	Pakkaamisella tarkoitetaan auton perusarkkitehtuurin suunnittelua, kuten voimalinjan, alustaosien, matkustajien ja muiden osien sijoittelua sekä auton mittojen ja maavaran määrittelyä.
Pakkaus	Katso: pakkaaminen
Pultruusio	Menetelmä, jossa valmistetaan kuitulujitettua muoviprofiilia suulakkeen läpi vetämällä.
Runkorakenne	Auton kuormaa kantava rakenne, johon kiinnitetään muut osat kiinni. Ei sisällä yleensä ulkopaneeleita. Katso: kori

1 JOHDANTO

Nykyisin valtaosassa henkilöautoja hyödynnetään terästä ja vähemmässä määrin muita metalleja runkorakenteissa. Tiukentuvat ympäristövaatimukset sekä toiveet painon alentamisesta ovat kuitenkin nostaneet autoteollisuudessa kiinnostusta muovikomposiitteihin. Kuluttajat ja päättäjät vaativat alhaisempia päästöjä ja pienempää polttoaineen kulutusta. Pääasiallinen keino tähän on pyrkiä alentamaan autojen massaa, joka on hankalaa hyödynnettäessä nykyistä terästeknologiaa. Muovikomposiitit ja niiden valmistusmenetelmät tarjoavat tähän kuitenkin uusia mahdollisuuksia.

Kantavissa runkorakenteissa pyritään käyttämään uusia sovelluksia ja varsinkin hiilikuitulujitteiset muovikomposiitit ovat tällä hetkellä autovalmistajien tutkimuskohteenä. Tällä hetkellä muovikomposiittimateriaaleja hyödynnetään lähes pelkästään kalliimman segmentin urheiluautoissa. Tässä työssä esitellään erilaiset muovikomposiitteissa käytettävät materiaalit ja komposiittien valmistusmenetelmät keskittyen autoteollisuuden tarpeisiin rungon kantavissa rakenteissa. Työn pääpaino on pultruusio-menetelmässä, joka mahdollistaa monipuolisten profiilien valmistuksen nopeasti.

Pultruusio on valittu tutkimuskohteeksi, sillä tiettävästi sitä ei hyödynnetä vielä henkilöautoteollisuudessa. Raskaiden ajoneuvojen rakenteissa kuitenkin pultruusiota hyödynnetään jo. Tarkoitus on selvittää voidaanko pultruusiota hyödyntää henkilöautojen rakenteissa, soveltuuko se kuinka hyvin, ja millaisia rajoitteita ja mahdollisuuksia se antaa.

Työssä esitellään myös liittämismenetelmät, mahdolliset korjauskäytännöt, kierätys sekä muut komposiittien käytön kannalta oleelliset asiat. Materiaaleja ja menetelmiä verrataan myös toisiinsa ja metalleihin. Työ on pyritty esittämään oppikirjamaisesti perusteista lähtien johtuen autoteollisuudessa olevan komposiitteihin liittyvän tietotaidon vähyydestä.

Työn loppuosa keskittyy esimerkkeihin komposiittien käytöstä autoteollisuudessa, erilaisiin tutkimuksiin sekä esimerkkeihin, joissa esitellään mahdollisia käyttökohteita pultruusio-menetelmällä valmistettuihin osiin. Pultruusiolla valmistettavien osien lisäksi esitellään mahdollisia liitostapoja sekä muiden menetelmien hyödyntämistä. Lisäksi liiteosiossa on esiteltynä konsepti pultruusiolla valmistettavasta autosta. Työ on kirjallisuuserelvitys johon on lisätty autotehtaan tietämystä.

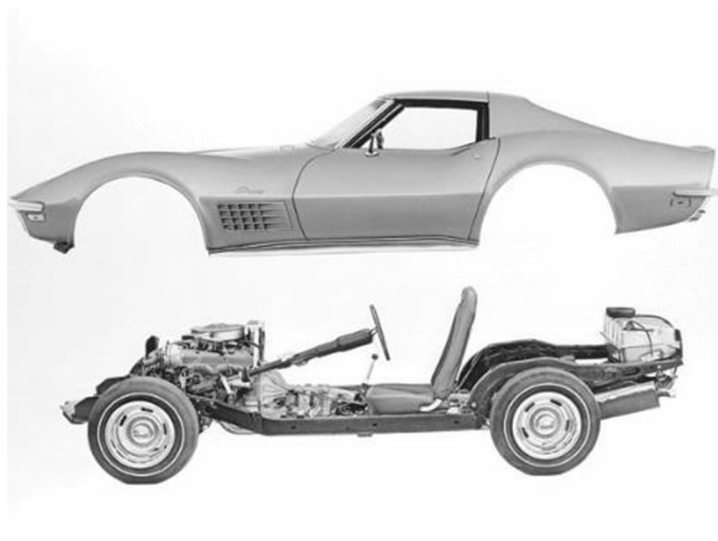
2 HENKILÖAUTOJEN RUNKO- JA KORIRAKENTEET

Tässä osuudessa esitellään lyhyesti erilaiset autoteollisuudessa hyödynnettävät kori- ja runkorakenteet ja käydään läpi korirakenteelta vaadittavia ominaisuuksia. Lopuksi käsitellään kirjoittajan näkemyksiä kehittyvän autoteollisuuden tarpeista ja vaatimuksista.

2.1 Erilaiset runkotyypit

Erilaiset korirakenteet voidaan jakaa usealla eri tavalla ja lähteistä riippuen nimeämisissä ja jaotteluissa on eroja. Jotkin korirakenteet voidaan myös ajattelutavasta riippuen luokitella moniin eri kategorioihin. Jaottelu ei ole aina selkeä ja rakenteessa voi olla yhdistettynä elementtejä eri kategorioista. Tässä työssä käytetyt pääasialliset luokat ovat space frame-rakenne, monokokkirakenne sekä erillisrunkoinen rakenne ja tästä eroteltu keskusputkirunkorakenne. Rakennejaottelussa ei oteta kantaa mahdollisiin apurunkoihin, joissa alustan tai voimansiirron osat voivat olla kiinnitettyinä, ja näiden mahdollisiin vaikutuksiin luokittelussa.

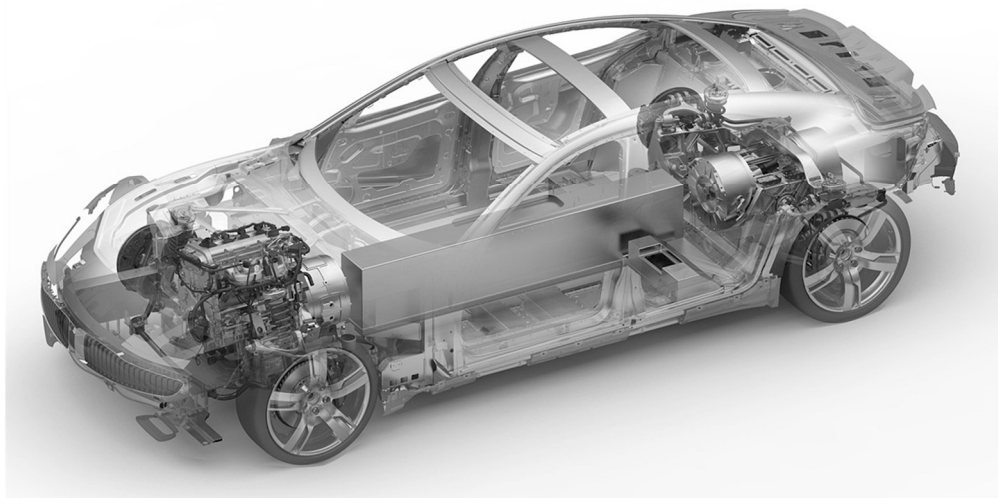
Erillisrunkoisessa rakenteessa käytetään pohjalevyä tai tikapuurakennetta. Tämän päälle asennetaan korirakenne, joka voi toimia osana kantavaa rakennetta. Pohjalevy tai tikapuurakenne kantaa voimansiirron ja alustaosat. Rakenne mahdollistaa usein melko helposti erilaiset ulkomuodot asentamalla erilainen kori rakenteeseen. (1 pp. 26-46). Seuraavassa kuvassa on esitettyä tikapuurakenne.



Kuva 1. Tikapuurungon rakenne (2)

Keskusputkirunko on myös erillisrunkoinen rakenne, jossa voimansiirto ja alustan osat ovat kiinnitettynä melko suureen suljettuun keskusrakenteeseen. Keskusputkirungolla saadaan rakenteeseen jäykkyyttä. Keskusputkirunko ei suojaa sivuttaisilta törmäystilanteilta ja vaatii kolariturvallisuutta kiinnitettävältä korirakenteelta. Samalla kiinnitettävä korirakenne lisää rakenteen jäykkyyttä entisestään. Erillisrunkoisia rakenteita on käytetty usein maasto- ja SUV-luokan ajoneuvoissa, mutta uudemmissa mallistoissa on siirrytty jonkin verran monokokkirakenteisiin painon säästämiseksi ja ajettavuuden parantamiseksi (3)(4). (1 pp. 26-46)

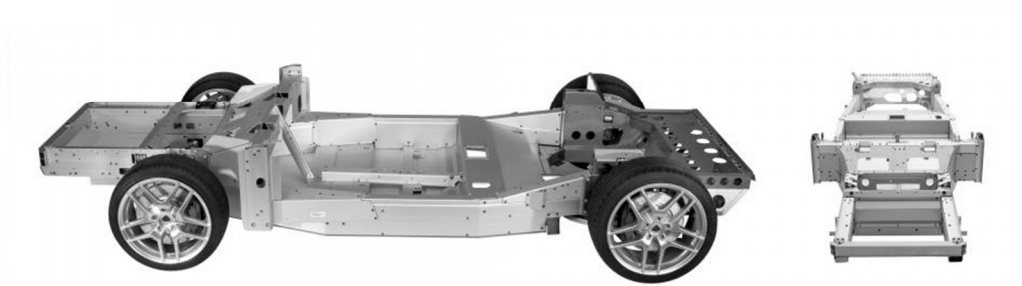
Space frame-rakenne koostuu kolmiulotteisesta avaruusrakenteesta, joka kantaa pääasiallisesti korin kuormat ja tuo rakenteen jäykkyyden. Puhtaimmillaan space frame-rakenne on encyclopedia Britannican (5) mukainen, jossa jäykkyyden ja lujuuden aikaansaava tukirakenne koostuu kolmioista. Kolmioiden sivut toimivat lineaarisina elementteinä, joihin kohdistuu ainoastaan puristusta tai vetoa. Yleensä autoteollisuuden space frame-rakenteessa on lineaaristen elementtien lisäksi erilaisia monimutkaisia kolmiulotteisia rakenneosia sekä levyjä. Lineaarisia osia ovat tällöin erilaiset profiili- ja palkkirakenteet. Lähimpänä puhdasta space frame-rakennetta on putkirunko eli kolmioitu putkista koostuva rakenne, mutta niiden käyttö on melko vähäistä. Myös keskusputkirunkorakenne voitaisiin luokitella jossain määrin space frame-rakenteisiin. Space frame-rakenteen ympärille asennetaan pintapaneelit, jotka voivat lisätä rakenteellista jäykkyyttä ja lujuutta tai toimia ainoastaan muodon- ja ulkonäön antajina. Space frame-rakenne voi olla esimerkiksi putkista koostuva häkki tai profiileista ja palkeista koostuva rakenne. (1 pp. 26-46). Seuraavassa kuvassa on esitettyä Fisker Karman space frame-rakenne



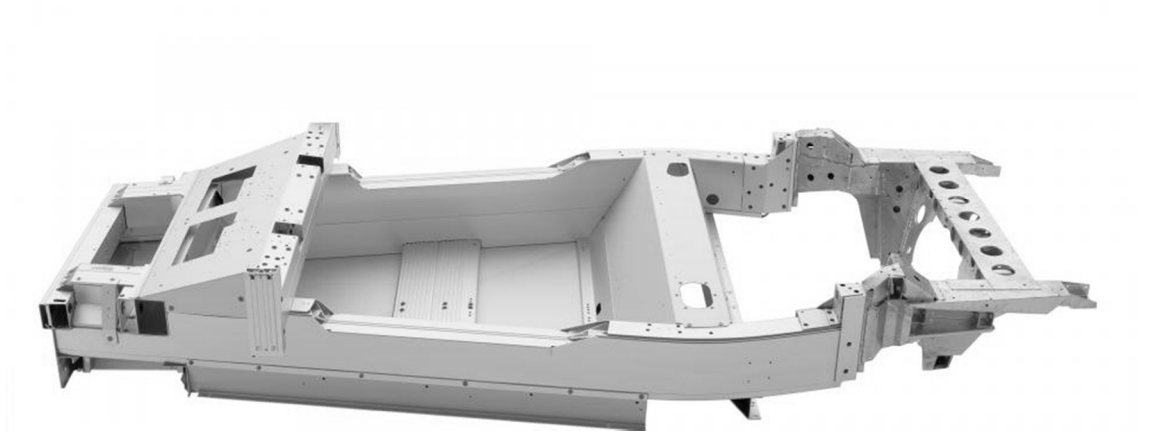
Kuva 2. Fisker Karman space frame rakenne (6)

Monokokkirakenteessa hyödynnetään yhtenäistä rakennetta, jossa pinnat toimivat kantavina rakenteina. Monokokkirakenne on tällä hetkellä yleisin käytetty rakenne henkilöautoissa. Rakenteessa hyödynnetään yleensä prässättyjä teräslevyjä. Teräksisissä rakenteissa pinnat toimivat myös auton näkyvinä ulkopintoina. (1 pp. 26-46). Hiilikuitukomposiittimonokokeissa puolestaan käytetään yleensä erillisiä ulkopaneeleja. Hiilikuitumonokokeja on esitetty kappaleessa 8.2.

Hankalasti määriteltävästä runkorakenteesta voidaan ottaa esimerkiksi Lotus Evoran hyödyntämä VVA-ratkaisu (Versatile Vehicle Architecture) (7) sekä Lotus Elisessä käytetystä Small Car platform (8). VVA-ratkaisua voidaan esimerkiksi muokata ja sen päälle voidaan asentaa erilaisia korirakenteita. Rakenteet ovat esitetty kuvissa (Kuva 3 ja Kuva 4) alla ja muistuttavat jotain space frame-rakenteen ja pohjalevyrakenteen väliltä.



Kuva 3. Lotus VVA. (7)



Kuva 4. Lotus Elisen runko. (8)

2.2 Vaatimusprofiili

Auton korilta vaadittavia asioita on hyvä lähteä käsittelemään pala kerrallaan. Ensisijaisesti auton korin tarvitsee lujutta kantaa hajoamatta siihen kiinnitettävät osat, kuten sisusta, ulko-osat, voimansiirto ja alustan osat. Samalla sen tulee kestää auton oma paino ja kyydissä olevat matkustajat ja tavarat. Seuraavaksi vastaan tulee erilaiset rasitukset ja kuormituspiikit, joita tiestä ja liikkuvista osista aiheutuu rakenteelle. Lujuuden lisäksi korilta vaaditaan myös jäykkyyttä eli muodossapysyvyyttä. Runko ei saa taipua liikaa omasta tai kyydissä olevasta massasta eikä taipua liikaa ulkoisista vaikutteista. Lisäksi rungolta oletetaan tietty elinikä, jolloin sen tulee kestää myös koko tämän ajan aiheuttamat rasitukset eli kori tarvitsee myös väsymiskestävyyttä. Edelliset asiat muodostavat osan korin lujuus- ja jäykkyyksivaatimuksista. (1 pp. 10-46)

Ei tietenkään riitä, että kori kestää ajossa tai paikallaan siihen kohdistuvat kuormitukset, vaan tulee ottaa huomioon myös erilaiset törmäystilanteet. Törmäystilanteessa auton koriin kohdistuu yllättäviä voimia ja paljon liike-energiaa, joka rakenteen tulee vastaanottaa ilman matkustajien liiallista vahingoittumista. Turvallisuuden minimivaatimukset määrittelee lainsäädäntö. (9 pp. 100-125)

Mekaanisten ominaisuuksien ja turvallisuuden lisäksi korin tulee kestää ympäristön vaatimukset. Kori kohtaa elinikänsä aikana erilaisia luonnon olosuhteita, kemiallisia yhdisteitä, lämpövaihteluita ja UV-säteilyä, joita sen tulee kestää. Lisäksi korista tietyn osuuden tulee olla lakivaatimusten puolesta kierrätettävissä.

Edellisen tapainen irroitus auton muusta kokonaisuudesta ei myöskään todellisuudessa toimi, sillä koria ympäröivät osat aiheuttavat aina vaatimuksia myös korirakenteelle. Yksi merkittäviä vaikuttavia tekijöitä on muotoilu ja pakkaus, joiden kanssa korirakenteen tulee toimia synergisesti.

Aiemmin mainitut ominaisuudet ovat myös omalta osaltaan minimivaatimuksia ja ajoneuvon korirakenteelta asetaan valmistajan toimesta hyvin selkeitä tavoitteita. Tavoitteet koko auton teknisistä tavoitteista kirjataan VTS-dokumenttiin (Vehicle Technical Specifications), jonka pohjalta myös vaatimukset korille pitkälti määräytyvät. Valmistaja määrittää korirakenteelle esimerkiksi vaatimukset painon, jäykkyyden, korjattavuuden, kierrätettävyyden, kolariturvallisuuden, ajettavuuden, kustannusten, mukavuuden ja koon suhteen. Lisäksi valmistaja määrittää rakenteelle eliniän vuosien ja ajokilometrien mukaisen tavoitteen jolloin tiettyjen ominaisuuksien, kuten kolariturvallisuuden, pitää pysyä kunnossa. Vaatimusten täyttämiseen voidaan vaikuttaa niin materiaali- valinnoilla, valmistusmenetelmillä kuin liitos- ja rakenneratkaisuilla.

2.2.1 Turvallisuus

Kolariturvallisuuden aikaansaamiseksi autoissa käytetään erilaisia turvaratkaisuja, kuten turvavöitä ja ilmatyynyjä. Varsinainen korin aiheuttama kolariturvallisuus saadaan aikaan kuitenkin energiaa sitovalla muutosalueella, jotka ovat sijoitettuna eteen, taakse ja sivuille. Törmäystilanteessa nämä muodonmuutosalueet hajoavat tai muuttavat muotoaan, jolloin niihin sitoutuu paljon törmäyksen liike-energiasta. Liike-energian sitoutu-

minen alentaa nopeuttaa ja hidastaa kiihtyvyyttä turvalliselle tasolle. Matkustajat sijaitsevat autossa matkustamossa, josta pyritään tekemään turvallinen minimoimalla sen muodonmuutokset. Luja matkustamo auttaa suojelemaan matkustajia myös tilanteissa, joissa auto pyörähtää ympäri. Hallitut muodonmuutokset saadaan aikaan käyttämällä eri lujuuksisia materiaaleja ja rakenteita eri puolilla koria. (9 pp. 100-125)

2.2.2 Lujuus- ja jäykkyyssominaisuudet

Auton lujuus- ja jäykkyyssominaisuudet pohjautuvat materiaaliominaisuuksiin ja rakenteellisiin muotoihin sekä liitosmenetelmiin. Rakenteen kokoa muuttamalla voidaan alhaisemman lujuuden tai jäykkyyden materiaalilla saada mekaanisesti parempaa materiaalia vastaava rakenne aikaan. Tällöin tosin voi materiaalien valinnassa tulla vastaan liian suuri koko tai paino, joka vaadittaisiin hyväksyttävältä rakenteelta.

Lujuusominaisuuksia tarvitaan lähinnä kolaritilanteissa ja usein lujuutta tärkeämpi suunnitteluperusta on rakenteen jäykkyys. Jäykkyydellä voidaan vaikuttaa ajominaisuuksiin ja korin käyttäytymiseen eri tilanteissa. Esimerkiksi staattiset kuormat vaativat rungolta taivutusjäykkyyttä. Ajon aikaiset dynaamiset kuormat kohdistuvat usein epätasaisesti korirakenteeseen, jolloin auton vääntöjäykkyys nousee suurempaan osaan. Esimerkiksi kuoppaan ajaessa alustaosien lisäksi vaikuttaa vääntöjäykkyys. Toinen hyvä esimerkki on auto, jonka yksi rengas on reunakivetyksellä. Löysä kori vääntyy paljon ja pahimmassa tapauksessa muodonmuutokset estävät oven aukeamisen tai sulkeutumisen kunnolla. (1 pp. 10-46)

2.2.3 Ympäristön aiheuttamat vaatimukset

Ympäristöstä aiheutuu korirakenteelle erilaisia kuormituksia. Lämpötilan vaihtelut aiheuttavat muodonmuutoksia ja jännityksiä korirakenteille. Lisäksi jäätymissulamissyklit voivat aiheuttaa vahinkoja epäsuotuisissa tilanteissa. Pahimmissa tapauksissa voidaan ylittää materiaalille soveltuva lämpötila alue, jolloin materiaalin ominaisuudet voivat muuttua tai rakenne voi vahingoittua. Lämpötilaan vaikuttaa erityisesti auringon valo, joka lämpökuormituksen lisäksi aiheuttaa UV-kuormitusta. Lisäksi lämpötilaan vaikuttavat auton lämpöä tuottavat ja johtavat osat, joista johtuu lämpöä ympäröiviin rakenteisiin.

Ympäristö altistaa korirakenteen myös erilaisille kemiallisille aineille, kuten tiesuolalle ja pakokaasujen saasteille. Nämä voivat olla haitallisia rakenteille tai edesauttaa korroosiota. Myös erilaiset luonnonilmiöt, kuten rae- ja sadekuurot aiheuttavat omat rasituksensa. Korirakenteen tulisikin kestää käyttöönsä ajan kaikkia näitä olosuhteita ilman liikoja ongelmia. Teräskoreja tosin yleensä joudutaan korjaamaan korrosioaurioista jossain vaiheessa niiden elinkaarta.

Ympäristön kannalta tulevia vaatimuksia ovat myös etenevässä määrin kasvavat lakivaatimukset auton korien kierrätyksestä. Tällöin valmistajalta vaaditaan soveltuvia valintoja materiaaleiksi ja rakenteiksi. Esimerkiksi hankalasti kierrätettävää materiaalia ei voi paljoa käyttää ja liitosten purkamisen helppous voi olla suotavaa.

2.2.4 Valmistettavuus, korjattavuus, sarjakoko ja kustannukset

Valmistettavuus, korjattavuus, sarjakoko ja kustannukset ovat osaltaan yhteennivoutuneita asioita. Autovalmistajat haluavat mahdollisimman helposti valmistettavia ja kasattavia ajoneuvoja, joita on helppo korjata ja joiden kustannukset ovat alhaiset halutulla sarjakoolla. Pyrkimällä parantamaan valmistettavuutta tai korjattavuutta saatetaan helposti vaikuttaa toiseenkin ominaisuuteen sekä kustannuksiin. Sarjakoko puolestaan vaikuttaa käytettäviin valmistusmenetelmiin ja sen kautta suoraan kustannuksiin. Menetelmävaihtoehtojen kautta sillä voi olla myös epäsuora vaikutus valmistettavuuteen ja korjattavuuteen. Edellä olevista asioista puhuttaessa tulee huomioida myös toleranssit, mittapituuksien hallinta (DIM) sekä näiden vaikutus kokonaisuuteen.

2.2.5 Kehittyvän autoteollisuuden tarpeet ja vaateet

Kehittyvän autoteollisuuden tarpeet ja vaateet vaikuttaisivat kumpuavan lainsäädännön vaatimuksista, kuluttajien haluista sekä valmistajien omista toiveista ja haluista. Lainsäädäntö ajaa auton valmistajia entistä enemmän kierrätettäviin ratkaisuihin ja pienempiin päästöihin. Samoin myös kuluttajat haluavat entistä vähäpäästöisempiä ja taloudellisempia ajoneuvoja. Valmistajat pyrkivät alentamaan kustannuksia ja nopeuttamaan kehityssyklejä ajoneuvoille. Kuitenkin tiukentuvat vaatimukset nostavat helposti kokonaiskustannuksia aina suunnittelusta valmistukseen.

Valmistajat vaikuttavat tällä hetkellä pyrkivän tuomaan markkinoille kevyempiä ajoneuvoja, jotka kuluttavat ja saastuttavat vähemmän. Painontiputuksiin pyritään uusilla rakenneratkaisuilla ja materiaalivaihtoehdoilla. Samalla pyritään kehittämään ratkaisuja, joilla voidaan tuoda markkinoille nopeammin uusia malleja. Tämän kannalta komposiittimateriaalit vaikuttavan olevan hyvä korvaaja perinteisille metallirakenteille. Komposiittien valmistusmenetelmät sallivat monipuolisempia rakenteita ja teräsrakenteita pienempiä sarjakokoja kustannustehokkaasti mahdollistaen samalla alhaisemman kokonaismassan.

Autoteollisuudessa on selkeä halu käyttää hiilikuituosia kantavissa rakenteissa. Hiilikuitujen yleistyminen autoteollisuuden kantavissa rakenteissa tosin vaatii niiden hinnan alentumisen huomattavasti nykyistä alhaisemmaksi. BMW:n hiilikuitua hyödyntävän i-sarjan mahdollinen menestys saattaa myös vaikuttaa oleellisesti muiden valmistajien halukkuuteen lisätä komposiittien käyttöä.

3 MATERIAALIT

Tässä osiossa esitellään komposiittimateriaalit yleisenä materiaalityyppinä sekä tarkemmin eriteltyinä erilaiset kuitulujuitteiset muovimatriisikomposiitit, sekä niiden ominaisuudet. Lisäksi esitellään komposiittien valmistukseen liittyviä puolivalmisteita sekä kerroslevyiksi kutsutut erikoisrakenteet. Osiossa esitellään myös yleisesti erilaiset korirakenteissa käytetyt metallimateriaalit. Lopuksi vertaillaan eri komposiittien ja metallien ominaisuuksia.

3.1 Metallit

Autoteollisuudessa käytetään lähinnä terästä, alumiinia ja magnesiumia korirakenteissa. Näistä ylivoimaisesti suosituin on teräs. Terästä on saatavilla useita erilaisia laatuja, jotka vaihtelevat halvoista tavallisista laaduista kalliimpiin erikoislaatuihin. Erikoislaadut vaihtelevat esimerkiksi korkeanlujuuden laaduista erilaisiin korroosiota kestäviin laatuihin. Teräksen eduksi voidaan mainita suhteellisen edullinen hinta, helppo liitettävyys ja kierrätettävyys. Haittapuolia ovat esimerkiksi korkea tiheys ja korroosiosuojauksen tarve. (10 pp. 100-128). Osien valmistus tosin voi olla melko kallista johtuen laitteistojen hinnoista, jolloin suuret sarjakoot ovat tarpeen.

Alumiinia käytetään, koska halutaan terästä keveämpi rakenne. Alumiiniset rakenteet ovat tosin teräksisiä suurempia, sillä alumiinin kimmomoduli ja siten vastaavan kokoisien rakenteiden jäykkyys on alhaisempi. Alumiinilla on lisäksi luontaisesti terästä parempi korroosion kestävyys pinnalle kehittyvän oksidikerroksen takia. Teräksen tapaan myös alumiini on helposti kierrätettävissä oleva materiaali. Haittapuolina on tosin alumiinin korkeampi hinta, alhaisemmasta kriittisestä venymästä johtuva heikompi muovattavuus sekä heikompi liitettävyys. Myös rakenteiden korjaus on näistä syistä usein hankalampaa. (9 p. 128)(10 p. 215)

Magnesium on alumiiniakin kevyempi materiaali. Alumiiniin ja teräkseen verrattuna magnesiumilla on vieläkin korkeampi hinta. Sen etuja on tosin mahdollisuus ohuisiin valukappaleisiin. Sen heikko puoli on tosin valmistettavuus, sillä magnesium soveltuu lähinnä pelkästään valukappaleisiin. Tosin myös levytuotteiden käyttöä on tutkittu (11). (9 pp. 132-133) (10 p. 228)

3.2 Komposiitit

Komposiitit ovat kahden tai useamman materiaalin heterogeenisiä yhdistelmiä eli niiden eri ainesosien välillä on rajapinta. Lisäksi kukin komponentti säilyttää sille ominaiset kemialliset, fysikaaliset ja mekaaniset ominaisuudet. Materiaalien yhdistelmällä saadaan

aikaan kuitenkin komposiitille yhtenäiset ominaisuudet, jotka ovat erilaiset kuin yksittäisellä komponentilla. Yleensä komposiitti koostuu matriisista ja lujitteesta, joista lujite antaa komposiitille pääasiallisen mekaanisen lujuuden ja jäykkyyden. Matriisiaine puolestaan vaikuttaa pitkälti kemiallisiin ominaisuuksiin sekä sitoo lujitemateriaalit yhteen. Matriisin ja lujitteiden lisäksi komposiitissa voi olla matriisiin lisättyinä erilaisia täyte- ja lisääaineita, joiden sisältöön ja lukumäärään ei tarkemmin pureuduta. Voidaan kuitenkin todeta, että niillä voidaan muuttaa tuotteen kemiallisia ja fysikaalisia ominaisuuksia, vaikuttaa palonkestoon sekä pyrkiä alentamaan kustannuksia. Esimerkiksi kustannuksia alentavien täyteaineiden käyttö on yleisempää kestopuoveilla kuin kertamuoveilla. (12)

Yleensä käytetyt matriisiaineet ovat muovimateriaaleja ja lujitteet kuituja. Matriisiaine voi olla myös esimerkiksi grafiittia, metallia tai keraamia, mutta kyseisten materiaalien tarkka esittely jätetään suurilta osin työn ulkopuolelle niiden vähäisen käytön ja kalliin hinnan vuoksi. Lujitteet puolestaan voivat olla myös esimerkiksi pallomaisia, hiutalemaisia tai niin kutsuttuja whiskereitä eli kasvatettuja pitkiä yksittäiskiteitä, mutta näiden lujitteiden käyttö on kuituihin verrattuna vähäisempää. (12)

Komposiittimateriaalien avulla pyritään yleensä alentamaan painoa verrattuna metallirakenteisiin ja parantamaan mekaanisia ominaisuuksia verrattuna perinteisiin muoveihin. Komposiitteja käytetään varsinkin painokriittisissä sovelluksissa, sillä niiden ominaislujuus ja ominaisjäykkyys on yleensä erittäin hyvä. Yleisiä käyttökohteita ovat rakennus-, urheilu-, vene-, auto-, ja lentoteollisuuden tuotteet. (13 ss. 74-100)

Komposiiteista puhuttaessa täytyy ymmärtää niiden monimateriaalisesta rakenteesta johtuvat erityispiirteet. Luonteeltaan komposiitit ovat anisotrooppisia, sillä lujitteet kantavat suurimman osan kuormasta ja ne ovat yleensä suuntautuneita. Lisäksi ominaisuuksiin vaikuttavat komponenttien väliset rajapinnat ja komposiitit ovat yleensä murtokäyttäytymiseltään hauraita. Tämä tekee suunnittelusta haastavampaa ja kyseiset asiat voivat helposti unohtua ihmisiltä, jotka ovat tottuneet metallituotteisiin. (12)

3.2.1 Matriisiaineet

Komposiiteissa voidaan käyttää matriisina sekä kesto- että kertamuoveja. Sekä kertamuovit että kestopuovit koostuvat erilaisista polymeeriketjuista, joita saadaan aikaan monomeerien kemiallisilla reaktioilla. Tarkkaan kemialliseen taustaan ja valmistukseen ei tässä työssä syvennytä. Kestomuovit luokitellaan materiaaleiksi, joita voidaan uudelleenmuokata lämmön avulla ilman sisäisen rakenteen muuttumista. Kertamuoveja ei voida lämmön avulla muovata, vaan ne hajoavat lämpötilan kohotessa riittävästi. Suurin osa valmistettavista komposiiteista on kertamuovipohjaisia, sillä yleensä kertamuoveilla on paremmat mekaaniset ominaisuudet ja kemiallinen kestävyys. Kestomuovit puolestaan ovat yleensä nopeammin prosessoitavissa ja helpommin kierrätettävissä. (13 ss. 35-56)

Kertamuovit kovettuvat nestemäisestä hartsista kovettimien avulla eli niiden rakenteessa tapahtuu silloittumisreaktio, jossa monomeerit yhdistyvät toisiinsa kemiallisesti. Kovettamisreaktio tapahtuu valmistusvaiheessa muotissa, jolloin kappale saa lo-

pullisen muotonsa. Kovettamislämpötila on riippuvainen käytetystä hartsista ja lisäaineista. Kertamuoveilla tarvitaan usein myös varsinaisen kovettumisen lisäksi jälkikoveutus. Jälkikoveutus on korkeammassa lämpötilassa tapahtuva koveutus, joka yleensä nostaa lasisiirtymälämpötilaa ja parantaa lämmönkestävyyttä sekä mekaanisia ominaisuuksia. Jälkikoveutuksessa käytettävä lämpösykli riippuu käytettävästi polymeerilaadusta. (13 ss. 35-56)

Yleisesti käytettyjä kertamuovityyppejä ovat polyesterit, vinyyliesterit, epoksit, polyuretaanit, fenolit ja polyimidit. Nimensä luokittelut saavat tyypeille ominaisista kemiallisista rakenteista. Raaka-aineita, joilla kemialliset rakenteet saadaan aikaan on olemassa lukuisia ja siten myös erilaisten laatujen määrä on huomattava. Tällöin myös saman alaryhmän, kuten epoksien, alla voi olla huomattavasti ominaisuuksiltaan erilaisiakin tuotteita. (13 ss. 35-56)

Polyesterit ovat yleisin käytetty kertamuovityyppi. Polyesterituotteet valmistetaan polyesterihartsista, jossa on tyydyttämätöntä polyesteriä ja styreeniä. Hartsit kovettuu edeltävien aineiden silloittumisreaktiossa, joka tarvitsee alkaakseen kovettimen eli initiaattorin, kuten vetyperoksidin. Käytettävät kovettimen määrät ovat erittäin pieniä, sillä se ei varsinaisesti osallistu silloitusreaktioon rakenneosana vaan se toimii katalyyttinä. Koveutusreaktion kulkuun ja nopeuteen voidaan vaikuttaa myös lukuisilla muilla ainesosilla, joihin ei tässä työssä syvennytä. Muihin kertamuoveihin verrattuna polyesterillä on kuitenkin suurempi muottikutistuma eli ne kutistuvat kovettuessaan muotissa. (13 ss. 35-56)

Yleisesti käytetään orto- ja isopolystereitä, jotka ovat nimetty niiden lähtöainesten mukaan, mutta polystereitä on olemassa lukuisia erilaisia johtuen mahdollisten raaka-aineiden monipuolisuudesta. Myös eri laatuja ja siten ominaisuuksiltaan eroavia polystereitä on paljon, sillä valmistuksessa voidaan muuttaa raaka-aineiden lisäksi myös styreenin sekä erilaisten lisäaineiden ja reaktioon vaikuttavien komponenttien määrää. (13 ss. 35-56)

Vinyyliesterit ovat polyesterien tyylisiä ominaisuuksiltaan ja käytöltään, mutta eroavat niiden rakenteista kemiallisesti. Vinyyliestereillä saadaan hyvä tarttuvuus. Lisäksi niiden kemiallinen kestävyys on polystereitä parempi. Vinyyliestereitä käytetään usein korroosionkestävissä tuotteissa, kuten säiliöissä. (13 ss. 35-56)

Epoksit ovat kertamuovityyppi, jota käytetään kun halutaan polystereitä paremmat mekaaniset ominaisuudet. Vinyyliestereistä ja polystereistä epoksit eroavat erityisesti siinä mielessä, että kovete on osa silloittunutta rakennetta jolloin sen suhde hartsiin on huomattavasti suurempi. Tällöin myös kovete vaikuttaa hartsin lisäksi lopullisen tuotteen ominaisuuksiin. Erilaisten epoksien määrä onkin erittäin suuri johtuen lukuisista mahdollisista harts- ja kovetevaihtoehdoista. (13 ss. 35-56)

Epokseista on kehitteillä myös niin sanottuja kierrätyskelpoisia laatuja (14), jotka voidaan helposti pilkkoa takaisin monomeereiksi sopivilla liuotusprosesseilla. Samalla saadaan talteen myös käytetyt lujitekuidut, ja kierrätyksen pitäisi olla lisäksi melko helppoa. Kierrätettävyys perustuu ilmeisesti uusiin koveutusaineisiin. Tämä tekisi epokseista käytännössä erittäin haluttavia, koska kierrätettävyys tekee siitä niin ihmisten

kuin lain silmissä ympäristöystävällisemmän. Lisäksi myös valmistuskulujen väitetään alenevan, sillä liuotusprosessin pitäisi olla riittävän yksinkertainen sovellettavaksi tehtaaseen, jolloin valmistuksessa tulevat sivuvirrat ja epoksijäte voidaan hyödyntää uudelleen. Valmistajan arvion mukaan kyseiset laadut ovat markkinoilla laajasti saatavilla noin puolentoista vuoden sisään.

Fenolialdehydimuovit ovat kolmivaiheisesti (A-B-C) kovettuva kertamuoviryhmä, jotka koostuvat yleensä fenoleista ja formaldehydistä. A-tilassa hartsi on silloittumaton ja vesiliukoinen, B-tilassa silloittuminen on alkanut, mutta hartsi on työstettävissä ja C-tilassa hartsi on kovettunut ja silloittunut siinä määrin ettei sitä voi työstää. A-B-C-tiloja käytetään myös joskus muiden hartsien kuvaamiseksi. Fenolimuovit voidaan jakaa resoleihin ja novolakkoihin valmistuskatalyytin emäksisyyden mukaan pääraaka-aineiden suhteen mukaan. Resolien reaktio pysäytetään usein B-tilaan, josta sitä käytetään tuotteiden valmistukseen myöhemmin hartsia lämmittämällä. Novolakat puolestaan vaativat kaksikomponenttisina lisäksi erillisen reaktiivisen komponentin.

Väritään fenoliformaldehydit vaihtelevat punaruskeasta mustaan. Eräs tunnettu kaupp nimi on Bakeliitti ja valmistettavia tuotteita ovat esimerkiksi erilaiset sähköteollisuuden tuotteet. Fenoliformaldehydit ovat ilman täyteaineita erittäin hauraita ja niillä on hyvä mittatarkkuus, puristuslujuus, kemiallinen kestävyys, säänkesto, lämmönkesto ja sähköneristävyys sekä niillä pieni muottikutistuma ja veden absorptio. (13 ss. 35-56)

Polyuretaanit ovat uretaaniryhmiä sisältäviä polymeerejä, jotka muodostuvat erilaisista di-isosyanaatin reaktioista. Johtuen monipuolisista reaktioaineista polyuretaanit voivat olla luonteeltaan hyvinkin erilaisia, kuten huokoisia solumuoveja, pehmeitä tai kovia kumeja sekä kerta- tai kestopuoveja. Prosessoinnin kannalta hyödyllisesti polyuretaaneilla on alhainen viskositeetti ja kovetuslämpötila. Kovetusreaktio voi myös lyhimmillään olla sekunteja, jolloin sykli aika voi olla lyhyt. Polyuretaaneilla on kuitenkin lähtökohtaisesti melko alhaiset mekaaniset ominaisuudet ja huono lämmönkestävyys verrattuna muihin kertamuoveihin. (13 ss. 35-56)

Creative pultrusions (15) väittää lisäksi, että polyuretaaneilla saataisiin pultrusiotuotteissa muita matriisivaihtoehtoja parempi tarttuvuus ja kerrosten välinen leikkauslujuus. Tämän yhdistettynä kimmoisampaan luonteeseen pitäisi vähentää delaminaatioita ja parantaa komposiitin mekaanisia ominaisuuksia. Tällöin myös liittäminen pitäisi olla helpompaa, sillä esimerkiksi polyuretaaniliimat olisivat erittäin yhteensopivia ja mekaaniset liitokset huolettomampia.

Polyimidien polymeeriketjussa on toistuvana imidiryhmät, jotka polymeerin aromaattisten monomeerien kanssa aiheuttavat hyvän lämmönkestävyyden. Polyimidit voidaan luokitella kesto-, kertamuovisiin ja sekä esimerkiksi alatyypinä bismaleimideihin. Näistä esimerkiksi hauraita bismaleimidejä käytetään hiililujitettuna lentokone- ja avaruusteollisuudessa niiden hyvän lämpötilankestävyyden ja korkeiden mekaanisten arvojen vuoksi. Bismaleimidit eivät välttämättä sovellu autoteollisuuden suurempiin sarjoihin, sillä niillä käytetään pitkiä jälkikovuusaikoja ja ne ovat kalliita. (13 ss. 35-56)

Kestomuovit pitävät sisällään lukuisia erilaisia polymeerejä. Yleensä kesto-
muovit koostuvat polymeerien lisäksi sopivista lisäaineista, joilla muutetaan tuote- ja
työstöominaisuuksia. Kertamuovit voivat olla yhtä polymeerityyppiä tai useammasta
tyypistä koostuvia seoksia. Kestomuovit voidaan esimerkiksi jakaa valtamuoveihin,
teknisiin muoveihin ja erikoismuoveihin. Valtamuovit kestävät yleensä vain melko al-
haisia lämpötiloja ja niitä käytetään yleensä paljon sov elluksissa, jotka eivät tarvitse
lujitusta. Yleisiä valtamuoveja ovat esimerkiksi polyeteeni (PE), polypropeeni (PP),
polyvinyylidikloridi (PVC), ja polystyreeni (PS). Teknisiin muoveihin voidaan luokitella
esimerkiksi polykarbonaatti (PC). Lujitteiden kanssa käytetään yleensä PP:a ja poly-
amideja (PA), mutta myös esimerkiksi erikoismuoveja, kuten polyeetteriketoneita
(PEEK) ja polyeetteri-imidejä (PEI) hyödynnetään. (13 ss. 35-56)

Prosessoinnin kannalta kesto- ja kertamuovit eroavat toisistaan. Kuten aiemmin
kerrottiin, kertamuoveilla kovetus tapahtuu lämmön avulla muotissa. Kestomuovit ovat
kuitenkin jo valmiiksi polymeereinä ennen muodonantoa. Lämpö pehmentää ja sulattaa
muovia alentaen viskositeetin riittävän alhaiseksi tuotteen valmistusta varten. Lähtökoh-
taisesti sulienkaan kesto-
muovien viskositeetti ei ole tarpeeksi alhainen kustuttamaan
lujitteita muotissa, jolloin lujitetut muovit valmistetaan prepregeistä. Lujittamattomien
kesto-
muovikappaleiden valmistuksessa sulatilassa muovi voidaan esimerkiksi ruiskuttaa
muottiin, josta se poistetaan sen jäähtyttyä riittävän kovaksi. Myös tarvittavat prosessi-
lämpötilat ovat kertamuoveja suurempia, sillä muovien sulamislämpötilat ovat usein
melko korkeita. Kestomuoveista esitellään PP, PA, PI ja PEEK, koska niitä käytetään
paljon tai niiden ominaisuudet ovat mielenkiintoisia. (13 ss. 35-56)

Polypropeeni on yksi yleisimmin käytetyistä muovityypeistä maailmalla. Poly-
propeenia käytetään paljon esimerkiksi pakkaus- ja sähköteollisuudessa. PP ominai-
suuksia voidaan muokata polymerointivaiheessa rakennetta muuttamalla ja lisäaineita
käyttämällä. Komposiitteissa PP:a käytetään lähinnä GMT-puolivalmisteisiin sekä
PP/PP-komposiitteissa, joissa polypropeenikuidut ovat polypropeenimatriisissa. (13 ss.
35-56)

Polyamidit ovat noin 60 erilaista polymeerilaatua sisällään pitävä ryhmä, joiden
ominaisuudet vaihtelevat paljon eri laatu-
jen välillä. Yleisiä lujitettujen polyamidien
käyttökohteita ovat esimerkiksi auton nestesäiliöt sekä venttiilin koteloiden kannet.
Tunnetuin kaupp nimi polyamidille on Nylon ja yleisesti käytettyjä laatuja ovat PA6 ja
PA66. Polyamideilla on niille ominainen nimeämistapa, jossa nimen jälkeinen numero
määräytyy lähtöaineiden kemiallisen rakenteen hiiliatomien lukumäärän mukaan. Tär-
keä ominaisuus prosessoinnin kannalta on polyamidien hygroskooppisuus, jonka takia
valmistusprosessissa tarvitaan usein myös kuivausta. (13 ss. 35-56).

Tällä hetkellä on kehitteillä myös niin kutsuttuja reaktiivisia laatuja polyami-
deista. Tavallisista kesto-
muoveista poiketen PA polymerisoidaan muotissa kertamuovi-
en tapaan. Ominaisuuksiltaan se on kuitenkin sulatyöstettävä ja kertamuoveja helpom-
min kierrätettävissä oleva kesto-
muovi. Laadut ovat kehitetty RTM-prosessia silmällä
pitäen. Muovien lopullisista ominaisuuksista ja syklijajasta ei ole tietoa. Laatuja kehitte-

tään erityisesti autoalan tarpeisiin ja sykliajan kuitenkin väitetään olevan kestumuovi-prosesseja lyhyempi. (16)

Polyimidit, kuten PI (polyimidit), PAI (polyamidi-imidit) ja PEI (polyeetteri-imidit) ovat amorfisia kestumuoveja, joilla on erittäin hyvä lämmönkestävyys. Edellämainittujen laatuojen lasisiirtymälämpötilat ovat 200-290 °C välillä. Lasisiirtymälämpötila on lämpötila, jonka alapuolella aine on kumimaista ja jonka yläpuolella se muuttuu kovaksi ja hauraaksi. Esimerkiksi PEI on erittäin mittatarkka, kemiallisesti kestävä ja kemiallisen rakenteensa vuoksi tulenkestävää. Sitä on lisäksi helppo sulatyöstää. (13 ss. 35-56)

Polyakryylieetteriketoni ovat osittain kiteisiä erikoismuoveja. Yleisin käytetty laatu on polyeetterieetteriketoni (PEEK), jolla on hyvä lämmönkestävyys (yli 250 °C) ja kemiallinen kestävyys. Muovia lujitetaan usein ja niiden korkeasta hinnasta johtuen jopa hiilikuidun lisääminen alentaa kustannuksia. Yleisimmät käyttökohteet ovat lento- ja avaruusteollisuudessa, kemianteollisuuden pumput sekä erilaiset laakerit. (13 ss. 35-56)

Seuraaviin taulukoihin (Taulukko 1 ja Taulukko 2) on kerätty tietoa erilaisista muovimatriiseista ja niiden ominaisuuksista. Taulukoiden arvoja vertaamalla huomataan kuinka suurta hajontaa eri laadut aiheuttavat ominaisuuksiin. Varsinkin muottikutistuman arvot ovat suuntaa antavia ja ne vaihtelevat hyvin paljon laadusta riippuen.

Taulukko 1. Kertamuovien ominaisuuksia (13 s. 37)(17)

	Polyesteri	Vinyyliesteri	Epoksi	Fenoli	Polyuretaani	Bismaleimidi	Polyimidi
Vetolujuus (Mpa)	50-70	50-70	50-70	< 50	> 70	> 70	> 70
Lämmönkestävyys (°C)	120-180	120-180	120-180	180-300	< 120	180-300	180-300
Palavuus	Helposti palava	Helposti palava	Helposti palava	Huonosti palava	Helposti palava	Huonosti palava	Huonosti palava
Kemiallinen kestävyys	Hyvä	Erinomainen	Hyvä	Hyvä	Erinomainen	Hyvä	Hyvä
Muottikutistuma (%)	Korkea (-0,2 - 3,5)	Alhainen	Alhainen (0,05 - 0,7)	Alhainen	Alhainen (0,08-1)	Alhainen	Alhainen
Hinta	Halpa	Kallis	Kallis	Halpa	Halpa	Erittäin kallis	Erittäin kallis

Taulukko 2. Kestomuovien ominaisuuksia (17)

	PP	PA6	PEI	PEEK
Lasiirtymä-lämpötila (°C)	- 20 - -10	60-142	168-200	143-148
Sulamispiste (°C)	61 - 180	141-295	Ei selvää pistettä	334-344
Minimi käyttö-lämpötila (°C)	-30	Ei ilmoitettu	Ei ilmoitettu	-50
Maksimi käyttö-lämpötila (°C)	65-125	60-250	170-300	230-315
Vetomyöty-lujuus (MPa)	9-80	3,45-135	20-255	89,6-140
Palavuus	Itsestään sammuva	Itsestään sammuva	Ei syty	Itsestään sammuva

Taulukkojen pohjalta voidaan huomata, että lujittamattomilla muoveilla lujuudet eivät ole kovin suuri verrattuna autojen korirakenteissa käytettäviin teräksiin. Tästä johtuen voidaan ajatella muovilaatujen lujittamisen olevan jo rakenteellisen lujuuden kannalta välttämätöntä.

3.2.2 Lujitekuidut

Tässä osiossa kerrotaan erilaisista lujitekuiduista ja niiden ominaisuuksista. Kuidut määritellään lujitteiksi joiden pituus on moninkertaisesti niiden paksuutta suurempi. Määritelmä riippuu lähteestä, mutta esimerkiksi 3:1 suhde voidaan ajatella riittäväksi kuidun määritelmäksi. Erilaisia kuituvaihtoehtoja on tarjolla erittäin paljon, joista pyritään esittelemään yleisimmät sekä autoteollisuuden ja työn kannalta mielenkiintoiset vaihtoehdot. Yleisimmin käytetyt kuidut ovat lasikuidut, hiilikuidut ja aramidikuidut. Lisäksi käytetään myös erilaisia luonnonkuituja, polymeerikuituja sekä erikoiskuituja. (13 ss. 74-100)

Lasikuidut ovat ylivoimaisesti eniten käytetty lujitemuoto markkinoilla, ja niiden osuus lujitekäytöstä on jopa 95 %. Lasikuitujen valmistuksessa saatava perustuote on jatkuvakuituinen rovinki, jonka tex-numero kertoo sen gramma-massan 1000 metrin matkalla. Markkinoilla olevat lasikuitulaadut voidaan luokitella niiden kemiallisen ra-

kenteen mukaan pääosin E-lasiin, C-lasiin, ECR-lasiin, R-lasiin ja S-lasiin. Nämä tyypit ovat ominaisuuksiltaan ja hinnaltaan erilaisia. Suurelta osin lasikuidun huomattavaa osuutta markkinoista voidaan selittää E-lasin antamalla riittävän hyvillä mekaanisilla ominaisuuksilla, hyvällä kemiallisella kestävyydellä ja sen alhaisella hinnalla. (13 ss. 74-100)

C-lasi on korroosionkestävyydeltään E-lasia parempi ja sitä käytetään etenkin korroosionkestävissä muovituotteissa esimerkiksi pintahuopana, joka auttaa muodostamaan erittäin hartsipitoisen pinnan suojaamaan tuotetta. ECR-lasi on E-lasin muunnos, jossa yhdistetään E-lasin mekaaniset ominaisuudet ja C-lasin kemiallinen kestävyys. R- ja S-lasi ovat mekaanisilta ominaisuuksiltaan E-lasia parempia, mutta samalla ne ovat myös kalliimpia. (13 ss. 74-100)

Lasikuiduissa käytetään myös monia pinnotteita, joiden tarkoitus voi olla esimerkiksi hankaussähkön ja kitkan vähentäminen prosessin helpottamiseksi. Kaikkia eri pinnotteita ei käydä tässä osiossa läpi, mutta tulee huomioida, että ne vaikuttavat jossain määrin kuidun ominaisuuksiin. Lasikuiduissa käytetään myös erilaisia tartunta-aineita, sillä luonnostaan lasikuidun tarttuvuus muovimatriisiin on heikko. Tartunta-aineet ovat yleensä erilaisia silaaneja. Tartunta-aineista tulee huomioida, että tietyt tartunta-aineet soveltuvat parhaiten tietyille matriiseille. (13 ss. 74-100)

Lasikuituja paremmat mekaaniset ominaisuudet saadaan käyttämällä hiilikuituja eli kuituja joissa on yli 95 % hiilipitoisuus. Hiilikuidut soveltuvat kaikille muovimatriisivaihtoehdoille. Niitä käyttämällä saadaan erittäin hyvä ominaisjäykkyys ja -lujuus. Kerroksienvälinen leikkauslujuus ILSS on myös yleensä erittäin hyvä verrattuna muihin kuituihin. Hiilikuitua käytetään myös jos halutaan hyvä väsymiskestävyys, värähtelyn vaimennus tai esimerkiksi sähkönjohtavuutta. Hiilikuitujen lämpölaajenemiskerroin on lähes nolla tai jossain tapauksissa negatiivinen jolloin sen avulla voidaan vaikuttaa myös komposiitin lämpölaajenemiskertoimeen kokonaisuutena. Hiilikuitulujitteisilla komposiiteilla on kuitenkin suhteessa moniin muihin kuituihin melko huono iskunkestävyys. Väriltään hiilikuidut ovat mustia jolloin myös valmis komposiitti on musta. (13 ss. 74-100)

Hiilikuitujen ominaisuudet riippuvat pitkälti niiden valmistustavasta ja raaka-aineesta. Pääasialliset raaka-aineet ovat polyakryylnitriili-kuidut (PAN) ja pikipohjaiset tuotteet. Suurin osa muovien lujittamiseen käytetyistä hiilikuiduista valmistetaan PAN-kuiduista. Pikipohjaisille kuiduille on ominaista PAN-kuituja alhaisempi vetomurtolujuus ja korkeampi kimmomoduli, joka tekee niistä hauraita ja vaikeasti käsiteltäviä. Hiilikuitujen valmistus ligniinistä ja polyolefiineistä on myös kehityksen alla, mutta ne eivät ole vielä suurtuotannossa (18). (13 ss. 74-100)

Hiilikuidut jaetaan usein lujuuden ja jäykkyyden mukaan eri kategorioihin. Käytettyjä kategorioita ovat esimerkiksi standardikuidut eli SM-kuidut (standard modulus), puolijäykät IM-kuidut (intermediate modulus), jäykät HM-kuidut (high modulus) ja erittäin jäykät UHM-kuidut (ultra high modulus). SM-kuituja kutsutaan myös korkean lujuuden tai venymän HS-kuiduiksi (high strength, high strain) tai HT-kuiduiksi (high tenacity) ja niitä käytetään ja valmistetaan myös eniten. HM- ja UHM-kuidut ovat eni-

ten käytettyjä avaruus- ja lentokoneiteollisuudessa. Alla olevassa taulukossa (Taulukko 3) on esitettyä eri kuitulaadut ja niiden tyypillinen kimmomoduli. (13 ss. 74-100)

Taulukko 3. Hiilikuitujen luokittelu. (13 ss. 74-100)

Kuitutyyppi	Kimmomoduli (GPa)
SM	230 GPa
IM	270-320
HM	> 340
UHM	> 440

Hiilikuidut valmistetaan touveina eli jatkuvina kuitukimppuina. Touveilla on filamenttiluku, joka kertoo kuinka monta tuhatta kuitua kimpassa on. Esimerkiksi 3000 kuidun kimppu ilmoitetaan merkinnällä 3K, 6000 kimppu merkinnällä 6K ja niin edelleen. Yleisiä filamenttilukuja ovat esimerkiksi 3K, 6K, 12K, 24K, 48K ja 64K. Lisäksi touvit voivat olla kierteisiä tai suoria. Kierteisyydellä parannetaan yleensä käsiteltävyyttä. Touvien filamenttilukua voidaan käyttää myös jaotteluun, jolloin 1K-24K touvit ovat pienifilamenttilukuisia ja yli 48K touvit ovat suurifilamenttilukuisia. Hiilikuitujen hinta kasvaa filamenttiluvun pienentyessä ja kimmomodulin kasvaessa. (13 ss. 74-100)

Orgaanisista kuiduista eniten käytettyjä ja tunnetuimpia ovat aramidikuidut, joiden kauppanimiä ovat esimerkiksi Kevlar ja Twaron. Aramidikuiduilla voidaan lujittaa samoja matriisija kuin hiili- ja lasikuiduilla, mutta aramidien huonon tarttuvuuden vuoksi matriisilaadun valintaan tulee kiinnittää huomiota. Aramidikuituja on saatavilla useita erilaisia laatuja, jotka ovat tarkoitettu erilaisten tuotteiden valmistukseen aina kumin lujittamisesta ballistisiin tai palonkestäviin sovelluksiin. Yleisiä ominaisuuksia eri laaduille on kuitenkin hygroskooppisuus, alhainen puristuslujuus, tekstiilikuitumainen luonne, sitkeys, palamattomuus ja heikko UV-valon kestävyys. Eräs hankala ominaispiirre aramidikuiduissa on niiden taipumus nukkaantua hio'essa sekä sitkeyden aiheuttama erikoisvaatimus leikkaus- ja työstövälineille. (13 ss. 74-100)

Aramidikuituja käytetään kohteissa, joissa tarvitaan lasi- tai hiilikuitua parempaa iskunkestävyyttä ja sitkeyttä tuotteeseen. Aramidia käytettäessä sitkeät kuidut ehkäisevät halkeamien etenemistä ja samalla katastrofaalista ja äkillistä haurasta rikkoutumista, joka on mahdollinen esimerkiksi lasi- tai hiilikuidussa. Aramidikuitua yhdistään myös usein muihin kuituihin komposiiteissa, jolloin saadaan muutettua ominaisuuksia entisestään. Lasikuitu-aramidilujitteisissa komposiiteissa aramidikuituja lisäämällä voidaan alentaa tuotteen painoa ja parannetaan jäykkyyttä ja käyttöturvallisuutta. Lasikuitu puolestaan parantaa tuotteen taivutus- ja puristuslujuutta sekä alentaa raaka-ainekustannuksia. (13 ss. 74-100)

Hiilikuiduilla ja aramideilla on samankaltaiset lämpölaajenemisominaisuudet, joka parantaa niiden yhteensopivuutta. Hiilikuitujen tarkoitus yhdistelmämaalissa on parantaa puristus-, taivutuslujuutta ja parantaa jäykkyyttä. Aramidikuidut sen sijaan

alentavat painoa, parantavat iskusitkeyttä, iskulujuutta sekä värähtelynvaimennusominaisuuksia. (13 ss. 74-100)

Muita mielenkiintoisia kuituja ovat esimerkiksi polyolefiinikuidut kuten HD-polyeteeni- ja polypropeenikuidut. Kuiduilla on erittäin alhainen tiheys, jonka takia niillä on hyvä ominaisjäykkyys ja -lujuus. Kuiduilla on huono tarttuvuus matriisiaineeseen, joka vähentää niiden käyttöä muovien lujitteena. HD-polyeteenikuituja käytetään kuitenkin jossain määrin lasi- ja hiilikuitujen kanssa parantamaan iskunkestävyyttä ja vauriokäyttäytymistä. (13 ss. 74-100)

Hiilikuitujen ja lasikuitujen välimaastoon sijoittuu myös basalttikuidut. Basalttikuidut ovat vähän tunnettuja ja käytettyjä kuituja, joiden lujuusominaisuudet jäävät E- ja S-lasin välille ja jäykkyys S-lasin ja hiilikuidun jäykkyyden väliin. Koska basalttikuitukomposiittien tiheys on lasikuitukomposiittien suuruusluokkaa, on myös niiden ominaisjäykkyys hieman parempi. Vähäinen tunnettavuus ja pienet valmistusmäärät johtuvat luultavasti maailmanpoliittisista syistä, sillä kuitujen pääasiallinen kehitys on tapahtunut Neuvostoliitossa. Väritään kuidut ovat ruskeita, mustia tai jotain siltä väliltä ja niillä voidaan saada hiilikuitua muistuttava ulkonäkö. Riippuen lähteestä basalttikuitu on ilmoitettu hinnaltaan S-lasia halvemmaksi, mutta E-lasia hieman kalliimmaksi tai kumpaakin kalliimmaksi. Basalttikuiduilla saadaan myös lasikuitua parempi palonkestävyys. (19)(20)

Komposiittien valmistuksessa voidaan käyttää myös erilaisia luonnonkuituja, jotka voidaan jaotella eläin-, puu- ja kasvikuuluihin. Luonnonkuiduilla saadaan tuotteesta ympäristöystävällisempi ja helpommin kierrätettävä, mutta ne ovat herkkiä lämmölle, absorboivat vettä ja kosteutta ja hyönteiset ja sienet voivat tuhota niitä. Niissä on myös suuria laatuvaihteluita, jolloin vaaditaan suuria varmuuskertoimia. Lisäksi tartunta matriisiin on käsittelemättömillä kuiduilla heikko ja käsittely voi heikentää kierrätettävyyttä sekä iskulujuutta ja -sitkeyttä. Samalla myös hinta kasvaa. Tästä syystä kuituja käytetään lähinnä korkeintaan puolirakenteellisissa sovelluksissa, mutta esimerkiksi auton runkorakenteeseen ne eivät ole suositeltavia. Luonnonmateriaaleja pyritään tosin kehittämään jatkuvasti paremmiksi ja esimerkiksi perinteisten kuitujen sijaan selluloosasta valmistetut nanokristallit (CNC) voivat jatkossa olla hyvä lujitevaihtoehto (21). Ominaisuuksien puolesta niillä voisi korvata jo hiilikuidun käyttöä joissain jäykkyyttä vaativissa sovelluksissa ja hinnan väitetään jäävän 1/10 osaan hiilikuidusta. Vetolujuus niillä hiilikuituakin parempi. Näilläkin lujitteilla on tosin ongelmia veden absorption kanssa. (13 ss. 74-100)

Alla olevassa taulukossa (Taulukko 4) on esiteltynä erilaisten kuitujen ominaisuuksia. Arvot ovat esimerkkiarvoja eräiltä valmistajilta ja kirjallisuudesta löytyviä yleisarvoja, jonka takia ne eivät välttämättä ole täysin samoja kuin jostain muualta kirjallisuudesta löytyvät. Suuruusluokan tulisi silti säilyä oikeana, jollei jokin valmistaja saa tehtyä huomattavia teknisiä parannuksia. Tulee huomata, että ominaisuudet eivät suoraan kerro lopullisen komposiitin ominaisuuksia, vaan siihen vaikuttaa myös käytetty matriisi, lisäaineet sekä näiden välinen tartunta ja eri ainesosien pitoisuudet sekä lujitteiden pituus ja suunta. Kuitenkin esimerkiksi käyttölämpötila tai lämpötilankestävyys

kertoo jo kuinka kuitua voidaan hyödyntää, sillä esimerkiksi kestopuovien sulamislämpötila ei voi olla suurempi kuin kuidun kestävyys tai käytettävä ympäristö ei voi sitä pitkäaikaisesti ylittää. Lähtökohtaisesti kuitenkin lasi- ja hiilikuidulla yleensä muovimatriisi rajoittaa maksimikäyttölämpötilan. Vertaamalla eri arvoja voidaan kuitenkin saada jonkinlaista käsitystä kuinka eri kuiduilla lujitetut tuotteet sijoittuvat toisiinsa nähden. Taulukosta voidaan helposti huomata kuinka hiilikuiduilla vetolujuus ja murtovenymä pienenevät kimmomodulin kasvaessa eli jäykemmät kuidut ovat myös samalla helpommin murtuvia.

Taulukko 4. Kuitujen ominaisuuksia. (13 ss. 74-100)(19)(20)(21)

	Vetolujuus (GPa)	Murtovenymä (%)	Kimmomoduli (GPa)	Tiheys (g/cm ³)	Kuidun halkaisija (µm)
PAN-pohjaiset hiilikuidut					
SM-kuitu 1	4,50	1,9	234	1,80	7
SM-kuitu 2	3,80	1,6	228	1,81	7,2
IM-kuitu 1	4,41	1,5	295	1,76	6
IM-kuitu 2	5,60	1,8	290	1,80	5
HM-kuitu 1	4,61	1,3	345	1,77	6
HM-kuitu 2	4,50	1,1	435	1,81	4,7
UHM-kuitu 1	3,82	0,7	588	1,94	4,7
UHM-kuitu 2	4,12	0,8	475	1,88	5
Pikipohjaiset hiilikuidut					
UHM-kuitu 1	3,60	0,58	760	2,12	10
UHM-kuitu 2	2,60	0,42	640	2,12	10
Lasikuidut					
E-lasi	3,60	4,7	75	2,54	9-13
S-lasi	4,60	4,7	86	2,48	9-13
Muita kuituja					
Aramidi 1	3,62	2,5	124	1,44	11,9
Aramidi 2	3,40	4,6	73	1,39	12
Basaltti	3-4,8	3,1	79,3-93,1	2,75	9-23
Polyeteeni 1	2,80	3,6	2,8	0,975	-
Polyeteeni 2	3,50	3,6	3,5	0,975	-
CNC	7,5	-	150	1,60	-

Seuraavassa taulukossa (Taulukko 5) on vertailtuna eri kuitujen suhteellisia hintatietoja. Täysin tarkkaa hintaa ei ole saatavilla, sillä se riippuu esimerkiksi valmistajasta ja määrästä. Esitettävä hinta on halvin saatavilla oleva tuotemuoto eli lanka, rovinki tai touvi. Erilaisilla puolivalmisteilla kuten matoilla, kudoksilla tai prepregeillä hinta voi kasvaa moninkertaiseksi. Kuitenkin voidaan arvioida, että perushinnat ovat jossain määrin sovellettavissa pultruusioon, jossa voidaan hyödyntää jatkuvakuituisia perustuotteita. Taulukosta nähdään, että hiilikuitu on suhteessa lasikuituun erittäin kallista. Hintaa pyritään

kuitenkin tuomaan jatkuvasti alaspäin ja autoteollisuus panostaa paljon yhteistyössä kuituvalmistajien ja tutkimuslaitosten kanssa esimerkiksi halvempien prekursorien eli hiilikuidun valmistuksen lähtökuitujen löytämiseen ja hyödyntämiseen (22).

Taulukko 5. Kuitujen hintavertailu. (13 s. 196)(20)(19)(23)(24)

Materiaali	Suhteellinen hinta
E-lasi	1
S-lasi	1,5
SM-hiilikuitu	20-30
Aramidi	30
Basaltti	1-2,5

Pelkästään kuitujen hintojen vertaaminen keskenään ei anna täyttä kuvaa lopullisten tuotteiden hinnasta. Myös käytettävän materiaalin määrä tulee huomioida. Verrattaessa esimerkiksi lasikuitu- ja hiilikuitulujitteista osaa, joilla on sama jäykkyys, tulee huomioida myös tarvittava materiaalin määrä. Lasikuitulujitteista komposiittia tarvitaan moninkertainen määrä, jolloin myös hintojen välinen kerrannaisuus on pienempi.

3.2.3 Puolivalmisteet

Komposiittiteollisuudessa käytetään paljon erilaisia puolivalmisteita, jotka voivat olla yksinkertaisimmillaan jatkojalostettuja lujitteita ja monipuolisimmillaan lujitteiden, matriisin ja lisäaineiden sekä kovetteen yhdistelmä. Kuiduista voidaan tehdä katkokuitua, katkokuituisia mattoja ja pintahuopia tai esimerkiksi jatkuvakuituisia kankaita, kudoksia, neuleita ja punoksia. Näistä pintahuovilla ei pyritä lisäämään juurikaan lujuutta, vaan muuttamaan pinnan ominaisuuksia. Yhdessä tuotteessa voi olla myös useampaa eri lujitemuotoa, kuten kudoksien ja mattojen yhdistelmät. Voidaan käyttää myös useampaa eri kuitutyyppeä, jolloin puhutaan hybridituotteista. Hybridituotteilla pyritään tuomaan käytettyjen kuitutyyppeiden edut valmiiseen tuotteeseen. Esimerkiksi lasikuitua voidaan käyttää hinnan alentamiseen ja hiilikuitua jäykkyyden lisäämiseksi. (13 s. 123)

Lujitetta ja matriisia sisältäviä puolivalmisteita ovat SMC-, BMC-, ja TMC-massat, GMT-levyt, lujitetut ja täytetyt granulaatit, prepregit sekä muut lujite/muovi-yhdistelmätuotteet. Granulaateissa, BMC-, ja SMC-massoissa käytetään yleisesti lyhyitä katkokuituja, joiden takia myöskin mekaaniset ominaisuudet jäävät jatkuvakuituisia tuotteita alemmiksi. SMC-massoissa voidaan tosin käyttää myös jatkuvaa kuitua. (13 s. 123)

SMC-massa (Sheet Moulding Compound) on levymäinen tuote, jota hyödynnetään kuumapuristuksessa. SMC-pastat koostuvat polyeteenikalvoista, pastamaisesta hartsista ja lujitteista. Lujitteet ovat polyeteenikalvojen välissä hakkeena, jatkokuituna tai mattoina. Pastamaista hartsia on levitettyä sekä kalvojen välissä, että niiden päälle. Pastassa on hartsin lisäksi mukana paksunnosaineita sekä muita haluttuja lisäaineita. SMC-pastoissa lujite on yleensä lasikuitua ja niissä on matriisin lisäksi usein myös lisä-

ainetta. Yleisimmät matriisiaineet ovat orto- ja isopolyesterit sekä vinyyliesterit, mutta myös epokseja ja fenoleja voidaan käyttää. Käytetyt lujitesuunnat ja pitoisuudet vaikuttavat tuotteen lopullisiin ominaisuuksiin. Käytetyillä lisäaineilla kuten kutistumaa pienentävällä lisäaineella voidaan alentaa valmistuksessa tapahtuvaa muottikutistumaa ja tehdä mittatarkempia tuotteita. SMC-pastat lajitellaankin usein kuitupitoisuuden ja kutistumaa alentavan lisäaineen määrän avulla. (13 ss. 136-139)

BMC-massat (Bulk Moulding Compound) ovat yleensä isopolyestereihin perustuvia taikinamaisia puolivalmisteita. Polyestereiden lisäksi voidaan käyttää myös esimerkiksi muita polyesteri- tai epoksihartseja erikoissovelluksissa. BMC-massa kovetetaan lämmön avulla joko puristemuovaamalla tai ruiskupuristamalla. SMC-massan tapaan myös BMC-massassa käytetään usein lisäaineita. Käytettävät kuidut ovat yleensä lasikuitua, mutta myös hiili- ja aramidikuituja käytetään esimerkiksi epoksien kanssa erikoissovelluksissa. BMC-massoihin kuuluu myös erikoismassat TMC (Thick Moulding Compound), CIC (Continuous Impregnated Compound) ja ZMC (Z Moulding Compound). TMC on täysin kuidut kostuttava mekaanisilta ominaisuuksiltaan BMC:a parempi paksu levy. CIC on TMC-massan kaltainen, mutta erilaisella menetelmällä valmistettu ja ZMC on matalien leikkausvoimien erikoistuote erälle injektioalaitetyypille. (13 ss. 139-142)

Kertamuovipregit ovat puolivalmisteita, joissa hartsi ja kovete ovat impregnoituna kuituun, joka voi olla mitä tahansa tyyppiä. Lujite voi olla muodoltaan niin yksittäinen kuitukimppu kuin yhdensuuntainen nauha tai moniaksaalinen kudus. Prepregit ovat puolijähmeässä B-tilassa ja perinteisesti niitä on täytynyt säilyttää pakkasessa, josta ne tuodaan ennen käyttöä lämpeämään huoneenlämpöön. B-tila on epävakaata jolloin prepreg-tuotteilla on rajallinen säilyvyys. Nykyään on kehitetty myös huoneenlämmössä säilytettäviä laatuja (25). Prepreg-tuotteet kovetetaan lämmön avulla. (13 ss. 142-145)

Kestomuoviprepregeissä kuidut ovat impregnoitu kestomuovilla, joka voi olla esimerkiksi PP:a, PA:a tai polykarbonaattia. Kertamuoviprepregien tapaan voidaan käyttää kaikkia kuitutyyppisiä ja erilaisia kuitumuotoja. Kestomuoveja hyödyntämällä voidaan parantaa lämmönkestävyyttä ja nopeuttaa valmistusprosessia. Prepregejä voidaan säilyttää huoneenlämmössä ja niillä on samalla lähes loputon säilyvyysaika. Valmiilla tuotteilla on yleensä kertamuoveja parempi iskutietoisuus ja vaurionkestävyys ja niitä voidaan jossain määrin muokata jälkikäteen lämmöllä. Kestomuovipregit ovat kuitenkin hankalammin asetettavissa muottiin eivätkä ne tartu toisiinsa yhtä hyvin kuin kertamuoviset. Valmistuksessa tarvitaan myös korkeita lämpöjä matriisin sulattamista varten ja käytetyt paineet ovat myös kertamuovituotteita korkeampia. Myös kestomuoviprepregien valmistus on kalliimpaa ja hankalampaa, jolloin myös prepregit ja niistä tehdyt tuotteet ovat kalliimpia. (13 ss. 145-146)

Levymäisiä kestomuovituotteita valmistetaan esimerkiksi GMT-levyistä (Glass Mat Thermoplastic), jotka ovat periaatteessa kahden kestomuovikalvon väliin polypropeenilla impregnoituja jatkuvaa lasikuitua. Toinen levymäinen tuote on suomalaisen Ahlstrom Glassfibre Oy:n kehittämä RTC (Reinforced Thermoplastic Composite), jossa käytetään jatkuvan kuidun sijaan haketta ja erilaista impregnointimenetelmää, jolla saa-

daan lähes täydellinen kostuminen. Lisäksi tuotteella on erittäinen tasainen jakauma. (13 ss. 146-147)

Lujite/kertamuovi- ja lujite/kestomuovi-tuotteet ovat puolivalmisteita, jossa kiinteä matriisiaine sijaitsee kahden lujitekerroksen välissä. Kestomuovituotteissa matriisi voi olla myös kuitujen päällä tai pulverimaisessa muodossa tai nauhoina. Lujitteet kostuvat valmistusprosessin aikana. (13 ss. 146-147)

Muita kestomuovipuolivalmisteita ovat myös erilaiset itsensä lujittavat materiaalit. Näissä materiaaleissa matriisi ja lujite ovat samaa materiaalia. Tällaisia tuotteita ovat esimerkiksi polypropeeni/polypropeeni tuotteet, joissa vetämällä valmistettujen kuitujen päälle ja alle ekstrudoidaan kerrokset samaa materiaalia. Tuotteita on saatavilla kankaana, teippinä ja levynä. Tuotteiden valmistus tapahtuu lämpömuovaamalla, usein puristusmuovauksella. Ominaisuuksiltaan tuotteilla on hyvä iskunkestävyys, suhteellisen korkea ominaisjäykkyys ja alhainen massa. Muita etuja tuotteilla on esimerkiksi helppo kierrätettävyys, sillä ne voidaan kierrättää sulattamalla lujittamattoman kestomuovin tapaan. Ulkonäöllisesti tuotteisiin saadaan selvä kuitumainen rakenne ja materiaali on värjättävissä. Tunnettuja kaupp nimiä ovat esimerkiksi Pure ja Curv. (26)(27). Runkorakenteisiin materiaali ei luultavasti sovi, sillä sen kimmoduli on muihin materiaaleihin verrattuna liian alhainen. Sen iskunkestävyyden ja ulkonäön ansiosta sitä voitaisiin tosin ehkä hyödyntää näkyvissä korkeintaan puolirakenteellisissa osissa joihin voi kohdistua iskuja.

3.2.4 Kerroslevyrakenteet

Kerroslevyrakenteet ovat komposiittien erikoistyyppi, jossa perusajatuksena kahden ohuen ja jäykän levyn välissä ydinaineena on liimattuna paksumpi kerros matalan tiheyden ja alhaisemman jäykkyyden materiaalia. Rakenteella pyritään saamaan hyvä taivutusjäykkyys ja alhainen massa. Muita haluttuja ominaisuuksia voi olla esimerkiksi iskuenergian imeminen rakenteeseen tai kalliin ja jäykän materiaalin määrän minimoiminen. Kerroslevyrakenteita voidaan myös käyttää, jos halutaan parantaa äänen- ja lämmöneristysominaisuuksia. Kerroslevyt ovat melko yksinkertaisia valmistaa ja niillä saadaan hyvä lujuus/paino-suhde sekä jäykkyys/paino-suhde. Rakenne on siis kokonaisuutena komposiitin määritelmän täyttävä, mutta usein myös pintalevyt ovat komposiittilaminaattia. (13 ss. 105-113)

Ydinaineeseen kohdistuu rakenteessa puristus- ja leikkausvoimia ja ne tukevat pintalevyjä estäen niiden poimuuntumisen tai lommahtamisen. Rakenteensa takia kerroslevyt ovat kuitenkin alttiina pistemäisille kuormituksille ja osumille, sillä heikompi ydinaine kestää paremmin suurella alueella jakautuvat voimat. Mekaaninen kestävyys antaa siten ydinaineelle tietyt vaatimukset, mutta lisäksi ydinaineelta saatetaan vaatia esimerkiksi tietynlaisia absorptio-, väsymis- ja palonestoominaisuuksia sekä tiettyä hintatasoa. (13 ss. 105-113)

Pintalevyt voivat olla esimerkiksi komposiittia, alumiinia tai terästä. Ydinaineina käytetään solumuoveja, luonnonmateriaaleja ja kennoja. Solumuoveja voidaan valmis-

taa useista eri polymeerilaaduista ja niiden solustus voi olla kemialliseen reaktioon pohjautuva tai fysikaalinen, jossa esimerkiksi voidaan käyttää lasikuulia tuomaan huokoisuutta rakenteeseen. Luonnonmateriaaleista käytetyin ja tunnetuin on balsa. Balsalla saadaan solumuoveja paremmat ominaisuudet, mutta orgaanisena ydinaineena sille on ominaista anisotrooppiset ominaisuudet, veden absorptio ja lahoaminen. Ilman käsittelyjä balsalla on myös taipumusta imeä liima-ainetta rakenteeseen nostaan tällöin massaa. Liimoista ja niiden käytöstä voi lukea enemmän kappaleesta 6.1.

Kennot ovat levymäisestä ohuesta materiaalista valmistettuja ydinaineita, joissa muodostuu selkeä kuvio. Kennoja voidaan valmistaa esimerkiksi liimaamalla levyjä päällekkäin sopivista kohdin ja vetämällä rakenne auki. Rakenne voi olla esimerkiksi heksagonaalinen tai neliö, mutta myös monia muita vaihtoehtoja on olemassa. Metallisia kennoja voidaan valmistaa esimerkiksi hitsaamalla poimutettuja levyjä yhteen. Kennomateriaaleja on olemassa satoja erilaisia ja ne voivatkin olla niin metallia, pahvia, paperia, komposiittia kuin kestopuoviakin. (13 ss. 105-113)

3.3 Vertailua eri materiaalien välillä

Tässä osiossa pyritään vertaamaan erilaisia komposiitti- sekä metallilaatuja keskenään. Raaka-aineiden monipuolisuuden ja rakennevaihtoehtojen takia erilaisia vaihtoehtoja on lukematon määrä. Erityisesti komposiiteilla vaihtelua saadaan paljon, sillä materiaalien lisäksi lujitteen määrä, orientaatio sekä esimerkiksi valmistusprosessi vaikuttavat lopullisiin ominaisuuksiin. Kaikkea ei pyritäkään esittämään vertailuissa, vaan keskitytään vertaamaan yleisesti komposiitti- ja metallivaihtoehtoja.

Taulukko 6 (s.23-24) esittää joitain kuitulujitettujen komposiittien mekaanisia ominaisuuksia joiden vertailuarvoiksi on annettu tietoa metalleista. Taulukossa vaihtoehdot 1 ja 2 sekä 3 ja 4 ovat samoja materiaaleja, mutta kuormitussuunta muuttuu 45° . Kankaat ovat $0^\circ/90^\circ$ rakenteella, jolloin ne ovat periaatteessa ominaisuuksiltaan vastavia 0° - ja 90° tai $\pm 45^\circ$ -kuormitussuunnissa. Tällöin niille on ilmoitettu sama arvo kumpaankin suuntaan, vaikka käytännössä arvoissa voi olla lieviä eroja johtuen esimerkiksi kuitujen mahdollisesta liikkumisesta valmistusvaiheessa. Perus CF 3 ja 4 materiaalin tiheyttä ei ollut ilmoitettu, mutta sille on laskettu keskimääräinen arvio saatavien tietojen perusteella.

Metalleille on ilmoitettu isotropian johdosta samat arvot 0° ja 90° , vaikka esimerkiksi erilaiset työstämiset ja käsittelyt voivat tehdä niistä jossain määrin anisotrooppisia. Metalleille ei ole eriteltyä puristuslujuutta, sillä yleensä metallien veto- ja puristuslujuudet ovat samoja. Lujuusarvot on ilmoitettu murtolujuudelle, sekä myötölujuudelle hyödyntäen 0.2 % venymän arvoa. Näistä myötölujuus on ensimmäinen kahdesta arvovälistä ja murtolujuus toisena jakomerkin jälkeen. Arvoväli johtuu markkinoilla olevista lukuisista erilaisista laaduista ja ominaisuuksien muuttumisesta esimerkiksi erilaisissa lämpökäsittelyistä. Taulukkoon on listattu myös ominaisjäykkyydet ja -lujuudet, sillä ne kertovat kuinka materiaali käyttäytyy painonsa tiheyden suhteen. Tämä tieto on erityisen tärkeää painokriittisten sovellusten suunnittelussa.

Taulukko 6. Eri materiaalien mekaanisia ominaisuuksia. (28)(29)(30 s. 172)(31)

	Kimmoduuli 0°	Kimmoduuli 90°	Vetolujuus 0°	Vetolujuus 90°	Puristuslujuus 0°	Puristuslujuus 90°	Tiheys
	GPa		MPa				g/cm ³
Perus CF kangas 1	70		600		570		1,6
Perus CF kangas 2	19,1		120		120		1,6
Perus CF kangas 3	45		475		480		1,55
Perus CF kangas 4	11,2		150		165		1,55
HMCF kangas 1	85		350		150		1,6
E-lasi kangas 1	25		440		425		1,9
E-lasi kangas 2	12,2		120		120		1,9
Kevlar kangas 1	30		480		190		1,4
Perus CF UD 1	135	10	1500	50	1200	250	1,6
Perus CF UD 2	17	17	110		110		1,6
HMCF UD 1	175	8	1000	40	850	200	1,6
HMCF UD 2	17	17	110		110		1,6
E-lasi UD 1	40	8	1000	30	600	110	1,9
E-lasi UD 2	12,3		90	90	90	90	1,9
Kevlar UD 1	75	6	1300	30	280	140	1,4
Teräs	207	207	200 - 500 / 500 - 950				7,85
Alumiini	70	70	120 - 280 / 160-350				2,7

	Om.jäykkyyks 0°	Om.jäykkyyks 90°	Om.vetolujuus 0°	Om.vetolujuus 90°	Om.puristuslujuus 0°	Om.puristuslujuus 90°	Tiheys
	GPa		MPa				g/cm ³
Perus CF kangas 1	44		375		356		1,6
Perus CF kangas 2	12		75		75		1,6
Perus CF kangas 3	29		306		310		1,55
Perus CF kangas 4	7		97		106		1,55
HMCF kangas 1	53		219		94		1,6
E-lasi kangas 1	13		232		224		1,9
E-lasi kangas 2	6		63		63		1,9
Kevlar kangas 1	21		343		136		1,4
Perus CF UD 1	84	6	938	31	750	156	1,6
Perus CF UD 2	11	11	69		69		1,6
HMCF UD 1	109	5	625	25	531	125	1,6
HMCF UD 2	11	11	69		69		1,6
E-lasi UD 1	21	4	526	16	316	58	1,9
E-lasi UD 2	12		47	47	47	47	1,9
Kevlar UD 1	54	4	929	21	200	100	1,4
Teräs	26	26	25 - 64 / 64 - 121				7,85
Alumiini	26	26	45 - 104 / 59-130				2,7
Kangas 1 = 0°/90° suunnattu, Kuitujen tilavuusosuus 50%, Matriisina epoksi Kangas 2 = kangas 1 45° suuntaan kuormitettuna Kangas 3 = 0°/90° suunnattu, Kuitujen tilavuusosuus 40-45%, Matriisina polyuretaani Kangas 4 = kangas 3 45° suuntaan kuormitettuna UD 1 = kuitujen tilavuusosuus 60%, Matriisina epoksi UD 2 = sama kuin UD 1, 45° kuormitus							

Taulukosta voidaan huomata kuinka komposiittien anisotropia vaikuttaa lujuteen eri kuormitussuunnissa. $\pm 45^\circ$ Kuormitus osoittaa käytännössä komposiittien tason suuntaisen lujouden heikoimman arvon $0^\circ/90^\circ$ -rakenteilla. Tällöin komposiittien suunnittelussa voidaan hyödyntää kvasi-isotrooppista rakennetta tai optimoida rakenne sen kohtaamien kuormitustilanteiden mukaan. Hiilikuitukomposiitteja verratessa keskenään nähdään kuinka suuri vaikutus kuitusuunnilla, -pitoisuuksilla sekä matriisivaihtoehdoilla voi olla, jolloin yleispäteviä johtopäätöksiä voi olla hankala tehdä. Taulukoista voidaan kuitenkin nähdä, että lujuudeltaan lasikuitukomposiitti pärjää hyvin verrattaessa hiilikuituisiin, aramidikangas (Kevlar) puolestaan ei anna muihin kuituihin verrattuna läheskään yhtä hyvää puristuslujuutta, mutta se on silti kilpailukykyinen alumiinin ja heikoimpien teräslaatuojen kanssa.

Taulukosta voidaan myös helposti huomata kuinka ominaislujuudet ja –jäykkyydet eroavat tavallisista materiaaliarvoista. Voidaan nähdä kuinka teräksen ja alumiinin keskinäiset erot vähentyvät ja komposiittien edut tulevat ilmi paremmin.

Seuraavassa taulukossa (Taulukko 7) on esitettyä eri materiaalien lämpölaajenemiskertoimia. Taulukosta huomataan, että eri kuiduilla on suuri vaikutus lämpölaajenemiskertoimeen. Yksittäisuunnatuissa komposiiteissa voidaan havaita matriisiaineen ominaisuuksien olevan merkitsevä kuituja vastakkaisessa suunnassa. Alumiinin ja ruostumattoman teräksen kanssa komposiitit eivät ole kovin hyvin lämpölaajenemisen kannalta yhteensopivia. Tämä voi aiheuttaa ongelmia esimerkiksi liitoksissa. Taulukon perusteella lasikuitulujitteiset komposiitit ovat kuitenkin melko hyvin yhteensopivia teräksen ja titaanin kanssa, joista tosin titaania ei hinnan puolesta kannata hyödyntää autoteollisuudessa. 181-tyyppinen kangas ja 24x23, sekä 8HS ovat erilaisia kankaiden kudostyyppisiä, joihin ei sen tarkemmin syvennytä.

Taulukko 7. Materiaalien lämpölaajeneminen. (32)

Materiaali	Lämpölaajenemiskerroin ($10^{-6} / \text{K}$)	
	Pitkittäissuunta	Poikittaissuunta
Hiilikuitu/epoksi UD	0,43	29,2
Hiilikuitu/epoksi kvasi-isotrooppinen	3,4	3,4
Hiilikuitu/epoksi (24x23-8HS)	2,7	4,0
E-lasi/epoksi UD	8,6	-
E-lasi/epoksi (181-tyyppinen kangas)	9,9	12,1
Aramidi/epoksi UD	-5,4	-
Aramidi/epoksi (181-tyyppinen kangas)	-1,8	-1,8
Alumiini	23,4	
Teräs	10,8	
Titaani	10,1	
Ruostumaton teräs	18	

Komposiitti- ja metallimateriaaleja verratessa tulee huomioda myös mekaanisten ominaisuuksien ja lämpölaajenemisen lisäksi muut ominaisuudet. Komposiitteja puoltaa niiden parempi sähkön- ja lämmöneristävyys, jolloin rakenteita ei välttämättä tarvitse erikseen eristää. Myös parempi korroosionkestävyys ja sen vaikutukset pitkällä aikavälillä tulisi huomioda materiaalivalinnoissa.

Materiaaleja verratessa voidaan miettiä mitkä vaihtoehdot sopisivat parhaiten auton korirakenteisiin. Hiilikuitu on saavuttanut tällä hetkellä suurien massojen tietoisuuden ja muiden kuitujen käyttöä ei juurikaan näe olevan edes suunnitteilla kantavissa korirakenteissa autoteollisuudessa. On tietysti totta, että hiilikuidulla saavutetaan muita lujitevaihtoehtoja korkeammat ominaisjäykkyydet ja -lujuudet, mutta sen korkea hinta verrattuna muihin rajoittaa komposiittirungot kalliimpiin hintaluokkiin. Tosin kaikissa tapauksissa hiilikuidullakaan ei ole edes alumiinia parempi ominaisjäykkyys kuten liitteen 1 mukaan voidaan päätellä. Voisi ollakin edullista pyrkiä tutkimaan muiden kuitu-

jen käyttöä niiden alhaisemman hinnan takia. Esimerkiksi lasi- tai basalttikuidulla pitäisi pystyä saamaan aikaan vähintään yhtä suuri ominaisjäykkyys kuin alumiinisella rakenteella ainakin yhdessä kuormitus suunnassa. Tällainen tilanne voisi soveltua esimerkiksi pitkään profiiliin ja siihen kohdistuviin kuormituksiin space frame-rakenteessa. Samalla voisi pohtia myös hybridirakenteita ja eri osien valmistusta eri materiaaleista jolloin esimerkiksi jäykkyys tuotaisiin hiilikuiduilla ja hintaa alennettaisiin lasi- tai basalttikuiduilla.

Lasikuidullakin on kuitenkin mahdollista saada aikaan riittävä lujuus, kuten vertaamalla ominaisuuksia nähdään. Lasikuiduilla, kuten muillakin haurailla kuiduilla, voi olla silti arvaamattomia seurauksia kolaritilanteessa. Komposiitti voi pahimmassa tapauksessa säilytyä vaarallisiksi teräviksi tikuiksi ja aiheuttaa siten suuria ongelmia turvallisuudessa. Tosin huolellisella suunnittelulla vaarallisesti hajoavia rakenteita voidaan välttää.

Matriisivaihtoehdoista käyttöön valikoituu helposti epoksi, koska sillä saadaan aikaan hyvät mekaaniset ominaisuudet ja käyttökohteeseen riittävät kemialliset ominaisuudet. Myös kierrätyksen kannalta epoksi voi olla tulevaisuudessa hyvä vaihtoehto, jos kierrätyskykyinen epoksi saa vallattua markkinoita. Jos Creative Pultrusionin tiedot pitävät paikkansa niin olisi polyuretaani parhaimpia vaihtoehtoja kierrätettävyyttä lukuunottamatta, mutta käytännössä asia tulisi testata.

Kertamuoveja parempi vaihtoehto kierrätettävyyden kannalta olisi kestomuovien käyttö. Esimerkiksi RTM-prosessiin sopivat polyamidit voisivat olla parhaimpia, sillä niillä saataisiin hyvin lujitettu tuote, jota voidaan muokata helpommin ja jonka iskunkestävyys on luontaisesti kertamuovituotteita parempi. Lisäksi kuumien metalliosien, kuten moottorin tai pakoputken lähistöllä täytyy kiinnittää huomiota käytettävään matriisiin, sillä useilla kertamuovilaaduilla on liian alhainen lämmönkesto. Kestumuoveilla on usein kertamuoveja korkeammat lämmönkestävyydet. RTM-laatuksen polyamidin kohdalla ei tosin ole vielä tietoa käyttölämpötiloista. Näiden tietojen varjossa esimerkiksi polyesteriä ei kannata käyttää matriisivaihtoehtona, sillä sen alhainen hinta ei riitä puoltamaan esimerkiksi kierrätettävyyden etuja.

Muita kestomuovien etuja voisi olla paremmin autoteollisuuden maalausprosessiin sopivat lämpötilankestävyydet. Kertamuovikomposiiteille nykyiset korkean lämpötilan käsittelyt eivät sovellu melkein lainkaan tai vaaditaan mahdollisesti kalliimpia ja erikoisempia laatuja. Tosin kestumuoveista maalaamon korkeita lämpötiloja paremmin kestävä laadut, kuten polyimidit ovat melko kalliita. Myös polyamidien eri laatuja hinnoista on hankala tässä esittää arvauksia, ja esimerkiksi RTM-laadun lämpötilankestosta tai hintatasosta ei ole vielä tietoa.

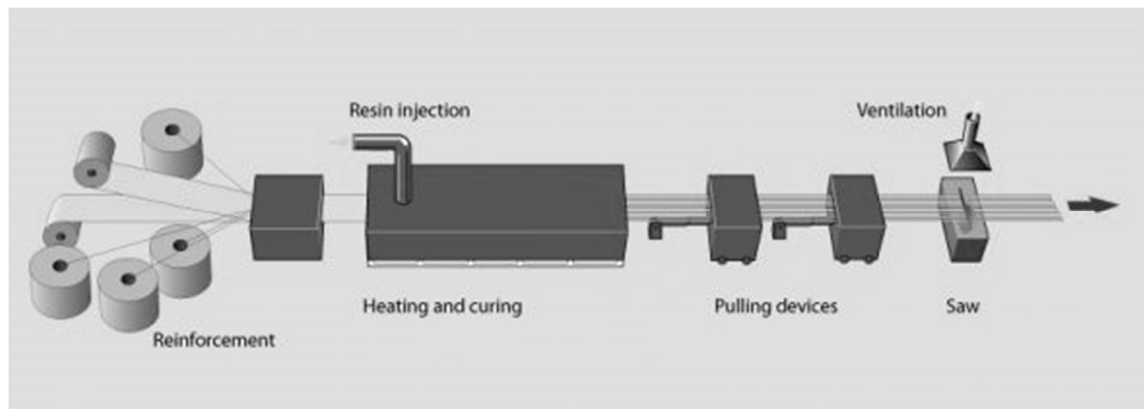
Rakenteellisesti voisi pyrkiä hyödyntämään paljon kerroslevyrakenteita. Niissä yhdistyy alhainen paino, korkea jäykkyys ja eristysominaisuudet. Tällöin yhdistyy käytännössä paljon auton rakenteilta vaadittavia asioita yhteen tuotteeseen. Tosin kerroslevyissä täytyy huomioida niiden heikompi kestävyys pistemäisiä iskuja ja kuormia vastaan sekä niiden suuremmat tilavaatimukset.

4 PULTRUUSIO

Tässä osiossa käsitellään pultruusiomenetelmää komposiittien valmistuksessa. Menetelmää ei tiettävästi käytetä tällä hetkellä henkilöautojen valmistuksessa. Muita valmistusmenetelmiä käsitellään kappaleessa 5.

Pultruusio on jatkuvatoiminen ja automatisoitavissa oleva valmistusmenetelmä, jossa kertamuoveja käytettäessä kostutettua kuitua vedetään lämmitetyn muotin lävitse. Lämmitetty muotti antaa tuotteelle muodon sekä kovettaa sen. Lämmityksen jälkeen tuotetta jäähdytetään, jotta se kestäisi prosessin vaatiman vetojännityksen. Kovettuneet tuotteet katkaistaan jäähdytyksen jälkeen sopivaan mittaan. Menetelmä on nopea ja kustannustehokas, mutta sillä pystytään valmistamaan ainoastaan profiileja, joilla on vakio poikkipinta-ala. Menetelmä on esiteltyä seuraavassa kuvassa. (13 ss. 186-189)

Kuvassa on ensimmäisenä kuituvahvikkeet kankaina, mattoina ja jatkuvina kuitukimppuina. Lujitteet ohjataan esimuotoilijan kautta ja impregnoidaan hartsilla. Tämän jälkeen prosessi etenee lämmitettyyn muottiin, jossa kovetus tapahtuu. Muotin jälkeen on esitettyä vetolaitteisto, jäähdytys- sekä katkaisuyksikkö.



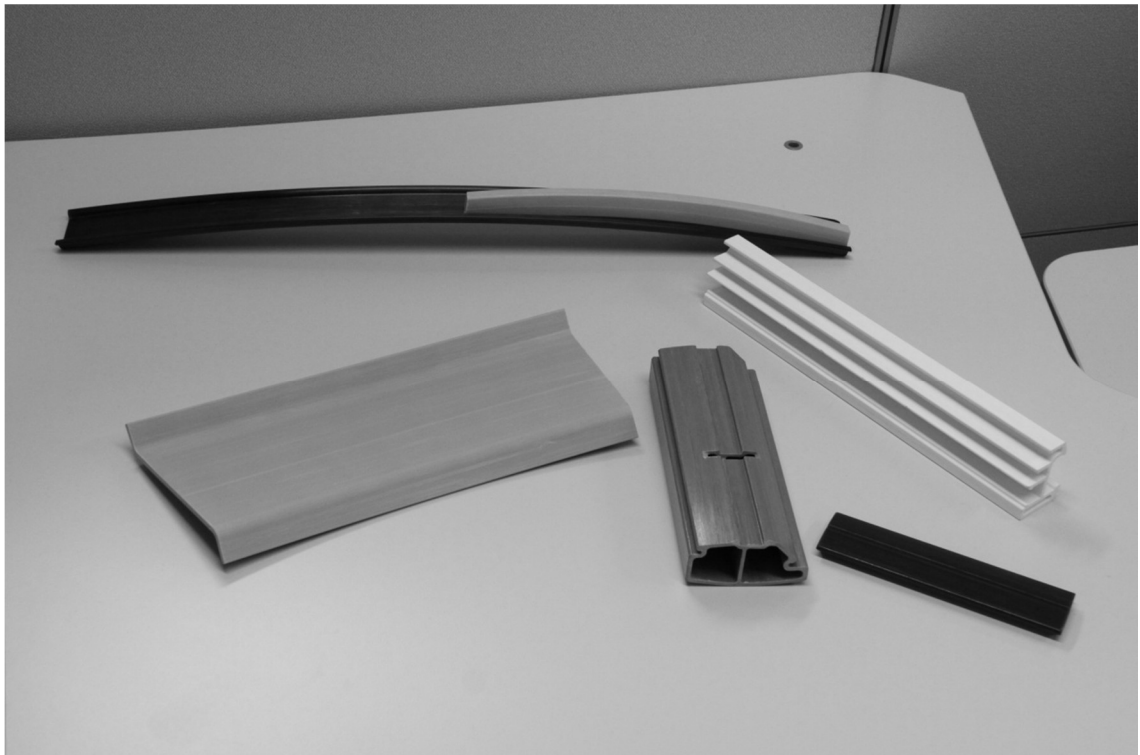
Kuva 5. Pultruusiomenetelmä (33)

Pultruusiossa käytetään yleensä kertamuovihartseja, mutta myös kestumuoveja voidaan hyödyntää. Kestumuoveilla lämmityksen tarkoituksena tosin on sulattaa muovi yhtenäiseksi tuotteeksi ja sitä saatetaan jäähdyttää kovettamisen nopeuttamiseksi. Yleisesti käytetään polyesterihartsia, mutta myös epoksi-, fenoli-, metakrylaatti-, vinyylisteri- sekä polyuretaanihartseja käytetään. Menetelmässä voidaan esimerkiksi hyödyntää lasi-, hiili-, aramidi-, sekä basalttikuituja, joista yleisimmin käytetään lasikuitua. Jotkut valmistajat tarjoavat myös ympäristöystävällisenä vaihtoehtona luonnonkuituja (34). Epokseja ja hiilikuitua käytetään yleensä, kun halutaan korkean lujuuden, jäykkyyden ja alhaisen tiheyden tuotteita. Kuidut voivat olla rovinkeina tai touveina, mutta myös mattoja ja kudoksia hyödynnetään. Pultruusiossa voi lujitteena olla myös erilaiset prepregit, joiden

hyödyntäminen on yleistä esimerkiksi kertamuoveilla niiden suuren viskositeetin takia. (13 ss. 186-189)(15)(35)(36)

4.1 Erilaiset variaatiot

Pultruusiosta on olemassa useita erilaisia variaatioita, joilla pystytään valmistamaan esimerkiksi kaarevia ja poikkipinnaltaan muuttuvia profiileja. Kaarevia profiileja voidaan valmistaa esimerkiksi kaksiosaisella muotilla, joista toinen on liikkuva puoli (13 ss. 186-189). Eräs toinen menetelmä kaarevien profiilien valmistamiseen on Thomas Technik GmbH:n radius- tai reverse-pultrusion niminen menetelmä (24). Reverse-pultrusion-menetelmässä kaarevat muodot on mahdollistettu kääntämällä perinteisen pultrusion toiminta päinvastaiseksi, sillä kaarevaa muotoa ei pystytä vetämään muotin lävitse yhtä helpolla. Menetelmässä hyödynnetään liikkuvaa muottiosaa, joka kulkee kovetuksen aikana linjan mukana. Kovettuaan muotin sisällä olevan pätjän, palaa takaisinpäin ja kovettaa uuden kohdan. Tällöin missään vaiheessa kovettunutta tuotetta ei vedetä muotin lävitse. Rajoittavana tekijänä menetelmässä on vakio kaarevuussäde ja kaltevuuskulma. Erilaisia pultruusiotuotteita on esitettyä alla olevassa kuvassa (Kuva 6). Kuvassa kaikki muut paitsi valkoinen profiili ovat kaarevia, mutta kuvakulmasta ja profiilien suuresta kaarevuussäteestä johtuen kaarevuus voi olla hankala havaita. (24)

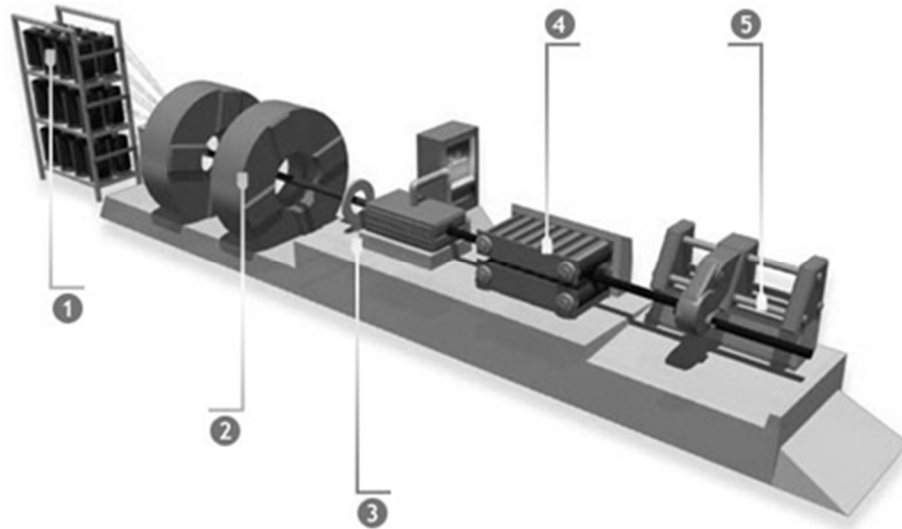


Kuva 6. Pultrusionäytteitä

Thomas Technik on myös jatkokehittänyt reverse-pultrusion menetelmää ja kutsuu sitä käärmettä tarkoittavalla snake-pultrusion nimellä. Menetelmässä kiinteä muotti on korvattu taipuisalla, jolloin pultruusioprosessissa voidaan tehdä kappaleita vaihtelevalla

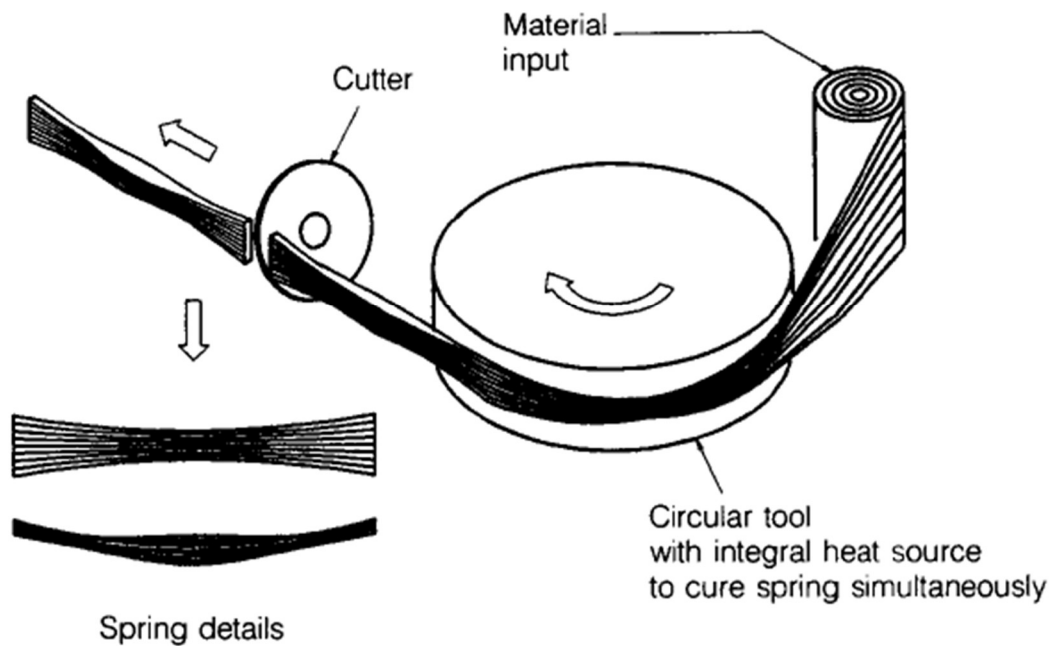
kaarevuussäteellä muuttamalla muotin kaarevuutta. Tarkkaa tietoa ei ole onko menetelmä kehitetty jo sarjatuotantoasteelle. (24)

Suomalainen Exel Composites puolestaan on kehittänyt pullwinding tyyppisen menetelmän, jossa yhdistetään kuitukelaus ja pultruusio eli profiilien ympärille voidaan kelata kuituja tai teippejä myös poikkisuunnassa (37). Menetelmä on esitettyä alla olevassa kuvassa (Kuva 7). Kuvassa kohta yksi kuvaa kuituja. Kohta kaksi esittää yksikköä, jossa kuitua voidaan kelata myös poikittaisissa suunnissa. Kohdassa kolme on esimuotoilu ja impregnointi ja muotti. Kohdassa neljä on esitettyä vetoyksikkö ja kohdassa 5 on katkaisuyksikkö.



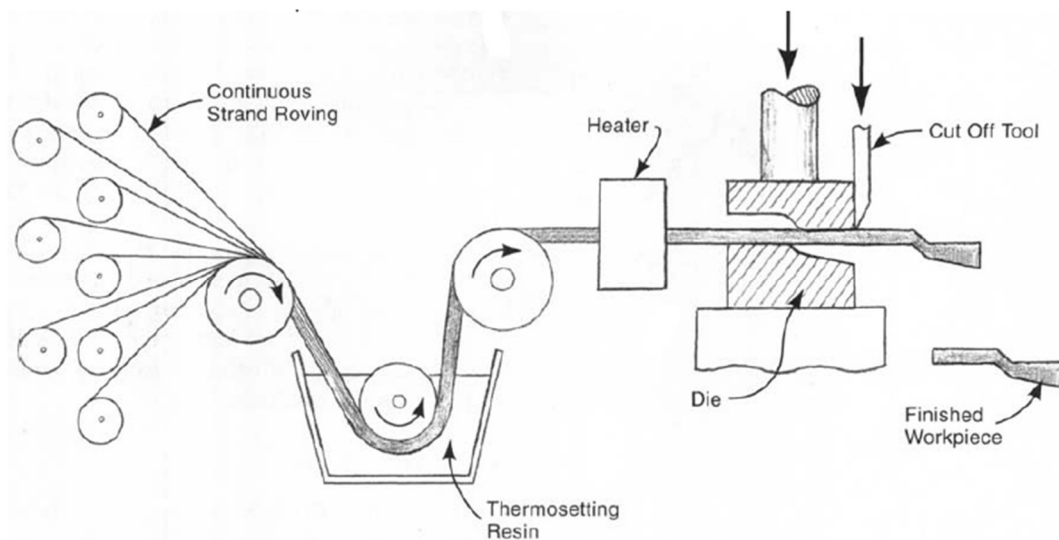
Kuva 7. Pullwinding menetelmä (37)

Eräänä pultruusion variaationa voidaan tarkastella myös pulforming-nimistä menetelmää. Samalla nimellä kutsutaan useampaa toisistaan hieman poikkeavaa tapaa valmistaa tuotteita riippuen siitä halutaanko poikkileikkauksessa vaihtuvan muodon lisäksi muuttuva tilavuus. Eräs tapa on käyttää pyörivää naarasmuottia, jonka erilaiset muodot mahdollistavat muutokset kaarevan profiilin, jossa voi muuttua poikkipinta-ala ja muoto. Naarasmuotin vastakappaleena voi toimia esimerkiksi teräshihna. Menetelmällä valmistetaan esimerkiksi autojen lehtijousia. (38 pp. 262-264). Seuraavassa kuvassa on esitettyä menetelmän toiminta (Kuva 9).



Kuva 8. Eräs pulforming prosessi (38 p. 264)

Toinen tapa vastaa myös pultruusiota, mutta kiinteän muodon antavan profiilimuotin sijaan käytetään aukeavaa muottia. Aukeava muotti mahdollistaa kappaleessa perinteistä pultruusiota monimutkaisemmat muodot. Tämän tyyppisessä menetelmässä voidaan tarpeen mukaan lisätä materiaalia tarvittaviin kohtiin muottia. Alla olevassa kuvassa on esiteltyä kuvaus menetelmästä (Kuva 9). (39 pp. 180-181)



Kuva 9. Pulforming menetelmä (39 p. 181)

Kolmas esiteltävä pullforming-menetelmämuunnos yhdistää pultruusion ja BMC-massan. Siinä annostellaan BMC-massaa vedettävän yksittäisen kuitunipun päälle tasaisen välimatkoin. Helminauhaa muistuttava kuidun ja BMC-massan yhdistelmä vedetään muottiin tai prässiin, jossa sille annetaan lopullinen muoto. Menetelmää voidaan käyttää

esimerkiksi työkalujen varsien valmistuksessa. Tällöin pullforming muistuttaa menetelmänä pultruusion ja puristusmuovauksen yhdistelmää. (40 ss. 544-546)(41)

Pultruusio on yhdistetty myös menetelmänä punontaan, jolloin alkupäässä laitteistoa kuitua punotaan sopivaan muotoon ja vedetään profiilin läpi. Käytetyt lujitteet ovat usein valmiiksi impregnoituja kuituja. Menetelmässä voidaan käyttää esimerkiksi kestonuovipohjaisia matriiseja. (42)

4.2 Suunnittelurajoitteet

Perinteinen pultruusio-prosessi asettaa tiettyjä rajoitteita profiilin suunnittelussa. Varsinaista teoreettista kokorajoitetta menetelmässä ei ole, mutta käytännössä koko rajoittuu valmistajien laitteiston mukaan. Prosessin luonteen takia profiilien pituutta ei ole rajattu, mutta käytännössä kuljetus ja valmistajien tilat asettavat maksimipituudet. Henkilöautojen valmistuksen kannalta profiilien pituus ei ole siten rajoittava tekijä. (13 ss. 186-189)

Perinteisen pultruusion vakiopoikkileikkaus asettaa yhden suurimmista suunnittelurajoitteista. Tästä johtuen profiilit ovat suoria ja kaksoiskaarevia pintoja ei voida toteuttaa, jolloin menetelmällä ei kyetä nykyvaatimusten mukaisia auton ulkopintoja valmistamaan. Space frame-rakennekin rajoittuu tällöin erittäin suoriin linjoihin tai putkirunkoihin. Pultruusioprofiilien kiinnittäminen on myös työläämpää kuin esimerkiksi RTM-menetelmässä, jossa on mahdollista lisätä insertit jo muottivaiheessa. Tämä voi vaikuttaa menetelmän kustannustehokkuuteen.

Toisaalta pultruusiossa on tarjolla myös yhdistelmä vapauksia, joita ei välttämättä toisessa yksittäisessä menetelmässä ole. Pultruusiolla voidaan valmistaa esimerkiksi tuotteita, joissa on sisäänrakennettu raide. Poikkileikkauksessa voi myös olla seinämiä negatiivisissa ja positiivisissa kulmissa, jotka perinteisellä kaksiosaisella sulkeutuvalla muotilla olisivat mahdottomia. Menetelmä mahdollistaa myös onttoja profiileja, joissa voi olla useita eri onkaloita. Lisäksi menetelmällä on mahdollista valmistaa suoraan profiilin sisälle ydinaine tai erilaisia johtimia ja vastuslankoja. Pultruusiolla on myös mahdollista valmistaa profiilia, jonka poikkileikkauksessa on vaihtelevia seinämäpaksuuksia. Tosin mittatarkkuuden parantamiseksi ne eivät ole aina suositeltuja. Lisäksi paksummat seinämät kasvattavat kovetusaikaa ja hidastavat prosessia. Eräs suunnittelun kannalta merkittävä asia on mahdollisuus paikalliseen jäykistämiseen tai heikentämiseen vaihtamalla esimerkiksi lujitetyyppejä kesken profiilin(35). Tämä voisi mahdollistaa esimerkiksi kolarikäyttäytymisen paremman hallinnan, mutta tiedossa ei ole kuinka tarkkaan vaihdos tapahtuu ja kuinka kestävä rajapinta saadaan eri lujitteiden välille. (43).

Suunnittelussa kannattaa pyrkiä huomioimaan myös kaikilta valmistajilta löytyvät valmiit profiilimuodot, jolloin säästetään työkalukustannuksissa. Lisäksi joissain tapauksissa on mahdollista suunnitella profiili hyödyntämällä inserttejä standardiprofiilien muoteissa (44). Profiilien suunnittelussa kannattaisi myös jo aikaisessa vaiheessa ottaa yhteyttä valmistajiin ja pyrkiä hyödyntämään heidän tietojaan ja osaamista oikeiden ratkaisuiden tekemiseksi. Esimerkiksi kaikilla valmistajilla ei ole mahdollisuutta

vaikuttaa suljettujen profiilien sisäseinien kuitusuuntiin vaan ne ovat aina pituussuunnassa. Tämä rajoittaa esimerkiksi profiilin poikittaista lujuutta. Suunnittelussa voi käyttää myös apuna eri valmistajien kotisivuilta löytyviä suunnitteluoppaita, jollainen on saatavilla esimerkiksi Creative Pultrusionilta (35). Tulee kuitenkin ymmärtää, että tietyn valmistajan opas ei välttämättä päde toisen valmistajan tuotteisiin, sillä heidän prosessit ja laitteensa voivat olla erilaisia. Pultruusioprofiileihin on olemassa myös useita standardeja, joita valmistajat seuraavat. Esimerkiksi EN 13706 (45) sisältää lasikuituprofiileille kaksi eri luokkaa (E17 ja E23), jotka määrittävät tiettyjä mekaanisia ominaisuuksia, jotka tuotteiden pitää vähintään täyttää.

Kaarevien profiilien valmistusmenetelmässä vakio kaarevuussäde mahdollistaa rajallisen kaksoiskaarevuuden, mutta suurin osa auton ulkopintojen vaatimista kaarevuusmuutoksista on mahdoton toteuttaa. Jatkoehditetty vaihtuvan kaarevuusäteen pultruusio mahdollistaa jo hieman monimutkaisempia muotoja, mutta edelleen profiilin vakio poikkileikkaus estää kokonaisvaltaisen käytön ulkopinnoissa. Profiili saattaisi toimia esimerkiksi helmassa. Tällöin menetelmä rajoittuu lähinnä korin osiin, jotka ovat B- tai C-pintoja. Jatkuvasti näkyviä pintoja voisi mahdollisesti olla lähinnä auton sisällä. Esimerkiksi keskitunneli tai lattiapinta voisivat olla pultruusiolla valmistettuja osittain paljaita pintoja. Space frame-rakenteessa tosin varsinkin vaihtuva kaarevuussäde mahdollistaa jo monimutkaisempien muotojen toteutuksen rakenteeseen. Menetelmä soveltuukin kirjoittajan mielestä parhaiten sovelluksiin, joissa auton kuormat ja törmäysturvallisuudesta vastaa space frame-rakenne, joka ei ole juurikaan käyttäjälle näkyvissä. Varsinaiset muodot tulisi tällöin toteuttaa erillisillä ulkopaneeleilla.

Pulforming ja pullwinding menetelmistä ei kirjallisuudessa ole saatavilla juurikaan tietoa. Myöskään valmistajat eivät kerro menetelmästä lähes mitään. Minkäänlaisia koko tai suunnittelurajoitteita ei ollut tähän työhön saatavilla. Pulforming-menetelmä voisi kuitenkin mahdollistaa muuttuvan profiilin sekä perinteistä pultruusiota monipuolisemmat muodot. Pullwinding-menetelmällä voisi kuitenkin arvioida samankaltaiset rajoitteet kuin pultruusiossa. Tosin muuttamalla kelauspaksuutta saattaisi muutokset poikkipinta-alassa olla mahdollisia.

Kestomuovien pultruusio voi olla myös merkittävä menetelmä, vaikka profiili-muodot rajoittuisivat valmistuksessa samaan tapaan kuin pultruusiossa. Profiileja voisi kuitenkin muokata lämmön avulla jolloin esimerkiksi taivutukset ja profiilin pään muokkaus onnistuvat jälkikäteen. Myös kierrätys helpottuisi kestomuovia käytettäessä ja liittäminen olisi helpompaa sillä kestomuoja voidaan esimerkiksi hitsata. Kestomuovien käyttö voi kuitenkin olla kalliimpaa johtuen esimerkiksi prepregien tarpeesta.

Pultruusioon liittyviä suunnitteluparametrejä on esitetty alla olevassa taulukossa (Taulukko 8). Taulukkoon on koottuna useamman eri valmistajan ilmoittamia arvoja ja ohjeita.

Taulukko 8. Pultruusion suunnitteluparametrejä (43)(24)(46)

	Perinteinen 1	Perinteinen 2A/2B	Perinteinen 3	Kaareva pul- truusio
Leveys (mm)	1250	n. 3000/900	200/300- 500	100
Korkeus (mm)	320	n. 300/900	200/ -	100
Seinämapaksuus (mm)	1,5-100	-	1,5-15	1,5-15
Pituus (mm)	24000	n. 60000/-	-	-
Pitkittäinen kaare- vuussäde (mm)	-	-	-	> 40
Kulmien kaarevuussäde (mm)	0,5	-	0,5-1	0,5-1
Onkaloiden määrä	-	-	1-5	1-5

Yllä olevan taulukon vaakarivillä perinteisellä merkityt ovat eri valmistajia. Viivalla merkityt kohdat ovat joka menetelmän kannalta merkityksettämiä, kuten pitkittäinen kaarevuussäde suorassa profiilissa, tai valmistajat eivät ole ilmoittaneet tietoja. Perinteinen 1 on erään valmistajan maksimi-arvot ja normaalitoleranssit profiileille.

Perinteinen 2A ja 2B ovat saman valmistajan eri laitteiden kokorajoitteita. Kyseisten laitteiden arvot ovat suuripiirteisiä tuuma- ja jalkamitoista muutettuja arvoja, joiden tarkoituksena on antaa vertailuarvoja laitteistojen mahdollistamista maksimidimensioista. Menetelmä 2A on tarkoitettu suurille paneelituotteille, joita voidaan käyttää esimerkiksi merialusten valmistamiseen (46). Paneeleissa käytetään vaahtoydintä, mutta toleransseista ja seinämävahvuuksista ei ole tarkkaa tietoa. Perinteinen 2B kuvaa saman valmistajan laitetta, jolla on mahdollista heidän sanojensa mukaan valmistaa minkäläinen tahansa profiili, joka mahtuu kyseisiin dimensioihin. Perinteinen 3 ja kaareva pultruusio ovat saman valmistajan antamat arvot suorille ja kaartuville profiileille. Perinteisessä pultruusiossa neliskanttiset profiilit ovat rajattu 200 mm x 200 mm alueeseen, mutta toiselle maksimileveyden mukaiselle arvovälille ei ole annettu suurinta mahdollista korkeutta.

Taulukosta voidaan nähdä, että valmistajien laitteistojen koot vaihtelevat erittäin paljon. Erityisesti kaarevan pultruusion laitteiston voidaan havaita olevan tällä hetkellä melko pieni. Tosin osa valmistajista ilmoittaa myös suurempien laitemuutosten olevan mahdollisia. Oletettavasti ainakin kaareva pultruusio ja vaihtuva kaarevuussäde vaatisivat suuria investointeja ja tiivistä yhteistyötä valmistajan kanssa, jotta siitä saataisiin kaikki hyöty irti ja mahdollisimman suuret ja hyödylliset profiilit.

4.3 Toleranssit

Henkilöautojen suunnittelussa, kuten muissakin tuotteissa tulee erittäin tärkeänä asiana huomioida toleranssit. Pultruusiossa toleransseihin vaikuttaa erityisesti muovi- ja komposiittituotteille tapahtuva kovetusjutistuma eli muottikutistuma, joka riippuu prosessista sekä käytettävistä materiaaleista ja lujitesuunnista. Muottikutistuma voi vaihdella

lähes 0 prosentista jopa 4 prosenttiin asti. Esimerkiksi hiilikuidulla lujitetulla epoksilla on pienempi kutistuma kuin lasikuitulujitteisella polyesterillä. Lisäksi on erikseen saatavilla pienen muottikutistuman matriisilaatuja. Mahdollinen kutistuma tulisi huomioida myös itse profiilin työkalua suunniteltaessa. (35)

Toleransseja on määritetty esimerkiksi ASTM D3917 (47) standardissa, joka määrittää lasikuidusta valmistettujen pultruusiotuotteiden sallittuja toleransseja. Valmistajilta on saatavilla standardiprofiileille toleranssit ja valmistettaessa kustomoituja profiileja voidaan toleranssit määrittää valmistajan kanssa. Toleransseja on yleensä mahdollista pienentää valmistajien yleisistä ohjeista, mutta tällöin myös tuotteen hinta kasvaa (35). Euroopassa on käytössä myös EN 755-9 (48), EN 12020-2 (49) ja EN 13706-2 (50) standardit, joissa määritellään profiilien sallittuja toleransseja. EN 755-9 sisältää yleiset alumiiniextruusiot, EN 12020-2 EN AW-6060 ja AW-6063 alumiinista valmistetut tarkkuusprofiilit ja EN 13706-2 kuitulujitetut pultruusioprofiilit. EN 755-9 standardissa eri alumiinilaadut ovat jaoteltuna kahteen eri ryhmään, joiden tarkkaa sisältöä ei luetella tässä. Alla olevissa taulukoissa (Taulukko 9 ja Taulukko 10) on vertailtuna joitain eri standardeissa määritettyjä toleransseja. Alumiineilla on käytetty suljetuista profiileista saumallisten tuotteiden tietoja, mutta standardissa on erikseen määritelty toleranssit esimerkiksi seinämäpaksuuksille saumattomissa profiileissa.

Taulukko 9. Seinäpaksuuksien toleransseja (50)(49)(48)

Toleranssit	EN 13706-2		Seinäpaksuus (mm)			
			0-2	2-5	5-10	
		Suljetut profiilit	10 %, vähintään ± 0,30 mm			
		Avoimet profiilit (mm)	± 0,15	± 0,2	± 0,35	
	EN 12020-2		Seinäpaksuus (mm)			
			0-2	2-3	3-6	6-10
			Suljetut profiilit (mm)			
		Profiilin suurin ulkomitta < 100 *	± 0,20	± 0,25	± 0,40	± 0,60
		Profiilin suurin ulkomitta 100-350 *	± 0,30	± 0,4	± 0,60	± 0,80
			Avoimet profiilit (mm)			
		Profiilin suurin ulkomitta < 100 *	± 0,15	± 0,15	± 0,20	± 0,25
		Profiilin suurin ulkomitta 100-350 *	± 0,20	± 0,2	± 0,30	± 0,35
	EN 755-9 ryhmä I		Seinäpaksuus (mm)			
			0-1,5	1,5-3	3-6	6-10
			Suljetut profiilit (mm)			
		Profiilin suurin ulkomitta < 100 *	± 0,20	± 0,25	± 0,40	± 0,60
		Profiilin suurin ulkomitta 100-300 *	± 0,30	± 0,40	± 0,60	± 0,80
		Profiilin suurin ulkomitta 300-500 *	-	± 0,60	± 0,80	± 1,0
		Profiilin suurin ulkomitta 500-800 *	-	± 0,80	± 1,0	± 1,2
			Avoimet profiilit (mm)			
		Profiilin suurin ulkomitta < 100 *	± 0,15	± 0,15	± 0,20	± 0,25
		Profiilin suurin ulkomitta 100-300 *	± 0,20	± 0,25	± 0,30	± 0,35
		Profiilin suurin ulkomitta 300-500 *	± 0,25	± 0,35	± 0,40	± 0,45
		Profiilin suurin ulkomitta 500-800 *	-	± 0,40	± 0,50	± 0,55
	EN 755-9 ryhmä II		Seinäpaksuus (mm)			
			0-1,5	1,5-3	3-6	6-10
			Suljetut profiilit (mm)			
		Profiilin suurin ulkomitta < 100 *	± 0,30	± 0,35	± 0,55	± 0,75
Profiilin suurin ulkomitta 100-300 *		± 0,40	± 0,50	± 0,70	± 1,0	
Profiilin suurin ulkomitta 300-500 *		-	± 0,70	± 0,90	± 1,2	
Profiilin suurin ulkomitta 500-800 *		-	± 0,90	± 1,0	± 1,5	
		Avoimet profiilit (mm)				
Profiilin suurin ulkomitta < 100 *		± 0,20	± 0,25	± 0,30	± 0,35	
Profiilin suurin ulkomitta 100-300 *		± 0,25	± 0,30	± 0,35	± 0,45	
Profiilin suurin ulkomitta 300-500 *		± 0,35	± 0,45	± 0,60	± 0,65	
Profiilin suurin ulkomitta 500-800 *	-	± 0,50	± 0,60	± 0,70		

* Mitataan piirtämällä pienin ympyrä, jonka sisään profiili mahtuu ja mittaamalla ympyrän halkaisija

Taulukko 10. Suoruuden toleransseja (50)(49)(48)

Suoruus								
Toleranssi (mm)	EN 12020-2							
	Kappaleen pituus (m)	< 1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	> 6
	Koko pituudelta (mm)	0,7	1,3	1,8	2,2	2,6	3,0	3,5
	Paikallinen toleranssi	0,3 mm / 300 mm						
	EN 755-9							
	Paikallinen toleranssi	0,6 mm / 300 mm						
	Koko pituudelta	1,5 mm / m						
	EN 13706-2							
	Profiilin pituus (m)	1	2	3	4	5	6	7
	Profiilin leveys < 50 mm	2,0	8,0	18,0	32,0	50,0	72,0	98,0
	Profiilin leveys 50-100 mm	1,0	4,0	9,0	16,0	25,0	36,0	49,0
	Profiilin leveys > 100 mm	0,5	2,0	4,5	8,0	12,5	18,0	24,5

Eri standardien suora vertailu on erittäin hankalaa, sillä komposiittiprofiilien ja alumiiniprofiilien eri toleransseja määritellään eri tavoin. Tietoja on kuitenkin kerätty esille havainnollistamaan erot. Alumiiniprofiileilla vaikuttaa myös komposiitteja useammin itse profiilin koko johonkin tiettyyn toleranssiin. Alumiineilla on myös koko määritely usein hieman eri tavalla kuin komposiiteilla. Monessa tapauksessa alumiiniprofiilin ympärille piirretään pienin mahdollinen ympyrä, jonka sisälle profiili mahtuu ja tämän ympyrän poikkileikkauksen mukaan määritellään toleranssialue. Komposiiteilla ei välttämättä vastaavassa toleranssissa ole lainkaan profiilin kokoa huomioon tai mittana on käytetty sen jonkin ulkopinnan leveyttä. Suoruuden toleransseissa havaitaan myös komposiiteilla huomattavasti suuremmat arvot, mikä saattaa johtua mittaustavan erosta. Pultrusiotuotteissa piirretään suora viiva profiilin päästä päähän ja mitataan poikkeama. Alumiinien kohdalla kokonaispituuden mittaustapaa ei ole erikseen kerrottu, mutta paikallisen toleranssin perusteella siinä mitataan profiilin alusta lähtevän suoran pinnan ja mitattavan päädyn korkeusero. (50)(49)(48)

Tiedoista voidaan päätellä, että melko lyhyillä ja suurilla pultrusiotuotteissa saadaan vielä toleranssit joita on mahdollista käyttää. Pidemmissä kappaleissa tarvitaan standardia tiukempia vaatimuksia. Taulukoista nähdään myös, että pultrusiotuotteilta vaaditaan tiukempia toleransseja esimerkiksi seinämäpaksuuden ja profiilin koon kasvassa verrattuna alumiinisiin. Standardeista nähdään myös, että pultrusiotuotteilla on kappaleen leveyden toleranssi suurilla profiilikokoilla tiukempi, mutta kuitenkin profiilin poikkisuuntaisen suoruuden toleranssi on suurempi. Tällöin saattaa sisäkkäisten profiilien käyttäminen olla alumiinien tapaan hankalaa. Kuitenkin valmistajilla on tarjolla paljon sisäkkäin meneviä profiililiitoksia tarjolla. Toisaalta alumiineilla erittäin suuri liukukitkeroin (noin 1,4) on merkittävä tekijä. Autoteollisuudessa toleranssit määritellään usein osan funktion mukaan, jolloin toleranssien sopiminen valmistajan kanssa on normaalia (51).(50)(49)(48)

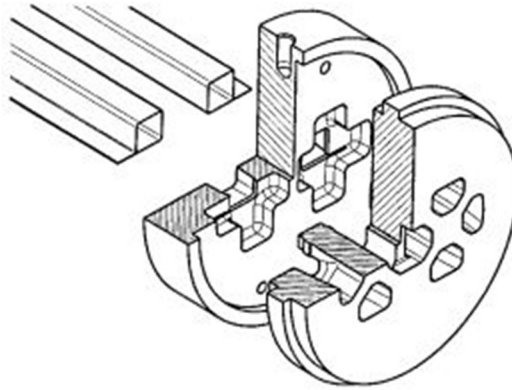
4.4 Pultruusioprofiilit verrattuna alumiinisiin profiileihin

Tässä kappaleessa pyritään vertaamaan pultruusioprofiileja alumiinisiin, jotta saataisiin tietoa kuinka hyvin pultruusioprofiilit soveltuvat korvaamaan alumiiniset profiilit rakenteissa, kiinnikkeissä yms. Erot voidaan luokitella esimerkiksi valmistuksellisiin ja materiaaliominaisuuksiin. Materiaaliominaisuuksia on käsitelty muissa kappaleissa eikä niihin keskitytä tässä osiossa. Voidaan kuitenkin mainita, että pultruusiossa materiaalien ja lujitteiden lukumäärä lisää vaihtoehtoja verrattuna alumiinisiin profiileihin, joissa vaihtoehdot rajoittuvat tiettyihin alumiiniseoksiin. Materiaalista tulee kuitenkin suuria vaikutuksia ominaisuuksiin monimutkaisemmissa rakenteissa.

Alumiinissa onttojen profiilien ominaisuudet ovat isotropiasta johtuen samankaltaiset ympäri rakennetta. Komposiiteilla lujitussuunnat ovat erittäin rajoittuneita onttojen profiilien väliseinämissä. Ulkoseinämissä kuitusuunnat voivat olla monipuoliset johtuen nykyisistä prosesseista. Sisäseinissä kuitenkin rajoitutaan lähinnä yksittäissuunnattuun kuituun. Markkinoille on ilmeisesti ainakin tulossa menetelmiä, joissa sisäseinämissäkin saataisiin kahteen suuntaan lujitusta, jolloin koko profiilin ominaisuudet ovat helpommin hallittavissa (24). Toisaalta oikein suunniteltuna kuitusuuntien muuttaminen rakenteen alueen mukaan voisi olla erittäin hyvä menetelmä. Tällöin voidaan esimerkiksi optimoida taivutusjäykkyys palkin pituussuunnassa, mutta samalla parantaa liitettävyyttä ja mahdollisesti turvallisuutta käyttämällä ulkopinnassa erilaisia kuitusuuntia.

Erot valmistuksen kannalta ovat moninaiset ja poikkeavat aina perusajatukseltaan laitteistoon. Pultruusiolaitteisto on käytännössä täysin jatkuvatoiminen, jossa tuote vedetään profiilimuotin lävitse. Alumiineilla puolestaan tuotanto perustuu valmiisiin harkkoihin, joita lämmitetään ja puristetaan muotin lävitse. Tällöin valmistus on periaatteessa panosluonteinen eli minimituotanto on käytetyn harkon materiaali. Pultruusiolla ei ole periaatteessa minimivalmistusmäärää, mutta käytännössä vaikuttaisi ainakin pienien profiilien kohdalla minimi-tilausmäärän olevan useita satoja metrejä. Todella suurten profiilien minimivalmistusmäärästä ei ole tietoa saatavilla. Myös muotteja ajateltaessa voidaan huomata eroja alumiinin ja komposiittien avulla. Alumiineilla käytetään melko yksinkertaisia ja lyhyitä muotteja, joissa ontot osuudet saadaan aikaan moniosaisella muotilla. Tällaisessa moniosaisessa muotissa voi olla esimerkiksi muotoa antava osa sekä erilaisia lisäosia, joissa on materiaalille kulkukanavia. Kertamuovikomposiiteilla vaaditaan isompia avattavia muotteja, jotka voivat olla esimerkiksi noin 0,7-1,5 metriä pitkiä(52). Ontot osuudet saadaan aikaan kelluvilla inserteillä, jotka pitkinä huonosti tuettuina kappaleina voivat liikkua hiukan ja siten vaikuttaa seinämien toleransseihin (52). Tällöin voidaan arvioida, että pultruusiomuottien kustannukset ovat hyvin paljon alumiiniprofiilien muotteja korkeampia. Kestomuoveille tarvittavista muoteista ei ole tietoa juurikaan saatavilla. Harkkojen käyttäminen alumiiniekstruusioissa tosin rajoittaa myös samalla valmistettävien profiilien kokoa. Yleinen ympyrän halkaisija johon profiilimuoto tulisi saada mahtumaan vaihtelee noin 300-350mm välillä. Tosin esimerkiksi Sapa mainostaa myös litteämpien ja leveämpien, noin 620 mm x 50 mm tilaan sopivien,

profiilien olevan mahdollisia(30). Kuten kappaleessa 4.2 kerrottiin, on pultruusioprofiilien maksimikoko moninkertainen alumiiniin. On tosin mahdoton arvioida onko kannattavampaa tehdä tietty profiili useammasta osasta vai yhtenä suurena ja monimutkaisempaa muottia vaativana osana ja tällöin vaadittaisiinkin valmis konsepti, jota selvitettäisiin valmistajien kanssa yhteistyössä. Kuvat alumiiniekstruusion ja pultruusioon tarvittavista muoteista on esitettyä seuraavana (Kuva 10 ja Kuva 11).



Kuva 10. Alumiiniekstruusiomuotti (53 p. 429)



Kuva 11. Pultruusiomuotti (54)

Suurien pultruusioprofiilien mahdollisuutta tukee esimerkiksi teollisuuden tarkoitetut pultruusiolla valmistetut lattiaritilät (55 ss. 453-461). Ne voivat olla kooltaan noin 1 m x 1 m ja reikien koko on noin 5 cm x 5 cm. Paksuutta ritiliköllä on usein noin 5 cm. Tuotteessa on siis paljon onttoja osioita ja se on suuri. Lisäksi se leikataan lyhyiksi kaistaleiksi. Tällainen tuote vaatii siis monimutkaisen ja suuren muotin, mutta sen avulla henkilökustannukset voidaan pitää alhaisina. Hankalissa geometrioissa voidaan puolestaan alumiineilla tarvita erillistä seuraajaprofiilia, jolla tasataan virtausnopeutta (53 pp. 435-436). Seuraajaprofiilin käyttö siis periaatteessa vähentää myös samalla tuotantonopeutta. Myös alumiinien muottisuunnittelu voi olla tietyissä tapauksissa hankalaa, sillä geo-

metriset muutokset ja erilaiset seinämävahvuudet voivat vaatia erilaista suunnittelua muotilta virtausnopeuden tasaamiseksi.

Menetelmien erot vaikuttavat myös valmistusnopeuteen. Alumiinien valmistus on nopeaa ja pieniä profiileja pystytään valmistamaan kerralla useampi yhdestä muotista käyttämällä useampaa muodon antavaa aukkoa (53 pp. 195-239). Pultruusiosta ei ole varmuutta, mutta luultavasti se ei ole järkevää ainakaan monimutkaisilla kappaleilla. Vetäminen voi olla tällöin hankalaa johtuen useasta irrallisesta osasta. Myös muotit muuttuvat monimutkaisemmiksi ja johtuen lämmitystarpeesta, saattaa tälläinen muotti-geometria olla hankala. Tällöin alumiiniprofiilien valmistus nopeutuu tietyissä tapauksissa moninkertaiseksi verrattuna yksittäisen profiilin valmistukseen kerralla.

Varsinainen profiilien valmistusnopeus suosii myös alumiiniprofiileja, sillä riippuen alumiinilaadusta ekstruusionopeus vaihtelee 0,8 m/min ja 100 m/min välillä (53 p. 232), joista esimerkiksi yleisen 6063-laadun ekstruusionopeus on välillä 30 - 80 m/min. Nopeimmat ekstruusiot onnistuvat puhtaimmilla seoksilla, jotka eivät sovellu rakenteellisiin osiin autoteollisuudessa. Pultruusiosta nopeus riippuu kovetusreaktiosta, jolloin siihen vaikuttaa lämpötila, seinämäpaksuus sekä materiaali. Tyypillinen nopeus pultruusiosta vaihtelee 0,02 - 3 m/min välillä kertamuoveilla ja kestonuoveilla voidaan päästä jopa 20 m/min (52). 0,02 m/min nopeus on luultavasti paksuseinämaisille ja monimutkaisille kappaleille. Matriiseista on saatavilla myös sen verran tietoa, että epokseilla valmistus on hankalampaa ja niiden valmistusnopeus on hitaampi (56). Kestonuoveilla prosessi riippuu lämmitys- ja jäähdytysnopeudesta, jonka takia suuremmat tuotantonopeudet ovat mahdollisia.

Valmistusnopeuksien avulla voidaan laskea teoreettinen vuosituotanto. Laskuissa ei huomioida huoltokatkoksia, toimintahäiriöitä tai muita prosessin keskeyttäviä asioita, kuten uuden harkon lisäämistä. Laskuissa ei huomioida myöskään alumiineilla päistä poistettavaa huonoa aluetta tai muuta materiaalihukkaa. Tuottavuudeksi lasketaan maksimiarvo, jota 24 tuntia vuorokaudessa toimiva linja voi tuottaa vuodessa. Tulokset on esitetty seuraavassa taulukossa. Taulukkoon on laskettu myös kuinka monta noin 1,5 metriä pitkää kappaletta vuodessa olisi mahdollista valmistaa. 1,5 metriä pitkä kappale voitaisiin ajatella esimerkiksi akkukoteloon soveltuvaksi profiiliosaksi. Taulukosta huomataan, että pultruusiolla ei ole periaatteessa tuotannollisia esteitä soveltua esimerkiksi piensarjaan. Riippuen prosessista, osien pituuksista ja käytetyistä määristä myös suuremmat sarjat aina suursarjoihin asti voisivat olla mahdollisia. Taulukossa on laskettu myös alhaisemmalla vuosittaisella voluumilla pyörivä toiminta, jolla on ajateltu simuloitavan pessimistisempää ja samalla realistisempää arviota pultruusion mahdollisuuksista. Vaikka ajateltaisiin koneen tuottavaksi pyörimisajaksi 5 tuntia päivässä ja vuoteen 200 tuotantopäivää, niin hitaimmillaankin pultruusio voisi soveltua piensarjoihin ja nopeimmillaan jopa suursarjoihin. Tietenkin useampaa muottia ja laitetta käyttämällä voidaan päästä suurempiin valmistusmääriin, mutta tällöin myös laitteistoinvestoinnit kasvavat. Tosin profiilivalmistuksessa ei tarvitse yleensä hankkia laitteistoa, vaan riittää soveltuvan muotin valmistuttaminen valmistajalla.

Taulukko 11. Alumiini- ja pultruusioprofiilien mahdollisia tuotantomääriä

Materiaali	Nopeus (m / min)	Tuotantomäärä vuodessa (m)	Osa vuodessa (1,5 metriä pitkä)
Alumiini teor. maksimi	0,8	$4,2 * 10^5$	$2,8 * 10^5$
	100	$5,26 * 10^7$	$3,5 * 10^7$
Pultruusio teor. maksimi	0,02	10512	7008
	3	$1,58 * 10^6$	$1,05 * 10^6$
Pultruusio 5 h/d , 200 d/a	0,02	1200	800
	3	180000	120000

Alumiiniprofiileja ja komposiittiprofiileja ei voida asettaa suoraan paremmuusjärjestykseen. Alumiiniprofiilit luultavasti soveltuvat paremmin pieniin kappaleisiin ja erilaisiin kiinnikkeisiin. Niiden etuihin voidaan lisätä myös parempi liitettävyyys alumiinirakenteisiin. Alumiiniprofiileilla suurin etu on kuitenkin jälkityöstön mahdollisuudet esimerkiksi hydroformaamalla.

Komposiittiprofiileilla puolestaan voisi olla käyttöä jos halutaan suurempia kappaleita tai kevyempiä kappaleita. Esimerkiksi kattorakenteissa voisi hiilikuituiset pultruusioprofiilit auttaa alentamaan painoa ja laskemaan painopisteen sijaintia. Pultruusioprofiilit ovat vaikeampia suunnitella anisotropiasta johtuen, mutta se mahdollistaa myös kuitusuuntien räätälöinnin. Tällöin voitaisiin esimerkiksi hyödyntää yksittäissuunnattuja kuituja onton rakenteen sisäseinämissä ja monisuunnattuja kankaita ulkopinnoissa. Tämä voisi auttaa maksimoimaan profiilin taivutusjäykkyyden ja vaikuttaa muihin ominaisuuksiin halutulla tavalla. Pultruusioprofiilien käyttöä voi puoltaa myös niiden materiaaliominaisuudet tilanteissa, joissa esimerkiksi alumiinin korroosionkestävyys on rajallinen. Tosin normaalien henkilöautojen tilanteessa alumiinien korroosionkestävyyden voidaan olettaa olevan riittävä.

4.5 Ehdotuksia pultruusion kehittämiseksi

Tässä osiossa on koottuna kirjoittajan ehdotuksia ja ajatuksia kuinka pultruusiota voitaisiin pyrkiä kehittämään valmistajien kanssa lähemmäs autoteollisuuden vaatimuksia. Ehdotusten lopullinen toteutuskelpoisuus ja merkitykset kustannuksille tulisi selvittää valmistajien asiantuntijoiden kanssa esimerkiksi mahdollisena kehitysprojektina.

Thomas Technikin hyödyntämää kaarevan pultruusion mahdollistavaa liikkuvaa muottiosaa voisi hyödyntää esimerkiksi yhdistämällä muottiin aukeava erillinen muottiosa. Tällöin perusmuottiosa liikkuisi halutuun välimatkoin hieman kovettamattoman osuuden yli ja osa kovettamattomasta osasta jäisi aukeavan muotin alueelle. Tämän jälkeen aukeava muotti sulkeutuisi ja antaisi osaan profiilia erilaisen muodon. Sen avulla voitaisiin tehdä esimerkiksi muuttuva kulma tai katkaisukohta, josta profiiliin jäisi litteä

pää. Tätä kavennettua osaa voitaisiin käyttää liittämässä. Muuttuva kulma saattaisi tosin vaatia leikkurilta tai vetolaitteistolta liikaa muutoksia.

Toinen tutkimuksen ja kehittämisen arvoinen kohde on metalli-inserttien asentaminen pultruusiotuotteeseen. Pullforming voisi mahdollistaa muiden puristusmuovaustekniikoiden tapaan inserttien asentamisen jo valmistusvaiheessa. Tällöin yksi pultruusion käyttöön liittyisi yksi rajoite vähemmän ja kappaleilta tarvittava jatkotyöstö vähenisi.

Metalli-inserttien mahdollisuutta tukee sinällään myös Fiberline Composites:n (33) tiedot, joiden mukaan pultruusioprosessissa voidaan sijoittaa profiiliin johtimia ja vastuslankaa. Tällöin voisi miettiä voisiko profiiliin liittää rullalta esimerkiksi metalliliuskaa. Tätä liuskaa voisi pyrkiä hyödyntämään liittämässä ja tutkia hitsauksen tai metalli-komposiitti-liittimien soveltuvuutta liitoksissa. Kysymyksiä herättää ainakin metallin pysyvyys profiilissa. Hitsausta voisi hyödyntää esimerkiksi profiilin liittämiseen metallista valettuun kulmapalaan tai muuhun metalliseen osaan. Asiaan liittyen on myös Daimler AG tehnyt patentin, jossa metallikuituja tai kankaita lisätään prosessiin perinteisten kuitujen lisäksi (141).

Pultruusioprofiileja voisi käyttää myös monipuolisempien osien aiheina. Tällöin profiiliin voitaisiin jatkovalmistuksessa tehdä jäykistäviä kennorakenteita tai esimerkiksi päihin kiinnityselementit. Soveltuvia menetelmiä voisi olla ruiskuvalu ja RTM, joissa profiili toimisi osana muottia. RTM prosessissa pultruusioprofiilit voisivat myös toimia onttojen osuuksien valmistuksessa erilaisten ilmarakkojen tai vaahtojen sijaan. Tällöin esimerkiksi seinämäpaksuuksien toleranssien pitäisi parantua ja lujuuskin saattaisi olla parempi. Rakenteen jäykkyyttä voitaisiin parantaa esimerkiksi yhdensuuntaisesti lujitetuilla profiileilla, jotka toimisivat palkkien muodontajina. Kehitystyössä tulisi kuitenkin tarkkaan tutkia jatkoprosessien matriisien tarttuvuus profiileihin. Muita geometrisiä etuja olisivat helposti valmistettavat liukukiskot sekä monipuoliset onkaloiden muodot ja väliseinät onttoihin osuuksiin.

Muita vaihtoehtoja kiinnityselementtien integroimiseen profiileissa voisi olla profiilin päälle tapahtuva ektstruusio, jolla saataisiin aikaan rakenteellisesti heikompia kiinnityskohtia. Ekstrudoimalla olisi edelleen rajoitteita poikkipinta-alan muutoksessa, mutta menetelmällä saataisiin esimerkiksi lyhyelle pätkälle kiinnityskiskoa sisustaosia varten. Toinen vaihtoehto voisi olla ruuvikanavien lisääminen profiilimuotoon. Ruuvikanavaan voitaisiin liimata esimerkiksi metallinen kierreosa, jolloin saataisiin luja liitos esimerkiksi metallirakenteisiin tai jota voitaisiin hyödyntää liitoksissa muutenkin.

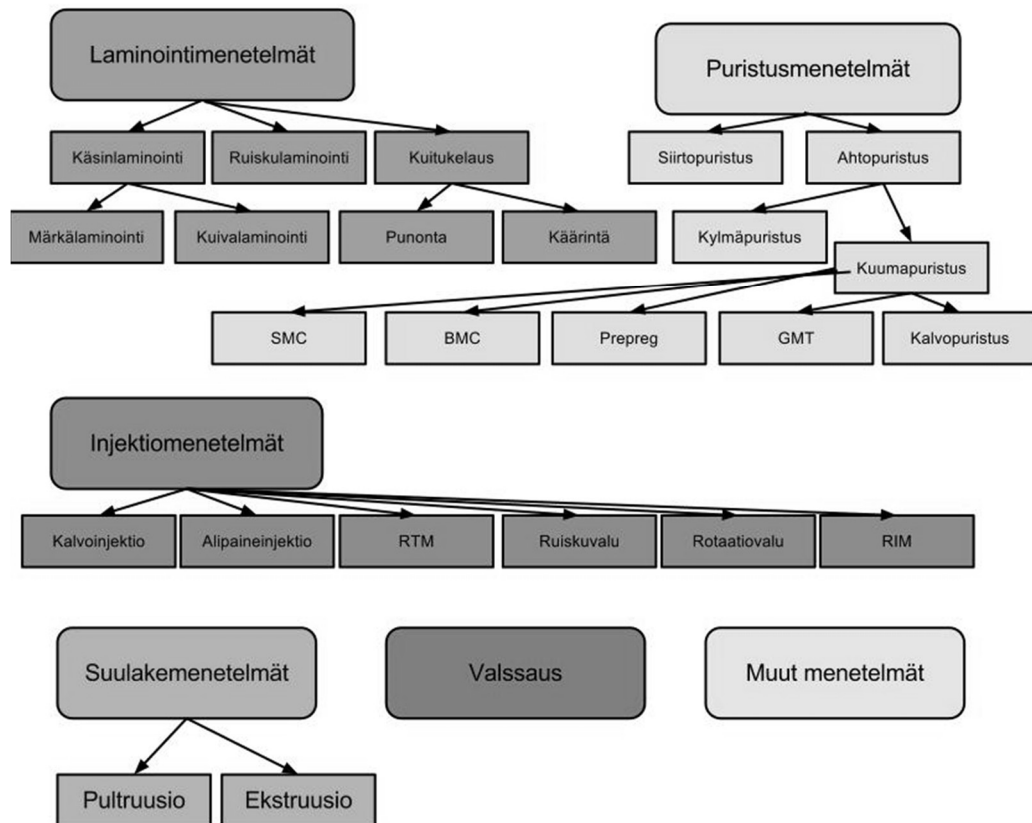
5 MUITA VALMISTUSMENETELMIÄ

Tässä kappaleessa käsitellään muita autoteollisuuden ja työhön liittyviä komposiittien valmistusmenetelmiä. Lisäksi mainitaan joitain tulevaisuuden kannalta mielenkiintoisia menetelmiä sekä kerrotaan lyhyesti kuinka autoissa yleisesti käytettäviä metalliosia valmistetaan. Lopuksi verrataan eri menetelmiä toisiinsa saatavilla olevan tiedon perusteella.

5.1 Komposiittien valmistusmenetelmiä

Johtuen komposiittien luonteesta ja monipuolisuudesta niitä voidaan valmistaa lukuisilla eri menetelmillä. Eri menetelmiä voidaan myös yhdistellä jolloin valmistustapojen määrä kasvaa entisestään. Menetelmän valintaan liittyy pitkälti vaatimukset muodosta, ulkonäöstä, mekaanisesta lujuudesta, syklijästä ja hinnasta. Kaikki valmistusmenetelmät eivät myöskään sovellu kaikille matriisi- tai lujitevaihtoehdoille.

Valmistusmenetelmät voidaan jakaa karkeasti esimerkiksi valmistustekniikan mukaan. Tällöin menetelmät on mahdollista ryhmitellä laminointimenetelmiin, puristusmenetelmiin, injektioimenetelmiin, suolakemenetelmiin ja valssaukseen (13 s. 153). Tämän lisäksi voidaan eritellä myös erikoismenetelmiä, jotka ovat hankalia sijoittaa mihinkään edellisistä ryhmistä tai yhdistelmämenetelminä soveltuvat useaan eri kategoriaan. Osa termeistä on myös enemmänkin puolivalmistetta tarkoittava kirjainlyhennys kuin varsinainen itsenäinen valmistusmenetelmä, mutta niiden käyttö on yleistynyt kuvaamaan myös tiettyjä valmistusmenetelmiä, joissa niitä käytetään. Menetelmäjaottelu on esitettyä alla olevassa kuvassa. Kaikki menetelmiä ei ole esitetty kuvassa niiden huomattavan määrän vuoksi. Työn kannalta epäoleelliset menetelmät, kuten valssaus ja keskipakovalu jätetään esittelemättä tarkemmin. Nekin ovat kuitenkin yleisinä menetelminä esiteltyä ja jaoteltuna kuvassa lukijan yleistiedon lisäämiseksi. Myöskään kaikkia menetelmien erikoisversioita tai sovelluksia ei käydä läpi vaan keskitytään perusmenetelmään kaiken taustalla.



Kuva 12. Komposiittituotteiden valmistusmenetelmiä. Mukailten Saarela *et al* (13).

Laminointimenetelmissä komposiitti valmistetaan lisäämällä kerroksittain lujitetta ja matriisia. Matriisi voidaan tuoda rakenteeseen myös jälkikäteen esimerkiksi vakuumin avulla. Komposiittien valmistuksessa yksi perinteisimmistä menetelmistä onkin käsinalaminointi. Muita laminointimenetelmiä on esimerkiksi ruiskulaminointi ja kuitukelaus. Käsinalaminointi voidaan puolestaan edelleen jakaa märkä- ja kuivalaminointiin. (13 ss. 153-159)

Märkälaminoinnissa lujitteet kasataan kerroksittain avoimeen muottiin, joka käsitellään irroitusaineella. Irroitusaine helpottaa kovettuneen tuotteen irtoamista muotista. Lujitteet kostutetaan märällä kertamuovihartsilla ja niistä telataan ilma ja ylimääräinen hartsi pois. Hartsi voidaan levittää esimerkiksi siveltimellä, rullalla tai ruiskuttamalla. Lujitekerroksien päälle asetetaan myös tarpeen mukaan erilaisia reikä-, irroitus- ja karhennuskalvoja. Karhennuskangas esimerkiksi tekee valmistettuun laminaattiin karheen pinnan, jota voidaan hyödyntää liittämisen tai pinnoituksen avulla. Laminoitu kappale voidaan kovettaa avomuotissa, mutta tiiveyttä ja parempia ominaisuuksia vaadittaessa käytetään usein ali- tai ylipainesäkkiä. Painesäkkiä voidaan hyödyntää myös kerroslevyjen valmistuksessa jolloin ydinaine liimautuu hartsin avulla osaksi rakennetta. Riippuen hartsin ominaisuuksista voidaan lopullisessa kovettamisessa tarvita myös ulkoista lämmitystä esimerkiksi uunissa. (13 ss. 153-159)

Märkälaminoinnilla voidaan valmistaa suuriakin kappaleita ja siinä voidaan hyödyntää suurta osaa tarjolla olevista lujite- ja matriisivaihtoehdoista. Menetelmä so-

veltuu myös kaksoiskaareviin tuotteisiin, mutta sillä on mahdollista saada ainoastaan yksi sileä pinta. Toisaalta menetelmässä on mahdollista valmistaa suoraan inserttejä. Jos halutaan erittäin paksuja kappaleita, joudutaan laminointi tekemään useassa osassa, sillä paksujen laminaattien kovetusreaktio voi tuottaa liikaa lämpöä ja laminaatti vaurioituu. Muotti- ja työkalukustannukset menetelmässä ovat alhaiset, mutta se on melko hidaskäyttöinen eikä siten sovellu suurille sarjoille. Itse kappaleen laatuun vaikuttaa myös oleellisesti laminoijan ammattitaito, jolloin kahdelta eri työntekijältä voidaan saada huomattavan eri laatuista tuotteita. Lisäksi menetelmässä vaaditaan hyvää ilmanvaihtoa poistamaan hartsista haihtuvia aineita. (13 ss. 153-159)

Kuivalaminoinnissa eli prepreg-laminoinnissa käytetään erillisen nestemäisen hartsin ja lujitteiden sijaan puolivalmistetta. Käytetyt prepreg-puolivalmisteet voivat kerta- tai kestopuovijohdannaisia. Kuitutyyppeistä ei ole rajattu eli ne voivat olla esimerkiksi lasikuitua tai hiilikuitua. Puolivalmisteet toimitetaan muovikalvolla tai kahden muovikalvon välissä. Kalvot poistetaan, joka ennen lujitteiden muotoon leikkaamista tai sen jälkeen. Muottiin asetetut lujitteet telataan ilman ja tiiveyden parantamiseksi ja paksampia laminaatteja voidaan välitiivistää alipainesäkillä sopivien kerrosmäärien välein. Märkälaminoinnista poiketen prepreg-laminaatit alipainesäkitetään aina kovettamista varten. Kovetus tehdään lämmön ja paineen avulla. Kovetukseen on perinteisesti käytetty autoklaavia, joilla saadaan aikaan korkea lämpötila ja paine. Autoklaavit nostavat kustannuksia, sillä ne ovat kalliita ja vaativat kalliita ja kestäviä muotteja. Nykyään on kuitenkin tarjolla myös niin sanottuja autoklaavin ulkopuolisia laatuja, joilla riittää esimerkiksi pelkästään alipainesäkillä saatava paine (57). (13 ss. 159-160)

Märkälaminoinnin tapaan autoklaavia vaativa kuivalaminointi on hidaskäyttöinen menetelmä, joka mahdollistaa esimerkiksi ydinaineen suoran lisäämisen rakenteeseen. Kuivalaminoinnilla saadaan aikaan erittäin hyvät mekaaniset ominaisuudet ja se on erittäin siisti menetelmä johtuen nestemäisen hartsin poisjäämisestä. Käytettäessä laatuja, jotka eivät vaadi autoklaavia ei saada aivan yhtä hyviä ominaisuuksia kuin autoklaavilaaduilla, mutta tuotanto on nopeampaa ja halvempaa (57). Kuivalaminointia on myös mahdollista jossain määrin automatisoida käyttämällä esimerkiksi prepreg-nauhoja syötäviä koneita jotka asettavat nauhat haluttuun muotoon ja asentoon muottiin. Yleinen käyttökohteita autoklaaviprepregeille on lentokone- ja avaruusteollisuus. (13 ss. 159-160)

Eräs laminointimenetelmä on ruiskulaminointi joka on märkälaminointia paremmin automatisoitavissa ja hieman vähemmän ammattitaitoa vaativa. Siinä käytetään ruiskutuspuistoolia, joka katkoo jatkuvaa kuitua ja ruiskuttaa sitä hartsin ja kovetteen kanssa muotin pinnalle. Ilmanpoisto tapahtuu edelleen telaamalla, mutta kovetus tapahtuu usein huoneenlämmössä tai vain hiukan korotetussa lämpötilassa. Menetelmässä menetetään pitkien ja tarkkaan suunnattujen kuitujen mekaaniset edut, mutta se on perinteistä käsinlaminointia nopeampi menetelmä. Käytettävät avomuotit ovat myös melko edullisia, mutta manuaalista työtä käytettäessä tarvitaan hyvä ilmasto ja suojavarusteet. Automatisoinnilla kustannukset kasvavat, työn laatu tasaantuu ja voidaan käyttää suljettuja tiloja. (13 ss. 161-162). Mekaanisilta ominaisuuksiltaan ruiskulaminointi

ei kuitenkaan välttämättä sovellu kantaviin korirakenteisiin matalan kuitupitoisuuden ja katkokuitujen takia.

Kuitukelaus on laminointimenetelmä, jossa altaassa kostutetut kuitukimput ajetaan pyörivän avomuotin eli mandrellin päälle. Kelaus mahdollistaa suuret kuitupitoisuudet ja siten hyvät mekaaniset ominaisuudet. Ominaisuudet voivat vastata jopa autoklaavituotteiden laatua. Kelausta jatketaan kunnes riittävä ainepaksuus on saatu, jonka jälkeen laminaatti voidaan siirtää muotteineen uuniin kovettumaan tai kovettaa paikallaan muotissa. Muotti voi olla osana valmistuvaa kappaletta tai se voidaan poistaa kovuuden jälkeen. Tuotteet ovat yksinkertaisimmallaan putkia, mutta laitteiston vapausasteita lisätessä myös monimutkaisemmat kappaleet ovat mahdollisia. Yleisin käyttötarkoitus kelaukselle on korroosiota kestävien putkien ja säiliöiden valmistus. Käytettäessä vain vähän jatkojalostettuja kuiturovinkeja ja -touveja kelaus on nopea ja kustannustehokas menetelmä. (13 ss. 162-166)

Kelauksessa voidaan käyttää myös erilaisia mattoja, pintahuopia ja kudoksia nopeuden ja ominaisuuksien parantamiseksi tai muuttamiseksi. Menetelmässä voidaan hyödyntää myös prepregejä, jotka voivat olla kesto- tai kertamuovipohjaisia. Kertamuovipohjaisissa tuotteissa sulatetaan ja puristetaan valmistusvaiheessa tuotteen ja muotin pinnalle. Yhdistämällä aiemmin mainittu nauhalaminointi ja kuitukelaus voidaan valmistaa tuotteita, joissa on negatiivisia päästöjä ja kaarevia muotoja. Menetelmää kutsutaan kuitulaminoinniksi ja pääasiallinen käyttökohde on lentokoneiteollisuudessa. (13 ss. 162-166)

Kuitukelausta muistuttava menetelmä on punonta, jossa käytetään prepregejä tai kuivia lujitteita. Siinä kuidut voidaan punoa kolmiulotteisesti ja toistensa lomitse muotin ympärille. Kuivat kuidut kostutetaan yleensä paineinjektiolla. Menetelmää on käytetty esimerkiksi autojen runko-osien ja erilaisten jäykistettyjen paneelien valmistamiseen. Menetelmänä punominen on melko hidas, mutta valmistettuja punoksia voidaan käyttää myös puolivalmisteena muissa menetelmissä. Käärintä puolestaan on kelausmenetelmä, jolla valmistetaan pyörähdyssymmetrisiä kappaleita käärimällä tuotteen pituisia aihioita muotin päälle. Käärinnässä käytettävät kuidut täytyy olla esikostutettuja tai prepregeinä. (13 ss. 162-166)

Injektiomenetelmät ovat valmistustapoja, joissa matriisi tai matriisi ja lujitteet tuodaan muottiin valamalla tai käyttämällä yli- tai alipainetta. Toisinaan matriisiaine voi olla myös aihiossa mukana kalvona. Alipaineinjektion peruseriaatteena on saada hartsi virtaamaan muottiin alipaineen avulla ja kostuttamaan lujitteet. Prosessia voidaan tietyissä tapauksissa nopeuttaa käyttämällä alipaineen lisäksi ylipainetta. Alipaineinjektiossa käytetään avointa muottia, jonka vastakappaleena toimii alipainesäkki. Tällöin ainoastaan tuotteen toinen puoli saadaan sileäksi pinnaksi. Alipainesäkki voidaan kuitenkin korvata myös joustavalla muottipinnalla, jos halutaan molemmiin puoliin sileä kappale. Kerroslevyjä valmistettaessa voidaan ydinaine sijoittaa kuitujen kanssa valmiiksi muottiin. (13 ss. 166-167)

Kalvoinjektiossa matriisiaine on kerroksina kuivien lujitekuitujen välissä tai kerroksena muotin pinnalla. Kerroksittain olevien kalvomenetelmien kaupanimiä ovat

esimerkiksi SPRINT ja HexFIT. Yksittäisen kerroksen menetelmää kutsutaan englanniksi nimellä RFI, joka tulee sanoista "Resin Film Infusion". Menetelmästä käytetään myös semipreg-nimitystä. Kalvoinjektiossa käytetään B-tilassa olevaa hartsia eli se on puolikovassa tilassa ja täytyy lämmittää juoksevaksi ennen injektointia. Kalvoista johtuen menetelmässä saadaan erittäin lyhyt virtausmatka. Myös kalvoinjektiossa voidaan käyttää säkkiä ja avomuottia. (13 ss. 167-168)

Paineinjektio eli RTM (Resin Transfer Moulding) on menetelmä, jossa matriisi yleensä injektoidaan ylipaineen avulla muottiin, johon on valmiiksi aseteltu lujitteet tai lujitepakka. Lujitteet voivat olla esimerkiksi lasi-, hiili- tai aramidikuitua. Yleisesti käytetyt matriisiaineet ovat polyestereitä, epokseja ja vinyylimestereitä. Injektoinnin jälkeen hartsi kovetaan ja kappale poistetaan muotista. Edellä mainituista injektio menetelmistä poiketen muotit ovat kaksipuoleisia ja käytetyt paineet suurempia, jolloin menetelmän laitteistokustannukset ovat suuremmat. (13 ss. 166-175)

Perinteisesti menetelmästä on olemassa nopean syklin versio, jolla saavutetaan alhainen lujitepitoisuus ja rakenteellisiin osiin vaadittu korkea lujitepitoisuus. Kyseinen menetelmä on vaatinut noin 15-20 minuutin muottiajan. Tämä ei kuitenkaan riitä suuriin sarjakokoihin. Korkean kuitupitoisuuden tuotteissa käytetään yleensä epokseja niillä saatavien parempien mekaanisten ominaisuuksien vuoksi. Varsinkin autoteollisuus on aiheuttanut paineita kehittää menetelmää nopeammaksi ja vähentää kustannuksia suurempien sarjakokojen mahdollistamiseksi (58). Nopeutta on pyritty lisäämään ja kustannuksia alentamaan esimerkiksi kehittämällä uusia ja paremmin virtaavia hartseja, jotka vaativat pienemmät muottipaineet. Pienemmät muottipaineet vaativat vähemmän muoteilta, jolloin niistä saadaan halvempia, kevyempiä ja niiden sulkemiseen ja avaamiseen vaadittavien laitteistojen ei tarvitse olla yhtä suuria, tehokkaita ja kalliita. Toinen vaihtoehto nopeuttaa menetelmää on paineen lisääminen ja alipaineen käyttö, jolloin muoteilta ja laitteistolta vaaditaan matalaa painetta enemmän. Paineen muuttamisen lisäksi menetelmää on pyritty nopeuttamaan lämmittämällä hartsia ja muottia sekä käyttämällä useita injektio pisteitä. Tällöin hartsin viskositeetti on alempi, virtausvastus pienempi ja kovetus tapahtuu nopeammin. Edellä mainituilla menetelmillä on mahdollista päästä noin 2 minuutin jaksoaikoihin. (13 ss. 166-175)

Paineinjektiossa lujitteet ovat usein lujitepakkana, joka esimuotoillaan ennen muottiin asettamista. Lujitepakka voidaan valmistaa käsin tai automatisoidulla laitteistolla, jolla voidaan vähentää henkilökustannuksia ja kasvattaa tuotantonopeutta suurempien sarjakokojen mahdollistamiseksi. Lujitepakkoja valmistetaan korkean lujitepitoisuuden tuotteisiin esimerkiksi tasolujitteista tikkaamalla, kutomalla, neulomalla tai jo aiemmin esillä olleilla kelaus- ja punontamenetelmillä. Lujitepakkojen avulla kappaleen mekaaniset ominaisuudet pystytään räätälöimään käyttökohteeseen sopivalla tavalla. Esimerkiksi vaurionsietokykyä voidaan parantaa lujittamalla kappale myös laminaatin pintaa kohtisuorassa tasossa. Yleensä lujitepakkojen valmistuksessa pyritään minimoimaan materiaalihukka tekemällä nettoaihioita eli aihioita jotka vastaavat mahdollisimman hyvin lopullisen tuotteen mittoja. (13 ss. 166-175)

Reaktiovalut eli RIM (Reaction Injection Moulding) ja sen johdannaiset RRIM (Reinforced RIM) ja SRIM (Structural RIM) perustuvat kaksikomponenttipolyuretaanin injektointiin suljettuun muottiin. RIM on lujittamaton menetelmä, mutta se on hyvä tuntee sillä se toimii lähtökohtana lujitetuille menetelmille ja on toiminnaltaan samantapainen. Menetelmissä sekoitetaan kahta pääkomponenttia erillisissä lämmitetyissä astioista. Komponentit sekoitetaan toisiinsa juuri ennen injektointia. Hyytymisaika pienillä kappaleilla on noin 2-6 s. ja muottiaika 20-200 s. RRIM-menetelmässä käytetään lujitukseksi lyhyttä katkokuitua, joka suuntautuu johtuen suuresta injektinopeudesta. Katkokuiduilla saatava lujitus on kuitenkin todennäköisesti riittämätön korin kantaviin rakenteisiin. SRIM on edelleen jatkokehitetty menetelmä, jossa hyödynnetään lujiteaihoita eli se muistuttaa RTM-menetelmää, mutta käytettävä matriisi on erilainen. SRIM-menetelmässä vaaditaan myös RTM-menetelmään verrattuna paremmin muodossaan pysyviä aihioita, sillä muutoin ne kulkeutuvat hartsin mukana muotissa. Tästä syystä käytetäänkin paljon esimerkiksi jatkuvakuituista mattoa ja harvoja kudoksia sekä näistä jatkojalostettuja aihioita. (13 ss. 175-176)

Ruiskuvalu on injektio menetelmä, jota käytetään yleisesti kestopuovituotteiden valmistukseen, mutta kertamuoveja voidaan valmistaa esimerkiksi BMC-massasta käyttämällä hieman erilaisia työkaluja. Kestomuovit voivat olla lujitettuja tai lujittamattomia ja lähtöaineena käytetään granulaatteja. Kestomuoveja käytettäessä peruseriaate on sulattaa granulaatit sylinterin sisällä pyörivässä ruuvissa kitkan ja lämmön avulla, sekä injektoida materiaali paineen avulla muottiin, jossa se jäähdtytetään. Kovetus tapahtuu muotin koosta riippuen 20-120 sekunnissa ja käytetyt paineet (40-200 MPa) ovat erittäin korkeat verrattuna esimerkiksi paineinjektioon (jopa alle 1 MPa). (13 ss. 176-179)

Korkeiden muottipaineiden vuoksi tarvitaan kalliita teräksisiä muotteja ja suuria laitteistoja. Käytännössä myös sarjakoon täytyy olla suuri, jotta kustannukset saadaan katettua. Suuret muotipuristus paineet ja kustannukset rajaavat myös valmistettävien tuotteiden koon usein muita menetelmiä pienemmäksi. Lujitteet ovat yleensä granulaatteihin sekoitettuna ja sekoituessaan ja sulaessaan ruuvissa kuidut lyhenevät entisestään. Keskimääräinen lujitepituus onkin vain noin 0,2 mm. Kuitujen leikkautumista voidaan vähentää monin tavoin, mutta silti kuitujen pituus jää keskimäärin 3-4 mm eli ne ovat melko lyhyitä. Tästä johtuen tuotteiden mekaaniset ominaisuudet eivät ole kovin suuret. Injektointi myös suuntaa lujitteita virtauksen mukaan, jolloin myös ominaisuudet saattavat olla erittäin anisotrooppiset. BMC-massaa varten laitteistossa täytyy käyttää erilaista syöttöpäätä ja ruuvigeometriaa, mutta myös eri kestopuovimateriaalit voivat vaatia toisistaan poikkeavia ruuvigeometrioita. Lisäksi BMC-massa vaatii myös muotin lämmityksen jäähdtyksen sijaan. Ominaisuuksiltaan ruiskuvaletut BMC-tuotteet vastaavat myöhemmin esiteltäviä puristetuotteita. (13 ss. 176-179)

Puristemenetelmät ovat nimensä mukaisesti menetelmiä, joissa tuote saa muotonsa kun se puristuu muotin sisään. Luonteeltaan menetelmät ovat panosmenetelmiä. Yleisellä tasolla menetelmät voidaan luokitella siirtopuristukseen ja ahtopuristukseen. Siirtopuristus on ruiskuvalua muistuttava menetelmä, jossa männän avulla siirretään materiaali muottiin. Käytettävät materiaalit ovat myös pitkälti samoja, mutta

muotit ja laitteet ovat halvempia ja muottiaika ja raaka-ainehukka on suurempi. Kertamuoveista voidaan käyttää esimerkiksi BMC-puolivalmistetta, mutta menetelmä soveltuu silti paremmin suursarjoille kuin pienille sarjoille. (13 ss. 180-185)

Autoteollisuuden kannalta siirtopuristusta tärkeämpiä ovat ahtopuristusmenetelmät, kuten märkäpuristus ja erilaiset puolivalmistepuristukset. Pääperiaate kaikissa ahtopuristusmenetelmissä on sama. Muotiin asetetaan lujitteet ja matriisiaineet, jonka jälkeen muottipuolet puristetaan yhteen antamaan muoto. Tämän jälkeen kappale kovetetaan ja poistetaan muotista. Puristimissa käytetään usein kahta puristinlevyä, jotka voivat olla lämmitettyjä. Puristinlevyihin kiinnitetään tarvittavat muottipuolet. (13 ss. 180-185)

Märkäpuristuksessa muottiin asetetaan lujitteet ja nestemäinen hartsi, jonka jälkeen muotti suljetaan. Sulkemisen jälkeinen kovetus voi tapahtua, joko ilman lisälämmitystä eli kylmäpuristuksena tai lisälämmöllä eli lämpöpuristuksena. Puristusaine on menetelmässä melko alhainen jolloin myös muottivaatimukset ja kustannukset ovat alhaisemmat. Menetelmä soveltuu parhaiten yksinkertaisille muodoille autoteollisuuden kannalta vaatimattomaan muutaman tuhannen kappaleen sarjakokoon. (13 ss. 180-185)

Kuumapuristusta käytetään myös puolivalmisteisiin, jolloin puolivalmisteen nimi on vakinaistunut arkikielessä kuvaamaan myös itse menetelmän muunnosta. Näitä menetelmiä ovat esimerkiksi SMC:n BMC:n ja GMT:n puristus. Myös prepreg-puolivalmisteita käytetään kuumapuristuksessa, mutta menetelmä tunnetaan tällöin nimellä kalvopuristus. (13 ss. 180-185)

SMC- ja BMC-tuotteiden puristuksessa puolivalmiste annostellaan muottiin, muotti puristetaan kiinni ja tuotteet kovetetaan lämmöllä. Tuotteiden valmistus on tavallista kuumapuristusta vaativampaa ja esimerkiksi SMC-levyt tulisi asettaa tarkasti muottiin ja leikata oikeaan muotoon. Myös puristusnopeutta ja paineenousua joudutaan säätämään tarkasti syklin aikana, jolloin muottien ja puristimien vaatimukset ovat suuremmat. Yleensä sykliajat ovat 30-150 sekunnin välillä. SMC on kustannustehokas menetelmä yleensä suurimmilla sarjoilla, mutta joissain tapauksissa se voi olla BMC:n tapaan kannattavaa jo yli 1000 kappaleen sarjoissa. SMC-tuotteita voidaan käyttää usein metallisten osien korvaamiseksi, sillä vaikka materiaali on kalliimpaa niin muotit ovat halvempia ja yksi SMC-osa voi korvata usean metalliosan. (13 ss. 136, 180-185)

Kalvopuristuksessa käytetään kahden muovikalvon väliin asetettuja prepregejä, jota tiivistetään alipaineella ja lämmöllä. Puristus tapahtuu ylipaineen avulla avomuotiin painesäkkimenetelmän tapaan. Kertakäyttöiset muovikalvot estävät lujitteiden rypistymisen, mutta sallivat hallitun liukumisen muovauksen avulla. Menetelmässä on edulliset muottikustannukset ja autoklaavikovuuteen verrattuna nopea sykli aika. Kertakäyttöiset ja melko kalliit kalvot lisäävät kuitenkin kustannuksia. Menetelmällä voidaan valmistaa esimerkiksi ohutseinäisiä tasomaisia kappaleita. (13 s. 183)

GMT on kestopuovipuristetuotteiden valmistuksesta käytetty termi ja kuumapuristusmenetelmä, joka poikkeaa hieman kertamuovituotteiden kuumapuristuksesta. Menetelmässä puolivalmistelevy lämmitetään sulamislämpötilan yläpuolella ja siirretään kylmään muottiin. Kylmässä muotissa levy puristetaan muotoonsa ja annetaan jäähtyä

kunnes se on kovettunut riittävästi irroitusta varten. Menetelmän muotti- ja laitteistokustannukset ovat korkeat, sillä nopean jaksoajan ja suuren puristuspaineen takia laitteistovaatimukset ovat korkeat. (13 s. 183)

Erikoissovelluksista voidaan mainita varsinkin 3D-tulostus. Siinä tulostetaan kappale kerros kerrokselta käyttämällä esimerkiksi jauheita tai suoraa sulan materiaalin syöttöä. Tulostettavasta kappaleesta tarvitaan 3D-malli, jonka leikkauksia käytetään tulostuskerroksina. Tulostuksessa voidaan hyödyntää esimerkiksi jauhetta, joka levitetään tulostusalueelle. Tämän jälkeen laser kuumentaa poikkileikkauksen mukaiselta alueelta jauheen, jonka jälkeen lisätään uusi kerros jauhetta. Samaa kiertoa toistetaan kunnes kappale on tulostettu kokonaan. Jauhe, joko sulaa tai sinteroituu materiaalista riippuen. Lopulta ylimääräinen jauhe poistetaan esimerkiksi tärisyttämällä ja tuote on lähes valmis. Yleensä tulostimien resoluutio ei riitä suoraan lopputuotteeseen vaan pinta tarvitsee loppukäsittelyn, kuten hionnin ja kiillotuksen tai erillisen pinnoituksen. Suoraan osia valmistettaessa nopeus ei riitä vielä suursarjatuotannon tasolle, mutta pienempiä sarjoja ja prototyyppejä voidaan valmistaa sillä melko kustannustehokkaasti, koska kalliita muotteja ei tarvitse erikseen valmistaa. (59)

3D-tulostusta ei juurikaan voida käyttää suoraan komposiittien valmistamiseen, mutta menetelmällä voidaan tehdä monimutkaisia muotteja valmistusmenetelmiä varten. Muoteista voidaan sopivalla ainevalinnalla tehdä esimerkiksi vedessä liukenevia, jolloin vaikeatkin geometriat ovat mahdollisia. Menetelmä vaikuttaakin siksi esimerkiksi konseptiautojen kannalta mielenkiintoiselta tai pienemmissä sarjoissa alumiinin valumuottien valmistuksessa. Muita hyötyjä voidaan nähdä tuotekehityksen kannalta nopeampina ja halvempina tapoina kokeilla uusien osien toimivuutta käytännössä. (59)(60)

5.2 Metalliosien valmistus

Metalliosia valmistetaan ja muokataan kanttaamalla, prässäämällä, valamalla, ekstruusiolla ja hydroformauksella. Lisäksi osat voivat vaatia erilaisia jälkityöstöjä, kuten hiomista leikkaamista, poraamista, hemmausta tai kiillotusta. Jälkityöstöt ajatellaan kuitenkin erilliseksi vaiheeksi eikä niitä käydä tässä osiossa lävitse.

Teräsosien valmistuksessa käytetään pääasiassa puristusmuovausta, jonka lisäksi hyödynnetään jossain määrin hydroformausta. Puristusmuovauksessa metallilevy painetaan suurissa puristimissa muotoonsa. Puristusmuovauksessa muoto annetaan usean peräkkäisen puristuksen avulla. Laitteet ovat nykyään suuria automaattisia laitteistoja, joilla päästään nopeaan sykli aikaan. (10 pp. 194-208)

Hydroformauksessa hyödynnetään nesteen aiheuttamaa painetta muodonantamiseen. Menetelmällä voidaan muokata levyjä ja putkia. Muokattava kappale vietään muottiin, jolla annetaan kappaleelle muoto. Levyillä neste tuodaan levyn toiselle puolelle ja putkilla neste tuodaan putken sisälle. Lisäämällä nesteen painetta saadaan metalli muotoutumaan muotin reunoja vasten. (10 pp. 208-215)

Alumiinia voidaan teräksen tapaan puristusmuovata tai hydroformata, mutta sitä voidaan lisäksi valaa muottiin tai pursottaa profiiliksi muotin lävitse. Alumiineille so-

veltuu myös superplastinen muokkaus, jossa käytetään ilmanpainetta, lämpöä ja yksi-puolista muottia. Profiileja voidaan lisäksi jatkotyöstää hydroformaamalla. Alumiinilla on heikompi muovattavuus kuin teräksellä eikä yhtä suuriin venymiin päästä. Magnesiumille puolestaan soveltuu lähinnä valaminen, kuten jo materiaalit osiossa mainittiin. (10 pp. 215-231)

5.3 Vertailua eri menetelmien välillä

Tässä osiossa vertaillaan eri menetelmiä keskenään. Vertailu on koottu useaan erilaiseen taulukkoon tiedon laajuuden vuoksi. Osassa taulukoista on vertailtu pelkästään komposiittien valmistusmenetelmiä keskenään ja osassa on huomioitu myös metallien valmistusta. Yhdessä taulukossa ei ole välttämättä kaikkia menetelmiä, sillä vertailtaessa eri menetelmiä adjektiiveilla kuten "nopea" tai "halpa" on erittäin hankalaa arvioida kuinka eri lähteet käsittävät kyseiset termit. Sarjakoot tässä työssä ovat määriteltä seuraavan taulukon mukaan. Rajat eivät periaatteessa ole tarkkoja ja kahden eri sarjakoon välimaastoon sijoittuvat valmistusmäärät voidaan luokitella kumpaan tahansa.

Taulukko 12. Sarjakokojen määritelmät

Sarjakoon nimitys	Sarjakoko (kpl/vuosi)
Prototyypit ja yksittäiskappaleet	1-10
Piensarja	< 1000
Keskisuuri	1000-50000
Suuri	> 50000

Seuraavaan taulukkoon (Taulukko 13) on pyritty kokoamaan mahdollisimman kattavasti tietoa eri valmistusmenetelmistä ja niihin liittyvistä kustannuksista, kannattavista sarjako'oista ja suunnittelurajoitteista. Osa vertailusta tapahtuu 0,-,+ asteikolla, jolla perinteinen pultruusio saa referenssiarvon 0. Tällöin muiden menetelmien ominaisuuksia pyritään vertaamaan tähän 0-tasoon. Osassa arvioista on annettu useampi eri arvo kauttavivaa käyttämällä. Kyseinen tapa kuvaa, että menetelmään osuu suurelle arvoalueelle, eli esimerkiksi kelauslaitteisto voi olla halvempi tai samanhintainen kuin pultruusiolaitteisto. Muottihinta kuvaa myöskin yhden muotin hintaa. Pinnanlaadussa pultruusiolle on annettu useampi arvo, sillä riippuen toimittajasta ja lujitevaihtoehdoista pinnanlaatu voi vaihdella keskinkertaisesta erittäin hyvään. Muita menetelmiä verrataan tällöin edelleen 0-tasoon. Lisäksi liitteessä 2 on esittettyä yksinkertaisemmat vertailut, joiden avulla voidaan suorittaa myös alustavia vertailuja.

Taulukko 13. Valmistusmenetelmien vertailu (13)(24)(35)(23)(61)

	Pultruusio	Kaareva pultruusio	Märkälaminointi	Ruiskulaminointi
Sopivin sarjakoko	Piensarja-suuri		Proto-piensarja	Piensarja-keskisuuri
määrä/vuosi	1000-1000000 m		1-1000 kpl	
Muottiaika	0.02-30 m/min		5 min - 24 h	
Suurin tuotteen koko	Riippuu toimittajasta	100 mm x 100 mm profiili	300 m ²	3 m ²
Mekaaninen lujuus (+/0/-)	0		-	--
Lujitesuuntaus	Suunnattu		Määrättävissä	Tasainen
Lujitepitoisuus (p%)	30-75		20-40	
Pinnanlaatu (+/0/-)	0/++		++	0
Insertit	Ei			
Reikien teko valmistusvaiheessa	Ei		Suuret	Suuret
Umpijäykisteet	Pituussuunta		Ei	Ei
Ontot jäykisteet	Pituussuunta		Kyllä	Kyllä
Liukukiskot	Pituussuunta		Vaikeita	Vaikeita
Ulokkeet (esim nupit)	Ei		Kyllä	Kyllä
Monimutkaisuus	Vakio poikkipinta-ala, useampi onkalo			
Minimipäästö (°)	0-2	Ei tiedossa	0	0
Minimipaksuus (mm)	1	1,5	1	1
Maksimipaksuus (mm)	100, teoriassa rajaton	15, teoriassa rajaton	Ei rajoitettu, kerralla noin 4-20	Ei rajoitettu
Paksuusvaihtelu (mm)	ks. osio 4.1.3	Ei tiedossa	0,6	0,6
Pienin kaarevuussäde (mm)	0,5-1,5		6	6
Laittekustannus (+/0/-)	0		---	---
Muottikustannus (+/0/-)	0		-	-

	Prepreg-laminointi	Kylmäpuristus	Kuumapuristus	RTM
Sopivin sarjakoko	Piensarja	Piensarja-keskisuuri		Piensarja-keskisuuri
määrä/vuosi		1000-10000		1000-20000
Muuttiaika	Jopa tunteja	20-30 min		2-20 min
Suurin tuotteen koko	Riippuvainen autoklaavista	Ei tiedossa		
Mekaaninen lujuus (+/0/-)	0	--		--/-
Lujitesuuntaus	Määrättävissä	Tasainen		Tasainen
Lujitepitoisuus (p%)	noin 60	20-40		15-70
Pinnanlaatu (+/0/-)	0	0/+		0/++
Insertit	Kyllä		Kyllä	Kyllä
Reikien teko valmistusvaiheessa	Suuret	Ei	Kyllä	Kyllä
Umpijäykisteet	Ei	Vaikeita	Vaikeita	Vaikeita
Ontot jäykisteet	Kyllä	Vaikeita	Vaikeita	Kyllä
Liukukiskot	Vaikeita	Ei	Ei	Vaikeita
Ulokkeet (esim nupit)	Kyllä	Ei suositella	Vaikeita	Vaikeita
Monimutkaisuus				
Minimipäästö (°)	0	2-3	1-4	2-3
Minimipaksuus (mm)	1	2	0,8	2
Maksimipaksuus (mm)	Ei rajoitettu	12	12	12
Paksuusvaihtelu (mm)	0,6	0,3	0,2	0,3
Pienin kaarevuussäde (mm)	6	6	3	6
Laitekustannus (+/0/-)	-	--	-	--
Muottikustannus (+/0/-)	-	-	+	-

	SMC	RRIM	Kelaus
Sopivin sarjakoko	Piensarja- suuri	Keskisuuri- suuri	Proto- piensarja
määrä/vuosi	1000- 100000	15000-100000	1-1000
Muottiaika	30-150 s	1-2 min	5 min - useita tunteja
Suurin tuotteen koko	4,5 m ²	Ei tiedossa	Halkaisija jopa 20 m
Mekaaninen lujuus (+/0/-)	--/-	--	0
Lujitesuuntaus	Tasainen	Tasainen, osit- tain virtauksen suuntaan	Suunnattu
Lujitepitoisuus (p%)	15-30	5-25	60-90
Pinnanlaatu (+/0/-)	++	++	0
Insertit	Kyllä	Kyllä	Ei
Reikien teko valmis- tusvaiheessa	Kyllä	Kyllä	Kyllä
Umpijäykisteet	Kyllä	Kyllä	Vaikeita
Ontot jäykisteet	Ei	Ei	Ei
Liukukiskot	Kyllä	Kyllä	Ei
Ulokkeet (esim nupit)	Kyllä	Kyllä	Ei
Monimutkaisuus			
Minimipäästö (°)	1-3	1-3	3
Minimipaksuus (mm)	1,3	2	0,25
Maksimipaksuus (mm)	25	12,5	> 50
Paksuusvaihtelu (mm)	0,1	0,05	0,25
Pienin kaarevuussäde (mm)	1,5	Puolet pak- suudesta	3
Laittekustannus (+/0/-)	0/+	-	-/0
Muottikustannus (+/0/-)	+	+	+

Kustannusten vertailussa tulee huomioida, että aina ei uutta osaa suunnitella ja hankkiessa tarvitse ostaa koko laitteistoa, vaan selvittää hankkimalla toimittajalle muotti tuotteiden valmistukseen. Pelkästään muottikustannukset eivät myöskään anna absoluuttista kuvaa tilanteesta, sillä esimerkiksi RTM, kelaus ja RRIM voivat tarvita useamman

kuin yhden muotin laitteiston kapasiteetin maksimoimiseksi. RTM-menetelmässä tulee huomioida myös suurempien kuitupitoisuuksien vaatimukset kovemmasta paineesta ja kalliimmista työkaluista jolloin yli 50 % kuitutilavuudet ovat käytössä lähinnä ilmaialalla (61 s. 332). Muita huomioitavia tekijöitä ovat esimerkiksi henkilökustannukset, jälkityöstön määrä ja muotin suurin käyttömäärä ennen korjausta tai vaihtoa. Pultruusi-on käyttämisestä puoltaa esimerkiksi suuri automatisoitavuus, jolloin henkilökustannukset ovat alhaiset. Tulisi myös huomioida osien määrän vähentäminen, sillä joissain tapauksissa yhdellä menetelmällä valmistettu kalliimpi osa voi sisältää useamman eri menetelmällä muuten valmistettävien osien toiminnallisuuden. Liiallinen toimintojen integroiminen voi myös toisinaan olla haitallista, jos se lisää muotin monimutkaisuutta liikaa. Osien määrän vähentäminen tulee esille erityisesti verrattessa metallien ohutlevytekniikan ja komposiittiosien suunnittelua. (13)

Komposiittisia korirakenteita suunniteltaessa kannattaa luultavasti hyödyntää erilaisia menetelmiä eri osiin. Soveltuvimpia menetelmiä voisivat olla RTM, pultruusio, kelaus. RTM voisi soveltua esimerkiksi erilaisiin kulmaliitososiin korvaamaan perinteisiä valukappaleita. RTM voisi soveltua myös suurien runko-osien valmistukseen. RTM saattaa tosin olla hankala suuremmilla sarjako'illa jolloin metalliset rakenteet saattavat olla parempia. Muovikomposiiteista kulmapaloiksi suuremmissa sarjoissa voisi sopia myös ruiskuvalun ja puristusmuovauksen yhdistelmä, jossa puristusmuovattua jatkuva-kuituista kappaletta vahvistetaan ruiskuvaletuilla rivastoilla (62). Muutenkin monimateriaalit ja monimenetelmät ovat luultavasti tällä hetkellä suunnittelijoiden kannalta helppo tapa lähestyä korirakenteita. Tällöin ei tarvitse kaikkea pyrkiä valmistamaan komposiiteista vaan niitä voidaan hyödyntää jäykkyyden lisäämiseksi, painon alentamiseksi tai hankaliin kohteisiin. Lisäksi saadaan helpoiten sopivan tyylinen komposiittiosa haluttuun paikkaan.

6 KOMPOSIITTIEIEN LIITTÄMINEN, TYÖSTÄMINEN JA PINNOITUS

Komposiittejä voidaan liittää, työstää ja pinnoittaa useilla erilaisilla menetelmillä. Tässä kappaleessa pyritään esittämään kattavasti tarjolla olevat perinteiset menetelmät, sekä uudemmat kehitteillä olevat tai hiljattain markkinoille tulleet. Lisäksi pyritään antamaan tietoa minkälaisia etuja ja rajoitteita erilaisilla matriiseilla ja lujitteilla on.

6.1 Adhesiivit

Adhesiivit eli liimat ovat polymeeripohjaisia tuotteita, jotka muodostavat mekaanisen ja spesifisen adheesion liimattavien kappaleiden välille. Mekaaninen adheesio tarkoittaa liiman tunkeutumista liimattavan kappaleen huokosiin ja siten mekaanista tartuntaa pintaan. Spesifinen adheesio on lujan liimasauman kannalta tärkeämpi tekijä. Siinä muodostuu kemiallisia liitoksia liiman ja liimattavan pinnan välille. Nämä ovat usein heikkoja sekundäärisiä Van der Waalsin voimista syntyviä liitoksia. Polymeerisinä aineina liimat kovetetaan matriisiaineiden tapaan eli kertamuoviset liimat polymerisoituvat liimauksen aikana ja kestonmuovisilla sulateliimoilla liimaus tapahtuu sulattamalla liima-aine ja antamalla sen jäähtyä. (13 s. 221)

Edellä olevat adheesiotekijät aiheuttavat periaatteessa vaatimukset liimattavalle pinnalle ja sille sopivalle liimalle. Spesifinen adheesio voi olla luonteeltaan polaarinen tai polaariton ja vaatii erittäin lyhyitä etäisyyksiä ollakseen riittävän vahva. Tällöin liimattavan pinnan ja liiman tulisi kummankin olla joka polaarisia tai polaarittomia yhteensopivuuden parantamiseksi. Polaarisuus ja polaarittomuus ovat kuitenkin melko hankalia aiheita pintakemiasta johtuen jolloin pelkistetty polaarinen-polaariton vertailu voi olla hankalaa. Liiman ja pinnan välistä etäisyyden kasvusta johtuvaa adheesion heikkenemistä voidaan vähentää esimerkiksi esikäsitteilyillä. Koska sekundääriset voimat johtuvat fysikaalis-kemiallisista ilmiöistä, voidaan liimasauman lujutta parantaa valitsemalla myös liimat, joissa on sopivat funktionaaliset ryhmät. (13 s. 221)

Nestemäisenä liiman tarvitsee tunkeutua kaikkiin pinnan huokosiin ja syrjäyttää sieltä ilma tiiviin ja hyvän liimasauman luomiseksi. Tällöin adheesioon vaikuttaa myös pinnan ja liiman pintajännitykset, sillä liima pisaroituu pinnalle, jossa on pienempi pintajännitys. Yleisesti varsinkin kestonmuoveilla on erittäin pieni pintajännitys, jolloin liiman leviäminen ja tarttuvuus on huonompi kuin esimerkiksi metalleilla. Pintajännitystä alentavasti vaikuttavat myös esimerkiksi rasvat ja öljyt pinnalla, jolloin niiden poisto on tärkeää ennen liimausta. Pintojen pintajännitystä voidaan lisäksi kasvattaa erilaisilla pintakäsittelyillä. (13 s. 221)

6.1.1 Liimatyyppiä ja lisäaineita

Liimat voivat olla laadusta riippuen joko yksikomponentti tai -kaksikomponenttisia. Niitä on saatavilla yleensä nesteinä, pastoina, kalvoina, jauheina ja teippeinä. Nesteet ovat usein edullisempia ja niiden käyttö on muita vaihtoehtoja sotkevampaa. Pastat ja kalvot ovat helpompia annostella pinnalle. Käytettävä tyyppi riippuu sovelluksesta ja sen vaatimuksista. Liimakalvoja esimerkiksi käytetään usein prepreg-valmistuksessa, jossa niiden kovetuslämmöt vastaavat prepregien kovetuslämpöjä.

Yleisesti käytettyjä liimatyyppiä ovat silikoni-, epoksi-, uretaani-, akrylaatti sekä sulateliimat. Liimakalvoissa käytetään lisäksi vinyyli-, fenoli- ja bismaleidipohjaisia raaka-aineita. Alla olevassa taulukossa (Taulukko 14) on esiteltyä erilaisille rakenne-liimoille tyypillisiä ominaisuuksia. (13 ss. 221-222)

Taulukko 14. Liimojen ominaisuuksia (13 ss. 221-222)

Liima	Epoksi	Silikoni	Uretaani	Akrylaatti	Sulateliima
Komponenttien määrä	1-2	1	2	1	1
Lämmön tarve	Haluttaessa	Ei	Haluttaessa	Ei	Pakollinen
Kovetusjakso	2-24 h / 20 °C 0,1 - 4 h / 150 °C	24 h / 20 °C	4-12 h / 20 °C 0,2-0,5 h / 65 °C	0,5-5 h / 20 °C	Sekunteja
Rakojen täyttyminen	Hyvä	Hyvä	Hyvä	Heikko	Hyvä
Iskulujuus	Heikko	Erinomainen	Erinomainen	Heikko	Kohtalainen
Leikkauslujuus (Mpa)	20	1,5-2	20	25	3
Repimislujuus (N/mm)	7-18	< 1	13	< 1	2
Käyttölämpötila (°C)	-60-120	-60-260	-150-80	-60-80	-40-60

Taulukosta huomataan, että nopeimmin kovettuvalla sulateliimalla ei välttämättä lujuusominaisuudet riitä suurillakaan liimapinnoilla korirakenteisiin. Lujemmilla liimoilla puolestaan vaaditaan hieman pidempiä kovetusaikoja ja lämpöä tai erittäin pitkää kovetusaikaa huoneenlämmössä.

Liimoissa voidaan käyttää myös erilaisia lisäaineita. Liimakalvoista voidaan valmistaa esimerkiksi vaahtoutuvia paksumpien liimasaumojen valmistamiseksi. Liiman seassa voi olla myös esimerkiksi lasikuulia, joilla voidaan vaikuttaa liimasauman paksumuutteen. Liimoja voidaan myös sitkosta jolloin esimerkiksi epoksin luontaisesti huonompaa iskunkestävyyttä voidaan parantaa.

Markkinoille on tulossa myös erikoislisäaineita, kuten Magsilica niminen ainesosa, joka koostuu pienistä nanokokoisista rautaoksidhiukkasista. Partikkelit sekoi-

tetaan liimaan ja vaihtelevan magneettikentän läheisyydessä ne alkavat oskilloimaan. Tämä liike muodostaa liimasaumaan lämpöä ja kovettaa liiman ilman uunia tai muuta ulkopuolista lämmönlähdettä. Tulevaisuudessa liimasauman luvataan olevan myös irroitettava käyttämällä vielä suurempaa vaihtelevaa magneettikenttää. Tällöin oskilloiva liike ja lämpö tuhoavat sauman ilman liimattavien kappaleiden tuhoamista. (63)

6.1.2 Pintojen käsittely

Liimattavat pinnat vaativat perinteisesti jonkinasteisen pintakäsittelyn. Yleensä pinnat tulee vähintään puhdistaa epäpuhtauksista ja rasvasta. Toisinaan voidaan vaatia karhennusta ja joskus myös erikoiskäsittelyjä. Käytettävä lujite ei juurikaan vaikuta liimaukseen, sillä liimat tarttuvat komposiitin pinnassa olevaan matriisikerrokseen. Erilaisille materiaaleille vaadittavia pinnankäsittelyjä ja rasvanpoistomenetelmiä on lueteltuna alla olevassa taulukossa (Taulukko 15). (13 ss. 221-223). Nykyään on varsinkin autoteollisuuden vaatimuksista johtuen tutkittu liimalaatuja, jotka eivät vaadi esikäsittelyjä pinnoille (64 s. 122). Näiden liimojen toiminta perustuu niiden kykyyn imeä tai syrjäyttää rasvaa ja likaa pinnoista. Esimerkiksi Sika mainostaa joillekin liimalaaduille, että niitä voidaan käyttää suoraan metallipintaan tai suoraan tai vähäisellä pintojen käsittelyllä muovipinnoille (65).

Taulukko 15. Liimattavien pintojen käsittely. (13 s. 223)

Materiaali	Rasvanpoisto	Vaihtoehtoja pinnankäsittelyyn
ABS	Ketoniliuote	Karhennus
		Syövytys natriumbikarbonaattirikkihappoliuoksella
Fluorivedyt	Kloorattu ketoni tai alkoholi	Syövytys natriumnaftaleeniliuoksessa
PA	Ketoniliuote	Karhennus
		Pohjamaalaus resorsinoliformaldehydimaalilla
		Plasmakäsittely
Polykarbonaatti	Alkoholi	Karhennus
PE & PP	Ketoniliuote	Liekitys
		Syövytys natriumkarbonaattirikkihappoliuoksessa
		Koronakäsittely
		Plasmakäsittely
PS & PSU	Alkoholi	Karhennus
PVC	Ketoni- tai kloorattu liuote	Karhennus
		Pyyhkiminen liuottimella
Kertamuovit	Ketoniliuote	Karhennus
Alumiini	Liuotepesu	Karhennus
		Syövytys natriumkarbonaattirikkihappoliuoksessa
		Syövytys rikki-kromihappokylvyssä
Teräs	Liuotehöyry	Karhennus
		Hiekkapuhallus
Ruostumaton teräs	Liuotehöyry, huuhtelu vedessä ja tislatussa vedessä	Syövytys natriumkarbonaattirikkihappoliuoksessa

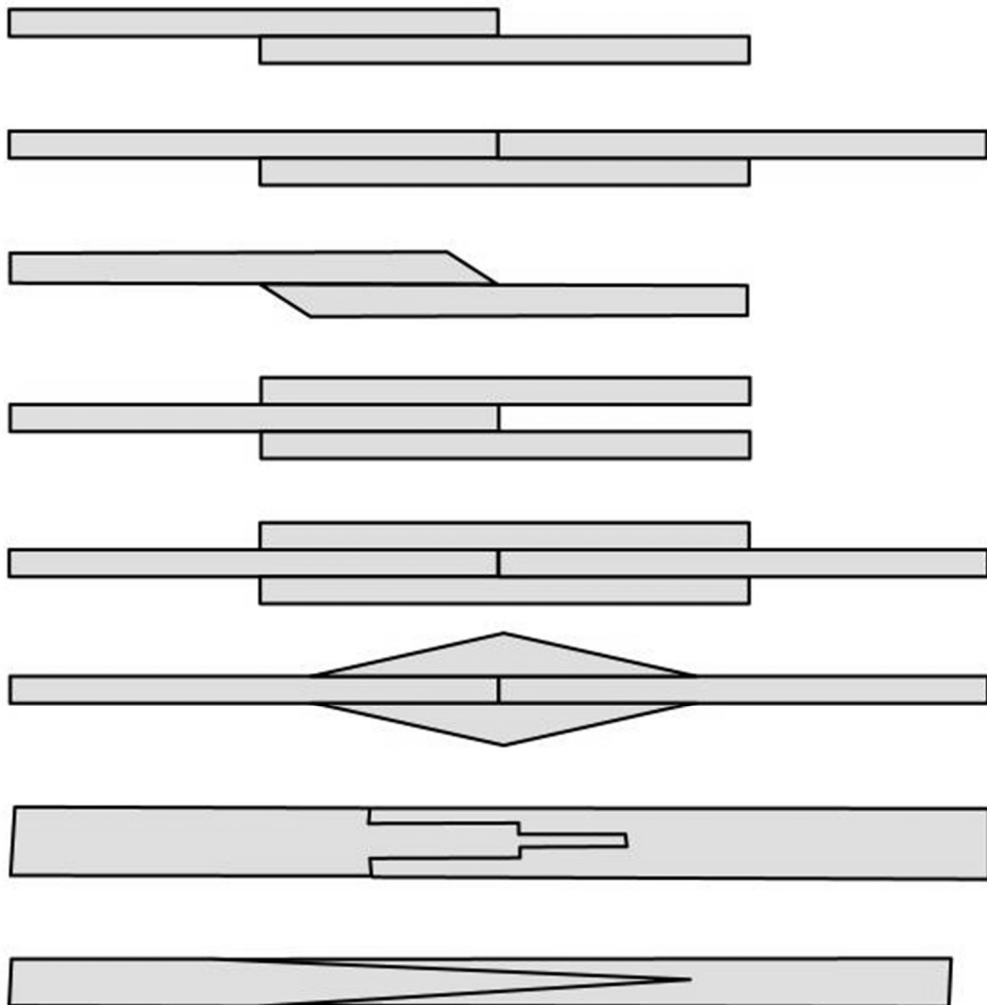
6.1.3 Liimasauman suunnittelu

Tässä osiossa käydään läpi liimasauman suunnitteluun liittyviä asioita. Lujuuksien ja jännitysten syvälinen tarkastelu jätetään laajuuden vuoksi käsittelemättä. Osiossa pyritään kuitenkin antamaan perustietoa, joita voidaan soveltaa liimasaumaa suunniteltaessa.

Liimaus on hyvin soveltuva liitosmenetelmä komposiiteille, sillä se on ainetta rikkomaton. Mekaanisilla liitoksilla vaaditaan usein esimerkiksi reikiä, jotka katkovat lujitetta ja heikentävät komposiittia. Liimasaumojen täytyy usein kuitenkin olla melko suuria, jotta niillä saavutetaan yhtä hyvä lujuus kuin mekaanisilla liittimillä. Liimasaumalla saadaan kuitenkin mekaanista liitääntä tasaisempi jännityksen siirtyminen kiinni-

tettävien kappaleiden välille. Liimatessa ei myöskään ole vaaraa galvaanisesta korroosiosta, jota tapahtuu esimerkiksi vääränlaisten metallisten liittimen ja hiilikuidun kanssa. (13 ss. 221-223)

Liimasaumat voidaan jakaa geometrian puolesta muutamaa erilaiseen. Niitä ovat esimerkiksi yksinkertainen päällekkäisliitos, kaksinkertainen päällekkäisliitos, yksin- ja kaksinkertaiset tuetut liitokset, porrastetut ja lovetut liitokset, sekä näistä erilaisia viistettyjä versioita. Käytännössä erilaiset moninkertaiset liitokset ovat lujempia, ja siirtävät kuormat paremmin, mutta yksinkertaiset liitokset ovat helpompia valmistaa. Erilaisia liitostapoja on esiteltynä seuraavassa kuvassa (Kuva 13). Kuvassa kolme ensimmäistä esittävät yksinkertaisia liitoksia, kolme seuraavaa kaksinkertaisia liitoksia ja kaksi viimeistä erilaisia porrastettuja ja lovettuja liitoksia. Kaksinkertaiset ja uurretut liitokset vastustavat lisäksi paremmin erilaisia repiviä ja kuorivia voimia, jotka ovat ongelmallisia yksinkertaisilla liitoksilla (38 p. 336). Lovetulla liitoksella saadaan lisäksi tasaisin voimien välittyminen jolloin voidaan suunnitella liitos, jossa liitoksen lujuus vastaa laminaatin lujuutta. Suositeltu kulman suuruus on 6-10 °.



Kuva 13. Liimaliitoksia. Mukailten (38)

Liimasauma on parhaimmillaan, jos se pystyy välittämään mahdollisimman paljon voimista liimattujen kappaleiden välillä kantaen itse mahdollisimman vähän kuormasta. Toivottu rasiustapa on leikkausvoimista syntyvää. Optimitalauksessa liimasauman lujuus vastaa komposiittilaminaatin lujuutta (38 p. 336). Käytännössä kuitenkin kannattaa liimasauma suunnitella lujemmaksi, ettei mahdolliset epäpuhtaudet tai liiman epätasaisuus heikennä liikaa saumaa. Liimasaumoihin vaikuttaa myös eri komponenttien lämpölaajeneminen ja liiman hauraus tai sitkeys. Esimerkiksi liimattaessa kahta erilaista materiaalia, kuten metalleja ja komposiitteja yhteen, voi suurissa lämpötilavaihteluissa liimasaumaan kohdistua suuriakin jännityksiä. Tällöin esimerkiksi da Silvan ja Adamsin mukaan voisi olla mahdollista käyttää haurasta ja sitkeää liimaa samassa liitoksessa, jolloin ne toimivat hyvin eri lämpötila-alueilla (66).

Liimasauman paksuuden vaikutusta on tutkittu kirjallisuudessa jonkin verran. Esimerkiksi lasikuituprofiileja liimattaessa polyuretaaniliimoilla Vallée et al. (67) huomasivat yhden millimetrin paksuisen sauman olevan lujin ja viiden mm jälkeen lujuuden alkavan vakiintua alle puoleen maksimista. Vallée et al. havaitsivat toisessa tutkimuksessa (68) että suurilla paksuuksilla (5-35 mm, kaksinkertainen liitos) havaitaan samaa liimasauman heikkenemistä paksuuden kasvaessa. Kolmannessa tutkimuksessa Vallée ja Keller (69)(70) huomasivat, että pultruusioprofiileilla 1-3 mm paksuilla liimasaumoilla sauman vahvuudella ja jännityksen siirtokyvyllä ei ollut suurta eroa keskenään.

Liimasauman ja liimattavien pintojen pyörityksiä ja viisteitä sekä näihin liittyviä geometrisiä muotoja on myös tutkittu kirjallisuudessa. Niillä on vaikutusta siirtyviin voimiin ja liimasauman lujuuteen, mutta niistä saatava hyöty ei välttämättä riitä oikeutamaan niiden valmistamiseen vaadittavaa aikaa. Voidaan kuitenkin ajatella, että jos sellainen voidaan suunnitella ilman suuria vaikeuksia, lisähaasteita tai kustannuksia niin siitä on hyötyä.

Liimasauman piteuden ja leveyden vaikutus on helppo käsittää. Sauman pinta-alan kasvaessa myös sauman lujuus kasvaa. Jossain pisteessä ei kuitenkaan sauman koon kasvattaminen ole järkevää, sillä sauman lujuus ei välttämättä kasva suoraan verrannollisena sauman alaan. Sauman koon kasvattaminen lisää tietysti myös painoa, vaikkakaan se ei autoteollisuudessa ole yhtä merkittävää kuin ilmailussa.(68)(70)(38)

Lämpötilavaihteluiden vaikutusta on tutkittu myös liimaliitoksissa. Lasikuituprofiilien ja epoksiliiman käyttäytymistä tutkiessaan Zhang et al. (71) huomasivat, että hauraalla alueella lasisiirtymä lämpötilan alapuolella käyttäytyminen on lineaarista, lasisiirtymälämpötilan alueella käyttäytyminen oli erittäin epälineaarista ja taas sen yläpuolella lineaarista. Käytännössä kuitenkin lasisiirtymälämpötilan ylittyessä liimosauman lujuus aleni ja sauman lujuuden kannalta liima pitäisi valita siten ettei lasisiirtymälämpötila ylity käyttökohteessa. Seuraavaan taulukkoon on koottu liimasauman suunnittelun ohjenuoria, joita on saatavilla kirjallisuudesta.

Taulukko 16. Liimaukseen liittyvää tietoa (38 pp. 330-345)(32)

Liimasaumaan tulisi kohdistua leikkausvoimia	Vältä kuorivia, halkaisevia ja vetojännityksiä
Jos kuorivia voimia ei voida välttää, käytä kumimaisempia liimoja	Haurailla ja jäykillä liimoilla alempi kestävyys
Viistetyt ja lovetut päät alentavat kuorivia voimia	
Kaksinkertaiset- ja lovetut liitokset ovat yksinkertaisia parempia	
Hajoaminen tulee suunnitella tapahtumaan liimattavaan kappaleeseen, ei liimaan tai liimapintaan	Liiman lujuuden ja tarttuvuuden tulee olla riittävän hyvä
Pinnankäsittely on usein tärkeä osa prosessia	Liimaliitokset tapahtuvat pinnoissa
Lämpökovetteiset kertamuovipohjaiset liimat ovat yleisesti nopeampia ja niillä on paremmat ominaisuudet	
Liiman ja liimattavien pintojen yhteensopivuus tulee varmentaa	
Korkea suhteellinen ilmankosteus saattaa aiheuttaa kosteuden absorptiota liimaan	Voi purkautua höyrynä kovettaessa
Osa liimoista tarvitsee puristuspaineen	Pastoilla ei usein tarvita
Jäykät kappaleet vähentävät liimaan kohdistuvaa jännitystä	
Kalvomaisilla liimoilla saadaan paras toistettavuus	
Metalliosilla tarvitaan korroosiosuojausta	Hiilikuitu aiheuttaa galvaanista korroosiota,
Lasikuitua voidaan käyttää hiilikuidun ja metallin välissä suojana	
Valitut liimat tulee testata ja suunnitellut liitokset todentaa toimiviksi	
Liimasauman pinta-alan kasvaessa sen lujuus ja paino kasvavat	Yksinkertaisilla liitoksilla kuorivien voimien vaikutus vähenee leveyden kasvaessa
Kapeilla liimasaumoilla on tasaisempi jännitys jakauma	
Korjattavuus tulee huomioida liimasaumaa suunnitellessa	
Yksinkertaisilla ja kaksinkertaisilla liitoksilla kuorivat voimat kasvavat liimattavien kappaleiden paksuuden kasvaessa, sillä päiden paksuudet lisäävät momenttivoimia	Lovetuttuja ja porrastettuja liitoksia voidaan periaatteessa käyttää kaiken paksuisissa kappaleissa. Viisteitä voidaan käyttää paksuilla kappaleilla
Pitämällä liiman muodonmuutokset elastisella alueella voidaan yleensä lisätä pitkäaikaista kestävyttä	

Perinteisten liimaliitosten lisäksi liimaliitoksiksi voidaan laskea myös yhteenlaminoinnilla valmistetut liitokset. Yhteenlaminointia käytetään sekä kerta-, että kestopuoveilla. Kertamuoveilla liitettävät komponentit yhdistetään hartsilla normaalin komposiittien valmistuksen aikana tai sitä voidaan käyttää valmiiden tuotteiden yhdistämiseen. Kestomuoveilla liitos tapahtuu matriisiin tai matriisin pinnassa olevan lisäkerroksen sulaessa ja yhdistyessä toiseen kappaleeseen. Kestomuovien yhteenlaminointi voidaan luokitella myös hitsaukseksi. Ero liimaamiseen on lähinnä se, että yhteenliittäminen tapahtuu valmistusprosessissa tai sen tapaisessa ympäristössä ja liitos on sopivasti tehtynä yhte-

näinen varsinaisen materiaalin kanssa. Menetelmässä ongelmia ja suunnitteluvaikeuksia luovat myös kertamuoveilla esimerkiksi kovetuslämpö, jolloin liitoskappaleiden paksaus tulee huomioda liimakiinnitystä tarkemmin. Yhteenlaminoinnilla saadaan kuitenkin tavallista liimaliitosta lujemmat liitokset ja oikein toteutettuna se on myös halpa. (38 pp. 345-346)

Tavallisten liimaliitosten hyödyntämisessä on kuitenkin vielä tällä hetkellä olemassa ongelmia. Liimasaumasta voidaan tutkia huokosia ja rakoja, mutta hyvän liimasauman lujuuden toteaminen on mahdotonta NDT-tekniikoilla (38 p. 334). Tämä aiheuttaa huolia erityisesti kuormaa kantavissa sovelluksissa. Tällöin esimerkiksi auton rungon valmistaminen ainoastaan liimaamalla ilman mitään muita liitosmenetelmiä voi osoittautua hankalaksi. Tosin mekaanista lujuutta ja liitoksen onnistumista suurempi ongelma olisi luultavasti liitoksen kasassa pitäminen tai liian pitkä kovettumisaika ilman muita menetelmiä. Liimauksen etuja ja siinä liittyviä asioita on koottu seuraavaan taulukkoon. Verrannolliset asiat, kuten hankalampia korjata, ovat mekaanisiin liitoksiin verrattuja piirteitä.

Taulukko 17. Liimaliitosten etuja ja siinä huomioitavia asioita (38 p. 334)

Liimauksen etuja	Liimauksessa huomioitavaa
Kevyet saumat vähentävät painoa Ei tarvetta rikkoa komposiitin rakennetta Soveltuu ohuille levyille Voidaan liittää erilaisia materiaaleja yhteen Tiivistää sauman itsestään Soveltuu korjausmenetelmänä Ei liittimistä syntyviä ulokkeita pinnoissa Tasainen jännitysten ja voimien siirto	Hankala purkaa Pinnankäsittely usein tärkeää Sauman vaurioituminen hankala todeta Lämpötilan muutosten ja kosteuden mahdollinen vaikutus lujuuteen Tarkistaminen vaatii kalliita laitteita Liimasaumat hankalampia korjata Liimattaessa eri tyyppisiä materiaaleja tulee huomioda lämpölaajenemisen vaikutus Oikeaoppinen suunnittelu ja lujuuslaskenta voi olla hankalampaa

6.2 Mekaaniset liitokset

Erilaisia mekaanisia liitostapoja on lukuisia. Niihin lasketaan erilaiset pultit, ruuvit, nauhat ja niitit sekä kappaleiden väliset geometriset muotolukitukset ja napsautusliitokset. Komposiitit materiaalina aiheuttavat erilaisia vaatimuksia mekaaniseen liittämiseen kuin metallit. Komposiiteilla suunnittelussa tulee huomioda erityisesti korroosio, reikien toleranssit, kiinnikkeiden paikoitus ja kiinnityselementtien kiristysmomentti. Liimaamiseen verrattuna kuitenkin ei tarvita pintakäsittelyjä ja liitoksen vaurioituminen on helpommin havaittavissa, mutta liitosten paino kasvaa ulkopuolisten liittimien vuok-

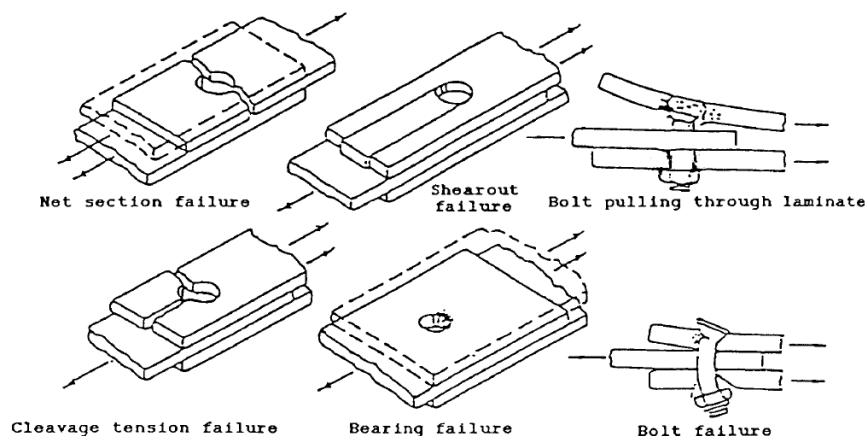
si. Komposiiteilla on tosin havaittu metalleja paremmat liitoslujuudet mekaanisia liitoksia hyödynnettäessä (72). (32)

6.2.1 Pultti-, niitti- ja ruuviliitokset

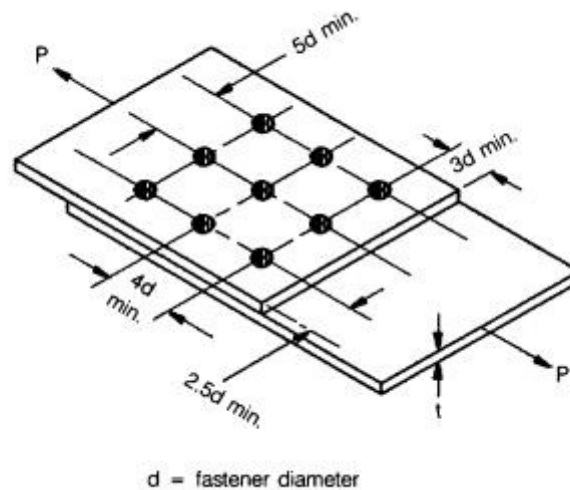
Tässä osiossa käsitellään erilaisia pultti-, niitti- ja ruuviliitoksia sekä muita liitosmenetelmiä, jossa kiinnitettävien kappaleiden yhdistämiseen käytetään kappaleiden ulkopuolisia kiinnityselementtejä.

Kuituvaihtoehdoista ainoastaan hiilikuitu asettaa metallimateriaaleille rajoituksia, sillä se aiheuttaa galvaanista korroosiota monissa eri metallilaaduissa. Tällöin kiinnikemateriaaliksi tulisi valita esimerkiksi titaani, austeniittinen korroosionkestävä teräs tai esimerkiksi kaksifaasiteräs. Korroosion kannalta epäsuotuisia metalleja voidaan käyttää, mutta ne vaativat suojauksen (38 p. 301). Suojaus voidaan tehdä esimerkiksi eristämällä pinnat toisistaan hartsilla, liimalla tai lasikuitukankaalla. Myös komposiiteista valmistettuja kiinnityselementtejä voidaan käyttää, mutta aina niiden lujuus ei ole riittävä. (32)

Mekaanisia liitoksia suunnitellassa lähtökohtana on, että kiinnityselementit eivät hajoa ennen kiinnitettäviä kappaleita, sillä muutoin ei saada hyödynnettyä kaikkea materiaalin lujuutta. Riippuen kiinnityselementtien paikoituksesta myös komposiitin hajoamistavat voivat poiketa. Lähtökohtana on välttää katastrofaalinen hajoaminen, joka tapahtuu yllättäen ilman varoitusta. Alla olevassa kuvassa (Kuva 14) on esitettyä liitoksille ominaisia hajoamistapoja. Näistä "bearing failure" ja "net section" ovat toivottuimpia, sillä muut ovat käytännössä äkillisesti tapahtuvia hajoamisia. Näistä myös "net section" on melko äkillinen, mutta toivotumpi hajoamistapa kuin muut, sillä siihen vaaditaan enemmän energiaa. Näihin voidaan pyrkiä suunnittelemalla kappaleiden paksuus, kiinnitysreikien ja elementtien koko ja etäisyys reunoista. Yksinkertaiset mitoitusohjeet mekaanisille liitoksille on esitettyä alla (Kuva 15). Kuvassa d tarkoittaa kiinnityselementin varren halkaisijaa. (72)



Kuva 14. Komposiittiliitosten hajoamistapoja (72)



Kuva 15. Mekaanisen liitoksen mitoitus (38 p. 294)

Komposiittiliitosten kohdalla kiinnityspulttien ja ruuvien taipuminen tapahtuu metalliliitoksia helpommin johtuen laminaattien sisäisistä leikkausvoimista. Sisäiset leikkausvoimat voivat nousta niin korkeaksi etteivät väärin suunnitellut kiinnityselementit kestä niiden kohdistuvaa rasiitusta. Tällöin korkean lujuuden ja jäykkyyden materiaalit voivat olla tarpeen. Tämä aiheuttaa myös erilaisia vaatimuksia kiinnityselementin pään muodolle. Pään ja kiinnitettävän pinnan välinen kuormaa kantava alue tulisikin olla mahdollisimman suuri ja kiinnityselementin avauskulman (yleensä 100-130 °) liitokseen kohdistuviin kuormiin sopiva. (32)

Kiinnityselementtien puristusvoiman tulisi levitä mahdollisimman suurella alueella, jotta matriisiaineen puristuslujuus ei ylittyisi. Tiukasti yhteenpuristetut kappaleet ja tiukan toleranssin reiät edesauttavat siirtämään kappaleisiin kohdistuneita voimia paremmin eteenpäin ja samalla parantavat liitoksen väsymiskestävyyttä. Komposiittien aikasidonnoisista ominaisuuksista, kuten jännitysrelaksaatiosta, johtuen liitoksen puristus löystyy ajan kuluessa ja muutos voi olla alkuperäiseen nähden melko suuri. (32)

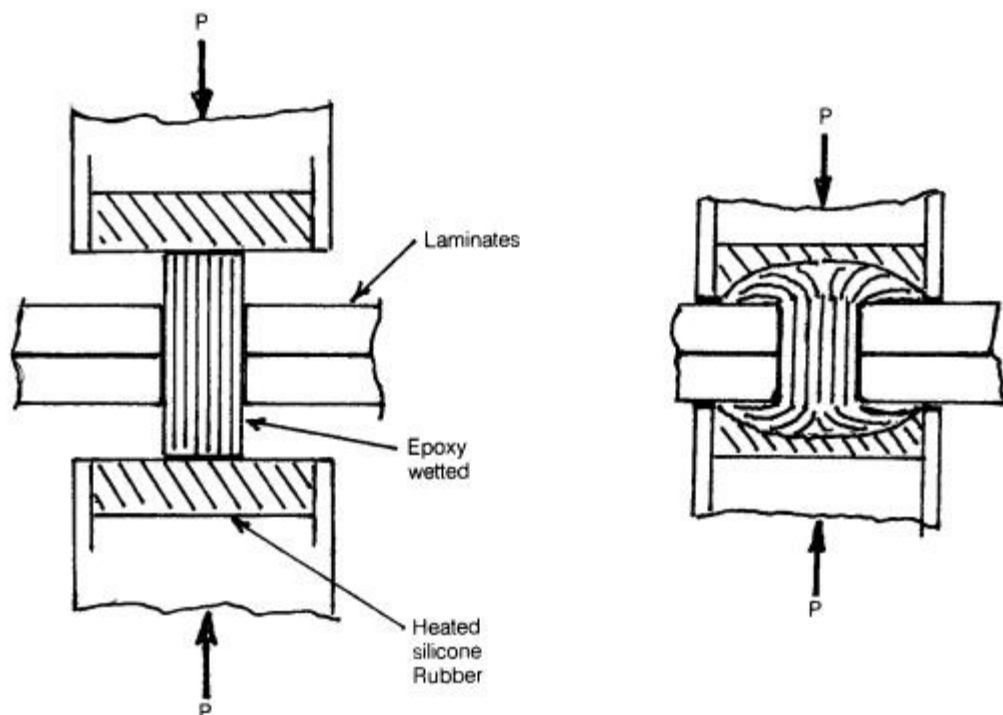
Kiinnityselementtien reikiä ei kannata pyöristää tai viistää, jos käytetään pinnasta ulkonevilla päillä olevia kiinnikkeitä, sillä se ei lisää liitoksen kestävyttä. Teoriassa viistämäton kulma painuu vähän kiinnityselementin mukana ja tekee reiästä tiukemman. Viistäminen rikkoo rakennetta lisää ja vähentää kuormaa kantavaa alaa. Käytettäessä pinnan tasoon jääviä kiinnityselementtejä on viisteet ymmärrettävästi pakollisia. (32)

Kiinnitysreiät ovat optimaalisia, jos ne ovat tasan oikean kokoisia kiinnityselementeille. Käytännössä tämän toteuttaminen on kuitenkin usein liian hankalaa. Komposiiteilla voidaankin käyttää alumiinin tapaan hieman liian suuria kiinnityselementtejä. Ylisuuret kiinnityselementit tosin taivuttavat kuituja ja rikkovat matriisiainetta, jolloin elementin tulisi olla mahdollisimman vähän ylisuuri eli menetelmässä pyritään saamaan aikaan lähes oikean kokoinen reikä. Samalla myös kiinnitysreiässä ajan myötä mahdollisesti tapahtuva vaurioitumisesta johtuva halkaisijan kasvu vähenee. (32)

Markkinoilla on saatavilla lukuisia erilaisia kiinnityselementtejä. Komposiiteille valmistetaan varta vasten niille suunniteltuja tuotteita, mutta jossain määrin voidaan käyttää myös muihin sovelluksiin tarkoitettuja kiinnityselementtejä. Komposiittien erilaisista rakenteista johtuen myös erilaisille komposiittituotteille on olemassa omanlaisia kiinnityselementtejä. Perinteiset menetelmät vaativat yleensä valmiin reiän kiinnityselementtiä varten. Poikkeuksena on esimerkiksi läpiniittäusmenetelmät (73), joissa niitti lävistää pintamateriaalin ja uppoaa alimpaan materiaaliin. Täm menetelmä soveltuu tosin parhaiten komposiitin liittämiseksi metalliin. (38 pp. 285-317). Ruuviliitoksia ei usein käytetä, sillä komposiittiin ei yleensä haluta tehdä kierteitä, vaan kierteet saadaan aikaan erillisellä rakenteeseen liitettävällä metalliholkilla tai niitillä.

Perinteisten vetokaraniittien, niittien ja pulttien lisäksi markkinoille on tullut esimerkiksi RivTac-niminen pikanaulaus (74). Siinä kappaleiden läpi lyödään naula-mainen kiinnike, jolloin valmiita reikiä eikä molemmin puolista pääsyä liitokseen tarvita. Menetelmä ei tosin sovellu hyvin esimerkiksi kahden komposiitin yhdistämiseen sillä naula voi ulostullessaan aiheuttaa delaminaatiota. Komposiitin kiinnittäminen metalliin onnistuu sillä kuitenkin hyvin. Menetelmä vaatii myös automaation, sillä käytännön kokemus on osoittanut ettei se sovellu hyvin manuaaliseen työskentelyyn.

Erikoissovelluksena niittauksesta voidaan mainita märkäpuristusniitin käyttö (Kuva 16). Tässä menetelmässä pitkä sylinterin muotoinen kimppu kostutettuja kuituja asetetaan reikään ja puristetaan lämmitettyjen silikonitassujen väliin. Puristuksessa kuidut taipuvat reiän ulkopuolella pintaa vasten luoden samalla niitin kannan molemminpuolin. Epoksihartsia kovettuu lämmössä ja muodostaa kovan liittimen. (38 p. 353)

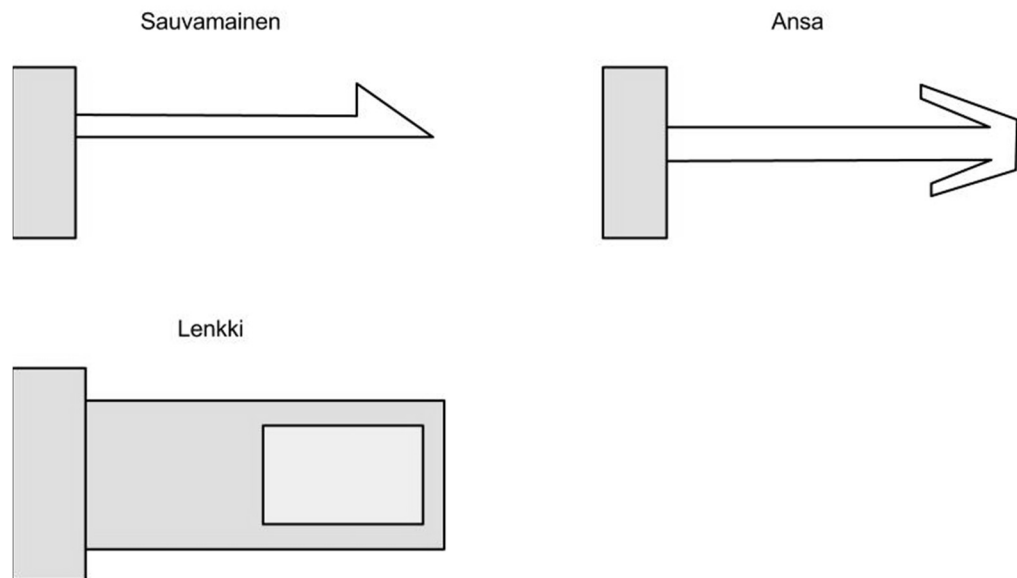


Kuva 16. Märkäpuristusniitti (38 p. p. 353)

6.2.2 Napsautusliitokset ja geometriset lukitukset

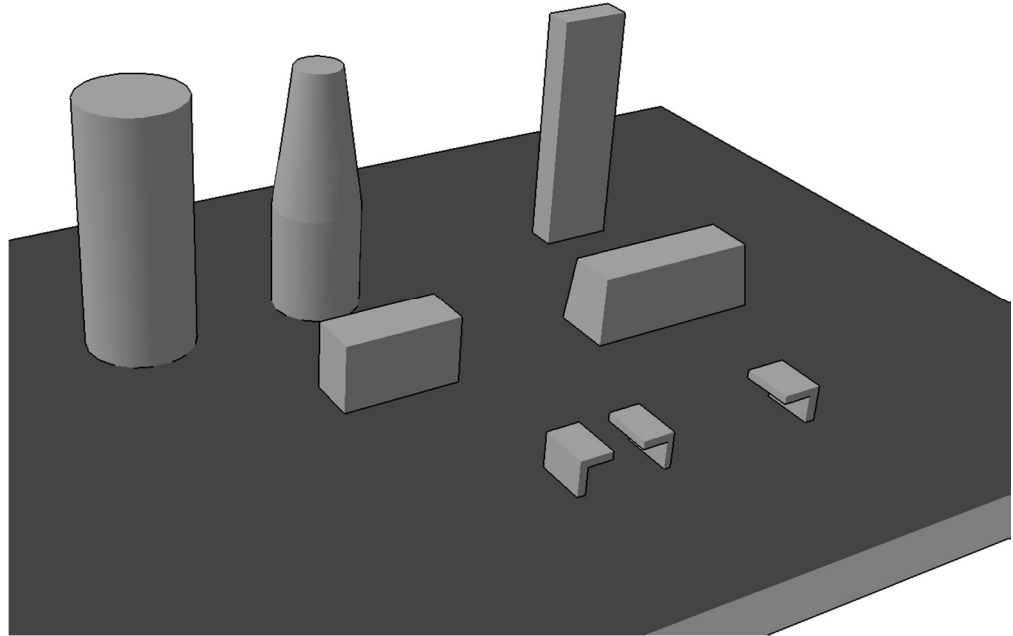
Napsautusliitokset ja geometriset lukitukset ovat kappaleisiin erikseen työstettäviä tai valmistetusvaiheessa integroituja elementtejä, joita voidaan käyttää paikoitukseen ja kappaleiden toisiinsa liittämiseen. Napsautusliitokset tulee ymmärtää järjestelminä, joissa on elementteinä lukkoja, paikoittimia, lisäosia sekä ohjeita.

Lukkojen tarkoitus on lukita lopullinen rakenne yhteen, mutta ei kantaa juurikaan liitokseen syntyvistä rasituksista. Lukkorakenne koostuu lukosta ja vastakappaleesta, joka voi olla paikoitin tai toinen lukko. Lukittuminen perustuu lukon kykyyn taipua ja "napsahtaa" kohdilleen. Muodoltaan lukot voivat olla erittäin moninaisia, mutta yleisimpiä ovat sauvamaiset koukut, ansat ja erilaiset lenkit. Näistäkin saadaan useita erilaisia variaatioita geometriaa muuttamalla. Alla olevassa kuvassa (Kuva 17) on esitettyä muutama erilainen lukko geometria. (75 ss. 14-33)



Kuva 17. Lukko geometrioita. Mukailten (75)

Paikoittimet ovat joko rakenteessa luonnollisesti olevia elementtejä tai varta vasten suunniteltuja ja lisättyjä osia. Paikoittimien tarkoitus on pääasiallisesti toimia kuormaa kantavina elementteinä ja rajoittaa liitoksen vapausasteista suurin osan. Lukkojen tapaan myös paikoittajilla on jokin vastakappale johon paikoitin tukeutuu tai ohjautuu. Käytännössä paikoittajien lisätarkoitus yhdistettynä lisäosaan on usein ohjata kiinnitettävät kappaleet kiinnitysvaiheessa toisiinsa. Paikoittajia käytetään myös ilman lukkoja erilaisissa sovelluksissa paikoittamiseen ja vapausasteiden rajoittamiseen. Esimerkiksi kappaleessa saattaa olla lovi johon toisen kappaleen reuna työnnetään paikannusta ja asentamisen helpottamista varten. Luontaisia paikoittajia ovat erilaiset seinämät ja reunat. Lisättyjä paikoittimia ovat esimerkiksi korvakkeet, liukukiskot, tapit, esteet ja kiilat. Vastinkappale voi olla esimerkiksi reuna, kolo tai reikä. Erilaisia paikoittajia on esiteltyä alla olevassa kuvassa (Kuva 18). (75 ss. 14-33)



Kuva 18. Erilaisia paikoittajia. Mukailten (75)

Lisäosat ja ohjeet ovat napsautusliitosten kannalta vapaaehtoisia elementtejä, joilla pyritään tukemaan järjestelmän toimintaa. Käytännössä kuitenkin hyvässä napsautusliitoksessa vaaditaan myös erilaisia lisäosia. Lisäosat voivat esimerkiksi ohjata paikoittajat ja lukot paikoilleen, antaa vasteen liitoksen onnistumisesta, toimia lukon aukaisijoina, parantaa paikallista lujuutta tai imeä toleransseja. Ohjeiden tarkoitus on esimerkiksi yksinkertaisimmillaan esittää vaadittava kasausliike, jos se poikkeaa yksinkertaisesta osien suorasta yhteenpainamisesta. Käytännössä siis yksi elementti, kuten paikoitin voi samalla sisältää myös useamman lisäosan. (75 ss. 14-33)

Hyvän napsautusliitoksen tulee täyttää seuraavat tarpeet. Sen tarvitsee olla riittävän luja, yhteensopiva, rajoittava sekä robusti. Jos kaikki osa-alueet ovat kunnossa voidaan liitosta pitää luotettavana ja hyvänä. Lujuus tarkoittaa lukon toimintaa kasaus- ja purkuvaiheessa sekä rakenteen kykyä pitää rakenne kasassa sen elinaikana ilman liitoksen löystymistä, hajoamista tai ylimääräisiä ääniä. (75 ss. 14-33)

Yhteensopivuus tarkoittaa napsautusliitoksen elementtien yhteensopivuutta järjestelmänä. Yhteensopiva liitos on helppo kasata ja se ei vaurioidu kasausvaiheessa. Yhteensopimaton liitos esimerkiksi voi vaatia liian suuria taivutuksia osille tai kasausliikettä tai järjestystä, joka ei ole geometrisesti järkevä. (75 ss. 14-33)

Rajoittava ominaisuus tarkoittaa liitoksen kykyä rajoittaa vapausasteita liitoksissa suunniteltuun määrään. Kiinteässä liitoksessa ei saa jäädä lainkaan vapausasteita, mutta esimerkiksi rullat vaativat rajoittamattomia vapausasteita. Rajoitteet ovat vaatimus muiden tarpeiden täyttymiselle. Alirajoitettu liitos voi elää, osat voivat liikkua tai esimerkiksi kolista tai nitistä. Ylirajoitettu saattaa vaatia kalliita ja erittäin tarkkoja toleransseja tai vaikeuttaa kasausta. Pahimmassa tapauksessa ylirajoitettu kappale voi hajota enneaikaisesti, sillä kappaleeseen voi syntyä kasausvaiheessa jännityksiä. (75 ss. 14-33)

Robusti tarkoittaa napsautusliitoksissa napsautusliitoksen toleranssia kaikkia muuttuvia ja tuntemattomia tekijöitä kohtaan, joita napsautusliitokseen suunnitteluun, valmistukseen, kasaukseen ja käyttöön liittyy. Tällöin liitos sietää tietyn määrän väärinkäytöksiä ja erikoisia tilanteita. Esimerkiksi liitoksen tulee kestää korjausvaiheessa avaaminen ja lievä väärinkasaaminen, jos kasaustapa on epäselvä. (75 ss. 14-33)

Napsautusliitos voidaan suunnitella avattavaksi tai kertakäyttöiseksi. Liitos voi olla myös liikkuva tai kiinteä. Sen tarkoitus voi olla pääasiallinen kiinnitystapa tai esimerkiksi toimia hetkellisenä tai pysyvänä kasausapuna liimauksen tai ruuvauksen ajan. Napsautusliitosta suunnitellessa tulee lisäksi huomioida kasausliike- ja suunta sekä elementtien sijainnit ja määrät. Lukkoja suunnitellessa tulee myös huomioida niiden riittävä lujuus ja kyky taipua tarpeeksi. (75 ss. 14-50)

Napsautusliitokset voisivatkin toimia hyvin yhteen komposiittien ja liiman kanssa. Tällöin napsautusliitos toimisi paikannusapuna ja pitäisi tuotteen kasassa liiman kuivumisen ajan. Paikoittajina voisivat esimerkiksi olla profiiliin valmistettavat urat, korvakkeet tai liukukiskot.

6.3 Muita liitosmenetelmiä

Muita komposiittien liittämiseen mahdollisia menetelmiä ovat esimerkiksi erilaiset insertit, kiinnikkeet ja hitsausmenetelmät. Näiden lisäksi on myös erikoismenetelmiä, kuten ompelu, jossa kappaleet yhdistetään ompelemalla ne yhteen kostutetulla kuitukimpulla (38 p. 353). Inserteillä tarkoitetaan tässä tappauksessa valmistusprosessissa kappaleeseen lisättäviä kiinnityspaikkoja. Insertit ovat yleensä metallisia ja ne liitetään komposiittiin esimerkiksi suoraan RTM-muotissa. Inserttejä käytettäessä tulee huomioida erityisen hyvin korroosion vaikutukset, sillä niitä voi olla hankala havaita ja hallita monimutkaisissa kappaleissa.

Kiinnikkeet ovat erillisiä työstettäviä kiinnityspaikkoja, jotka valmistetaan kappaleeseen työstämällä. Nekin ovat inserttien tapaan usein metallisia, mutta niiden valmistus vaatii esimerkiksi reikien ja kolojen työstämistä sijoittamista varten. Inserteissä ja kiinnikkeissä käytetään usein kierteisiä liittimiä, joihin voidaan esimerkiksi liittää metalliosia kiinni.

Hitsaus on ainoastaan kestumuoveille soveltuva kiinnitysmenetelmä sillä siinä sulatetaan matriisiainetta. Hitsaus voidaan jakaa vastushitsaukseen, ultraäänihitsaukseen, induktiohitsaukseen, kohdistettuun infrapunahitsaukseen ja kitkahitsaukseen (38 pp. 349-353). Vastushitsauksessa liitettävien osien väliin asetetaan vastuslanka tai -lankoja, jotka lämpenevät sähkövirran vaikutuksesta. Lanka voi olla metallia, mutta myös hiilikuitua voidaan hyödyntää vastuslankana. Langat jäävät rakenteeseen, mutta menetelmä on nopea ja yksinkertainen. Liitosaumassa voidaan käyttää myös esimerkiksi muovikalvoa tai prepregejä lisämateriaalina.

Ultraäänihitsauksessa synnytetään liitettävien pintojen välille värinän avulla kitkaa ja lämpöä. Liitettävissä pinnoissa tulee olla energiaa keskittäviä muotoja, jotka edesauttavat sulamista. Liitokseen tuodaan lisäksi painetta, jolloin liitoksista tulee vah-

voja ja kestäviä. Sopiva pinta hitsausta varten voidaan valmistaa suoraan valmistusprosessissa käyttämällä esimerkiksi repäisykangasta, josta jää karhea pinta. Komposiittejä hitsatessa kuitenkin pitkät saumat ovat hankalia ja menetelmää käytetään usein pistehitsauksena. (38 pp. 349-353)

Induktiohitsauksessa lämpö tuodaan induktiosta johtuvan lämmön avulla. Siinä vaihtelevassa magneettikentässä olevat sähköjohtavat ja magneettiset aineet tuottavat erittäin nopeasti lämpöä saumaan. Saumaan tarvitseekin tuoda tällöin tällöin metallikalvo tai elementti, jolla lämpö saadaan aikaan. (38 pp. 349-353)

Värinähitsaus on lähinnä lujittamattomille muovimateriaaleille suunniteltu menetelmä, mutta soveltuu myös komposiittituotteille. Siinä liitettävistä kappaleista toista liikutetaan nopeasti jolloin saumassa syntyvä kitka sulattaa pinnat yhteen. Menetelmä soveltuu parhaiten yksiakselisesti lujitetuille kappaleille. Moniakselisessa lujituksessa risteävät pinnat ja kuidut voivat värähdellessään katkoa toisiaan. Menetelmä soveltuu lähinnä pienille kappaleille tai pienen kappaleen kiinnittämisen suureen kappaleeseen. (38 pp. 349-353)

Kohdistetussa infrapunahitsauksessa liitossauma saadaan sulamaan yhteen käyttämällä elektromagneettisten aaltojen synnyttämää lämpöä. Lämpö keskitetään saumaan ja liitos viimeistellään painamalla kappaleet yhteen. (38 pp. 349-353)

Seuraavassa taulukossa on esitettyä joitain etuja ja hyötyjä sekä huomioitavia asioita eri hitsausmenetelmistä. Taulukkoa voidaan käyttää alustavaan valintaan tutkimalla esimerkiksi eri hitsausmenetelmien rajoitteita.

Taulukko 18. Kestumuovien hitsausmenetelmiä (38 pp. 286, 349-353)

Hitsausmenetelmä	Etuja	Haittoja
Vastuslanka	Suuret sauma-alat mahdollisia Ei paksuusrajoitetta hyvä kontaktipinta saumassa Automatisoitavissa	Tarvisee lämpöelementin Tarvisee pintakäsittelyn Vaatii paljon sähkötehoa
Ultraääni	Korkea lujuus saumalle Nopea Automatisoitavissa	Soveltuu lähinnä pistehitsiin Tarvisee käsittelyn pinnalle Tarvisee taustatuen Tarvisee paikannuslaitteet
Induktio	Ei vaadi pääsyä takapuolelle Sopii monimutkaisille geome- trioille Lämpötilan kontrollointi	Liitettävien pintojen paksuus rajoitettu Vaatii metallisia apuja saumaan
Värinä	Nopea Hyvä kontaktipinta	Tarvisee erikoispintakäsittelyjä Tarvisee paikannustyökaluja Rajoitettu koko Tarvisee molemmin puolisen pääsyn
Kohdistettu infrapuna	Korkea lujuus Nopea Hyvä kontaktipinta	Hankala toteuttaa

6.4 Liittämismenetelmät autojen korirakenteissa

Autojen korirakenteiden kannalta mielenkiintoisimpia ovat monimenetelmä- ja monimateriaaliliitokset. Kertamuovikomposiittien käytössä mielenkiintoisimmilta vaihtoehdoilta vaikuttaa liimauksen yhdistäminen mekaanisiin menetelmiin. Tällöin liima ja sen avulla saatava pitkä ja jatkuva liitos toimisi varsinaisena kuormaa kantavana sovelluksena ja mekaanisella liitoksella kappaleet paikoitettaisiin ja pidettäisiin yhdessä kunnes liima kuivuu.

Mekaaniset liitokset toisivat lisäksi liiman vaadittavan paineen jolloin ylimääräisiä ja väliaikaisia työkaluja ei tähän tarvittaisi. Samalla mekaaninen liitos toisi lisävarmuutta ja rajoittaisi kuorivien voimien vaikutusta liimasaumassa. Luultavasti varsinkin kolaritilanteessa mekaaniset liittimet auttaisivat kuorivia voimia vastaan. Esimerkiksi mekaanisessa liitoksessa voitaisiin käyttää napsautusliitosta ja vetokaraniittiä, jolloin napsautusliitoksen sisäkkäin menevät pinnat tekisivät liitoksesta moneen suuntaan tukevan ja nopeasti kasattavan. Vetokaraniitti lukittaisi napsautusliitosta paremmin liitoksen. Vetokaraniittien vähäinen tarve myös mahdollistaisi niiden käytön rakenteessa, jolloin niistä koituvat kustannukset ja ylimääräinen työ ei olisi liikaa ainakaan pienemmissä sarjakoi'issa. Suuremmissa sarjakoi'issa tarvitaan todennäköisesti nopeampaa menetelmää.

Liitoksessa lisäksi käytettävä liima sitoisi pinnat lopullisesti yhteen ja siirtäisi hyvin kuormituksia. Hieman saman tyylistä ratkaisua käytetään esimerkiksi Aston Martin Rapidin rakenteessa (76), mutta siinä materiaalit ovat metallia ja napsautusliitoksia ei tietävästi käytetä. Toinen mielenkiintoinen tapa vetokaraniittien sijaan voisi olla RivTac tai SPR-niittaus esimerkiksi, jos liitetään komposiittiprofiili metalliseen kulmaliitokseen.

6.5 Komposiittien työstäminen

Monet muotissa valmistettavat komposiittikappaleet pyritään tekemään nettokokoon eli mahdollisimman lähelle lopullista tuotetta. Aina ei jälkityöstöä tarvita lainkaan, mutta siltäkään ei voida aina välttyä. Komposiittien työstämismenetelmät vastaavat käytännössä metallien työstötapoja. Yleisimmät työstömenetelmät ovat leikkaus ja poraus. Käytettävät työkalut voivat olla joissain tapauksissa samoja kuin muilla materiaaleilla, mutta komposiiteille on suunniteltu myös omia työkaluja. Työkalun valintaan vaikuttaa myös käytetyt kuidut, sillä esimerkiksi hauraat lasi- ja hiilikuidut käyttäyvät eri tavoin kuin sitkeä aramidikuitu. Aramidikuiduilla hyvään työpölyn jälkeen vaaditaan kuitujen leikkaantumista, joka vaatii työkaluilta normaalia enemmän. (13 s. 214) (32)

Kesto- ja kertamuoveja työstetään samoilla työkaluilla, sillä eniten työstöä vastustava komponentti on lujittava kuitu. Kuitenkin kestopuovut kuluttavat työkaluja hieman nopeammin. Suurin ero kesto- ja kertamuovien välillä on syntyvän jätteen muoto. Kestomuoveilla syntyy isompaa kierremäistä jätettä ja kertamuoveilla pölymäistä pientä partikkelia. Pölymäisen partikkelin vaikutus ympäristöön tulee huomioida ja esimerkiksi hiilikuidusta syntyvä pöly on sähköjohtavaa, jolloin sähkölaitteet tulee suojata. Sekä kesto- ja kertamuoveilla voi leikattavan tai porattavan kappaleen taustapuolella tapahtua delaminaatiota jollei siihen kiinnitetä huomiota. Delaminaatiota tapahtuu varsinkin tylsillä työkaluilla. (32)

Leikkauksessa voidaan käyttää sahoja, ultraääni-, laser- ja vesisuihkuleikkausta. Ohueen laminaattiin voidaan käyttää puunleikkausterällistä vannesahaa ja kuiduille tekstiiliterää, mutta yleensä komposiitteja leikataan kovametalli-, keraami- tai timanttipinnoitettuja työkaluja. Parhailla timanttipinnoitetuilla työkaluilla on pisin käyttöikä, mutta ne ovat myös kalliita. Kovametalliset työkalut ovat pahimmallaan kertakäyttöisiä. (13 ss. 214-215) (32)

Ultraäänileikkauksessa käytetään korkealla taajuudella värähtelevää leikkuuterää, jolloin terän ja materiaalin välinen kitka pienenee. Terägeometriat, pinnoitteet ja tehot vaihtelevat leikattavan kappaleen mukaan. Alustana leikkauksessa tarvitaan värähtelyitä vaimentava leikkuupyötä, joka voi olla esimerkiksi lujitemuovia tai polyuretaania. Suurin laminaatin paksuus, jota voidaan leikata on noin 20 mm. (13 s. 216)

Laserleikkauksessa leikkaus tapahtuu lasersäteiden hyörystäessä materiaalia, jolloin syntyy myös erilaisia kaasuja ja tarvitaan ilmastointia. Laserleikkaus soveltuu parhaiten ohuille laminaateille ja prepregeille. Orgaaninen materiaali absorboi hyvin käytettyjä lasereita jolloin se soveltuu esimerkiksi aramidikuiduille hyvin. Lasikuidun ja

hiilikuidun sulattamiseen tarvitaan huomattavasti enemmän tehoa ja hiilikuitu johtaa lämpöä melko hyvin, jolloin laserin käytössä tulee vastaan ongelmia. Lasi- ja hiilikuiduista johtuva lämpö lämmittää matriisiainetta ja tuhoaa sitä. Hiilikuituprepregeillä johtuva lämpö voi myös kovettaa prepregien matriisia. (13 ss. 216-217)

Komposiittien vesisuihkuleikkauksessa käytetään korkeapaineista vesisuihkua, jossa on mukana abrasiivisia aineita. Vesileikkaus voidaan aloittaa mistä tahansa kohtaa kappaletta eikä menetelmää käytettäessä synny lämpöä tai vaarallisia höyryjä. Käyttäjältä vaaditaan kuitenkin kuulosuojausta ja vesisuihku voi häiriön sattuessa delaminoida komposiittia. Lisäksi käytettävä vesi voi imeytyä rakenteeseen ja siten edesauttaa delaminoitumista. Vesileikkauksessa on myös taipumusta vesisuihkun leventymiselle pak-suissa komposiiteissa, jolloin reuna saattaa jäädä huonoksi. (13 ss. 216-218) (32)

Komposiitteja voidaan työstää ja leikata myös koneistamalla. Käytetyt työkalut ovat samoilla materiaaleilla pinnoitettuja kuin sahauksessa. Koneistuslaitteistossa käytetään usein imua tai jäähdytystä. Jäähdytyksen suunnitteluun kannattaa kiinnittää huomiota, sillä syntyvä pöly voi tukkia esimerkiksi suodattimia ja hiilikuitupöly voi aiheuttaa korroosio-ongelmia. Imua käytetään pölyn poistamiseen ilmasta, mutta siinä tulee huomioida työkalun ja komposiitin kuumeneminen, joka voi vahingoittaa matriisia. (32)

Seuraavaan taulukkoon (Taulukko 19) on koottuna tyypillisiä nopeuksia eri leikkausmenetelmille. Taulukosta on tärkeää huomata, että laser- ja vesileikkaus ovat huomattavasti sahausta nopeampia menetelmiä. Voidaan myös havaita, että suositellut nopeudet vaihtelevat lähteen mukaan melko huomattavasti. Tällöin soveltuvat nopeudet tulisi varmentaa työkaluvalmistajien tietojen sekä testien avulla.

Taulukko 19. Leikkausnopeuksia (13 ss. 214-218) (32)

Menetelmä	Laminaatin pak-suus (mm)	Leikkausnopeus (mm/min)	Huomioitavaa
Sahaus	< 2,5	78	Timanttipinnoitettu terä
	5,1	48	
	> 8	< 24	
Laserleikkaus	< 10	5000-6000	Orgaaniset lujitteet
	3	2000	Hiilikuitu
	-	200	Reiät ja muodot
Vesileikkaus	3	2000	1. Lähde
	> 6	800	1. Lähde
	< 12,7	381	2. Lähde
	25,4	254	2. Lähde
	25,4-50,8	127,152	2. Lähde

Reikien poraaminen komposiittiin on vaativampaa kuin metalleihin. Hyvät reiät ovat välttämättömiä, jos halutaan hyvä mekaaninen liitos erilaisilla pulteilla tai niiteillä. Reikää poratessa tulee huomioida käytetyt materiaalit, kuitusuunnat ja raot porattavien kappaleiden välillä.

Eri tyyppiset kuidut tarvitsevat erilaisia työkaluja. Aramidikuiduilla vaaditaan jälleen erikoisgeometrioita verrattuna lasi- ja hiilikuituun. Aramidikuitujen terät ovat muotoiltu siten, että ne jännittävät kuituja ja leikkaavat ne, kun taas hiili- ja lasikuiduilla käytetään positiivisella kulmalla olevia teriä, jotka vähentävät painetta ja lämpeämistä (13 s. 219). Komposiiteilla, joissa on runsaasti yhdensuuntaisia kuituja pintakerroksissa ovat herkempiä pinnan säilytykselle ja delaminaatiolle. Tällöin tarvitaan usein taustapuolelle tukilevy. Säilytyminen tapahtuu lisäksi helpommin hiilikuitulujitteisessa rakenteessa, kuin lasikuituisessa. Delaminaatiota ja säilytymistä voi tapahtua myös syöttöpuolella, jolloin ongelmana usein liian suuri syöttö- tai pyörimisnopeus. (32)

Ongelmia porauksessa voidaan vähentää valitsemalla työkalu- ja prosessiparametrit oikein. Lisäksi voidaan käyttää erikoistyökaluja tai esimerkiksi ajoittain takaisin palaavaa porausta, jolloin lämpeneminen vähenee eikä porausjäte aiheuta ongelmia. (32)

Jos porattavia kappaleita on useampia päällekkäin, voi niiden välille jäädä rako. Tämä rako voi tyhjänä tilana edesauttaa delaminaatiota ja säilytymistä sekä sinne voi päätyä porausjätettä. Rako voidaan kuitenkin tiivistää kiinteillä tai nestemäisillä tiivisteillä. Nestemäiset tiivisteet ovat usein hyödyllisempiä, sillä ne täyttävät paremmin erilaiset raot juoksevuuden takia. (32)

Fiberline Composites neuvoo ohjeissaan (77), että pultruusiotuotteita voidaan myös sorvata sekä rei'ittää meistämmällä. Sorvaukselle suositellaan suurimmaksi sorvaussyvyudeksi noin 10 mm. Meistäminen voidaan tehdä tavallisilla työkaluilla aina 4 mm paksuuteen asti. Sitä paksummille kappaleille suositellaan erikoistyökaluja, joka lävistää kappaleen asteittain. Soveltuvia matriisimateriaaleja ja kuituja ei ole kerrottu, mutta sivuston pohjalta voidaan perusohjeiden arvella olevan lasikuitulujitetulle polyesterille.

Usein komposiitteja tarvitsee myös työstää hiomalla. Hiomista tarvitaan karhentamaan pintaa jatkolaminointia tai liimausta varten. Sitä voidaan käyttää myös ylimääräisen materiaalin poistamiseen tai pintakäsittelynä maalausta varten. (13 s. 218)

Korirakenteissa erilaiset työstömenetelmät ovat todennäköisesti pakollisia. Käytettäessä lähes pelkästään RTM-menetelmiä voidaan mahdollisesti päästä lähelle tilanetta, jossa jälkityöstön määrä on melko pieni. Jos kuitenkin päätetään hyödyntää pultruusiota korirakenteissa, on jälkityöstö käytännössä pakollista. Suorat leikkauspäät, ja kiinnityskohtien, -rakenteiden ja inserttien puute vaatii jonkin asteista työstämistä. Luultavasti profiilin päähän joudutaan tekemään kiinnityselementeille tilaa tai muodot, jotka soveltuvat seuraavaan kappaleeseen kiinnittämiseen. Vähintään reikiä tarvitaan mekaanisille liittimille. Pelkän liiman käyttäminen ilman mitään muuta menetelmää tai edes sopivien muotojen työstämistä on myöskin aika epätodellinen ajatus. Työstön määrää voidaan ehkä vähentää käyttämällä napsautusliittimille soveltuvia piirteitä, kuten liukukiskoja, mutta silloinkin itse napsautusliitos täytyy jotenkin saada aikaan. Profiilien työstö voi vähentyä tosin huomattavasti, jos niihin voidaan liittää jollain eri menetelmällä tai yhdistelmämenetelmällä päähän liitoselementti.

6.6 Maalaaminen ja pinnoittaminen

Komposiiteissa käytetään usein erilaisia pinnoitteita ominaisuuksien muokkaamiseksi. Erilaisia pinnoitteita komposiiteilla ovat geelipinnoitteet (Gelcoat), suojapinnoitteet (Topcoat), maalit, lakat, pintahuovat, kestumuovit, metalloinnit ja painatukset. Gelcoatit ovat pintakerroksina toimivia hartseja, jotka levitetään muottipinnalle. Niillä tuodaan tuotteeseen ulkonäköä, säänkestävyyttä, sekä veden- ja kemiallista kestävyyttä. Käytetty hartsityyppi riippuu halutuista ominaisuuksista ja pitää sisällään usein erilaisia lisäaineita, kuten pigmenttiä tai palonestoaineita. Topcoatit ovat laminaatin sisäpuolisille pinnoille tarkoitettuja hartseja, joilla pyritään valmistamaan likaa ja vettä hylkivä pinta. Ulkonäöltään topcoatit ovat gelcoatteja huonompia. (13 ss. 100-101)

Topcoatien ja gelcoatien sijaan voidaan käyttää myös maalia. Maalit voivat olla yksi- tai kaksikomponenttisiä ja ne sisältävät erilaisia lisäaineita ominaisuuksien muuttamiseksi. Maalien viskositeettia muokataan usein erilaisilla liuotteilla, ja maali kovettuu liuotteen haihtuessa tai kovetusreaktion avulla. Komposiitti tarvitsee usein erilaisia ja useita maalipintoja tyydyttävän lopputuloksen saavuttamiseksi. Yleisimmät maalityypit ovat vinyyli-, epoksi-, polyuretaani- sekä akryylimaalit. Lakat ovat maalien tapaisia ominaisuuksiltaan ja käytettävyydeltään, mutta ne ovat läpikuultavia tai -näkyviä. Pohjustus- ja viimeistelymaalaus voi tapahtua myös muotissa ja sitä käytetään esimerkiksi SMC-, BMC- ja RIM-menetelmissä. Maali on tällöin nestemäisenä tai pulverina. (13 ss. 101-102)

Maalaus ja lakkaus asettaa vaatimuksia pinnoille. Pinnassa ei voi olla epätasaisuuksia tai pintavaurioita. Pinnan tulee myös olla puhdas liasta, rasvasta tai irroituksesta. Pinnan korjaamiseen voidaan käyttää tasoitetta ja hiontaa. Lakkojen kanssa pinnan tasoitus, hionta ja puhdistus ovat todella tärkeitä, sillä muutoin ei saada syväkiiltävää ja hyvää pintaa. Lakkoja tarvitsee usein levittää myös useampi kerros parhaan lopputuloksen saamiseksi (13 ss. 102-103)

Metalloinnissa kappaleen pintaan tehdään tyhjiössä tai galvaanisesti metallinen pinta. Menetelmistä galvaaninen pinnoitus soveltuu lähinnä kestumuoveille. Tyhjiömetalloinnilla saadaan melko ohut pinnoite, mutta galvaanisesti voidaan valmistaa kulutusta ja ympäristöä kestävä paksu pinta. (13 s. 104)

Kuumapainatuksessa tuotteeseen painetaan lämmön ja paineen avulla kalvopinta, joka voi olla laadultaan ja ulkonäöllisesti erittäin hyvä. Kestumuovipinnoituksen tarkoituksena on puolestaan parantaa tuotteen kemiallista kestävyyttä. (13 ss. 104-105)

Pintahuovat ovat kertamuovikomposiittien pintaominaisuuksien muuttamiseen tarkoitettuja tuotteita. Niillä muokataan yleensä ulkonäköä, kemiallista-, tulen-, kulutuksen-, tai lämmönkestävyyttä, mutta ei mekaanisia ominaisuuksia. Niillä voidaan muokata myös sähköisiä ominaisuuksia. Pintahuovissa voi olla jatkuvaa tai katkokuitua ja ne voivat olla käytännössä mitä tahansa kuitua. Kuidut sidotaan yhteen sideaineilla. Sideaineet voivat esimerkiksi olla lisäksi hartsiin tai liimaan liukenevia. Pintahuovat ovat usein mittatilaustavaraa laadullisesti ja varsinaisia standardituotteita on rajoitetusti. Nii-

den valmistaminen on kuitenkin taloudellista myös pienemmässä mittakaavassa. (13 s. 105)

Korirakenteiden suhteen pinnoitteiden käyttö riippuu pitkälti halutuista ominaisuuksista ja valmistusmenetelmistä. Pultrusiotuotteiden pinnanlaatu ei välttämättä ole riittävän hyvä, jolloin voidaan tarvita maalausta tai valmistusvaiheessa pintahuopia. Muotissa tehtävät maali- tai gelcoat pinnoitukset eivät ole soveltuvia pultrusiotuotteille, mutta esimerkiksi RTM-menetelmän tuotteissa ne voisivat olla mahdollisia. Muotissa maalaukset tosin luultavasti kannattaisi rajoittaa pohjamaalaukseen, jos siihenkään sillä erilleen valmistetuissa ja eri valmistajilta tulevissa osissa voi olla hankalaa säilyttää yhtenäinen värisävy. Toisaalta esimerkiksi pultrusioilla valmistetut korin osat ovat luultavasti muutenkin käyttäjältä piilotettuja, jolloin niiden pinnoitus ei ole välttämättä tarpeen, jollei korin kehitystyön aikana paljastu erikoisvaatimuksia tai käytetty matriisi vaadi suojausta kemiallisia olosuhteita vastaan.

7 MUITA KOMPOSIITTIIEN KÄYTÖSSÄ HUOMIOITAVIA ASIOITA

Tässä osiossa käsitellään muita komposiittien käyttöön ja suunnitteluun liittyviä asioita. Osioon on pyritty saamaan perustietämystä niin vaurioista, turvallisuudesta kuin kierrätyksestäkin. Tieto pohjaa pitkälti lentokoneteollisuuden kirjallisuuteen, mutta sitä on pyritty muokkaamaan autoteollisuuden tarpeisiin soveltuvaksi.

7.1 Suunnittelu

Komposiittituotteiden suunnittelu on hankalampaa kuin metalleilla johtuen niiden anisotropiasta. Tuotteita suunniteltaessa on lähes rajaton määrä erilaisia rakenne- ja materiaalivariaatioita, joilla voidaan täyttää eri tarkoituksiin vaadittavat ominaisuudet. Kokonaisen kappaleen käytöstä on myös hankala mallintaa suoraan vaan tarvitaan usein paljon esitietoa valituista rakenteista ja materiaaleista. Valmistajilta saatavia tietojakaan ei voida yleensä hyödyntää suoraan suunnitteluarvoina, sillä ne pohjaavat tietyillä välineillä tehtyihin testeihin, joista annetaan usein ainoastaan yksi lukuarvo. Tällöin ei saada kokonaiskuvaa materiaaleista ja niiden käyttäytymisestä. Valmistajien testikappaleet ovat myös valmistettu heidän prosesseillaan ja parametreillaan, jotka eivät vastaa täysin osan valmistajan olosuhteita. (72).

Yksi mahdollinen tapa suunnitella komposiittiosia on lentokoneteollisuudesta peräisin oleva rakennuspalikka-periaate (Building Block Approach), jossa suunnittelun perustana on aina edellisessä tasossa tehdyt testit. Näin suunnittelutyö nojaa aina testattuun ja validiin tietoon. Käytännössä kuitenkin testaaminen ja suunnittelu ei tapahdu näin kaavamaisesti vaan myöhempien eri syvyyksiset suunnittelu- ja testausosuudet toteutetaan jossain määrin päällekkäin. (72)

Perustana ovat materiaalitestit, joilla varmennetaan matriisin ja kuitujen käytös sekä näiden toimiminen yhdessä. Testeillä pyritään varmistamaan materiaaliominaisuudet sekä erilaisten ympäristön tekijöiden, kuten kemikaalien tai lämmön, vaikutus niihin. Yksinkertaisimmat komposiittitestit tehdään koekappaleille yhdensuuntaisissa kuormituksissa. Näillä testeillä saadaan komposiitin peruskäyttäytyminen selville ja voidaan ajatella sen siten käyttäytyvän samoin myös suuremmassa kokonaisuudessa. Myöhemmissä vaiheissa testataan aina suurempia kokonaisuuksia ja useampia eri rasiustapoja ja kuormitussuuntia. Lopulta testataan kokonaisuuksia ja liitoksia. Lisäksi testataan vaurioitettuja kappaleita ja selvitetään alusta lähtien erilaisten vaurioiden vaikutuksia. Testaaminen ja suunnittelu ovat tällä tavoin aikaa vieviä ja testien suuresta

määrästä johtuen menetelmä on melko kallis. Tulokset ovat kuitenkin tällä tavoin melko luotettavia ja rakennetta pystytään optimoimaan haluttuun suuntaan. (72)

Edellisen kaltainen suunnittelu tosin soveltuu parhaiten, joissa osien suunnittelu ja materiaalivalinnat ovat autovalmistajan käsissä alusta alkaen. Valmet Automotiven kaltaisen pienemmän toimijan tapauksessa hyödynnetään todennäköisimmin valmiiden komposiittiosien valmistajia, joille annetaan vaatimukset tarvittavasta osasta. Tällöin menetelmä voi olla hankala ja muutenkin liian raskas toteuttaa. Olisikin parempi ratkaisu hyödyntää osavalmistajien ammatti- ja tietotaitoa osien suunnitelmien viimeistelyssä. Kehitystyö voi silti olla jossain määrin rakennuspalikkamainen, mutta alkupään materiaalitestejä esimerkiksi voitaisiin kaventaa ja kohdistaa niitä testiliuskoihin. Testiliuskoja voitaisiin valmistaa esimerkiksi valmistajien mallituotteista, joilloin saadaan joitain omaisuuksia selville materiaaleista. Pultruusiotuotteiden tapauksessa esimerkiksi standardien mukaiset vetokoekappaleet ovat helppoja valmistaa.

Muita eroja metallien suunnitteluun saadaan valmistusmenetelmien kirjolla. Komposiiteilla on huomattavasti enemmän soveltuvia valmistusmenetelmiä, mutta jokaisella menetelmällä on omat rajoitteensa. Komposiittiosien suunnittelussa tulee myös huomioida osien integraatio verrattuna metallisiin. Levymetallituotteisiin verrattuna komposiittiosassa voi olla huomattavasti monimutkaisempia muotoja. Tällöin myös monen levyosan sijaan voidaan valmistaa yksi komposiittiosa. Tällä on vaikutuksia kokoonpanossa ja muottikustannuksissa. Tosin komposiittiosiakaan ei kannata suunnitella liian monimutkaiseksi, sillä monimutkaisuus kasvattaa muottikustannuksia ja saattaa hankaloittaa esimerkiksi korjaamista.

Lujuuden ja jäykkyyden kannalta saattaa suunnittelijan kannalta olla helpoin lähestyä komposiitteja kvasi-isotrooppisella rakenteella. Tällaisessa rakenteessa kuitusuunnat ovat valittu siten, että kokonaisuutena komposiitti on melko isotrooppinen. Tällainen rakenne on esimerkiksi komposiitti, jonka lamellit ovat kuitusuunniltaan 0° , 90° ja $\pm 45^\circ$. Tällaisessa rakenteessa tosin menetetään komposiiteilla mahdollista optimointia kuormitussuuntien mukaan.

Suunnittelussa tulisi myös huomioida rakenteeseen tulevat vauriot ja käytön aiheuttamat kulumat. Erilaiset vauriot ja viat laskevat komposiitin lujuutta ja jäykkyyttä ja komposiitti ei käytännössä koskaan ole aivan ideaali. Tällöin voidaan käyttää esimerkiksi riittäviä varmuuskertoimia. Vaurioiden kannalta esimerkiksi iskujen vaikutuksia voidaan vähentää käyttämällä useamman eri kuitulaadun hybridirakenteita. Hiilikuidun heikompa iskunkestävyyttä parannetaan aramidi- tai lasikuiduilla, joiden suurempi murtovenymä parantaa iskulujuutta. Tällöin vaurioitumattomalla rakenteella on puhdasta hiilikuitukomposiittia huonommat lujuus ja jäykkyysarvot, mutta iskuvaurion saaneella komposiitilla arvot ovat puhdasta hiilikuitukomposiittia paremmat. Iskunkestävyyttä voidaan parantaa myös kiinnittämällä huomiota kuitukerroksien pinoamisjärjestykseen. Pitämällä suurimman jäykkyyden ja lujuuden antavat yhdensuuntaiskuidut mahdollisimman keskellä voidaan pitää ne mahdollisimman ehjinä iskun sattuessa, jolloin myös jäännöslujuus ja -jäykkyys on parempi. (72)

Komposiittejä voidaan suunnitella myös esimerkiksi paino-optimoinnin tai korjattavuuden kautta. Paino- ja osaoptimoinnilla saadaan kevyitä rakenteita, joiden osamäärä on vähäinen. Tällainen suunnittelu tosin hankaloittaa usein korjaamista tai tekee siitä jopa mahdotonta. Korjattavuuden optimoinnissa nousevat usein puolestaan valmistus- ja kokoonpanokustannukset. (72)

7.2 Käyttöturvallisuus ja terveysasiat

Tässä osiossa on komposiittien käyttö- ja valmistusturvallisuuteen liittyviä asioita keskittyen lähinnä terveydellisiin seikkoihin. Kaikelle valmistukselle ja kokoamistyölle yhteisiä yleisiä käyttöturvallisuus seikkoja ei käydä juurikaan lävitse, sillä voidaan olettaa niistä saatavan tietoa myös muista lähteistä.

7.2.1 Valmistus ja työstö

Komposiittimateriaaleista puhuttaessa tulee huomioida niiden käyttöturvallisuus niin valmistuksessa kuin työstössäkin. Komposiittien kertamuoviset matriisiaineet valmistetaan hyödyntämällä eri kemikaalien reaktioita keskenään. Kovettuneet matriisiaineet eivät ole ihmisille vaarallisia, mutta niiden valmistuksessa käytetyt aineet ovat usein ärsyttäviä, myrkyllisiä, herkistäviä tai karsinogeenisiä. Näille kemikaaleille, kuten kovettimille ja hartseille, voi altistua yleensä kosketuksen tai hengityksen kautta. Kertamuoveista varsinkin epoksi voi aiheuttaa herkistymistä epoksiallergian muodossa. Kertamuovien valmistus voi niiden eksotermisen reaktion takia aiheuttaa myös erilaisia savuhaittoja tai syttymisvaaroja. (78 ss. 822-837). Kertamuovien kemikaaleja koskevat terveyshaitat tulee huomioida myös kokoonpanossa, sillä komposiiteilla yleisesti käytettävät liimat ovat usein myös toimintaperiaatteeltaan vastaavia polymeerisia aineita.

Komposiittien työstössä huomioida pölyn syntyminen. Pienet kuitu- ja matriisihiukkaset voivat päätyä ilmasta hengityksen kautta keuhkoihin. Keuhkoissa kuitupöly voi olla laadusta ja koosta riippuen karsinogeenistä tai tukkia keuhkorakkuloita. Lisäksi hiilikuitupöly aiheuttaa vaaran myös työympäristölle, sillä se johtaa sähköä. Pöly voi väärään paikkaan kulkeutuessaan haitata tai tuhota sähkölaitteita ja aiheuttaa siten vaaratilanteita. (78 ss. 822-837)(13 s. 420)

Edellä mainituista syistä tulee turvallisuusasiat huomioida valmistuksessa ja selvittää mahdolliset riskit. Kemikaaleista, niiden vaikutuksista ja niiltä suojautumisesta voi etsiä lisätietoa esimerkiksi niiden käyttöturvatiiedoista.

7.2.2 Kolaritilanteet

Kolaritilanteissa tulee huomioida komposiittien ja metallien toisistaan poikkeava käyttäytyminen. Metalleissa tapahtuu plastista muodonmuutosta, joka kuluttaa törmäysenergiaa. Komposiiteilla ei vastaavaa plastista muutosta tapahdu, vaan ne hajoavat hauraasti. Tosin varsinkin hiilikuituisilla komposiiteilla törmäyksestä johtuva jännitys siirtyy rakenteessa tasaisemmin korkeasta jäykkyydestä johtuen jolloin komposiitille kriittinen

kuorma ei ylitä. Tällöin rakenteessa ei välttämättä tapahdu pysyviä muodonmuutoksia ja rakenne säilyy ehjänä. Käytännössä kolareiden iskuenergia imeytyy rakenteeseen kuitujen tai matriisiaineen murtuessa, delaminaatioilla ja kuitujen irtautuessa matriisista. Tällöin rakenne hajoaa pieniksi paloiksi törmäyksen aikana. (79). Tulee kuitenkin huomata, että yleisesti komposiitit absorboivat törmäysenergiaa metallista rakennetta paremmin, vaikka mekanismi onkin erilainen.

7.3 Komposiittien vaurioituminen

Komposiittien viat, vauriot, vaurioiden eteminen ja niiden vaikutukset poikkeavat metallirakenteista, jolloin niiden ymmärtäminen on tärkeää niin suunnittelun kuin korjaamisenkin kannalta. Vikoja ja vaurioita voi syntyä rakenteeseen valmistuksessa, osien kuljetuksessa sekä tuotteiden käytön aikana. (72)

Valmistuksessa syntyviä vikoja ja vaurioita ovat esimerkiksi erilaiset poikkeamat rakenteessa, huokokset, mikrohalkeamat, delaminaatiot, riittämätön kovettuminen ja materiaaliviat. Näiden syntyyn vaikuttaa usein erilaiset vahingossa tapahtuneet iskut ja osumat, väärin tai huolimattomasti tehty työstö, likaisuus ja huolimaton käsittely. Iskuvaurioista tulee myös huomata, että ne voivat aiheuttaa delaminaatioiden lisäksi myös muita vaurioita, kuten esimerkiksi halkeamia matriisiin. Valmistuksen aikaisista viasta suuri osa voidaan karsia tehokkaalla ja hyvällä laadunvalvonnalla ja toiminnan kehittämisellä. (72).

Kuljetuksen aikaiset vaurioita ovat yleensä käsittelystä tai kuljetuksesta johtuvia naarmuja ja iskuosumia. Käytön aikaiset vauriot ovat yleensä sattumanvaraisia, joiden paikka, koko ja frekvenssi vaihtelevat ja joihin voidaan päästä käsiksi statistiikan avulla. Useimmiten vauriot johtuvat erilaisista pienistä iskuvaurioista, ympäristön vaikutuksista sekä käytössä kohdatuista kuormituksista. Esimerkiksi rakeet tai tien pinnasta lentävät pienet kappaleet voivat aiheuttaa iskuvaurioita. Tuli, lämpötilan muutokset, erilaiset kemikaalit ja saasteet, auringon valo sekä vesi voivat aiheuttaa kulumista ja vaurioitumista rakenteessa. Jatkuvia kuormia ovat rakenteen omasta massasta sekä matkustajista ja tavaroista koostuvat staattiset kuormat sekä näistä kohdistuvat voimat erilaisissa käyttötilanteissa, kuten kuoppaisilla teillä. (72)

Vaurioita voi syntyä myös auton kokoonpanovaiheessa erilaisista iskuista ja naarmuista, mutta myös esimerkiksi mekaanisten kiinnityselementtien ylikiristäminen voi tuhota komposiittien rakennetta. Hybridirakenteissa vaurioita voivat aiheuttaa esimerkiksi mahdollisesti hitsauksessa tarvittava lämpö, joka saattaa olla läheisille matriisiaineille liian suuri. Myös maalaus ja pintakäsittelyprosessit voivat olla haitallisia, jos prosessit ja materiaalit ovat valittu väärin.

Korjaustilanteissa voidaan myös aiheuttaa ylimääräisiä vaurioita rakenteisiin valmistuksen ja kokoonpanon tapaan. Väärin paikkoihin tai väärin tehdyt reiät voivat aiheuttaa lujuuden laskemista ja esimerkiksi delaminaatioita. Valmistuksen tapaan myös pintakäsittelyillä ja työstömenetelmillä, joilla poistetaan vaurioitunutta materiaalia, voidaan saada aikaan lisätuhhoa rakenteissa.

Erilaisia mahdollisia komposiittirakenteiden vaurioita ovat kuitu- ja matriisivauriot sekä erilaiset delaminaatiot ja liitosten irtoamiset. Kuituvauriot ovat usein iskuista johtuvia kuitujen katkeamisia. Katkenneet kuidut sijoittuvat yleensä iskukohdan välittömään ympäristöön, mutta vaurion sijainnista ja laajuudesta riippuen se voi olla erittäin kriittinen, sillä kuidut kantavat suurimman osan kappaleeseen kohdistuvista kuormista. (72)

Matriisivaurioita ovat esimerkiksi huokokset ja halkemat. Vauriot ovat usein kuitujen ja matriisin rajapinnassa tai kulkevat kuitusuunnassa. Matriisivauriot heikentävät usein materiaaliominaisuuksia, jotka riippuvat kuitu-matriisirajapinnasta tai hartsista. Vauriot voivat vaikuttaa esimerkiksi puristuslujuuteen tai kerrosten väliseen leikkauslujuuteen. Erilaiset pienet mikrohalkeamat eivät usein ole kriittisiä, mutta ne voivat altistaa komposiitin esimerkiksi delaminaatioille. (72)

Delaminaatioissa kuitukerrokset irtoavat toisistaan komposiitin rakenteessa. Näitä syntyy esimerkiksi komposiittiin osuneista iskuvaurioista. Delaminaatioiden tapaisia vaurioita ovat myös kerroslevyrakenteissa tapahtuvat ydinaineen irtoamiset pintalevyistä. Nämä irtoamiset voivat lisäksi altistaa pintalevyt delaminaatioille. (72)

Delaminaatioiden kriittisyys riippuu pitkälti osan kantavuudesta ja siihen kohdistuvista kuormista. Kriittisyyteen vaikuttaa myös delaminaatioiden määrä, koko, sijainti, syvyys. Reunojen lähellä, kuormitusalueella ja epäjatkuvuuskohdissa olevat delaminaatiot ovat hankalimpia. Kuormituksista vetokuormitus ei usein ole kriittinen delaminoituneessa osassa, mutta puristuskuormitus ja väsymiskuormitus voivat kasvattaa delaminaatioiden kokoa. Tasonsuuntainen leikkausjännitys ja puristusjännitys voivat nurjauttaa irronneita pintalevyjä tai laminaatteja ja muuttaa rakenteessa tapahtuvaa voimien siirtymistä. Tällaisella mekanismin voi olla pahimmassa tapauksessa erittäin katastrofaaliset seuraukset, sillä osat joutuvat tilanteeseen joihin niiden ominaisuuksia ei ole suunniteltu. (72)

Kerroslevyissä vauriot voivat tapahtua ydinaineessa, pintalevyissä tai niiden rajapinnassa. Ydinaine voi murskautua, lommahtaa tai painua kasaan esimerkiksi iskun takia. Tällöin pintalevyssä saattaa olla vain pieni jälki tai siihen voi syntyä lommo, joka palautuu osuman jälkeen lähes normaaliin asentoon. Tällaiset vauriot ovat esimerkiksi visuaalisesti hankalasti todettavia ja niiden havaitsemiseen tarvitaan tehokkaampia menetelmiä. Pintalevyissä, jotka ovat komposiiteista valmistettuja voi tapahtua samaan tapaan kuitu- ja matriisivaurioita kuin muissakin komposiiteissa. (72)

Komposiiteissa tapahtuva vaurioiden eteneminen on metalleja moninaisempaa. Väsymisvaurioiden etenemistä ja väsymisvaurioille ominaisia piirteitä metalleissa ja komposiiteissa on esitetty seuraavassa taulukossa (Taulukko 20). Taulukosta nähdään, että metallien ja komposiittien käytös eroaa toisistaan huomattavasti.

Taulukko 20. Metallien ja komposiittien väsyminen (38 pp. 422-423)

Väsymisvaurion mekaniikka		
	Metallit	Komposiitit
Kuormitus	Särön synty ja kasvu	Useamman mikrosärön synty ja kasvu
Särön synty	Jännityskeskittymät, huokokset, sulkeumat	Täyteaineen irtoaminen, huokokset, kuidun irtoaminen, kuitujen epäjatkuvuudet, jännityskeskittymät
Särön eteneminen	Yleensä yksittäinen kasvava	Useampi kasvava tai etenevä
Lopullinen hajoaminen	Siisti	Matriisin ja/tai kuitujen hajoaminen, laminaattien lommahtaminen
Huomioitavaa väsymisvaurioista		
Jännitysvenymä käyttäytyminen	Alhaisesta venymästä hajoamiseen	Korkeasta venymästä hajoamiseen
Ympäristön vaikutus	Melko vähäinen	Lämpötila ja kosteus vaikuttavat
Vauriosyyt	Väsymiskuormat, korroosio, jännityskorroosio	Iskuvauriot ja valmistusvirheet
Kriittinen kuormitustyyppi vaurioille	Veto	Puristus
Kriittinen vauriotyyppi	Säröt	Delaminaatiot
Vaurion havaittavuus	Yleensä visuaalisesti havaittavissa	Visuaalisesti usein mahdoton, NDT-menetelmillä
Ennustettavuus	Hyvä	Huono

Väsymiskestävyydeltään komposiitit ovat yleensä huomattavasti metalleja parempia ja usein matalat jännityskuormat eivät edesauta väsymisvaurioiden etenemistä kriittiseksi. Joissain tapauksissa on havaittu komposiittiosan vaativan 50-75 % maksimivetolujuudesta väsymisvaurioiden etenemiseen. (72).

Tosin myös pienemmällä väsymiskuormilla komposiiteissa voi tapahtua vaurioitumista. Suuret kuormat aiheuttavat yleensä kuitujen hajoamista ja sen kautta nopeampaa väsymistä. Matalat kuormat puolestaan aiheuttavat yleensä matriisin säröilyä, jota komposiitti kestää paremmin. Tällöin myös väsymiskestävyys on suurempi. Väsymiskestävyteen vaikuttaa lisäksi käytetyt matriisiaineet, kuidut sekä näiden rakenne. Esimerkiksi lyhyt katkokuitulujitettu komposiitti väsyä pienemmällä kuormituksella kuin yksittäissuunnatut komposiitit. (80 ss. 329-339)

Seuraavissa taulukoissa on koottuna erilaisia vaurioita ja niiden aiheuttamia vaikutuksia lujuus- ja jäykkyysominaisuuksiin (Taulukko 21). Taulukossa on esitettyä myös eri vaurioiden suuruutta ja syntyvien vaurioiden määrää valmistuksessa, iskuissa ja läpäisevissä iskuissa. Läpäisevät iskut ovat iskuja, jotka läpäisevät esimerkiksi ker-

roslevyrakenteen ohuen pintalevyn tai ovat muuten pistomaisia. Taulukosta nähdään, että eri virheet syntyvät usein eri tilanteissa ja vaikuttavat hyvinkin erilaisilla jäännöslujuuksiin ja -jäykkyyksiin.

Taulukko 21. Paikallisten vaurioiden synty ja vaikutus lujuuteen ja jäykkyyteen. (32)

Vauriotyyppi	Vaurioiden määrä tai suuruus			Vaurion vaikutus	
	Valmistusvirhe	Matalaenerginen isku	Läpäisevä isku	Jäännöslujuuteen	Jäännösjäykkyyteen
Ytimen vaurio	Vähäinen	Keskimääräinen	Suuri	Vähäinen	Pieni
Katkenneet kuidut	Muutamia	Vähän	Paljon	Suuri	Suuri
Matriisin halkeamat	Muutamia	Monia	Monia	Vähäinen	Pieni
Delaminaatiot	Vähäinen	Suuri	Keskimääräinen	Keskimääräinen	Suuri

7.4 Testaus

Komposiittien vaurioita voidaan tutkia ainetta rikkovilla ja ainetta rikkomattomilla menetelmillä. Ainetta rikkovat menetelmät soveltuvat suunnitteluvaiheeseen tai esimerkiksi lunastuskuntoisen ajoneuvon vaurioitumisen tutkimiseen. Ainetta rikkovia testejä ovat esimerkiksi erilaiset veto- ja puristuskokeet tai mikroskooppiset leikkausnäytteet sekä hartsin polttoon perustuvat termiset menetelmät. Tässä osuudessa keskitytään kuitenkin ainetta rikkomattomiin testauksiin, sillä ne ovat auton valmistuksen ja käyttöajan aikana tärkeämpiä.

Ainetta rikkomattomista testauksista käytetään yleisesti lyhennettä NDT, joka tulee englanninkielisistä sanoista non-destructive testing. Muita käytettyjä lyhenteitä ovat myös NDI (non-destructive inspection) ja NDE (non-destructive evaluation). Erilaisia käytettyjä NDT-menetelmiä ovat visuaalinen tarkastelu, ultraäänimenetelmät, lämpökuvaukset, akustiset menetelmät ja röntgenmenetelmät sekä muut menetelmät, kuten mekaaniset testit ja sähköisiin ominaisuuksiin liittyvät testaukset. (32)

Visuaalinen tarkastelu on komposiitin pintojen tarkastelua ilman erityisiä apuvälineitä, joilla nähdään komposiitin pintaa syvemmälle. Visuaalisesti voidaan nähdä erilaisia koloja, naarmuja, kohoumia ja muita vaurioita ja se kertoo usein nopeasti missä päin komposiittia voi olla vaurioitunutta rakennetta. Vaurion suuruutta ei yleensä nähdä, sillä pinnan alla olevat vauriot voivat olla huomattavasti suurempia kuin pinnassa näkyvät jäljet. (32) (72)

Ultraäänimenetelmät perustuvat äänen nopeuden muutoksiin ja heijastumisiin eri aineissa ja niiden rajapinnoissa. Käytettävissä menetelmissä voidaan ultraääni ohjata koko kappaleen läpi, jolloin tarvitaan molemmiin puoleen pääsy, tai heijastaa ultraääni yhdeltä puolelta. Menetelmillä voidaan selvittää huokoisuutta, matriisin halkeamia, rypyjä, delaminaatioita ja vieraiden aineiden sulkeumia. Läpi kulkevalla ultraäänellä ei saada selville vian syvyyttä, ja hankalammin toteutettavalla heijastavalla ultraäänellä saadaan käytännössä esiin ensimmäinen virhe. Ultraäänilaitteissa voidaan tarvita väliaineksi geelia tai vettä tai ne voivat toimia myös ilman erityistä väliainetta ilmassa.

Osassa ultraäänilaitteistoja hyödynnetään myös lasereita, joissa hyödynnetään interferometriaa. (72)(32)

Lämpökuvauksessa hyödynnetään aineiden erilaista lämmönjohtavuutta. Menetelmät voivat olla aktiivisia tai passiivisia eli tutkittavaa kappaletta voidaan johtaa lämpöä tai mitata sellaisenaan. Lämmönjohtumista ja lämpötilan tutkitaan muutoksia lämpömittareilla tai tarkastellaan kappaletta infrapunakameroilla. Menetelmien etuna on, että ne voidaan toteuttaa yhdeltä puolelta. Infrapun avulla voidaan saada selville esimerkiksi iskuvaurioita, delaminaatioita, vesisulkeumia, tiheyden muutoksia ja arvioida liimaliitosten laatua. (72)(32)

Akustiset menetelmät perustuvat komposiitin tuottamaan ääneen. Perinteisin testi on napautustesti, jossa komposiittiosan pintaa napautetaan metalliesineellä, kuten kolikolla. Rakenteellisesti hyvässä kohdassa kuuluu kilahdus, mutta esimerkiksi delaminoituneet kohdat eivät kilahda. Menetelmä vaatii harjoitusta ja sen avulla ei voida selvittää kovin paksujen kappaleiden vaurioita. Menetelmää varten on kehitetty myös laitteita, joilla poistetaan ihmisen vaikutusta. (72)(32)

Röntgenmenetelmissä hyödynnetään röntgensäteiden läpäisykykyä ja säteilyn absorboitumista materiaaliin. Röntgensäteet voidaan kuvata filmille tai suoraan tietokoneelle kennon avulla. Tällöin saadaan kuvaa kappaleen valmistus-, rakenteellisista ja kasauksessa aiheutuneista virheistä. Röntgensäteitä voidaan käyttää myös tomografisissa menetelmissä. Tomografialla saadaan kerroskuvaa rakenteesta ja sillä saadaan selville delaminoitumista, huokosia, hartsirikkaita ja -köyhiä alueita, liimasauman laatua, säröytymistä, kuitusuuntia, ulkopuolisten materiaalien sulkeumia ja selvityksiä tiheyden muutoksista. (72)(32)

Edellä mainittujen menetelmien lisäksi voidaan tehdä esimerkiksi mekaanisia testauksia, matalataajuuksisia värinä- ja oskilloivia testejä, optista holografiaa ja sähköisiä testejä. Mekaanisissa testeissa tutkitaan esimerkiksi komposiitin jäännösjäykkyyttä ainetta rikkomatta. Värinätestit ja oskilloivat testit hyödyntävät ultraääniä matalampia taajuuksia ja niillä voidaan tutkia esimerkiksi iskuvaurioiden vaikutuksia. Korkean, mutta ultraääniä alhaisemman värinän testeistä käytetään myös liitostestaus nimitystä. Värinätesteissä hyödynnetään myös mekaanista impedanssia jäykkyyden määrittämiseen. Sähköiset testit vaativat sähköä johtavan matriisin tai kuidut. Esimerkiksi hiilikuitukomposiittien sähkönjohtavuutta voidaan hyödyntää testeissä. Sähköisillä testeillä voidaan selvittää esimerkiksi matriisin halkeilua ja kuitujen katkeamista, mutta se on herkkä epäoleellisille asioille, kuten kiinnitysrei'ille tai jäykisterivoille. (72)(32). Seuraavassa taulukossa on esitetty erilaiset vauriotyypit, joita eri NDT-tekniikoilla voidaan havaita.

Taulukko 22. NDT-menetelmillä havaittavat viat (32)

Vikatyyppi	Havainnointimenetelmä												
	Visuaalinen	Väriaineen käyttö	Napautustesti	Liitostesti	Kaiku UÄ	Läpi UÄ	Röntgen	Dielektrinen	Thermografia	Interferometria	Mikroaallot	NR	MI
Laminaattiviati													
Delaminaatio	1,2	1	x	x	x	x	3		x	x			x
Makrohalkemat	1,2	2	x	x			3		x	x			
Kuidun katkeaminen							x		2,3	2,3			
Rajapinnan halkeamat									2,3	x			
Mikrohalkeamat		1	2	2					x	x			
Huokokset	1		2	2	x	x	x		2	x			
Sulkeumat	1				2	2	x		x	x			x
Lämpövauriot	1		2	2				2		2			
Kosteus							2	x		2	x	x	
Onkalot					x	x	x		x	x			
Pinnan ulkonemat	x								x	x			
Rypyt	x								x	x			
Huono kovettuminen								x	2	2		x	
Selitykset: 1 = Pinnassa näkyvä, 2 = Epäluotettava, 3 = Riippuen vian suunnasta, X = sopii, UÄ = ultraääni, NR = neutroniradiografia, MI = mekaaninen impedanssi													

Taulukon pohjalta voidaan huomata, että käytännössä ei ole menetelmää joka soveltuisi täydellisesti kaikkeen. Osan geometria ja molemminpuolisen pääsyn estyminen vaikuttavat myös oleellisesti menetelmävälintaan. Voidaankin ajatella, että useamman menetelmän yhdistäminen on paras ratkaisu luotettavaan testaukseen.

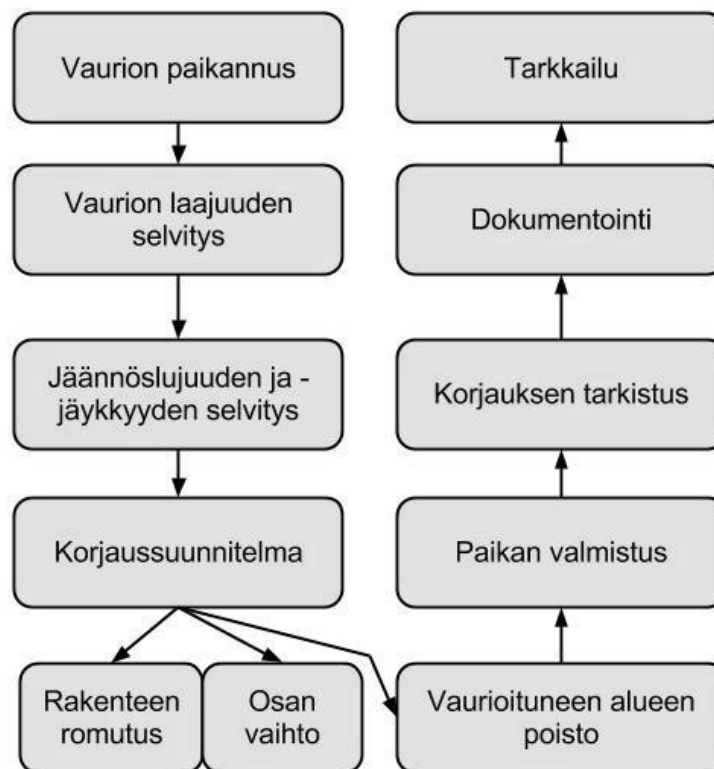
7.5 Korjattavuus

Korjattavuus on osa-alue, joka pitää sisällään korjaamisen, korjausprosessien ja korjausmahdollisuuksien suunnittelun. Kuten aiemmassa kappaleessa todettiin, korjattavuus saattaa monimutkaistaa asennusta ja valmistusta ja siten lisätä kustannuksia. Myös materiaalia voi kulua enemmän verrattuna esimerkiksi paino-optimoituun rakenteeseen. Usein korjaaminen on kuitenkin halvempi ratkaisu kuin koko osan vaihtaminen uuteen. Esimerkiksi hiilikuidut ovat suhteellisen kalliita ja tällöin uuden osan kustannukset voivat olla suuret. Varsinkin auton rungossa voi olla käytössä liitosmenetelmiä, joita on

hankala tai mahdoton purkaa. Tällöin osan vaurioituminen voi tarkoittaa koko korin uusimista.

Korjattavuuden suunnittelussa voidaan siis jo alussa päättää suurelta osin onko osa korjattavissa vai ei. Osan muoto, rakenne ja siinä käytetyt materiaalit määrittävät pitkälti minkälaisia korjauksia voidaan tehdä. Hyvää osan tai kokonaisuuden korjattavuutta halutessa tulisi jo suunnitteluvaiheessa suunnitella ja päättää erilaisia korjausmahdollisuuksia ja tapoja eri asteisille vaurioille. Vaurioiden kriittisyydestä ja korjausmenetelmien tehokkuudesta voidaan saada tietoa esimerkiksi rakennuspalamaisella suunnittelulla siinä tehdyillä testauksilla. Etukäteen suunnitellussa korjattavuudessa voidaan myös määrittää tiettyjä materiaaleja, joilla voidaan korjata mikä tahansa osa rakenteesta vaikka käytetyt materiaalit poikkeaisivat alkuperäisestä. Tällöin saadaan joustavuutta lisättyä korjaustoimenpiteisiin. (32).

Lähtökohtaisesti korjaus voidaan tehdä vaihtamalla osa, laminoimalla vaurioituneen alueen tilalle uutta materiaalia, liimaamalla paikka tai kiinnittämällä se mekaanisesti. Kestomuovikomposiiteilla myös hitsaus voisi olla toimiva korjausmenetelmä. Periaatteessa korjausmenetelmissä hyödynnetään siis täysin samoja menetelmiä kuin liittämässä. Lähtökohtana vain on käytössä ollut vaurioitunut rakenne. Korjausprosessi (32) voidaan tehdä esimerkiksi alla olevan kaavion mukaan (Kuva 19).



Kuva 19. Korjausprosessi

Ensimmäiseksi tulee vaurion tai vaurioiden sijainti paikantaa alustavasti. Tämä voidaan suorittaa esimerkiksi visuaalisesti tai naputustestillä. Tämän jälkeen vaurioiden laajuus tulee selvittää. Tähän voidaan käyttää hyödyksi erilaisia NDT-menetelmiä, kuten ultra-

äänimenetelmiä. Tämä vaihe on erittäin tärkeä, sillä rakenteeseen jäänyt vaurio saattaa edetä huomaamatta ja väärin selvityksen pohjalta tehty korjaus voi jopa pahentaa tilannetta. (32)

Vaurioiden laajuuden avulla voidaan selvittää kappaleen jäännöslujuutta ja -jäykkyyttä. Näiden avulla saadaan tietoa tarvittavasta korjausmenetelmästä ja esimerkiksi paikalta vaadittavasta suorituskyvystä. Tieto mahdollisesta jäännöslujuudesta ja -jäykkyydestä voi pohjautua esimerkiksi rakennuspalikkavaiheessa kerättyihin tietoihin vaurioiden vaikutuksesta rakenteeseen. (32). Tämän vaiheen todellinen suuruus korjausprosessissa ei välttämättä ole kovin suuri, jos esimerkiksi käytetään korjaussuunnitelmassa jotain ennaltamäärättyjä korjausohjeita, jotka pohjautuvat vaurion paikkaan ja suuruuteen ja näistä määrättyihin korjausmenetelmiin.

Korjaussuunnitelmassa päätetään rakenteen korjauksen kannalta tehtävät toimenpiteet. Vaurioitunut alue voidaan päättää poistaa ja korjata tai osa voidaan joissain tapauksissa vaihtaa kokonaan tai pahimmassa tapauksessa suurempi osa tai koko rakenne joudutaan romuttamaan (32). Korjaussuunnitelmaan vaikuttaa vaurion suuruus ja sijainti sekä paikan korjattavuus. Muita vaikuttavia tekijöitä voi olla esimerkiksi se onko osa kantavaa rakennetta tai onko sillä pinnanlaadullisia tai ulkonäkövaatimuksia. Korjaussuunnitelma voi pohjautua myös esimerkiksi suunnittelun aikana valmiiksi päätettyihin korjausmalleihin erilaisille vaurioille.

Osan vaihto voi johtua esimerkiksi liian suurista vaurioista ja tai osasta, jota ei voi rakenteen vuoksi korjata. Muita syitä osan vaihtoon voisi olla esimerkiksi kiinnikkeiden sijaitseminen vaurioituneella alueella. Tällöin korjaus voi olla hankalaa tai mahdotonta suorittaa siten, että osaan tehdä siihen kuuluvat liitokset. Koko rakenteen romutus voi esimerkiksi johtua liitoksista, joiden purkamisen mahdottomuuden vuoksi osaa ei voida vaihtaa. Auton korien osalta voi pahemmassa kolaritilanteessa realisoitua helposti romuttaminen, sillä käytettävät liitosmenetelmät ovat todennäköisesti hankalia purkaa ja esimerkiksi erilaiset kulmapalat voivat olla rakenteellisesti monimutkaisia ja hankalia korjattavia. Kolaritilanteessa voi olla myös tarpeen vaurioista riippuen tarkistaa törmäyksen aiheuttamat vauriot muualle kuin iskualueelle. Romutettavasta korista voidaan todennäköisesti kuitenkin ottaa talteen korjausmateriaaliksi kelpaavia osia ja paloja, mutta ne tulisi tarkistaa etukäteen NDT-menetelmillä rakenteen ehjyyden varmistamiseksi.

Tilanteen salliessa paikkaaminen tulee vaurioitunut rakenne poistaa, jotta sen tilalle voidaan asentaa sopiva paikka. Tässä kohdassa on tärkeää, että alkuvaiheen vaurion paikannus ja laajuuden selvitys on onnistunut. Vaurio tulee myös poistaa oikeoppisesti, jotta ei aiheutettaisi lisää vauriota rakenteeseen. Vaurioituneen alueen poistoon voidaan hyödyntää esimerkiksi mekaanisen työstön kannalta annettuja ohjeita materiaalille sekä korjausta varten tehtyä ohjeistusta. (32)

On suositeltavaa poistaa vaurioalueelta ympyrän tai neliskanttisen muotoinen alue epäsymmetrisen sijaan jolloin paikkaus on helpompaa. Vaurion poistossa tulee myös huomioida käytettävä korjausmenetelmä ja käsitellä reunat sekä pinnat korjausmenetelmän vaatimalla tavalla. Lisäksi tässä vaiheessa voidaan joutua kuivattamaan ja

poistamaan rakenteesta vaurion kautta päässyt kosteus. Kosteus voi heikentää paikan pysyvyyttä tai haitata laminointia. Pitkällä aikavälillä kosteus voi aiheuttaa myös tuhoja rakenteessa. (32)

Uusi paikka voidaan asentaa mekaanisesti, liimaamalla, laminoimalla tai näiden yhdistelmällä. Eri menetelmät soveltuvat erilaisille vaurioille ja rakenteille. Soveltuvuuteen vaikuttaa esimerkiksi osan suunnittelu, sillä ohuille laminaateille liimapaikka voi soveltua, mutta mekaaninen pulttiliitos ei. Uuden paikan laminointia ei voida aina suositella ja riippuen alkuperäisestä materiaalista voidaan tarvita hartsia, jonka kovetuslämpötila on riittävän alhainen ettei se vahingoita ympäröivää korjattavaa materiaalia ja soveltuu korjauspajaolosuhteisiin. Tällöin saattaa olla helpompaa hyödyntää esikovetettua paikkaa, joka liimataan tai kiinnitetään mekaanisesti. Paikan mekaaninen lujuus on suunnittelun kannalta hankala, sillä jos halutaan alkuperäistä vastaava lujuus tai jäykkyys niin paikan paino kasvaa yleensä. Painon kasvua suurempi ongelma voi kuitenkin olla paikan kasvaminen liian suureksi ympäröivien osien kannalta. Liian luja tai jäykkä paikka voi myös tuoda jännityksiä paikka-alueelle, jolloin rakenne voi vaurioitua uudestaan. Muuta rakennetta matalampi jäykkyys paikan kohdalla ohjaa jännityksiä ja voimia paremmin, mutta ei välttämättä kestä uusia vaurioita yhtä hyvin (32). Kestomuoveja korjattaessa muistaa myös hitsauksen olevan yksi toimiva menetelmä.

Toisinaan paikan valmistamisen sijaan voidaan hyödyntää myös hartsinjektiota. Menetelmää voidaan hyödyntää joissain tapauksissa esimerkiksi delaminaatioiden, kerroslevyrakenteiden pinnan irtoamisen tai matriisiaineen halkeamien korjaamiseen. (32)

Korjattu rakenne tulisi arvioida jälkikäteen, jotta voidaan varmistua sen mekaanisesta riittävydestä. Tarkastuksessa voidaan käyttää erilaisia NDT-menetelmiä arvioinnin tukena. Pahimmassa tapauksessa, jos korjaus vaikuttaa epäonnistuneelta voidaan koko prosessi joutua tekemään alusta uudelleen. (32)

Korjauksen ja tarkistuksen jälkeen tulisi korjausprosessi dokumentoida. Dokumentoinnissa tulisi kirjata ylös havaitut vauriot, niiden laajuus, vaurion poisto, korjausmenetelmät sekä tarkistus. Lisäksi tulisi ottaa ylös korjauksessa käytetyt materiaalit ja esimerkiksi näiden rakenteiden kuitusuunnat sekä missä suunnassa paikan kuidut ovat rakenteeseen verrattuna. Jos paikka kovetetaan etukäteen tai laminoidaan rakenteeseen niin tällöin tulisi ilmoittaa myös käytetyt kovetusolosuhteet. (32)

Korjauksen ja dokumentoinnin jälkeen paikan toimintaa tulisi tarkkailla, jotta voidaan varmistaa sen toimivuus. (32). Tällainen pitkäaikainen seuranta voisi toimia autojen osalta esimerkiksi osana merkkihuoltoa. Muutoinkin komposiittikoriin kohdistuvat korjausten tulisi tapahtua vain hyväksytyillä henkilöillä ja korjaamoilla, sillä epäpätevän henkilön tekemä korjaus voi näyttää ulkoa päin ja ulkopuoliselle riittävältä. Kuitenkin tällainen paikkaus saattaa olla oikeasti riittämätön ja jopa haitallinen.

Korjaamisen kannalta voisi olla järkevää kehittää korjauskäsikirja, jonka ohjeiden avulla korjausprosessi tapahtuu. Tällöin korjaus ei pohjaa niin paljoa korjaajan arvioihin, vaan hän saa avuksi työkalut vaurion selvittämiseen ja sen oikeaoppiseen korjaamiseen. Väärin tehty paikka voi kuitenkin olla lopputulokseltaan pientä vauriota ra-

kenteellisesti heikompi kokonaisuus. Korjauskäsikirjassa tulisi olla vaurioiden suuruuden ja sijainnin selvittämisen ja korjaamisen lisäksi ohjeet käytettävistä materiaaleista ja välineistä sekä dokumentoinnista ja jälkitarkastuksista.

Korjausta ja korjaustapoja suunnitellessa tulee huomioida paljon erilaisia asioita. Lähtökohtaisesti korjauksen tulisi kestää koko auton jäljellä olevan käyttöiän ja sillä tulee olla riittävä rakenteellinen lujuus ja jäykkyys. Korjauksen tulee kestää käyttöiän aikana tulevat väsymiskuormat, ympäristön aiheuttamat rasitteet sekä erilaiset kemikaalit. Mekaanisissa paikkauksissa tulisi huomioida myös korroosion vaikutus kiinnittimiin. Tärkeä huomioitava asia on myös korjauksen kustannukset ja onko se järkevää vahingoittuneelle rakenteelle. (32). Korjauksen tulisi myös kestää mahdolliset kolaritilanteet alkuperäisten rakenteiden tapaan tai muutoin hyväksyttävästi. Muita huomioitavia asioita ovat esimerkiksi korjauksen vaikutukset muihin osiin. Esimerkiksi pultattu paikka ei voi olla liian suuri tai sen ympäristöön kuuluvat muut osat eivät välttämättä sovi enää paikoilleen.

Komposiittien hyödyntäminen korirakenteissa vaatii myös suunnittelua korjaustoiminnan järjestämiseksi. Nykyiset korjaajat ovat erikoistuneet metallirakenteisiin, sekä niiden korjaamiseen ja arviointiin. Tällöin vaaditaan henkilöstön koulutusta ja pätevöittämistä. Komposiittisten korien korjaamisen kannalta liittyviä johtamiseen, hallintoihin ja kouluttamiseen liittyviä asioita on koottuna alla olevassa taulukossa (Taulukko 23). Taulukko 24 puolestaan sisältää suunnittelun kannalta vaikuttavia tekijöitä liimapaikoissa ja mekaanisissa pulttiliitospaikoissa.

Taulukko 23. Komposiittikorien korjauksen osaamishaasteita. (32)

Materiaalien käsittely	Materiaalien varastointi
Vaurioituneen materiaalin poisto	Vaurioanalyysit
Korjaustavat	Jatkuva koulutus
Pinnankäsittely	Henkilöturvallisuus
Laadunvalvonta	Välineistöt
Korjaussuunnitelman laatiminen	Dokumentointi

Taulukko 24. Mekaanisiin ja liimapaikkoihin liittyviä asioita. (32)

Pulttiliitos	Liimaliitos
Tarvittavat reiät eivät saa alentaa liikaa komposiitin maksimilujuutta	Vaatii usein pinnankäsittelyn
Alkuperäinen laminaatti ei saa olla liian ortotrooppinen: -Alle 37,5 % kuitua yhteensuuntaan -Yli 12,5 % kuitua 0°, ±45° ja 90° suunnissa suotavaa (mahdollisimman kvasi-isotrooppinen)	Absorboitunut vesi täytyy kuivattaa pois - Erityisen tärkeää kerroslevyrakenteissa Voidaan hyödyntää myös askelliimausta ja kartioliitoksia Kuurivia voimia tulee välttää
Täysi optimointi vaikeaa	
Mahdollisuus käyttää määräytyy yleensä jo suunnitteluvaiheessa	
Kuormituslujuus tulisi pitää alle yhden reiän maksimikuormituslujuuden	
Liittämisosion tiedot pätevät myös korjausliitoksiin	

Korjaamisesta hyvänä esimerkkinä voidaan esittää Lamborghiniin Avantadorin korjaamiseksi tehdyt suunnitelmat. Avantadorissa on hiilikuituinen monokokki, jonka korjaus hoidetaan muutaman eri vaihtoehdon avulla. Korjaus voidaan toteuttaa jossain 5 maailmalla sijaitsevasta erikoistuneesta keskuksesta, tietyillä kauppiaille tai lentävien tohtorien avulla. (81)

Lentävät tohtorit matkustavat ympäri maailmaa korjaamassa rikkoutuneet Avantadorit. Avantadorissa korjaaminen tapahtuu pitkälti irrottamalla vahingoittunut kohta rakenteesta ja korjaamalla se prepreg-paikalla tai uudella palalla. Hankaluuksia korjaamiseen aiheuttaa vaihtelevat olot, ainoastaan yksipuolinen pääsy useisiin kohtiin runkoa, hankalat runkomuodot, a-pinnan vaatimukset sekä alumiini-inserttien kuumeneminen korjauksen aikana. Vauriot rakenteissa pyritään etsimään kannettavalla ultraäänilaitteistolla. (81)

Korjaamiseen tarkoitetut välineet ovat melko yksinkertaisia, sillä ne ovat on tarkoitus pystyä kuljettamaan lentämällä paikasta toiseen. Välineistöön kuuluu esimerkiksi timanttiteräinen laikkaleikkuri, veitsi, hiomalaitteet, puristimia yms. välineitä. Prepreg-materiaalien käyttö vaatii lisäksi kuumennusta varten laitteet sekä tarvikkeet, joilla kuumennettava alue suljetaan. (81)

Korjattavuuden kannalta voidaan ajatella myös hybridirakenteiden hyödyllisyyttä. Komposiittien sijaan voidaan hyödyntää muodonmuutosvyöhykkeillä metallia, jonka korjaaminen voi olla tapauksesta riippuen helpompaa. Tosin vaihdettavien osien kannalta ei metallisilla ja komposiittisilla osilla nähdä suurta eroa.

7.6 Elinkaari ja kierrätys

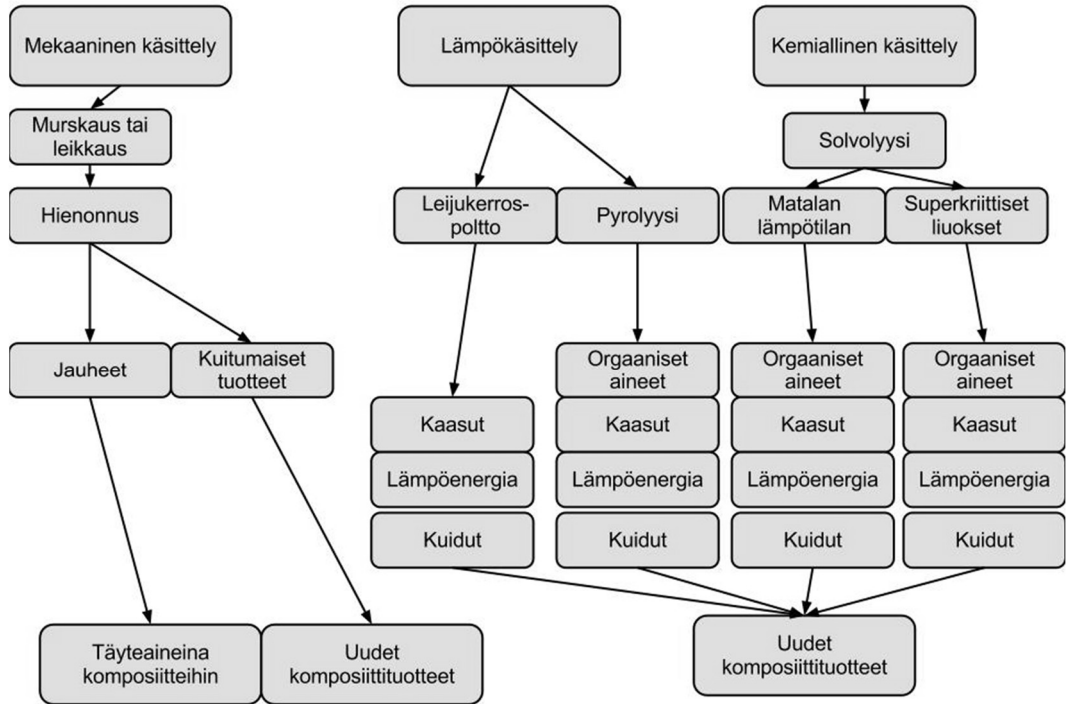
Kierrätyksen ja energian käytön kannalta on tärkeää analysoida auton ja sen komponenttien elinkaari ja käytöstäpoisto. Tällöin voidaan jo suunnitteluvaiheessa pyrkiä mahdollisimman pieneen energian ja materiaalien kokonaiskustannukseen ja tällöin voidaan myös perustella komposiittien valmistuksen korkeita kustannuksia. (82 ss. 310-313). Elinkustannusanalyysin perusteellinen läpikäyminen jätetään työn osalta väliin sen laajuuden vuoksi, mutta ympäristön kannalta analysoinnista on saatavilla lisätietoa esimerkiksi ISO 14040/44 standardissa (83).

Esimerkiksi alentamalla koko auton massaa voidaan käyttää matalamman tehoista moottoria ja säästää polttoainetta auton elinkaaren aikana. Tällöin voidaan perustella korkeampia lähtökustannuksia. Jos suunnitellaan vielä loppukierrätys mahdollisimman hyvin, voidaan valmistuksessa kulunutta energiaa ja materiaalia saada huomattavasti hyödynnettyä. Esimerkkinä kierrätyksen suunnittelussa kannattaa huomioida myös komposiittiin liittyvät muut rakenteet ja ainesosat, kuten maalit, kerroslevyrakenteet, insertit ja liitokset, jotka voivat olla hankalia purkaa ja lajitella. Lisäksi lasikuitujen kierrätystä hidastaa neitseellisen materiaalin alhainen hinta, jolloin kierrätys ei välttämättä ole järkevää tai kannattavaa ilman voimakkaita lakipakotteita (84).

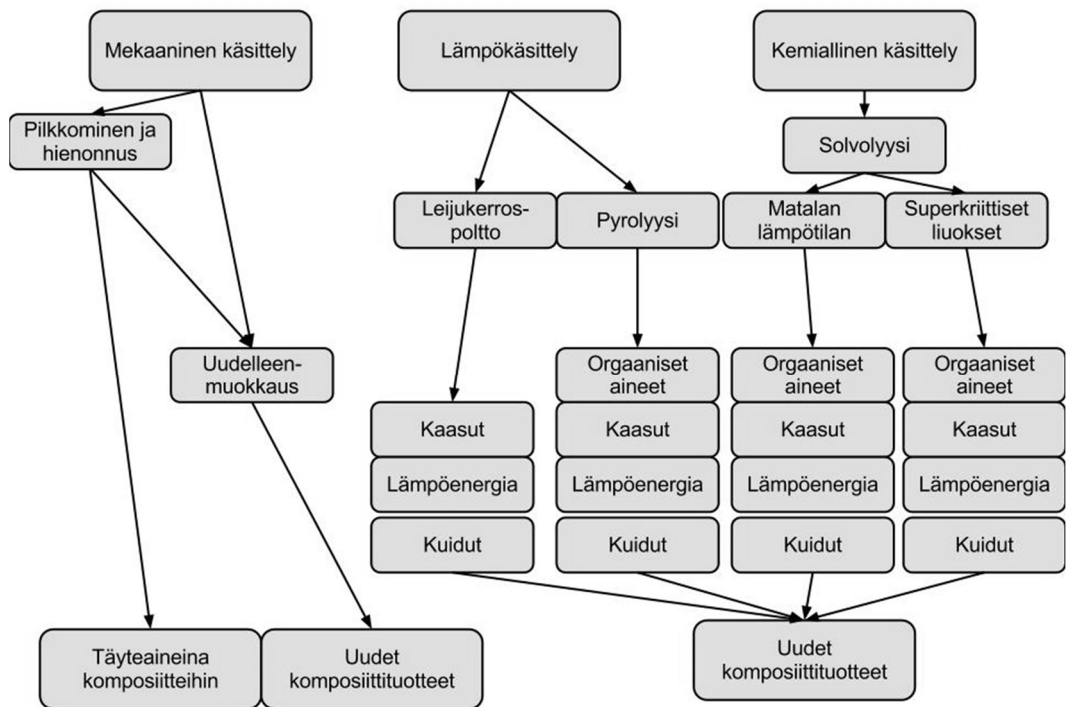
Kierrätettävyyden autoteollisuudessa on nykyään jo lakisääteistä. Vuodelle 2015 Euroopan parlamentin ja neuvoston antaman direktiivin mukaan romuautosta tulisi pystyä hyödyntämään tai uudelleenkäyttämään 95 prosenttia ja 85 prosenttia kierrättämään tai uudelleenkäyttämään (85). Uudelleenkäyttö tarkoittaa osan käyttöä uudelleen alkuperäisessä käyttötarkoituksessa. Kierrätyksellä tarkoitetaan materiaalien käsittelyä, josta saatavia materiaaleja voidaan hyödyntää alkuperäisessä prosessissa tai jossain muussa käyttötarkoituksessa.

Direktiivi voidaan siis ymmärtää siten, että 85 prosenttia tulisi pystyä kierrättämään jollain tavalla ja 10 prosenttia voidaan käyttää esimerkiksi energian talteenottamiseksi polttamalla. Komposiittisten runkojen osalta uudelleenkäytön voidaan ajatella olevan melko hankalaa, sillä ne ovat todennäköisesti erittäin hankalia jollei mahdollisuuksia purkaa osiin. Osiinkin purkaessa voi uudelleenasennus olla hankalaa. Samalla tulisi myös miettiä onko komposiittien rakenteellinen kestävyys enää alkuperäisen tai uudelleenkäytön veroinen ja se tulisi jollain tavalla tutkia. Direktiivi asettaa paineita tarkastella komposiiteille soveltuvia kierrätystapoja ja miettiä mitä niistä voidaan lakivaatimusten sisällä järkevästi hyödyntää. Esimerkiksi energian talteenotto ei voi olla ainoa tapa hyödyntää komposiittisia runkorakenteita elinkaaren lopussa.

Kesto- ja kertamuoveille on kemiallisista ominaisuuksista johtuen erilaiset tavat kierrätykselle. Kertamuovien kierrätys on lähtökohtaisesti hankalampaa johtuen niiden risisilloittuneesta rakenteesta. Kestomuoveilla kierrätys on puolestaan yleensä helpompaa, koska niitä voidaan muokata lämmön avulla. Erilaisia kierrätystapoja ja mahdollisia lopputuotteita komposiittiteollisuudessa kerta- ja kestomuoveille on esitettyä seuraavissa kuvissa (Kuva 20 ja kuva 21).



Kuva 20. Kertamuovien kierrätysmenetelmiä. (86)



Kuva 21. Kestomuovien kierrätysmenetelmiä (84)(87)

Kertamuovikomposiittien kierrätys voidaan toteuttaa käytännössä mekaanisesti, kemiallisesti tai lämmön avulla. Mekaaninen käsittely on menetelmä, jossa komposiitti hienonnetaan ensin noin 50-100 mm kokoisiksi kappaleiksi leikkaamalla tai murskaamalla. Ennen leikkausta tulee kuitenkin komposiitista poistaa insertit ja muut metalliosat (86). Tätä silppua hienonnetaan lisää vasaramyllyllä tai muulla vastaavalla menetelmällä. Hienonnettu silppu (50 µm - 10 mm) jaotellaan tämän jälkeen partikkelikoon mukaan korkean kuitupitoisuuden karkeaan materiaaliin ja hienoon jauhemaiseen matriisipainotteiseen materiaaliin. Jauhetta voidaan käyttää esimerkiksi SMC- ja BMC-tuotteiden täyteaineena. Lopputuotteella on tosin huonommat mekaaniset ominaisuudet kuin perinteisiä täyteaineita käytettäessä. (84). Kuiturikkaan karkean materiaalin on tutkimuksissa huomattu soveltuvan suoraan esimerkiksi BMC-massaan korvaamaan neutseellistä kuitua (88). Tässäkin tapauksessa mekaaniset ominaisuudet ovat huonommat kuin pelkästään neutseellistä kuitua käytettäessä.

Lämpökäsittelyt ovat kierrätysmenetelmiä, joissa käsittely perustuu korkean lämpötilan vaikutuksiin komposiitissa. Menetelmät voidaan jakaa leijukerropolttoon, pyrolyysiin ja polttamiseen. Polttamisessa saadaan energiaa ja epäorgaanista jätettä, jota voidaan hyödyntää esimerkiksi rakennusteollisuudessa betoneissa. Polttamista ei luokitella kuitenkaan kierrätykseksi epäorgaanisesta jätteestä huolimatta, jolloin sitä ei voi hyödyntää kierrätysajattelussa. Leijukerropoltto on Nottinghamin yliopiston kehittämä menetelmä, jossa komposiittijäte tuodaan hiekasta muodostettuun leijukerrokseen johon johdetaan kuumaa ilmaa. Leijukerros on komposiitista riippuen noin 450 - 550 °C lämpöinen ja höyrystää matriisiaineen pois. Menetelmällä saadaan lyhyttä kuitua, jonka mekaaniset ominaisuudet ovat neutseellistä kuitua huonompaa lämpökäsittelystä ja katkonaisuudesta johtuen. Erityisesti lasikuidun ominaisuudet voivat heiketä jopa puoleen alkuperäisestä. Kuituja voidaan käyttää kuitenkin esimerkiksi BMC-massoissa. (84). Leijukerropoltton etuna on kuitenkin se, että siinä voidaan käsitellä myös erilaisia materiaaleja ja kuituja sisältäviä komposiitteja helposti ja prosessi ei ole niin tarkka epäpuhtauksille kuin muut menetelmät (86).

Pyrolyysi on menetelmä, jossa komposiittijäte käsitellään hapettomasti korkeassa lämpötilassa. Menetelmällä on mahdollista saada talteen pitkiä korkean jäykkyyden kuituja. Menetelmässä syntyy lisäksi kaasuja, energiaa ja orgaanista ainetta. Lämpöenergiaa ja kaasuja käytetään pyrolyysin ylläpitämiseen. Kuitujen lisäksi syntyviä materiaali- ja virttoja voi olla esimerkiksi mahdollista hyödyntää erilaisten kemiallisten prosessien raaka-aineina. Pyrolyysissa saattaa jäädä kuituun kiinni orgaanista materiaalia, joka voidaan poistaa polttamalla. Tämä kuitenkin heikentää kuidun ominaisuuksia. Lisäksi pyrolyysia voidaan esimerkiksi hyödyntää leijukerropolttolaitteistoon. (84). Pyrolyysissa täytyy insertit ja muut metallikiinnittimet poistaa ennen prosessia komposiittijätteestä (86)

Kemialliset kierrätysmenetelmät ovat menetelmiä, joissa matriisi poistetaan tai depolymerisoidaan kemiallisen liuotuksen avulla. Kemiallisilla menetelmillä voidaan saada talteen puhtaat kuidut, täyteaineet sekä monomeerejä tai muita kemiallisten prosessien raaka-aineita. Liuottimena voidaan käyttää esimerkiksi vettä, happoa tai alkoholo-

lia, kuten glykolia. Menetelmä voidaan jakaa matalan lämpötilan ja superkriittisten liuottimien solvolyyysiin. Matalan lämpötilan prosessissa käytetään hieman korotettua lämpötilaa ja erilaisia liuottimia. Superkriittinen prosessi hyödyntää korkeaa painetta ja lämpötilaa prosessin nopeuttamiseksi. Superkriittisessä tilassa neste muistuttaa ominaisuuksiltaan kaasua olematta varsinaisesti kumpaakaan niistä ja superkriittisessä tilassa aineella on yleensä erittäin hyvät liuotusominaisuudet (89 pp. 1-5). (84) Materiaalit osuudessa esitelty epoksin kierrätysmenetelmä on jonkin tapainen kemiallinen liuotus, mutta tarkemman tiedon puutteessa on mahdotonta sanoa kuinka se lopulta vertautuu muihin menetelmiin.

Kierrätystä suunniteltaessa erilaiset autossa olevat komposiittiosat ovat hankalasti kierrätettäviä, sillä ne sisältyvät usein romuauton hävityksessä syntyvään revittyyn jätteeseen. Jätteestä on hankala lajitella erilaiset materiaalit jolloin myös komposiittien kierrätys jää siltä osin vähäiseksi. (84).

Kestomuovien kierrätysmenetelmät voidaan jakaa mekaaniseen kierrätykseen, lämpökäsittelyihin ja kemialliseen kierrättämiseen. Lämpökäsittelyt ja kemiallinen kierrätys vastaavat periaatteiltaan kertamuovien kierrätystä. Mekaanisessa kierrätyksessä kestomuovikomposiittijäte uudelleen muovataan lämmöllä tai hienonnetaan pieneksi. Hienonnettua jätettä voidaan käyttää täyteaineena tai se voidaan käyttää raaka-aineena esimerkiksi puristusmuovauksessa. Siitä voidaan valmistaa myös granulaatteja ruiskuvalua varten. (84)(87)

Auton korin komposiittiosien kierrätyksen helppous riippuu paljon muista käytetyistä korimateriaaleista sekä kierrätettävyyden suunnittelusta. Kierrätyksen kannalta hyvin suunniteltu kori voi olla helppo kierrättää, vaikka se olisi monimateriaaliratkaisu. Kierrätysmenetelmiä tulisi suunnitella jo valmistusvaiheessa ja esimerkiksi lasikuiduille mekaaniset menetelmät ja hiilikuituisille komposiitteille leijukerrosmenetelmät vaikuttavat kustannustehokkailta. Tosin liuotusmenetelmät voisivat olla myös hyvä vaihtoehto esimerkiksi tuotantovaiheessa, jolloin voitaisiin saada mahdollisimman paljon syntyvän jätteen ja vikakappaleiden materiaaleista talteen uusiokäyttöä varten. Auton rungon kohdalla erityisesti liitokset voivat aiheuttaa hankaluuksia, sillä liitetyt osat voivat olla eri materiaaleja. Tällöin kierrätysvaiheessa liitosten purkamismahdollisuus olisi erittäin hyödyllinen. Yksi tapa purkamiseen voisikin olla liimausosuudessa mainittu MagSilicalisäaine, jolloin liitokset ovat helppo purkaa osiin. Yhteenlaminoituissa kappaleissa voitaisiin puolestaan käyttää esimerkiksi aiemmin mainittua helpommin liuotettavissa olevaa epoksilaatua. Paras tapa tietysti kierrätyksen kannalta on pyrkiä minimoimaan käytettävien materiaalien määrä. Myös kestomuovikomposiitit voivat olla erittäin vartenotettava vaihtoehto, jos ne yleistyvät ja niiden valmistusmenetelmät kehittyvät vielä lisää. Kierrättämisen tärkeydestä autoteollisuudessa ja komposiittialalla yleensä kertoo esimerkiksi BMW:n ja Boeingin joulukuussa 2012 tekemä ilmoitus aloittaa yhteistyö hiilikuitukomposiittien kierrättämisen kehittämisestä (90).

7.7 Sarjakoko ja kustannukset

Haluttu sarjakoko vaikuttaa suuresti käytettävissä oleviin menetelmiin. Valmet Automotiven tapauksessa sarjakoko rajoittuu luultavasti lähinnä prototyypeistä keskisuuriin sarjoihin. Tosin keskisuurissa sarjakoissa kustannusten suhteen ollaan niillä rajoilla onko esimerkiksi puristusmuovattu teräsrakenne, alumiini vai komposiitti paras vaihtoehto. Piensarjoissa ovat komposiitit ja kevytmetallit todennäköisesti terästä parempi vaihtoehto. Kappaleessa 5.3 on esitetty eri menetelmiä ja niille arvioita soveltuvasta sarjakoosta. Sen perusteella voidaan huomata, että jotkut menetelmät voivat soveltua hyvinkin erilaisiin sarjakokoihin, kun taas toiset rajoittuvat melko selvästi piensarjoihin tai suurempiin sarjoihin.

Varsinainen kustannuslaskenta on tässä tapauksessa käytännössä mahdotonta. Kuten aiemmin on mainittu niin eri menetelmillä on mahdollista valmistaa hieman erilaisia osia, jolloin yhdellä menetelmällä saatava osa saattaa funktioiltaan vastata useampaa eri menetelmällä valmistettua osaa. Toisaalta erilaisia pohdintoja voidaan miettiä siitä miten kustannuksia voitaisiin hallita. Esimerkiksi suunnittelemalla selkeät kokonaisuudet, joita liitetään toisiinsa voi alentaa kustannuksia. Halvin ratkaisu valmistuksen kannalta voisi olla suuri kokonaisuus, mutta korjattavuuden puolesta se todennäköisesti merkitsisi koko rakenteen korvaamista uudella.

Esimerkiksi hiilikuitua käytettäessä voidaan ajatella BMW:n i3 ja i8 olevan järkevästi suunniteltuja. Niissä kallis ja hankalasti korjattava hiilikuitukomposiitti on säästetty matkustamoon, johon ei ole tarkoitus kohdistua muodonmuutoksia. Hiilikuitumatkustamoja suojelevat metalliset kolarivyöhykkeet. Kolarikorjauksessa voidaan pelkätään korjata alumiinirakenne tai siirtää matkustamo uuden rakenteen päälle. On todennäköistä, että kolareissa joissa matkustamoon kohdistuu suuria muodonmuutoksia auton joutuvan lunastukseen muutenkin. Tällaisissa tilanteissa kalliimpaa hiilikuitukoria ei tarvitse edes pyrkiä korjaamaan. Tietysti tulee myös tilanteita, joissa matkustamo vaurioituu lievästi, mutta tällöin voidaan pyrkiä käyttämään aiemmissa osioissa esitettyjä korjausmenetelmiä. Alumiinin sijasta voitaisiin tietysti käyttää myös jotain halvempaa komposiittiratkaisua, esimerkiksi lasikuitua tai basalttikuitua tai kokonaan muuta materiaalia, kuten terästä.

7.8 Korroosio ja sen estäminen

Korroosion kohdalla tulee huomioida niin komposiitteihin kohdistuva kuin komposiittien aiheuttama korroosio. Korroosiovaaran aiheuttaa käytännössä lujitteista ainoastaan hiilikuitu sen sähkönjohtavuuden takia. Korroosio on luonteeltaan galvaanista ja hiili toimii erittäin hyvin katodina. Tällöin suuri osa metalleista toimii anodina ja korrodoituu. Osa materiaaleista, kuten titaani ja ruostumaton teräs toimivat hiilikuidun kanssa ilman suojausta, mutta monet materiaalit, kuten alumiini, magnesiumi ja jotkin teräkset, tarvitsevat suojausta. Suojaus tapahtuu käytännössä eristämällä hiilikuitu ja anodina toimiva materiaali toisistaan. Korroosiosuojaus voidaan tehdä anodisoimalla alumiini tai

käyttämällä maali- tai muita pinnotteita. Suojaus voidaan tehdä myös eristämällä metalli ja hiilikuitu toisistaan esimerkiksi lasikuitu- tai aramidikerroksella. (38) (32)

Komposiittirakenteiden korroosio poikkeaa metallirakenteista, joissa syntyy erilaisia oksidiyhdisteitä ja kuvaavampi termi on ehkä materiaalin heikkeneminen. Korroosio on usein rakenteessa tapahtuvaa matriisin tai kuidun ominaisuuksien heikkenemistä vaurioitumisen tai kemiallisen prosessin johdosta. Komposiittirakenteessa tapahtuvaa korroosiota aiheuttaa erilaiset kemikaalit, jäätymis-sulamissyklit, lämpötilavaihtelut sekä muut ympäristövaikutukset.

Komposiittirakenne pystyy imemään itseensä kosteutta ja nesteitä tietyn verran riippuen materiaaleista, huokoisuudesta ja säröjen määrästä. Matriisissa nesteet etenevät käytännössä diffuusion avulla. Kosteuden imeytyminen rakenteeseen muuttaa kappaleen painoa ja tilavuutta yleensä vähän, mutta samalla materiaalin mekaaniset ominaisuudet heikkenevät. Kosteus voi esimerkiksi päästä kuitujen ja matriisin rajapintaan ja heikentää siten niiden välistä liitosta. Kosteuden pääsy voi aiheuttaa myös kemiallisia muutoksia matriisissa, kuten polymeeriketjujen katkeamista. Kosteus voi myös aiheuttaa säröjä ja siten edesauttaa muuta kulumista ja heikentää ominaisuuksia. Kosteuden absorboituminen materiaaliin altistaa myös jäätymis-sulamissykleissä materiaalin rappeutumiselle, sillä materiaalin sisältämä kosteus voi jäätymään ja laajeta aiheuttaen samalla tuhoja. Kosteuden imeytyminen ei usein ole tavallisissa auton runkoon kohdistuvissa oloissa pahin mahdollinen ongelma, mutta esimerkiksi höyryisissä teollisuusoloissa se voi aiheuttaa nopeastikin materiaalin heikkenemistä ja hajoamista. (32)

8 KOMPOSIITTIIEN KÄYTTÖ AUTOTEOLLISUUDESSA

Tässä osiossa käydään läpi komposiittien käyttökohteita autoteollisuudessa. Havainnollisuuden vuoksi esitellään myös esimerkkituotteita, joissa komposiitteja hyödynnetään tai aiotaan hyödyntää tulevaisuudessa. Lisäksi esitellään patenteja ja tutkimuksia liittyen erilaisiin komposiitteihin sekä autojen runkorakenteisiin.

8.1 Komposiiteista valmistettavia osia

Komposiitteja hyödynnetään tälläkin hetkellä henkilöautojen runkorakenteissa, ulkopaneeleissa sekä esimerkiksi puolirakenteellisissa osissa, sisustan osissa, sekä voimansiirron ja alustan osissa. Yleisin käyttökohde tällä hetkellä on luultavasti ulkopinnat, sisustusosat sekä erilaiset puolirakenteelliset tai suojaavat osat. Komposiiteista valmistetut ulkopinnat ovat usein lasikuitulujitteisia, mutta kalliimmissa tuotteissa voidaan käyttää myös hiilikuitua. Sisustusosissa voi olla suurempi kirjo lujitteita ja matriiseja käytössä, sillä niillä on ulkopintoja alhaisemmat vaatimukset ulkonäölle ja mekaanisille ominaisuuksille. Esimerkiksi itse-lujitettua polypropeenaa voidaan käyttää sisustuksessa tai erilaisissa suojuksissa (27).

Rungon rakenteellisissa osissa käytetään yleensä lasikuitua tai hiilikuitua. Hiilikuitua käytetään lähinnä kalliimpien autojen monokokeissa ja lasikuitua esimerkiksi puskuripalkeissa. Koko auton mittakaavassa on helpoin ajatella siten, että periaatteessa mikä tahansa muoviosa voi olla myös komposiittia, mutta komposiitit soveltuvat myös kohteisiin, joihin lujittamattoman muovin ominaisuudet eivät riitä. Tosin kaikki autoissa käytettävät komposiitit eivät ole jatko-, tai katkokuitulujitteisia, vaan myös partikkelilujitteisia komposiitteja käytetään.

Myös pultruusioprofiileita käytetään joissain autoteollisuuden sovelluksissa. Käyttö ei ole tosin yleistynyt juurikaan henkilöautoissa. Ainoita tiedossa olevia esimerkkejä henkilöautoissa on jo aiemmin mainitut lehtijouset sekä näiden lisäksi vetoakselit (91). Kuitenkin raskaassa liikenteessä on hyödynnetty pultruusioprofiileja jonkin verran. Pultruusioprofiileja käytetään jossain määrin linja-autojen ulko- ja sisäpaneloinnissa (52). Myös rekkojen perävaunujen paneleissa ja kantavissa rakenteissa hyödynnetään jossain määrin pultruusioprofiileja (15).

8.2 Esimerkkejä autoteollisuudesta

Tällä hetkellä markkinoilla tai markkinoille on tulossa useita autoja, joissa käytetään komposiitteja runkorakenteissa. Tosin kuitukomposiittien käyttö kori- ja runkorakenteissa ei ole mitenkään uusi asia, vaikka ne ovat vasta nyt yleistymässä enemmän. Ensimmäiset sarjatuotannossa olleet varteenotettavat sovellukset olivat Ford Thunderbirdin ja Chevrolet Corvetten lasikuitupaneelit 50-luvulla (92)(93). Seuraava mielenkiintoinen esimerkki oli vuonna 1957 markkinoille tullut Lotus Elite, jossa oli useammasta erillisestä lasikuituosasta yhteen liimattu monokokki (92). Periaatteeltaan rakenne muistuttaa nykyisiä teräskoreja, joissa ulkopinnat ovat kantavia ja alusta- ja voimansiirron osat kiinnitetään runkoon suoraan. Seuraavassa kuvassa on esitettyä poikkileikkaus Lotus Eliten monokokista.



Kuva 22. Lotus Eliten monokokki (94)

Nykyaikaisissa autoissa runkorakenteissa on käytetty lähinnä hiilikuitua ja autot ovat olleet tyypiltään kalliita urheilu- tai superautoja. Ensimmäisiä tuotantoautoja, joissa on hyödynnetty laajamittaisesti hiilikuitua kantavissa rakenteissa ovat Ferrari Enzo ja ensimmäisenä hiilikuitua laajamittaisesti hyödyntänyt markkinoille tullut McLaren F1. McLaren F1:ssä käytettiin hiilikuitumonokokkia johon voimansiirto ja alustaosat kiinnitettiin.ENZossa on hiilikuitukomposiittia sekä alumiini-nomex-kerroslevyjä monokokkirakenteessa (95). Tällä hetkellä tunnetuimmilta super- ja urheiluautovalmistajilta on markkinoilla tai tulossa markkinoille uusia versioita hiilikuiturungoista. Ferrarilta on tulossa Enzon seuraajana lehdistössä nimellä F70 tunnettu malli, jonka hiilikuitumonokokkia on esitelty autonäyttelyissä. Hiilikuitumonokokki on esitettyä seuraavassa kuvassa. Ferrari F70-rakenne on melko mielenkiintoinen esimerkiksi, siksi että he käyt-

tävät monokokissa useaa eri hiilikuitulaatua ja ovat ilmoittaneet käytetyt laadut sekä suuntaa antavaa tietoa siitä, missä osassa kuituja käytetään (96). Valmistusmenetelmäksi on valittu käsin laminointi ja autoklaavi (97), joka ei sovellu lainkaan suurempiin sarjakokoihin, mutta josta ammattitaitoiset valmistajat saavat valmistettua erittäin hyvän rakenteen.



Kuva 23. Ferrari F70:n hiilikuitumonokokki. (98)

McLaren on puolestaan on tuonut markkinoille MP4-12C mallin, jossa on hieman Lotus Elisen rungon (Kuva 4 s. 4) näköinen ratkaisu yhtenäisenä hiilikuituosana. Runkoon kiinnittyy etu- ja takapäähän alumiiniset rakenteet, jotka kantavat voimansiirron ja alustaosaa, sekä toimivat kolarivyöhykkeinä. Erikoisuutena voidaan pitää hiilikuiturungon koostumista yksittäisestä osasta, jonka valmistus kestää ainoastaan neljä tuntia (99). Kuva 24 esittää MP4-12C:n runkoa ja ympäröiviä osia.



Kuva 24. McLaren MP4-12C:n hiilikuituinen runko. (100)

Lamborghinin vastine hiilikuitukoreihin on Aventadorin monokokki, jossa on muiden tapaan metallinen etu- ja takarunko. Lamborghini valmistaa rungon useasta eri osasta RTM- ja prepreg-menetelmillä (81). RTM-menetelmästä he käyttävät nimitystä RTM-Lambo (101). Menetelmässä ilmeisesti käytetään kevyitä hiilikuitumuotteja sekä hyö-

dynnetään aiemmin muovattuja osia muotin osina. Esimerkiksi pohjarakenne voi toimia toisena muottipuoliskona ja siihen liitetään lisäosia. Lisäosat ovat prepregeistä auto- klaavissa valmistettuja A-pintaisia paneeleita, vaahtomaista ydinainetta sekä punomalla valmistettuja rakenteellisiä osia. Tähän kokonaisuuteen liitetään erikseen samaan tyyliin valmistettu kattorakenne liimaamalla ja uunissa kovettamalla(81). Menetelmä vaikuttaa liian hankalalta ja hitaalta sovellettavaksi piensarjoja suurempiin kokonaisuuksiin. Kuva 25 on esitettyä kyseinen rakenne.



Kuva 25. Lamborghini Aventadorin monokokki (102)

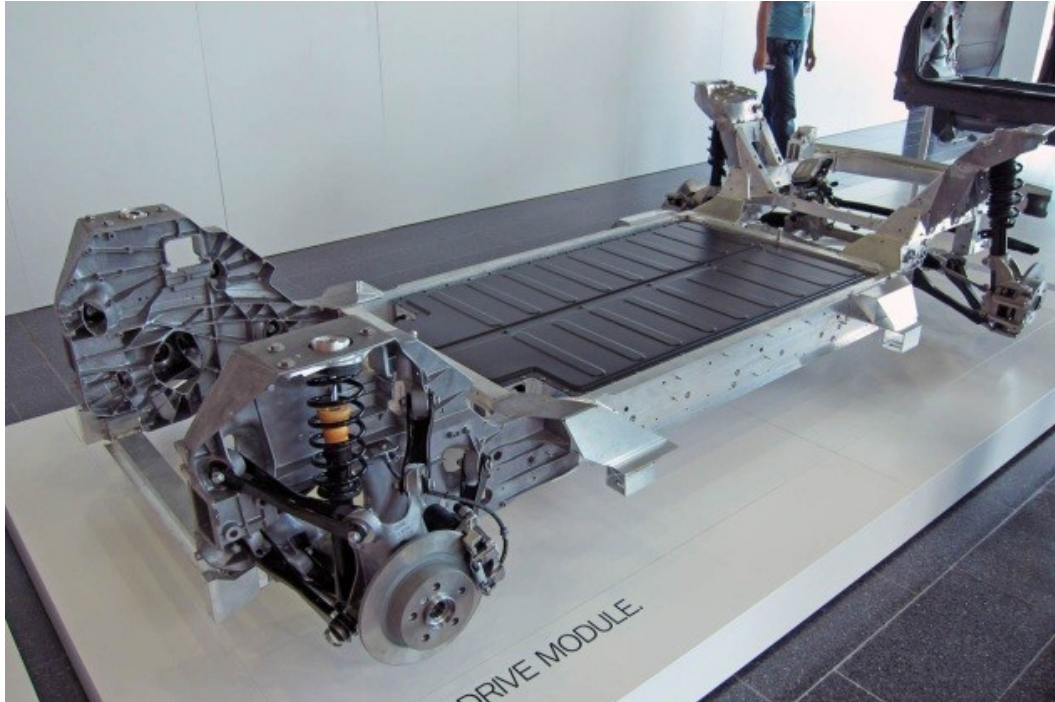
Tunnetuimpien valmistajien lisäksi markkinoille on pyrkinyt myös paljon pienempiä valmistajia, joiden tuotteet ovat superautoja alemmassa hintaluokassa. Kuitenkaan tarjolla ei ole juurikaan Lotus Eliten tyyliin valmistettavia autoja, joissa hiilikuituinen monokokki toimisi myös ulkonäön tuovana pintana. Yksi tällainen auto on suomalaisvalmistein KMR Oura, joita valmistetaan tilauksesta yksittäiskappaleina. Rakenteellisesti KMR Oura tosin on modernimpi, sillä siinä hyödynnetään kerroslevyrakennetta ja pientä erillistä taka-apurunkoa. KMR Oura on esitettyä seuraavassa kuvassa (Kuva 26).



Kuva 26. KMR Oura (Klaus Raunela)

Markkinoilla olevat pienet valmistajat vaikuttaisivat pyrkivän tekemään massasta poikkeavia urheilullisia ja retrovaikutteisia autoja. Esimerkiksi Lucra Cars valmistaa hiilikuitukorista ja teräspuutkirunkeista LC470 mallia, joka pyrkii muistuttamaan Lister Jaguaria. Rakenne on käytännössä putkirunkoisen ja pohjalevyrakenteen välimaastosta, johon hiilikuitukori tuo jäykkyyttä.(103). Huet Brothers puolestaan pyrkii saamaan markkinoille HB Coupe-mallin, joka muistuttaa myös vanhoja urheiluautoja (104)

Hiilikuiturunkoa ei kuitenkaan hyödynnetä vielä lainkaan yhtään suurempien sarjakokojen automalleissa. Syynä on raaka-aineiden korkea hinta. Kuitenkin BMW on tuomassa markkinoilla sähkökäyttöiset i3 ja i8 mallit, joista i3 tähtää ilmeisesti ylemmän keskiluokan hintaluokkaan. BMW i3 ja i8 perustuvat hiilikuituisen matkustamon ja alumiinisen alustan yhdistämiseen. Matkustamon on tarkoitus olla mahdollisimman jäykkä ja luja ja suojata matkustajia törmäyksissä jolloin hiilikuitu on hyvä ratkaisu. Alumiininen alarunko muistuttaa hieman rakenteeltaan tikapuurunkoa. Siihen kiinnitetään voimansiirto ja alustan osat. Keskelle asennetaan akusto. BMW i3:n rakenne on esitettyä seuraavissa kuvissa. BMW i3 on erittäin hyvä esimerkki kuinka hankala runkorakenteita on kategorisoida, sillä siinä irrallaan monokokilta näyttävä hiilikuiturakenne, joka liitetään tikapuurunkoa etäisesti muistuttavaan alumiinikehikkoon. Tämän jälkeen päälle asennetaan vielä erilliset paneelit antamaan ulkomuotoa. BMW aikoo valmistaa hiilikuiturungot RTM-menetelmällä useasta palasta, jotka liimataan yhteen. (105).



Kuva 27. BMW i3:n alusta. (106)



Kuva 28. BMW i3:n hiilikuituinen matkustamo. (107)

8.3 Tutkimuksia ja patenteja

Komposiittien hyödyntämiseen auton runkorakenteissa on tehty paljon erilaisia ja eri taseisia tutkimuksia, joista pyritään esittelemään joitain mielenkiintoisimpia ja mahdollisesti hyödyllisiä. Näiden lisäksi on tehty paljon yleistutkimusta, joiden tuloksia voidaan hyödyntää myös autoteollisuuteen. Tällaisia ovat esimerkiksi erilaiset liitoksiin liittyvät tutkimukset. Näihin erilaisiin tukea antaviin tutkimuksiin ei niiden lukematto-

man määrän vuoksi perehdytä, mutta niistä on seuraavaksi taulukoituna lyhyt lista jolloin lisätietoa voidaan tarvittaessa hakea halutuista osa-alueista.

Taulukko 25. Tutkimuksia liittyen komposiitteihin

Aihe	Lähde
Insertit kerroslevyrakenteissa	(108)
Pultruusioprofiilien liittämismenetelmien tutkimusta (siltarakenteissa)	(109)
Komposiittien niittiliitos, upotusten ja reiän väljyyden vaikutus	(110)
Profiilien pultiliitos, kireyden ja pultin reunaetäisyyden vaikutus	(111)
Yksittäisuunnattujen pultiliitosten väsymiskäyttäminen	(112)
Pultiliitosten optimointi komposiittisille hybridiliitoksille	(113)
Adhesiiveillä kiinnitettyjen inserttien hyödyntäminen pultiliitoksissa	(114)
Liimaliitosten väsymisen arviointia	(115)
Lasikuitulujitteisten pultruusioprofiilien liimaliitoksen optimointia	(67)
Lämpötilan vaikutus liimaliitoksen vetokäyttäytymiseen	(71)
Metalleihin yhteenlaminoitujen liitokset, jäännösjännitysten vaikutus	(116)
Komposiittien liittäminen metalliin yhteenlaminoimalla	(117)
Vaurioita kestävä suunnittelu, niittiliitokset, jännitysten siirtyminen	(118)
Niittiliitokset, lisätutkimuksia pohjautuen edelliseen	(119)

Osa tutkimuksista keskittyy pitkälti yksittäisiin osiin sekä näiden optimointiin tai muihin rakenteisiin vertaamiseen. Monissa suurempia rakenteita koskevissa tutkimuksissa lähtökohta on usein hyödyntää monimateriaaliratkaisuja. Autoteollisuuden kannalta yksittäistutkimuksia ovat olleet esimerkiksi puskuripalkkien tekeminen komposiittimateriaaleista tai komposiittien törmäyskäyttäytymisen tutkiminen.

2000-luvulla on tehty paljon tutkimusta auton massan keventämiseksi. Syinä ovat olleet esimerkiksi kulutuksen ja päästöjen alentaminen. Osa tutkimuksista on keskittynyt pelkästään rakenteen optimointiin kevytmetalleja ja uusia teräslaatuja hyödyntämällä(120), mutta esimerkiksi ULTRALight-Car tutkimushankkeessa (11) on mietitty myös muovikomposiittien hyödyntämistä. ULTRALight-Car tutkimuksissa on pyritty löytämään ratkaisuja, joilla pystytään suursarjojen vaatimiin valmistusnopeuksiin. Tavoitearvoksi oli asetettu 1000 autoa päivässä. Mielenkiintoisimpia komposiittiratkaisuja, joita oli esitetty olivat korkean tuotannon RTM, hiilikuituisten profiilien pultruusio, sekä paneleiden valmistaminen LFT-menetelmillä. LFT-menetelmät (Long Fiber Thermoplastic) ovat käytännössä samoja ekstruusio-, puristusmuovaus- ja ruiskuvalumenetelmiä kuin valmistusmenetelmät osuudessa, mutta käytetyt katkokuidut ovat pidempiä (noin 12-50 mm).

Eräs mielenkiintoisimmista laajemmista esityksistä komposiittien käytöstä auto-teollisuudessa, on Ford Motor Companyn vuonna 1990 julkaisema tutkimus (121) RTM-menetelmän hyödyntämiseksi auton korirakenteessa. Tutkimuksessa tehtiin RTM-menetelmällä hyttiosa Ford Ranger pickup-malliin alkuperäisen teräksisen tilalle. Ra-

kenne koostui kahdesta erillisestä (osasta katto ja pohja), jotka oli tarkoitus liittää toisiin liimaliitoksilla. Osat valmistettiin yksittäissuunnatuista ja sattumanvaraisesti suunnatuista jatkuvista kuiduista. Osa osista valmistettiin myös pelkästään sattumanvaraisesti suunnatuista kuiduista. Rakenteessa hyödynnettiin myös vaahtoytimiä antamaan muotoa palkkirakenteeseen sekä estämään näiden seinämien lommahduksia. Matriisiaineksi valittiin vinylylesteri. Materiaalien ominaisuudet ovat esitettynä seuraavassa taulukossa.

Taulukko 26. Testikorin komposiittien mekaanisia ominaisuuksia (121)

Jatkuvakuituinen satunnaissuunnattu kuiturakenne	
Puristuslujuus (MPa)	372,3
Vetolujuus (MPa)	220,6
Kimmomoduli (GPa)	8,69
Jatkuvakuituinen satunnaissuunnattu/yksittäissuunnattu kuiturakenne	
Puristuslujuus (MPa)	359,9
Vetolujuus (MPa), Pituussuunta	461,9
Vetolujuus (MPa), Poikittaissuunta	150,3
Kimmomoduli (GPa), Pituussuunta	5,03
Kimmomoduli (GPa), Poikittaissuunta	18,75

Yksi muovattu RTM osa pystyi korvaamaan melkein 100 teräksistä osaa, joita tarvittiin alkuperäisessä rakenteessa. Komposiittirakenteesta pyrittiin suunnittelemaan teräksistä rakennetta vastaava jäykkyydeltään, mutta lopullisesta rakenteesta tuli noin 1,75-2,5 kertaa jäykempi. Osittain jäykkyyden parantumiseksi arvioitiin korirakenteen parantunut yhtenäisyys liitosten määrän vähentyessä. Matkustamon kiertojäykkyydeksi oli mitattu 9,5-11,5 kN*m / aste, joka on nykyautoihin verrattuna alhainen (yleisesti noin 20-40 kN*m/aste). Komposiittirakenteen massa oli 71,1 kg, jolla pystyttiin korvaamaan 85,7 kg painavan teräsrakenteen lisäksi 5,7 kg erilaisia eristeitä ja listoja. Suurempien painonsäästöjen oletettiin olevan mahdollisia suunnittelemalla auton rakenne RTM-menetelmää silmällä pitäen sen sijaan, että käytettäisiin teräskorille suunniteltuja komponentteja. Kahden avonaisen osan käyttäminen mahdollistaisi tutkijoiden mukaan etuja myös kokoonpanossa. Tällöin sisustaosat, ilmastointi sekä muut rakenteeseen liitettävät osat voitaisiin asentaa roboteilla avoimiin puoliskoihin. Vasta tämän puoliskot liitettäisiin toisiinsa liimaamalla. Kokonaista rakennetta Ford nimitti semi-monokokiksi. (121)

Komposiittien eduksi todettiin rakenteen yhtenäisyys lukuisten hitsausten sijaan, korroosionkestävyys sekä parempi lämmön- ja ääneneristävyys. Komposiittien korroosionkestävyys helpottaa myös muuta prosessia, sillä rakennetta ei tarvitse suojata teräksen tapaan eikä korroosionkestävyyden ja rakenteen yhtenäisyyden takia tarvita saumausaineita. Yhtenäisyyden lisäksi ajateltiin myös sisustaosien vähentämistä sisäpinnan muotissa värjäymisellä sekä martioinnilla. Tällöin vähenee myös erillisistä osista johtuvat ongelmat paikoituksessa, sovittamisessa ja osien natinoissa. (121)

Kustannusten arvioitiin tulevan korkeintaan yhtä suuriksi kuin teräsrakenteilla. Valmistusmenetelmäksi suunniteltiin usean muotin karusellimainen rakenne, jotta päästäisiin riittäviin tuotantonopeuksiin. Tällöin tarvitaan paljon muotteja, mutta teräksen puristusmuovausta, niiden muotteja, hitsausasemia ynnä muita samantapaisia investointeja ei tarvita. Myös korkein mahdollinen automaatioaste arvioitiin RTM-menetelmällä suuremmaksi. (121)

Autoille tehtiin myös rasisus- ja törmäystestausta. Hyttiosa asennettiin muutoin normaaliin tuotantomalliin. 50 km/h nopeudella tehtävässä etutörmäystestissä rakenne säilyi hyvin ehjänä ja jopa ovien reunat säilyivät ehjinä ja aukesivat helposti. Lisäksi testattiin katon painautumista (FMVSS 216) ympäriajon varalta. Rasisustestissä autolla ajettiin 16000 mailia hankalissa tieolosuhteissa, jonka jälkeen komposiittiosissa ei havaittu säröjä tai lohkeamia. Sitä kuinka hyvin kyseinen korirakenne läpäisee kolaritesti- en standardit ei ole tietoa, mutta kattorakenteen kestävyys riittäisi vielä nykyisiinkin Amerikkalaisiin vaatimuksiin. (121)

Nyky aikaan peilattuna voidaan tutkimuksesta tehdä mielenkiintoisia havaintoja, ja osaltaan voidaankin miettiä onko tutkimus ollut parikymmentä vuotta aikaansa edellä. Tikapuurunjon ja erillisen komposiittisen matkustamon yhdistäminen muistuttaa hyvin paljon BMW:n i-sarjan rakennetta, jossa tosin käytetyt kuidut ovat hiilikuitua ja tikapuurunjon tapainen rakenne alumiinia. Samalla komposiittimatkustamo muistuttaa rakenteeltaan paljon kalliiden urheiluautojen, kuten Aventadorin monokokkia.

Rakenteen kannalta lasikuitu on myös mielenkiintoinen, sillä verrattain alhaisen jäykkyyden lasikuituinen rakenne toimi kokonaisuutena teräksistä jäykempänä. Tämä avaa ajattelun kannalta paremmin mahdollisuuksia hyödyntää kuitumateriaaleja. Tosin tutkimus puoltaa RTM- tai muiden menetelmien hyödyntämistä, joilla saadaan aikaan suuria yhtenäisiä rakenteita. Pultruusioprofiilien kannalta vaikutus ei välttämättä ole niin suuri jollei rakenteen yhtenäisyyttä pystytä takaamaan. Tosin suurien profiilien hyödyntäminen voi tällöin olla järkevää esimerkiksi hyödyntämällä suurta profiilipohja-levyä.

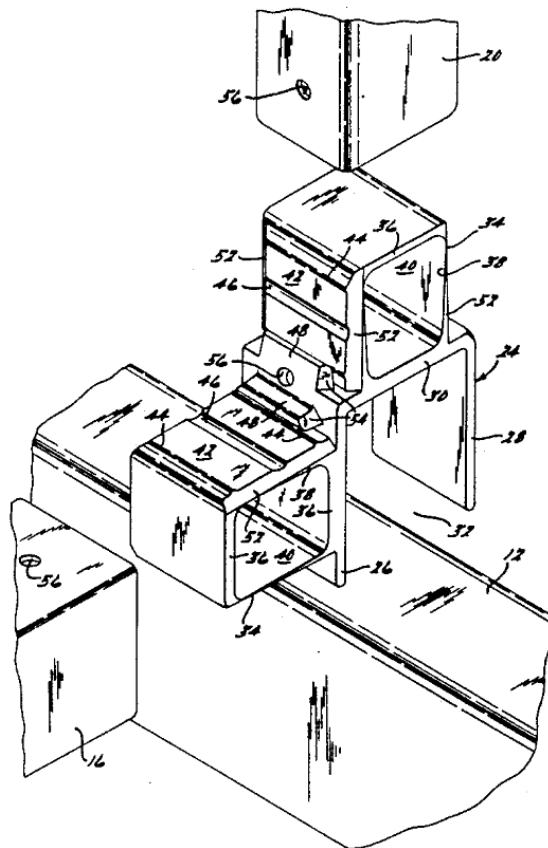
Voidaan periaatteessa miettiä onko hiilikuidun käytöllä muita etuja kuin painon alentaminen esimerkiksi henkilöautojen rakenteessa. Hiilikuiduilla saadaan tosin parannettua jäykkyyttä, mikä on eduksi kaikille henkilöautoille. Kuitenkin hiilikuitu on liian kallis ratkaisu alhaisimman hintaluokan autoihin, joissa ei välttämättä myöskään yhtä korkea jäykkyys ole niin suuri vaatimus. Tosin tutkimuksessa esiintynyt kiertojäykkyys on nykyaikana liian alhainen ja rakenteen tulisi olla parempi. Sitä kuinka paljon jäykempi rakenne voitaisiin lasikuidusta valmistaa on hankala arvioida, sillä esimerkiksi tutkimuksessakin oli pyritty ainoastaan vastaamaan jo olemassa olevan teräsrakenteen jäykkyyttä.

Alhaisemmissa hintaluokissa voisi tällöin olla etua käyttää esimerkiksi basalttikuitua, jolla saataisiin lasikuitua paremmat mekaaniset ominaisuudet tai hybridirakennetta, jossa hiilikuitua käytetään jossain määrin lisäämään rakenteen jäykkyyttä, lujutta ja alentamaan painoa. Pelkällä lasikuidulla tai basalttikuiduillakin voidaan tutkimuksen perusteella saada aikaan painosäästöjä. Tällöin investointikannalta voisi olla pien- ja

keskisuurissa sarjoissa järkevää tutkia esimerkiksi teräskorin sijaan itsekantavaa RTM-menetelmällä valmistettua komposiittikoria. Menetelmä voisi soveltua myös pieniin L6e- ja L7e-luokan kevyisiin ajoneuvoihin, joiden sarjakoot jäävät melko pieneksi.

Komposiitti- ja space frame-rakenteisiin liittyviä keksintöjä on patentoitu erittäin paljon. Tässä on pyritty esittelemään pari mielenkiintoisinta. Kappaleen lopussa on lisäksi taulukko, jossa on lueteltu muita erilaisia mielenkiintoisia patenteja. Space frame-rakenteiden patentit eivät yleensä liity komposiitteihin ja niissä on usein esitelty erilaisia liitostapoja. Keksityt liitostavat ovat kuitenkin usein sovellettavissa myös komposiiteille. Komposiitteihin liittyvät keksinnöt puolestaan ovat usein monokokkeihin, paneeleihin tai esimerkiksi lavarakenteisiin sovellettuja.

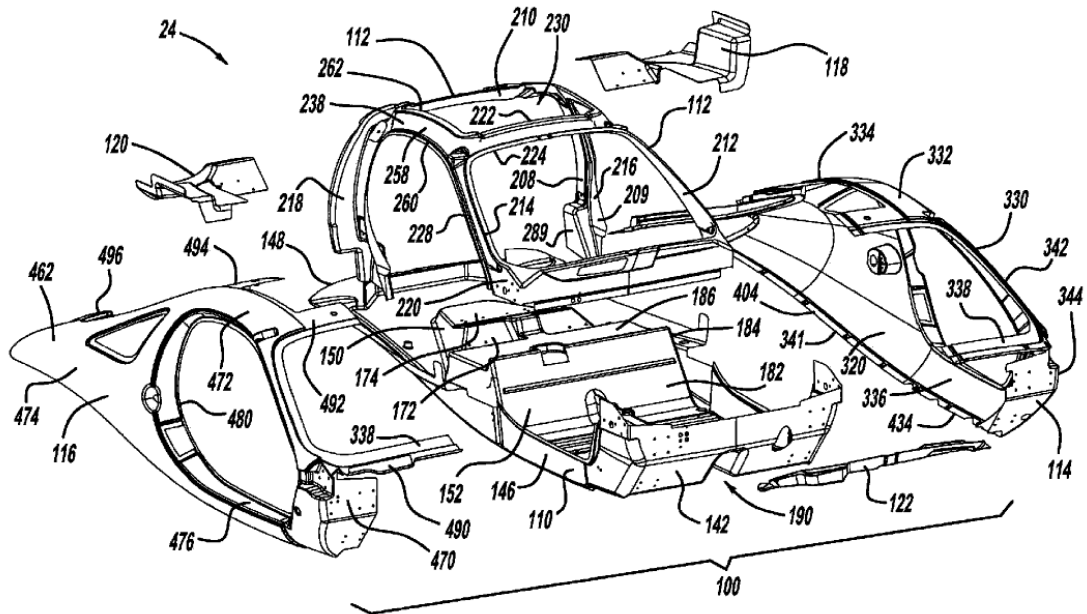
Ford Motor Company on patentoinut lukuisia tapoja, joilla profiileja voitaisiin liittää toisiinsa. Eri patentit ovat tosin lähinnä muutoksia erilaisista geometrisista muodoista, jotka lukittuvat jossain määrin toisiinsa. Seuraava kuva (Kuva 29) esittää patentissa US522859 (122) olevaa space frame-rakenteen liitososaa. Kyseisen tyyliiset profiileista valmistetut liitososat voisivat toimia myös pultruusioprofiileista valmistetuissa runkorakenteissa.



Kuva 29. Liitin patentista US522859. (122)

Komposiitteihin liittyvistä patenteista mielenkiintoisimpia ovat monokokkeihin liittyvät patentit. Erityisesti Apera Motors on patentoinut koriratkaisuja, joissa on pyritty aikaansaamaan kevyt, turvallinen ja aerodynaaminen rakenne. Seuraavassa kuvassa on esitettynä heidän patenteissa esiintyvä rakennerratkaisu. Aperan tekee mielenkiintoiseksi vähäinen osien määrä, joilla koko rakenne saadaan aikaan. Rakennetta tutkimalla voi-

daan kuitenkin huomata, että esimerkiksi pultruusio ei menetelmänä sovellu yhtä hyvin osien minimointiin kuin geometrisestä vähemmän rajoittavat menetelmät.



Kuva 30. Aptera Motorsin komposiittimonokokki. (123)

Seuraavan taulukossa on listattuna aiheeseen liittyviä patenteja. Patenteista on ilmoitettu sisällön kannalta mielenkiintoinen asia, patenttinumero sekä viitenumero, jonka avulla patentin tarkat tiedot ovat löydettävissä.

Taulukko 27. Patenteja liittyen space frame-rakenteisiin ja komposiitteihin

Aihepiiri	Patenttinumero	Viite
Space frame-liitokset ja rakenne	US4986597	(124)
Profiileista valmistettu liitososa	US5059056	(125)
Space frame-liitokset	US5209541	(126)
Space frame-liitokset	US5271687	(127)
Space frame-liitokset	US5332281	(128)
Space frame-liitokset	US5343666	(129)
Taivutetut profiilin päät liitoselementteinä	US5549352	(130)
Useasta osasta koostuva profiililiitos	US5715643	(131)
Vaahtoytimen avulla liimattava komposiittipalkki	US6168226	(132)
Komposiittimonokokki	US2012/0104799 A1	(133)
Komposiittimonokokki	US2012/0104803 A1	(134)
Kaksiosainen kantava rakenne ruiskuvalamalla	US6168231	(135)

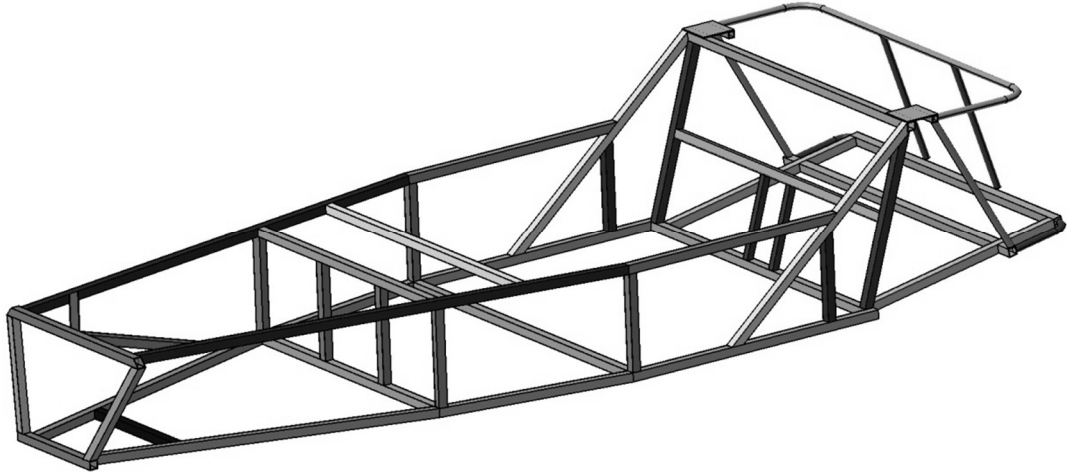
9 ESIMERKKEJÄ JA EHDOTUKSIA KORIRAKENTEeseen LIITTYEN

Tässä osiossa on esitetty erilaisia rakenne-ehdotuksia, joihin pultruusioprofiileja voitaisiin hyödyntää. Esimerkkitapauksiin on pyritty löytämään ratkaisuja, joissa saadaan paras tasapaino rajoitteiden ja etujen välillä. Tarkoitus on myös löytää ratkaisuja, joissa pultruusioprofiileja käyttämällä saadaan jokin kilpailuetu verrattuna puhtaasti metalliosista valmistettuihin kokonaisuuksiin. Tämän lisäksi kappaleessa on tutkittu materiaalin vaikutuksia rakenteeseen sekä massaan ja pyritty niiden avulla saamaan tietoa komposiittien ja metallien eroista. Kappale on tarkoitettu antamaan myös ideoita mahdollisia jatkotutkimuksia varten.

9.1 Materiaalin vaikutus rakenteeseen ja sen massaan

Standardiprofiilien käyttö merkittävimpana osana korirakennetta ei välttämättä ole kovinkaan järkevää. Tällöin saadaan käytännössä putkirunko tai erittäin kulmikas rakenne, vaikka hyödynnettäisiin esimerkiksi suurikokoisia levyjä ja U-profiileja. Ongelmaksi tulevat järkevät kulmaliitokset, joiden täytyisi olla jollain muulla menetelmällä valmistettuja tai perustua erilaisiin profiileihin tehtäviin viisteisiin kiinnityslevyihin. Teräksiseen putkirunkoon verrattuna saataisiin aikaan kevyempi, mutta hankalammin liitettävä ja kalliimpi ratkaisu. Tällöin esimerkiksi sarjatuotannon kannalta ratkaisut eivät olisi järkeviä, mutta voisivat soveltua paino-optimoituihin prototyyppeihin tai yksittäiskappaleisiin. Putkirunkorakenne on kuitenkin valittu esimerkkitapaukseksi, sillä siinä on mahdollista laskea potentiaaliset painosäästöt melko yksinkertaisesti. Painoverailu rajoitetaan putkikomponentteihin, ja kiinnikkeet, liitokset sekä levyosat jätetään vertailun ulkopuolelle.

Putkirunkoisia autoja ei enää paljoakaan ole sarjavalmistuksessa, mutta esimerkiksi Lotus 7 tyyllisiä ajoneuvoja on saatavilla useilta eri valmistajilta ja toimittajilta niin avaimet käteen ratkaisuna kuin kit car-tyyppisinä rakennussarjoina. Seuraavassa kuvassa (Kuva 31) on esitetty erään auton runkorakenne, joka on esitetty kirjassa "Build Your Own Sports Car for as Little as £250 and Race It!" (136), ja jonka piirustukset, 3D-malli ja osalista ovat saatavilla esimerkiksi Lotus 7 tyyllisiin autoihin erikoistuneelta sevenesque-sivustolta (137). Vastaavan näköisissä autoissa on yleensä kaikissa kuitenkin hieman erityyppiset runkorakenteet ja esimerkiksi auton mitat ja kolmiotukien määrä voivat vaihdella.



Kuva 31. Yksinkertainen putkirunkorakenne. 3D-malli saatavilla (137)

Kyseinen rakenne on valittu vertailun kohteeksi, sillä siitä on saatavilla täsmällistä tietoa käytetyistä materiaaleista ja niiden määristä. Kuvassa olevan korin rakennetta ei ole jäykistetty normaalien putkirunkojen tapaan kolmioiden avulla eli lisätty putkia halkaisemaan neliskanttiset osiot. Tämä johtuu paneeleista, jotka kiinnitetään suoraan putkirunkoon jäykistämään rakenne. Kuvassa ei myöskään ole keskitunnelia, vaikka auto on etumoottorillinen takaveto. Tämä johtuu siitä, että kyseinen rakenne on tarkoitettu teese-itse henkisesti valmistettavaksi luovuttaja-autosta, jolloin vaadittavat mitat voivat muuttua. Painolaskennassa ei huomioida liitosten vaatimaa massaa ja esimerkiksi taivutetut putket taka-osassa vaatisivat käytännössä kestopuovisen profiilin.

Auton rakenteessa käytetään levyrakenteita, kahta eri kokoista teräksistä neliöputkea (25 mm x 25 mm x 1,5 mm ja 20 mm x 20 mm x 1,5) sekä teräksistä pyöröputkea (19 mm halkaisija, 1,5 mm seinämäpaksuus) (137). Mitat on muutettu tuumamitoista vastaamaan lähimpiä SI-järjestelmän mukaisia Euroopassa käytettäviä laatuja. Tarvitavat materiaalmäärät ovat esitettyinä seuraavassa taulukossa.

Taulukko 28. Putkirunkoon tarvittavat materiaalmäärät (137)

	Neliöputki	Neliöputki	Pyöröputki
Ulkohalkaisija (mm)	25	20	19
Määrä (m)	30,7	7,5	7,4

Painoverailussa on yksinkertaistuksen vuoksi pyritty saamaan teräsrakennetta vastaava jäykkyys käyttämällä eri kokoista ja eri materiaalista valmistettavaa taivutusjäykkyydeltään vastaava profiilia. Vastaavien ulkodimensioiden käyttö oli harkinnassa, koska tila on usein rajoittavin tekijä auton rakenteissa. Laskuista kuitenkin selvisi että vastaavia ulkodimensioita ei voida saavuttaa kaikilla materiaaleilla edes käyttämällä saman kokoista umpitankoa. Vertaamalla taivutusjäykkyyttä ei tosin pystytä kertomaan täysin koko rakenteen käyttäytymistä, sillä esimerkiksi komposiiteilla kiertojäykkyys voi olla huomattavasti taivutusjäykkyyttä huonompi yksittäissuunnatuilla kuiduilla.

Laskennasta saadut arvot ovat esitettynä liitteessä 1. Tuloksissa on esitettynä kaavioina profiilin halkaisijan muutos verrattuna seinämäpaksuuden muutokseen. Lisäksi on esitetty vastaavien profiilien paino pituusyksikköä kohden. Kaavioiden avulla on pyritty valitsemaan profiili, jossa saadaan aikaan paras kompromissi ulkomittojen ja painon suhteen. Seuraavassa taulukossa on esitettynä valitut profiilikoot ja niiden painot pituusyksikköä kohden. Alumiinin kohdalle on saatavilla valmistajilta helposti profiilikoot ja näitä vastaavat painot, jolloin niille on voitu valita teollisuudesta saatavilla olevat standardiprofiilit. Komposiittiprofiilien kohdalla on poikettu vakioprofileista ja käytetty laskennallisia arvoja, sillä niistä ei ole saatavilla yhtä hyvin tietoa. Voidaan huomata, että periaatteessa kaikki materiaalivaihtoehdot ovat soveltuvia riippuen kuinka paljon rakenne antaa myöden dimensioiden kasvuille. Profiilien dimensioita voidaan kutistaa taulukon arvoista olevista, mutta tällöin myös painon suhde pituuteen nousee melko nopeasti. Varsinkin lasikuituvaihtoehdolla 1 paino voi nousta jopa teräksistä rakennetta suuremmaksi.

Taulukko 29. Soveltuvat profiilikoot ja niiden painot

Valitut profiilikoot ja painot						
Materiaali	neliöprofiili (25x25x1,5)	paino (kg/m)	neliöprofiili (20x20x1,5)	paino (kg/m)	pyöröprofiili (19x1,5)	paino (kg/m)
Teräs	25x25x1,5	1,11	20x20x1,5	0,87	19x1,5	0,65
Alumiini	35x35x2	0,61	30x30x1,5	0,46	28x1,5	0,50
Lasikuitu 1	40x40x3,5	1,01	36x36x2	0,57	35x2	0,41
Lasikuitu 2	35x35x3	0,76	31x31x2	0,48	29x2	0,35
Hiilikuitu 1	35x35x2,5	0,54	30x30x2	0,35	30x1,5	0,22
Hiilikuitu 2	30x30x1,3	0,22	25x25x1	0,17	20x2	0,20

Seuraavaan taulukkoon on laskettu eri materiaaleille rungon putkiosien paino jolloin saadaan tietoa mahdollisesta painon säästöstä. Lasikuitu- ja hiilikuitulujitettujen profiilien vaihtoehtoja 1 ja 2 voidaan ajatella vaihteluvälinä, jolle kyseistä kuitulujitusta käytämällä päästään. Voidaan havaita, että painon säästöihin voidaan päästä käytännössä kaikilla materiaaleilla, mutta vaadittavat dimensiot, valmistustekniset asiat, sarjakoot ja hinta saattavat puoltaa teräksisten rakenteiden käyttöä tai poistaa jonkin materiaalivaihtoehdon listalta. Myös profiilien muodon muuttaminen esimerkiksi ainoastaan korkeutta muuttamalla voi muuttaa tuloksia erilaisiksi.

Muista materiaaleista voisi olla huomionarvoisena mieltä myös basalttikuitujen hyödyntämistä. Niistä valmistettujen tuotteiden tiheys vastaa lasikuitulujitettuja, mutta niiden jäykkyys on suurempi. Tarkkaa tietoa kimmomodulin vaihtelusta ei ole, mutta kirjallisuuden pohjalta ne sijoittuvat jonnekin 20-70 GPa välille riippuen lujitemääristä ja kuitusuunnista. Noin 50 GPa voisi olla hyvä arvio yhdensuuntaisesti lujitetulle pulttu-ruusiotuotteelle perustuen teräksisiä korvaaviin basalttikuitulujitettuihin raudoitustankoihin. Tällöin basalttikuitu mahdollistaisi parhaimmillaan alumiinia tai kvasi-

isotrooppista hiilikuitua vastaavat jäykkyysominaisuudet yhdessä suunnassa, mutta hiilikuitua halvemmalla.

Taulukko 30. Runkorakenteen paino

Materiaali	25x25x1,5 vastaavat profiilit (kg)	20x20x1,5 vastaavat profiilit (kg)	19x1,5 vastaa- vat profiilit (kg)	yhteensä (kg)	Osuus teräk- sisestä
Teräs	33,98	6,54	4,81	45,33	1,00
Alumiini	18,73	3,45	3,70	25,88	0,57
Lasikuitu 1	31,01	4,28	3,03	38,32	0,85
Lasikuitu 2	23,33	3,60	2,59	29,52	0,65
Hiilikuitu 1	16,58	2,63	1,63	20,83	0,46
Hiilikuitu 2	6,75	1,28	1,48	9,51	0,21

Tarkastelussa ei ole huomioitu lujuutta, mutta esimerkiksi kappaleen 3.3 pohjalta voidaan arvioida lujuuden olevan riittävä. Tämä johtuu esimerkiksi komposiittien hyvästä vetolujuudesta ja melko hyvästä puristuslujuudesta. Tarkastelun matemaattinen taso pohjautuu lujuusopin kaavoihin, jotka ovat itsessään jo pelkistettyjä. Lisäksi taiputusjäykkyyttä tutkittaessa ei huomioida kiertojäykkyyttä tai muita pituussuuntaan poikisuuntaisia ominaisuuksia. Tämä aiheuttaa epätarkkuutta tarkasteluun, mutta esimerkiksi 45 GPa hiilikuitukomposiitti voidaan ajatella kvasi-isotrooppisena jolloin sivuttaissuuntaiset ominaisuudet pysyvät paremmin hallussa. Dimensioita muuttaessa voisi miettiä myös kuinka teräksisen kappaleen paino muuttuisi dimensioita kasvattamalla ja seinämäpaksuutta alentamalla. Teräksellä tosin voi tulla nopeasti raja vastaan, jossa seinämäpaksuus on jo liian pieni toteutuksen kannalta.

Putkirunkoistarakennetta tutkiessa voidaan kuitenkin ajatella, että myös standardiprofiilit voivat olla toimivia, mutta niitä kannattaa käyttää niille soveltuvissa alueissa, eikä pyrkiä väkisin löytämään käyttökohdetta. Parempi tapa olisi hyödyntää varta vasten käyttökohdetta varten suunniteltuja profiileja, mutta tällöin kustannukset nousevat. Esimerkiksi putkirunkoisessa rakenteessa voitaisiin yrittää korvata koko sivu kaarevalla suuremmalla profiililla. Toinen vaihtoehto voisi olla käyttää profiileja, joissa on valmiiksi kiinnittämistä helpottavia piirteitä, kuten kanavia, koloja tai ohjaimia. Putkirunkoinen space frame-rakenne tosin soveltuu teoriassa hyvin melko yhdensuuntaisesti lujitetuille komposiittiprofiileille, koska perinteisen kolmio-osioista koostuvan putkirungon rakenteisiin tulisi kohdistua lähinnä puristus- ja vetojännitystä. Käytännössä kuitenkin liitokset ja erilaiset paneelit mahdollistavat rakenteessa myös poikkeavat kuormitustavat, kuten leikkaus- tai kiertotyypiset kuormitukset.

Johtopäätökset voidaan vielä viedä putkirunkoa pidemmälle, jolloin voidaan yleisesti ajatella, että kuitulujitetut komposiitit voivat tuoda painosäästöä metallirakenteisiin verrattuna tai ainakin teräkseen verrattuna, mutta tällöin vaaditaan maksimaalisen hyödyn takaamiseksi suurempia rakenteita. Pelkästään seinämäpaksuuden muuttaminen

samankaltaisessa rakenteessa ei siis ole hyvä ratkaisu, vaikkakin sillä voidaan saavuttaa sopivilla materiaaleilla painosäästöä.

Toinen päätelmä voidaan tehdä alumiinin ja hiilikuituprofiilin välillä. Kuvaajien perusteella vaikuttaisi, että joissain tapauksissa alumiinisella rakenteella päästään hiilikuitua vastaavaan jäykkyyteen ja painoon profiileissa. Tällöin kyseessä on kvasi-isotrooppinen profiili perushiilikuitulaadusta. Kustannukset hiilikuidulla ovat kuitenkin korkeammat ja liitettävyyden ehkä hieman hankalampi. Käyttämällä korkeamman jäykkyyden laatua voitaisiin saada alennettua painoa alumiiniin verrattuna, mutta tällöin myös hinta voi nousta. Lujuuden pitäisi kuitenkin olla hiilikuitua käytettäessä parempi ja voidaankin pohtia onko lujuuden tai jäykkyyden kasvattaminen alumiinia korkeamman hinnan arvoinen. Tällöin pultruusioprofiilien hyödyllisyyttä voidaan kyseenalais-
taa.

Käytettävien profiilien tulisi ehkä olla suurempia kuin mihin alumiinisilla pystytään, tai niitä kannattaisi käyttää tarkoin harkitusti suorissa osuuksissa. Jos alumiinisessa rakenteessa rajoittava tekijä on lujuus ja vaaditaan rakenteen kasvattamista riittävän lujuuden saavuttamiseksi, voisi hiilikuituprofiili olla hyvä ratkaisu. Paras sovellus hiilikuitukomposiiteille luultavasti saadaan silti valmistamalla osia menetelmillä, joissa osa on melko suuri ja toimii esimerkiksi samalla muotoa-antavana tai näkyvänä osana tai siihen saadaan muita ominaisuuksia jo muottivaiheessa. Eli esimerkiksi monokokkirakenne, jossa käytetään suurempia RTM-osia ja soveltuvissa osuuksissa suoraa hiilikuituprofiileja voisi toimia. Muita järkeviä, mutta pienempiä käyttökohteita ovat rakenteet, joissa painoa säästämällä voidaan siirtää auton massakeskipistettä alemmaksi ja lähemmäksi auton keskiosaa. Tällaisia alueita ovat esimerkiksi katon, etu- ja takapään rakenteet.

9.2 Akkukotelo

Tässä kappaleessa on kuvattuna mahdollinen esimerkkirakenne, jossa hyödynnetään pultruusioprofiileja akkukotelon rakenteessa. Tarkoituksena on esitellä yksinkertainen ja helposti liitettävä ratkaisu, jota voidaan käyttää metallisessa korirakenteessa perinteisen rakenteen korvaavana osana.

Keskitunnelina toimiva akkukotelo on pultruusion kannalta mielenkiintoinen sovelluskohde, sillä siinä vakiopoikkileikkaus ei ole niin suuri rasite. Akkujen aiheuttamat vaatimukset paloturvallisuudesta ja akkukotelon turvallisuudesta voidaan myös hyvin todennäköisesti täyttää käyttämällä sopivia kuituvaihtoehtoja ja matriisien lisäaineita ilman erillistä suojausta kotelon lisäksi. Etua rakenteeseen saadaan myös komposiittien lämmöneristävyydestä ja mahdollisuudesta tehdä rakenteesta sähköä eristävä sopivilla materiaalivalinnoilla.

Seuraavissa kuvissa on esitettynä rakenne-ehdotus akkukotelolle (Kuva 32 s. 113 ja Kuva 33 s. 113). Rakenne koostuu yhdestä suuresta profiilista (vihreä), metallisista nauhamaisista inserteistä (ruskea), päätylevyistä (harmaa) ja metallisista kierreinserteistä (sininen). Profiilirakenteessa hyödynnetään kaksinkertaisia seinämiä, joilla voidaan tuo-

da rakenteeseen jäykkyyttä ja lujuutta. Seinämien väliin on suunniteltu poikittaisia ripoja ja ruuvikanavia tuomaan jäykkyyttä rakenteeseen. Akku on tarkoitettu asennettavaksi pohjasta, jonka jälkeen rakenne suljetaan sopivalla pohjalevyllä. Pohjalevy voi tietysti olla osana myös akkupaketin rakennetta.

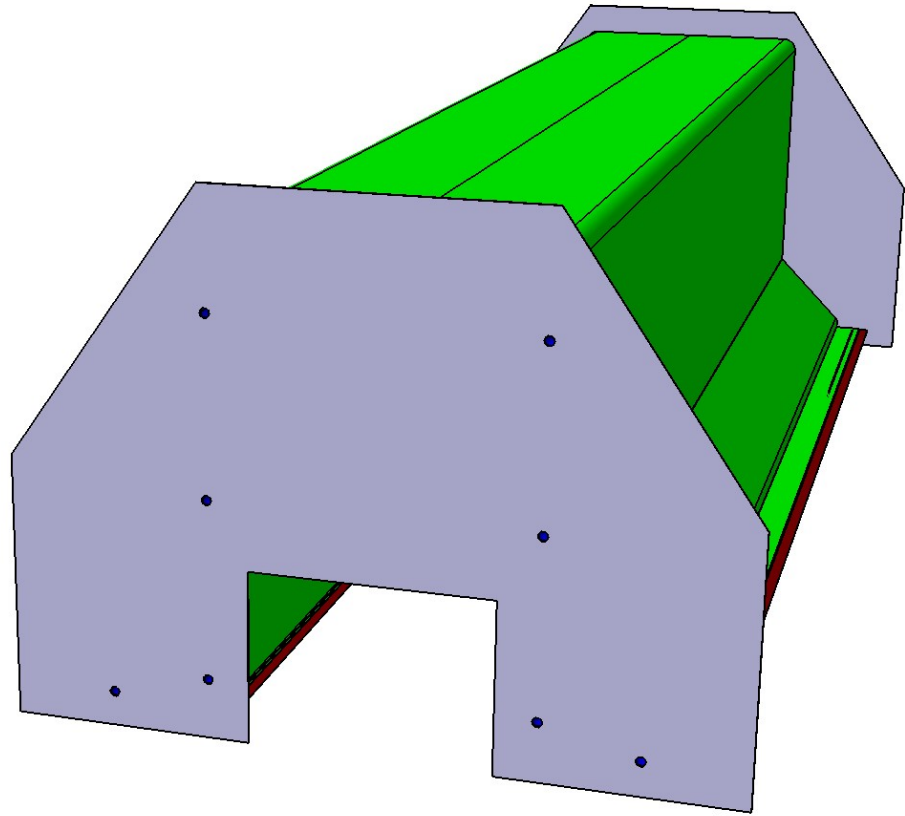
Ruuvikanavat ovat tarkoitettu päätylevyjen tai muiden mahdollisten rakenteiden helppoon liittämiseen. Suunnittelemalla ruuvikanava seinämien väliin voidaan niillä korvata jäykisteripoja ja samalla optimoida painoa ja vähentää monimutkaisuutta. Ruuvikanaviin on tarkoitus liimata pultruusioprosessin jälkeen metalliset kierreinsertit. Kierreinserttien avulla komposiittiin ei tarvitse yrittää valmistaa kierteitä ja täten edesauttaa vaurioiden syntymistä.

Kierreinsertteihin liitetään päätylevyt tai muut halutut kiinnityselementit pulttaamalla. Lisävarmistena voidaan käyttää myös välissä liimaa, jolla voidaan pyrkiä myös erottamaan esimerkiksi hiilikuidut metallista ja lisäämään korroosionkestoa. Päätylevyn sijaan rakenne voidaan tällä tavoin liittää esimerkiksi myös suoraan tulipeltiin tai muuhun liittämiseen tarkoitettuun kaulurirakenteeseen. Päätylevyn käyttö mahdollistaa myös rakenteen helpon niittaamisen tai hitsaamisen metallirakenteisiin.

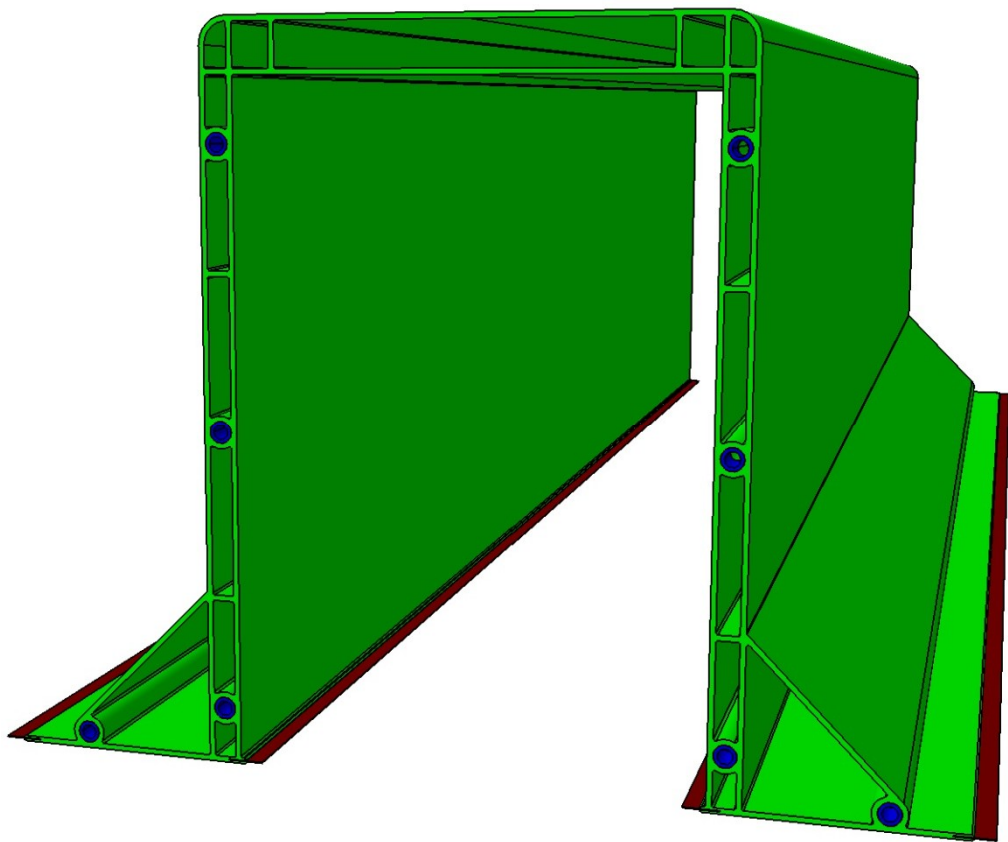
Inserttien ja liiman voidaan ajatella olevan riittävän hyvä ratkaisu rakenteen liittämiseen päädyistä, sillä oletetussa käyttötarkoituksessa ei päätylevyihin pitäisi kohdistua todella suuria vetäviä voimia. Tällöin voidaan arvioida inserttien liimaamisen riittävän niiden pysymiseen ruuvikanavissa.

Nauhamaiset insertit valmistetaan pultruusioprosessissa. Ne voitaisiin säilöä esimerkiksi rullalla ja vetää siitä kuitujen tapaan muotin lävitse. Kovettuva matriisi sitoo tällöin metallinauhan rakenteeseen. Riippuen sovelluksesta myös leveämmät enemmän levyä muistuttavat insertit voisivat toimia. Nauhamaisia inserttejä on tarkoitus hyödyntää pohjalevyn kiinnityksessä ja kotelon liittämässä muuhun auton pohjaan. Nauhojen sijaan voisi olla mahdollista kokeilla myös paksumpaa alumiinirakennetta, jos kotelo halutaan liittää hitsaamalla alumiinikoriin. Tällöin tosin menetetään nauhamaisen materiaalin antamat hyödyt materiaalin jatkuvuudessa.

Jos rakennetta halutaan niitata tai naulata metallikoriin on myös mahdollista jättää nauhojen käyttö kokonaan pois. Tällöin tosin vaaditaan mahdollisesti hieman pidemmät laipat, joista liittäminen tapahtuu. Kuitusuuntiin tulisi tällöin kiinnittää myös huomiota ja rakenteen kannattaisi olla mahdollisimman kvasi-isotrooppinen.



Kuva 32. Akkukotelo



Kuva 33. Akkukotelo ilman päätylevyä

Käytettävät kuidut voisivat olla esimerkiksi lasi-, hiili- ja aramidikuitua ja matriisina voisi toimia palonestolisäaineistettu epoksi. Tosin käyttämällä sopivaa kestumuovia voitaisiin saada korkeampi lämpötilankesto. Aramidin tarkoituksena on tuoda rakenteeseen iskunkestävyyttä, hiilikuiduilla saadaan aikaan luja ja jäykkä rakenne ja lasikuidut olisivat sijoitettuna inserttien ympärille suojaamaan niitä hiilikuidun aiheuttamalta korroosiolta.

Rakenteen tulisi kuitusuunniltaan olla mahdollisimman kvasi-isotrooppinen, mutta onttojen alueiden kuitusuunnat ovat käytännössä rajattu $0^\circ/90^\circ$ -rakenteeseen menetelmästä johtuen. Seinämäpaksuus kannattaa pitää mahdollisimman vakioituna jännitysten ja kovettumisen pitämiseksi mahdollisimman tasaisena.

Seinämäpaksuudeksi on esimerkissä valittu 3 mm. Muilta dimensioiltaan rakenne on noin 400 mm korkea, 1,8 m pitkä ja 260-450 mm leveä. Pultruusioprosessin suomissa rajoissa periaatteessa akkukotelon koko ei ole rajoittava tekijä. Käytettävät pultit ovat M8 kokoisia, mutta kaksoiseinämän paksuutta muuttamalla voidaan myös muita kokoja hyödyntää. Valittu nauhamainen insertti on 1 mm paksua terästä. Päätylevyjen materiaaliin ja paksuuteen ei ole kiinnitetty muuten suurempaa huomiota kuin että ne ovat metallia.

Rakennetta ei ole optimoitu jäykkyyden, lujuuden tai muiden arvojen mukaan eikä vaadittavaa pulttimäärää ole selvitetty. Tämä on myöskin käytännössä mahdotonta, sillä rakenteelle ei ole määritetty ympärillä olevaa autoja ja sen osia eikä siten myöskään siihen kohdistuvia voimia. Optimoimalla rakenne oikein ja käyttämällä sopivaa hiilikuitua voidaan kuitenkin saavuttaa erittäin jäykkä rakenne, jolloin esimerkiksi rakennetta voitaisiin hyödyntää jostain autosta valmistettavan avomallin valmistamiseen.

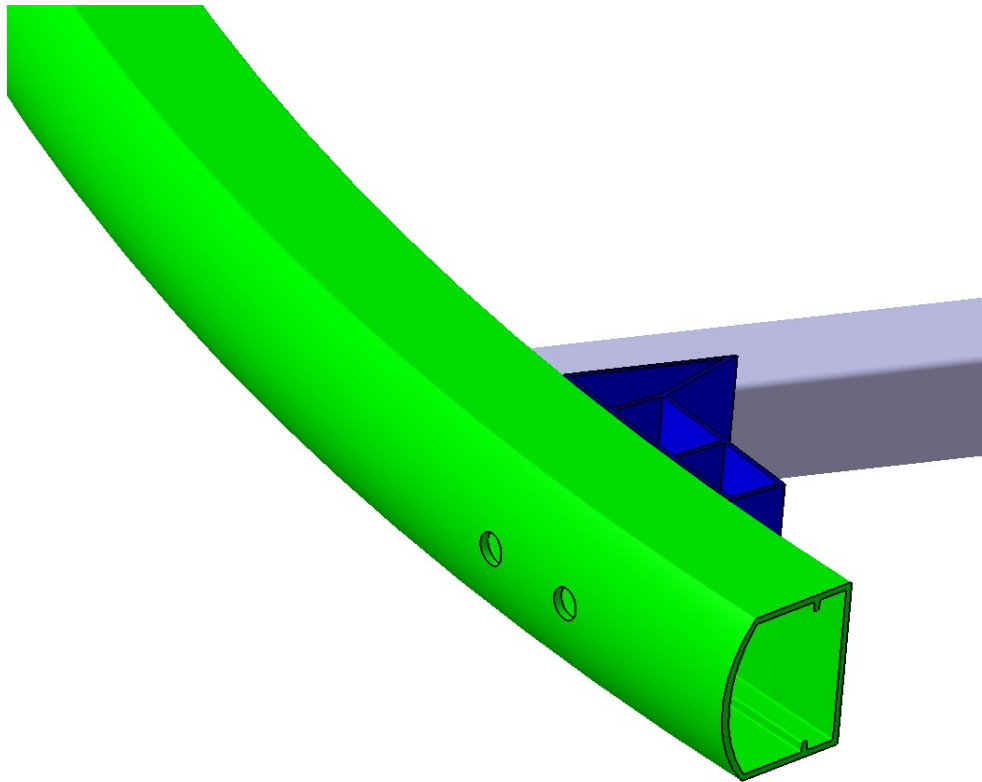
Verrattuna vastaavaan rakenteeseen, joka valmistetaan alumiinista niittaamalla saadaan aikaan paljon etuja. Esimerkiksi Fisker Karmassa käytettävä alumiininen akkukotelo vaatii 5 profiilia ja yli 100 niittiä. Tietyissä tapauksissa myös 3 profiilia saattaisi riittää, mutta silti tarvittaisiin kiinnityksessä suuri määrä niittauksia. Yhdellä suurella profiililla säästetään huomattavasti niittien määrässä ja rakenne on yhtenäisempi, jolloin myös voimat siirtyvät tasaisemmin rakenteessa. Päätyjen kiinnityksessä ei alumiinirakenteella tarvita kierreinserttejä, mutta niiden käyttö voidaan perustella vähentyneellä niittimäärällä. Alumiininen rakenne voitaisiin kasata tosin myös hitsaamalla jolloin erot kaventuvat jossain määrin, mutta silloin tulee huomata hitsauksen aiheuttamat vaatimukset ja haasteet.

Ongelmakohtia ja suunnittelun kannalta hankaluuksia voivat aiheuttaa insertit ja hitsaukset. Tällaista rakennetta suunniteltaessa tulisi tutkia metalli-inserttien pysyvyys ja hitsauksen vaikutus lähellä olevaan matriisiin. Tällöin voidaan optimoida geometriat, joilla rakenne on toteutettavissa.

9.3 Puskuripalkki

Toimiva sovelluskohde pultruusioprofiileille voisi olla myös metallisten puskuripalkkien korvaajana. Riippuen sovelluskohteesta voitaisiin käyttää suoraa tai jatkuvan kaarevuussäteen profiileita. Kiinnitys voisi tapahtua pulteilla korjattavuuden parantamiseksi. Kiinnitys pitkittäispalkkeihin voisi tapahtua esimerkiksi käyttämällä välissä tai palkin sivussa erillistä kiinnitykseen tarkoitettua profiilia. Seuraavassa kuvassa on esitetty kuvitteelliseen autoon kyseinen ratkaisu.

Vihreällä värillä on esitetty pultruusioprofiili, sinisellä kiinnitysprofiili ja harmaalla pitkittäispalkki. Pultruusioprofiilin käyttö mahdollistaa törmäysominaisuuksien optimointia muodon avulla. Kiinnitystä voidaan myös helpottaa käyttämällä esimerkiksi kuvassa näkyviä laippoja muodostamaan kanava profiilirakenteen sisään. Tätä voidaan hyödyntää esimerkiksi aluslaattojen alustavaan paikoitukseen. Kyseisen esimerkin palkki on tarkoitettu kiinnitettäväksi ja kiristettäväksi etupuolella olevien reikien kautta pulteilla siniseen profiiliin. Kiinnitysprofiili voisi olla alumiinia tai komposiittia. Esimerkiksi alumiinirunkoisessa autossa profiili voitaisiin hitsata pitkittäispalkkiin. Profiilia voidaan myös pidentää puskuripalkkia korkeammaksi jolloin sitä voidaan käyttää myös muiden ympäristössä olevien osien kiinnittämiseen.



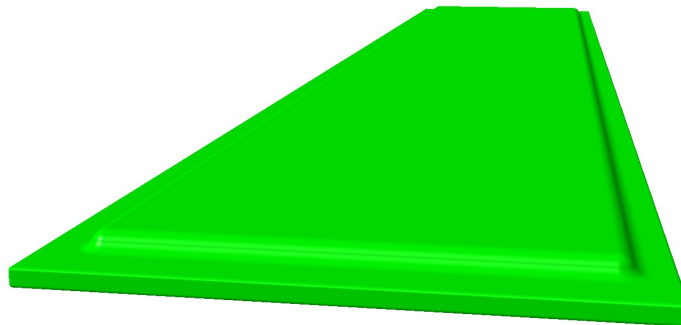
Kuva 34. Esimerkki puskuripalkista

Etuna metallisiin rakenteisiin on alentunut massa sekä mahdollisuus parempaan törmäysenergian absorboimiseen. Lisäksi etuna on painopisteen siirtyminen lähemmäs auton keskipistettä. Haittapuolena on pulttuusion tapauksessa rajoitetut muodot.

9.4 Pohjalevyt ja muut suorat levypinnat

Pultruusioprofiileja voitaisiin hyödyntää korvaamaan metallisia levypintoja, kuten auton pohjalevyjä. Pultruusio soveltuu tosin lähinnä suoriin pintoihin. Pultruusioprofiilit mahdollistavat kerroslevyrakenteen valmistamisen suoraan prosessissa. Tällöin saataisiin yhdellä menetelmällä rakenne, joka on jäykkä ja samalla eristää ääntä ja lämpöä. Metalleihin verrattuna saadaan lämmöneristyksessä myös itse komposiittia käyttämällä johtuen niiden alhaisesta lämmönjohtavuudesta. Metallisessa kerroslevyrakenteessa täytyisi levyn lisäksi lisätä eristekerrokset ja se on hankalemmin valmistettavissa. Perinteisissä teräskorissa autoissa pohjalevynä käytetään vain yhtä kerrosta, jonka päälle asennetaan erikseen vaadittavat eristeet ynnä muut. Ilman kerroslevyrakennetta puolestaan menetetään jäykkyyttä, jolloin pultruusioprofiilin etu korostuu. Suurissa kokonaisuuksissa tosin lämpölaajeneminen voi olla suurempi ongelma, ja tällöin materiaalivalinnat niin komposiitin kuin esimerkiksi kiinnitysliiman kohdalla ovat tärkeitä. Kerroslevyrakenteilla myös iskuvauriot ja niiden korjaaminen on hankalampaa.

Sivuihin voidaan jättää ydinaineeton alue laipaksi, josta levy voidaan kiinnittää ympäröivään rakenteeseen. Lisäksi jättämällä sopivin välein rakennetta ilman ydinainetta voitaisiin luultavasti valmistaa myös rakenteen päihin alueet, joilla paneeli voidaan kiinnittää myös päistään. Rakenne on esitettyä seuraavissa kuvissa.



Kuva 35. Pultruusiolla valmistettu pohjalevy



Kuva 36. Pohjalevyn poikkileikkaus

Kuvissa vihreä väri esittää komposiittia ja keltainen ydinainetta. Kuvista voidaan helposti nähdä kiinnityslaipat sekä ydinaine rakenteen keskellä. Yhdistämällä pohjalevyn tyylinen rakenne akkukoteloon sekä helmapalkkeihin voitaisiin valmistaa myös yhtenä kokonaisuutena suuri osa, joka toimisi matkustamon pohjana. Ongelmaksi voisi muodostua kuitenkin mahdollisten valmistajien vähäisempi määrä sekä lämpölaajenemisen suurempi vaikutus.

9.5 Liituskappaleet

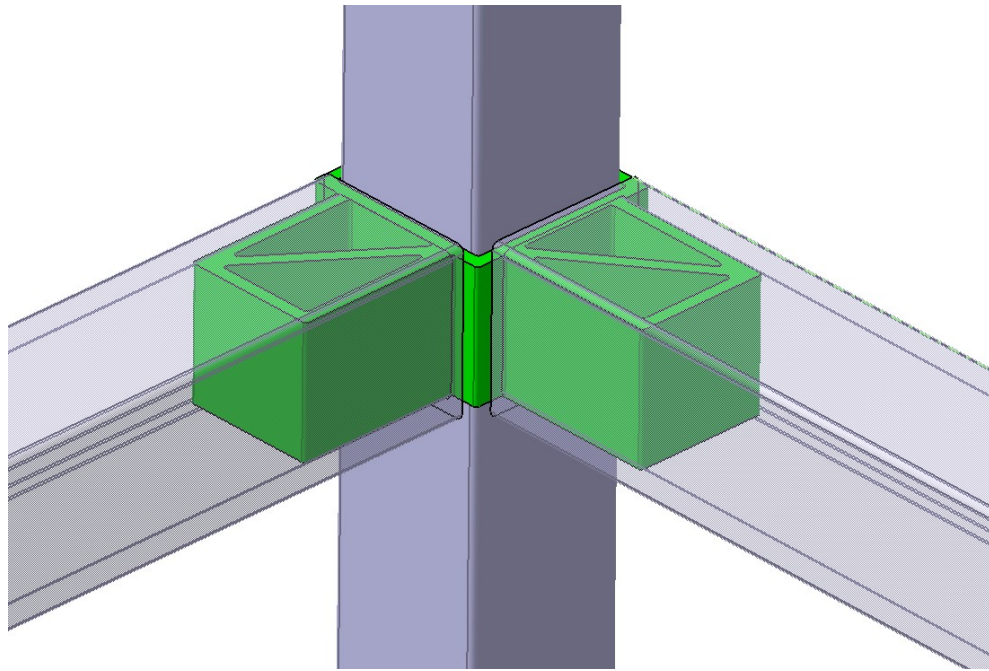
Aiemmat esimerkit ovat keskittyneet lähinnä eri tyyliin pultruusioprofiileihin. Seuraavissa esimerkeissä otetaan esille myös muilla menetelmillä valmistettavia ratkaisuja. Liituskappaleita valmistettaessa muilla menetelmillä kuin pultruusiolla voidaan saada huomattavasti monimutkaisempia rakenteita aikaan. Kappale on jaettu ensin ehdotuksiin menetelmistä ja materiaaleista, jonka jälkeen on lyhyitä esimerkkiratkaisuja toteutettuna erilaisilla menetelmillä.

9.5.1 Mahdolliset valmistusmenetelmät ja materiaalit

Erilaisia liitoselementtejä voidaan valmistaa lukuisilla eri menetelmillä, joiden rajoitteet ja mahdollisuudet määrittävät minkälaisia ominaisuuksia lopulliseen osaan voidaan saada. Käytettävät materiaalit rajoittuvat lähinnä kertamuoveista epokseihin ja kesto-
muoveista esimerkiksi polyamidiin. Lujitteina voidaan lähes kaikissa menetelmissä käyttää lasi-, basaltti- tai hiilikuitua. Lasi- ja basalttikuitu voivat tosin olla joissain tapauksia mekaanisilta ominaisuuksiltaan liian heikkoja, mutta hiilikuitujen kallis hinta huokuttelee pohtimaan myös niiden käyttöä ominaisuuksien ja painon kustannuksella. Myös muita kuituja, kuten aramidia, voitaisiin käyttää, mutta niitä kannattaisi todennäköisesti hyödyntää ainoastaan paikoissa, joissa tarvitaan lisättyä iskun- ja vaurionkestävyyttä.

Pultruusiorofiileja voitaisiin liittää toisiinsa suoraan ilman erillisiä liituskappaleitakin esimerkiksi pulttaamalla tai liimaamalla. Tällöin profiileissa kannattaisi hyödyntää geometrisiä lukituksia, joita voitaisiin valmistaa suoraan profiiliin sekä työstämällä. Lisäksi voitaisiin käyttää myös liitokseen kiinnitettävää levyä tai pientä kulmapalaa johon liitettävät kappaleet lisäksi tuetaan. Profiileista voitaisiin pyrkiä valmistamaan myös erillisiä liituskappaleita, jotka muodostuvat useasta yhteenliitetystä ja työstetystä profiilista. Liituskappaleen profiilit voisivat esimerkiksi mennä osittain liitettävien profiilien sisään tai voitaisiin käyttää kokonaan profiilien sisään menevää liituskappaletta samaan tapaan kuin joissain ikkunaprofiileissa. Ikkunaprofiileissa voidaan kulmat leikata 45 ° kulmaan ja niiden yhdistämiseksi käytetään profiilien sisälle menevää pientä kulmapalaa.

Seuraavassa kuvassa on esitettyä esimerkki tavasta, jolla profiilia voitaisiin käyttää liittämiseen. Vihreän värinen profiilia voidaan käyttää kolmen muun profiilin liittämiseen. Kahteen suuntaan liitos tapahtuu liitettävän profiilin sisäänmenevällä osalla ja yhdessä suunnassa liitettävä profiili kulkee liitosprofiilin lävitse. Päädyistä liitettävät profiilit on muutettu osittain läpinäkyväksi, jotta liitosprofiilin muoto olisi selkeämpi. Profiilit voidaan liittää toisiinsa liimalla tai kesto-
muovien tapauksessa hitsaamalla. Myös mekaanista liittämistä voidaan käyttää, mutta tällöin tarvitsee työstää liittimille reiät. Liitososa voisi olla myös alumiinia jolloin liitosmenetelmänä voisi toimia liimaamisen ja mekaanisista liittimistä myös rivtac, joka ei tarvitse etukäteen tehtyjä reikiä.



Kuva 37. Profiililiitos

Profiilien käyttö suoraan liittämällä olisi melko edullinen tapa, sillä ylimääräisiä osia ja niihin liittyviä kustannuksia ei tule. Myös pienet kulmapalat ja levyt voisivat olla edullisia, sillä niitä voidaan helposti valmistaa standardituotteista. Suora liittäminen voisikin toimia jigien avulla suuressakin sarjakoossa, mutta menetelmän rajoitteista johtuen myös liitokset olisivat melko rajoittuneita. Esimerkiksi moneen suuntaan lähtevät liitokset voivat olla haastavia liittää ja niihin voidaan tarvita erikoisempia kulmapaloja tai levyjä. Profiileista valmistettavat liitospalat vaativat suoraa liittämistä enemmän investointeja. Niillä tosin voi olla helpompi tehdä erilaisia liitoksia. Rajoitteena profiileilla tulee nopeasti vastaan niiden yksinkertaisuus jolloin niitä ei voida helposti hyödyntää osina, joissa yhdistyy monta erilaista funktiota. Profiileja ajatellessa tulee myös huomioida mahdollisuus valmistaa liitosprofiilit alumiinista, jolloin galvaaninen korrosio tulee huomioida ja voidaan käyttää hitsausta liitososan kasaamiseen.

Liituskappaleita voitaisiin valmistaa myös laminoimalla. Tällöin voitaisiin laminoida suoraan valmis liitososa joka mahdollistaa eri suuntiin tehtävät liitokset. Käsins laminointi voisi soveltua esimerkiksi prototyyppien valmistamiseen, mutta prepreglaminointia tai vakuuamavusteista märkälaminointi voitaisiin käyttää jo erikokoisissa sarjatuotannoissa. Laminoinnin etuja on esimerkiksi mahdollisuus pitkiin kuituihin ja kuitusuuntien helppoon muokkaamiseen, jolloin myös mekaanisia ominaisuuksia voidaan räätälöillä osalle sopivaksi. Märkälaminoinneissa haitaksi muodostuu hartsi, joka märkänä on hankalampaa käsitellä kuin kuivat prepregit. Märkälaminoinnille on eduksi myös melko alhaiset kustannukset jos ei käytetä autoklaavia.

Käyttämällä RTM- tai RRIM- tai SRIM-menetelmiä voitaisiin sarjatuotantomäärissä valmistaa erilaisia liituskappaleita. RTM ja SRIM mahdollistaisivat suunnatut luji-tepakat ja paremmin kontrolloidut mekaaniset ominaisuudet. Menetelmissä voitaisiin

lisäksi hyödyntää inserttejä, jolloin kiinnityspisteet muille rakenteille voitaisiin valmistaa helpolla. Menetelmällä voitaisiin saada myös rakenteellisesti monimutkaisempia muotoja, jolloin niillä voi olla myös muita funktioita kuin liitos rakenteellisesti kantavien profiilien välillä. Ne voivat toimia myös esimerkiksi liitospintoina paneeleille tai sisustaosille suoraan. Joissain tapauksissa voitaisiin valmistaa myös suoraan tai lähes suoraan a-pintaa, jolloin osan käyttökohteet kasvavat entisestään.

Ruiskuvalu voisi olla myös varteenotettava vaihtoehto liitoskappaleille. Menetelmällä voitaisiin valmistaa monimutkaisia muotoja ja mittatarkkoja kappaleita. Menetelmä mahdollistaa myös rakenteita, jotka muilla menetelmillä ovat hankalia tai mahdottomia valmistaa. Ruiskuvalamalla voitaisiin valmistaa esimerkiksi jäykistävä hunajakennomainen riparakenne. Tämä toisi osaan jäykkyyttä ja mekaanista kestävyyttä. Menetelmällä voidaan osaan lisätä myös inserttejä suoraan muotissa, mutta kustannussyistä ne kannattaa lisätä vasta jälkikäteen.

Menetelmän ongelma on tosin kalliit laitteistot varsinkin suurilla kappaleilla. Muottikustannukset voivat olla myös melko kalliit, vaikka pienissä sarjoissa voidaankin käyttää esimerkiksi jyrstyttä alumiinimuotteja. Ruiskuvalussa ei voida myöskään käyttää jatkuvaa kuitua ja kuidut suuntautuu virtauksen suuntaan muotissa. Tällöin mekaaniset ominaisuudet jäävät usein muita menetelmiä huonommiksi ja niitä ei voida räätälöidä yhtä vapaasti. Johtuen lyhyistä jossain määrin satunnaisesti suuntautuneista lujitteista kappaleet ovat tosin lähempänä isotrooppista kuin muilla menetelmillä, jolloin myös niiden suunnittelu on helpompaa. Ruiskuvalussa käytetään pääasiassa kestopuoveja, jolloin osien kierrätettävyys paranee. Osia voidaan myös liittää hitsaamalla muihin yhteensopiviin kestopuoviosiin, jolloin saadaan lisää mahdollisuuksia liittämiseen. Muita etuja kestopuoveilla on parempi lämmönkestävyys jolloin niitä voidaan ilman suojausta käyttää myös hankalammissa olosuhteissa. Lyhyiden lujitteiden takia joudutaan käyttämään rakenteellisesti tärkeissä osissa hiilikuitua riittävän mekaanisen lujuuden ja jäykkyyden takaamiseksi. Tällöin kappaleiden kustannukset nousevat.

Puristusmuovaus-menetelmät voisivat olla myös hyvä vaihtoehto liitoskappaleille. Tarvittavat puristimet ja prepreg- ja semipreg-materiaalit tosin lisäävät kustannuksia. Osat voivat olla myös geometrisesti rajoittuneempia kuin muilla menetelmillä. Menetelmät soveltuvat tosin a-pinnan valmistukseen, jolloin niillä valmistettuja osia voitaisiin käyttää esimerkiksi monokokeissa.

Liitoskappaleina voitaisiin käyttää myös alumiini tai magnesium valuja. Tällöin kappaleiden mekaaniset ominaisuudet ovat helposti ymmärrettävissä isotropian vuoksi. Samalla häviää kuitenkin myös mahdollisuus vaikuttaa ominaisuuksiin kuitusuuntia muuttamalla. Metalliosissa täytyy myös huomioda hiilikuitujen kanssa mahdolliset korroosio-ongelmat ja suojata ne oikeaoppisesti.

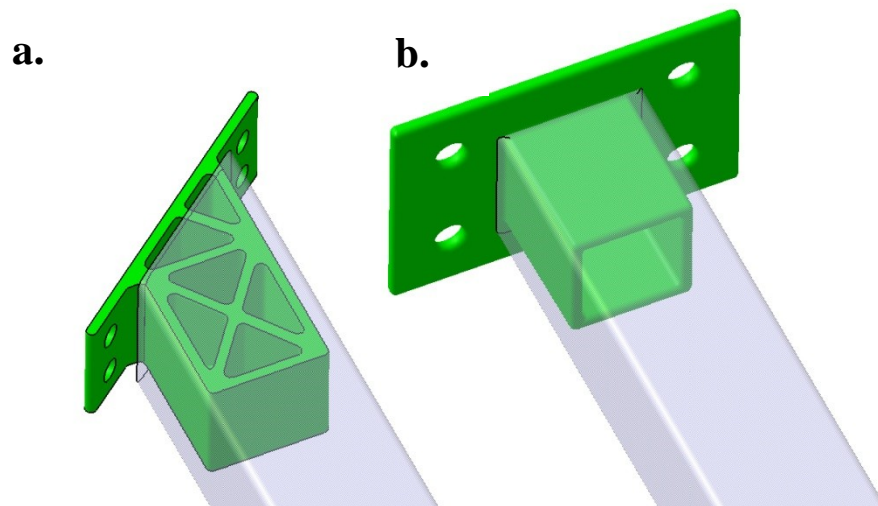
Liitoselementteinä voitaisiin käyttää myös 3D-tulostimella valmistettuja metalliosia. Menetelmä mahdollistaisi monimutkaiset muodot, jotka muilla menetelmillä ovat hankalia. Menetelmä olisi varsinkin monimutkaisia osia valmistettavissa prototyyppisiin, konsepteihin ja mahdollisesti jopa pieniin sarjoihin soveltuva. Hiilikuitujen kanssa tulee edelleen samat vaikeudet korroosion kanssa kuin valuosilla. Tosin 3D-

tulostuksella on mahdollista valmistaa myös titaaniosia, joilla korroosio-ongelmia ei ole. Titaaniosilla tosin hinta voi olla melko korkea ja niiden käyttö tulisi olla hyvin perusteltu.

Liitoskappaleita voitaisiin valmistaa myös yhdistämällä useampi eri menetelmä. Liitoskappale voisi muodostua esimerkiksi kahdesta kuoresta, jotka yhdistetään toisiinsa mekaanisesti, liimaamalla tai hitsaamalla. Kuoriosien ei välttämättä tarvitse olla samalla menetelmällä valmistettuja, vaan niissä voidaan hyödyntää eri menetelmiä funktionaalisuuden parantamiseksi. Yksi kuoriosia voidaan valmistaa myös esimerkiksi usean eri menetelmän avulla. Esimerkiksi puristusmuovaamalla voidaan tehdä jatkuvasta kuidusta kuormitussuuntien mukaan optimoitu rakenne johon ruiskuvaletaan hunakennorakenne jäykistämään ja parantamaan osan kestävyyttä. Ruiskuvalamalla voitaisiin valmistaa myös suoraan ruuvitorneja, joita voitaisiin käyttää mekaaniseen liittämiseen esimerkiksi pulttien ja inserttien avulla. Ruiskuvalun soveltuvuutta suoraan kertamuoviprofiiliin tulisi tutkia, sillä kiinnittyminen voi olla ongelma. Ruiskuvalulla voidaan kuitenkin tehdä rakenteita suoraan esimerkiksi kestumuvipohjaisesta hiilikuitulujitteisesta tepex-prepregista puristusmuovaamalla valmistettuun osaan (138).

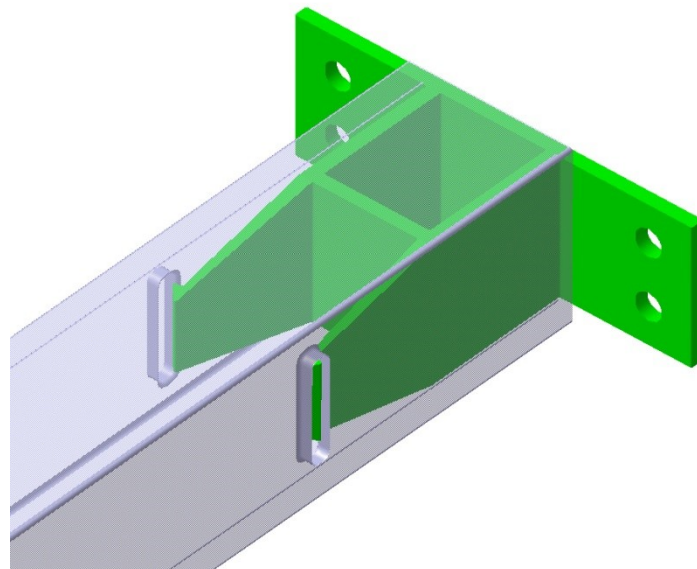
9.5.2 Päätilyiitos

Pultruusioprofiilien liittämiseen muuhun rakenteeseen voitaisiin käyttää esimerkiksi erilaisia päähän liitettäviä profiileja. Yksinkertaisimmillaan liitoselementti voisi liittyä profiiliin sisä- tai ulkopintaan liimalla tai mekaanisesti. Monimutkaisemmin tehtynä päässä oleva liitin voitaisiin liittää hyödyntäen profiiliin tehtäviä muotoja ja lukittamalla liitin siihen esimerkiksi liimalla ja napsautusliittimillä. Liitin voitaisiin myös esimerkiksi suoraan valaa profiilin päähän, jolloin liitos perustuu liittimen muovin kutistumiseen ja puristumiseen profiilin ympärille. Tällöin kiinnitystä voitaisiin parantaa esimerkiksi tekemällä juovat profiilin päähän tai karhentamalla profiilin pinta liitosalueelta. Seuraavassa kuvassa on esitettyä kaksi erilaista liitintä (vihreä). Oikeanpuoleinen osa (Kuva 38b) on valmistettavissa esimerkiksi ruiskuvalamalla ja voidaan liittää mekaanisesti ympäröivään rakenteeseen. Vasemman puoleinen liitososa (Kuva 38a) voitaisiin puolestaan valmistaa pultruusiolla tai alumiiniekstruusiolla ja se voidaan liittää vinoon seinämään, jollainen voisi olla esimerkiksi auton a-pilarin tai tuliseinämän läheisyydessä. Profiilit joihin liitin kiinnitetään ovat kuvassa osittain läpinäkyviä, jotta rakenne olisi helpompi ymmärtää.



Kuva 38. Päätuliittimiä

Seuraavassa kuvassa on esitettyä kuinka päätyliitos voitaisiin toteuttaa napsautusliittimien avulla. Vihreällä esitettävä liitin voidaan valmistaa esimerkiksi alumiinista ekstruusiolla tai pultrusion avulla. Liitin voidaan työntää suoraan paikoilleen ja kuvassa olevien hahlojen kohdalla lukot napsahtavat paikoilleen. Tällöin kappale paikottuu ja kiinnittyy mekaanisesti helpon prosessin avulla. Liitoskappaleen ja profiilin väliin voidaan lisäksi laittaa liimaa jolla saadaan lopullinen rakenteellinen lujuus liitokseen. Vastaavan tyylisellä liittimellä, jossa toisellakin puolella on kiinnityslevyn sijaan napsautusliittimet voitaisiin liittää esimerkiksi kaksi profiilia tai profiili suoraan levyyn ilman perinteisiä nittejä tai pultteja.



Kuva 39. Päätyliitos napsautusliittimellä

Napsautusliittimen hyödyntäminen lisää kuitenkin liitoksen suunnittelun vaativuutta huomattavasti. Liitettävään profiiliin tarvitsee työstää reiät napsautusliittimen lukoilta

jolloin myös sen rakenteellinen lujuus heikkenee. Napsautusliittimen geometriat tulee suunnitella myös melko tarkkaan ja ne riippuvat käytetyistä materiaaleista niin profiileissa kuin liittimissäkin. Kyseisessä tapauksessa lukot ovat 45 mm pitkiä ja ne kapenevat ja ohenevat 1:2 pituus suunnassa. Tällöin voidaan vähentää syntyviä kuormituksia, mutta samalla myös liitoslujuus heikkenee. Lukkojen kiinnityskoukkujen kulmat eivät ole kohtisuorassa lukon varteen nähden, sillä käyttämällä tarkemmin määriteltyä pienempää kulmaa voidaan vähentää toleranssien vaikutusta. Lisäksi materiaalien välinen kitka saa pienemmätkin kulmat käyttäytymään 90° kulman tavoin.

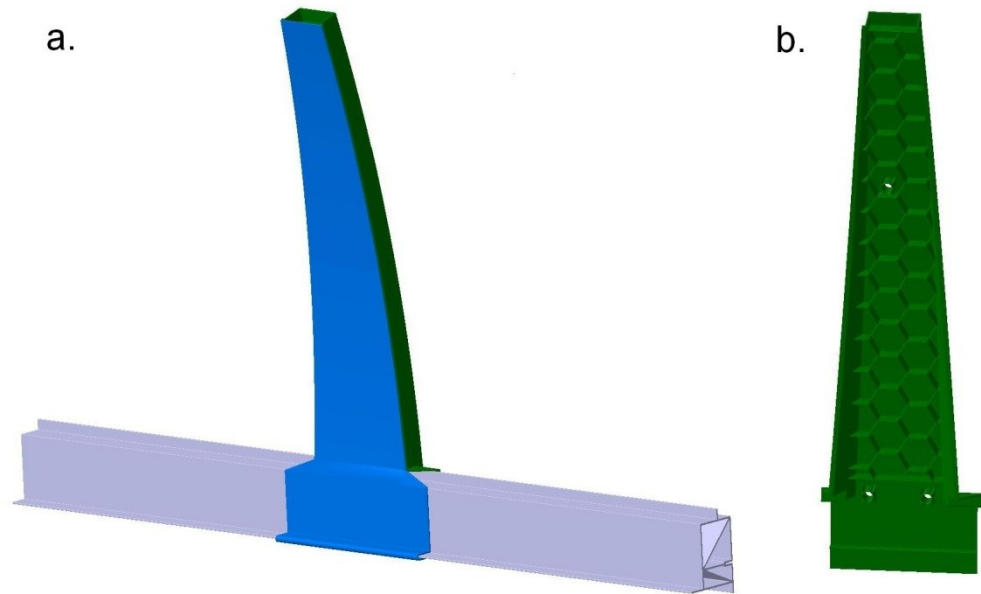
Käytetty lukkogeometria soveltuu esimerkiksi lasikuitulujitetuille profiileille, mutta ei hiilikuitulujitteisille tai alumiinisille, sillä niissä syntyisi liian suuret jännitykset. Esimerkiksi lukon pituutta vähentämällä 10 mm syntyvät jännitykset ovat liian suuret joillekin lasikuitukomposiiteille ja tarvittava kasausvoima voi kasvaa jopa kolminkertaiseksi. Materiaalivalinnoissa tulee myös huomioida lämpölaajenemisen vaikutus, sillä erilailla laajenevat materiaalit voivat aiheuttaa liian suuria jännityksiä lukon kiinnitykseen.

Pultruusioprofiilien kohdalla suunnittelun monimutkaisuutta lisää erilaiset kuitusuunnat ja niiden vaikutukset. Esimerkin omaisesti voidaan ajatella kahta ääripäätä eli pelkästään poikittaisia tai pitkittäisiä kuitusuuntia liitoskappaleessa. Pitkikkäisiksi ajatellaan esimerkissä pelkästään liittimen asennussuunnassa kulkevia kuituja. Poikittaisia ovat tästä 90° kulmassa kulkevat kuidut. Tosin liitoskappaleen asennussuunnan mukaan suunnatut kuidut eivät olisi ainoana kuitusuuntana edes järkevästi toteutettavissa. Ainoastaan poikittain suunnatut puolestaan olisivat pultruusioprosessin kannalta helpompia, sillä kyseessä on esimerkin profiilin vetosuunta. Poikittaiskuiduilla kuidut eivät juurikaan vaikuta ominaisuuksiin, jolloin liitoksen lujuus ja liitoskappaleen jäykkyys on hyvin paljon matriisiaineen ominaisuuksista riippuvainen. Tällöin tosin myös liitoksen asentaminen on helpompaa, sillä alhaisemmasta jäykkyydestä johtuen ei vaadita yhtä paljon asennusvoimaa (noin 90 N). Pitkittäiskuidut puolestaan antaisivat liitokselle lujuutta, jolloin liitos olisi kestävämpi, mutta samalla myös vaatisi kolme kertaa enemmän asennusvoimaa (noin 290 N). Asennusvoiman kasvu on käytännössä suoraan verrannollinen jäykkyyden kasvuun. Liittämisen kannalta poikittainen suunta olisi optimaalinen, mutta samalla liitoksen lujuus olisi heikko. Pitkittäinen suunta puolestaan liittämisen kannalta hankalampi, mutta samalla liitoslujuuden puolesta parempi. Yhdensuuntaiset kuidut haittaisivat myös liitoskappaleen toisen pään mekaanista liittämistä, kuten liittämiskappaleesta on opittu. Tällöin paras ratkaisu olisi moneen suuntaan oleva lujitus jolloin liitoksen lujuus olisi hyvä, liittämiseen tarvittava voima ei olisi liian suuri ja kappale kestäisi paremmin eri suuntaisia kuormituksia.

9.5.3 B-pilari ja sen liittäminen

Henkilöauton b-pilari on hyvä esimerkki osasta, jossa tarvitaan uusia liitosratkaisuja komposiitteja hyödynnettäessä. Esimerkin tilanne (Kuva 40a) on ajateltu space frame runkoon, jossa helman pitkittäispalkki on valmistettu pultruusiolla. Esimerkin b-pilarin ulkokuori (Kuva 40b) voidaan valmistaa joko ruiskuvalulla tai puristusmuovauksen ja

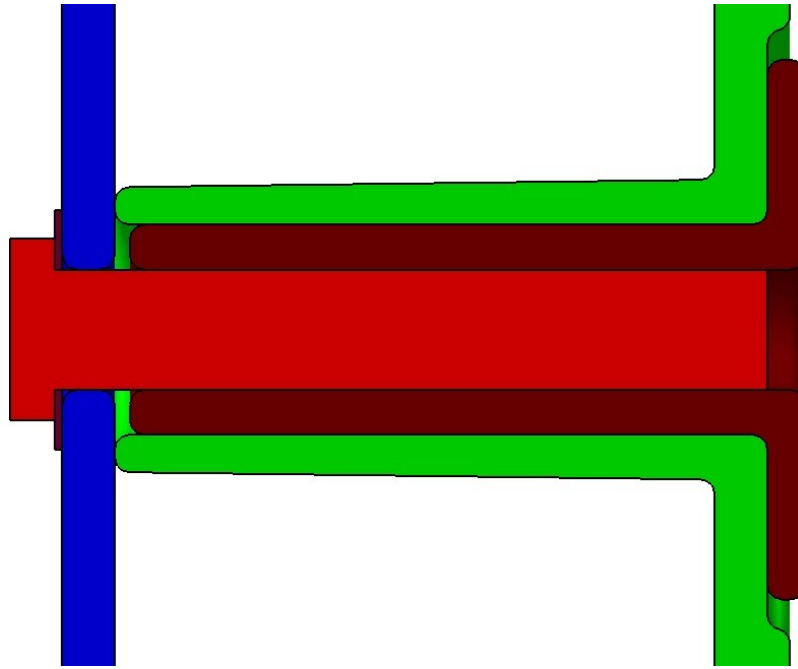
ruiskuvalun yhdistelmällä. Yhdistelmäosaa voidaan hyödyntää, jos halutaan esimerkiksi vaikuttaa osan ominaisuuksiin enemmän kuin ruiskuvalulla on mahdollista tai havaitaan sen mahdollistavan paremman paino- tai lujuusoptimoinnin. B-pilarin sisäpuoleinen kuori on valmistettu esimerkin tapauksessa ruiskuvalamalla, mutta ulkokuoren tapaan myös monimenetelmäosa olisi mahdollinen ja on todennäköisesti jopa parempi vaihtoehto. Muuttamalla osan geometriaa erilaiseksi myös pultruusiolla valmistettava pieni kappale helman läheisyydessä olisi mahdollinen.



Kuva 40. B-pilari (a) ja B-pilarin ulkokuori (b)

Ulko- ja sisäkuoren reunoilla kulkeva laippa mahdollistaa osalle pitkän yhteinäisen sauman, jolloin myös sen ominaisuudet kokonaisuutena paranevat. Kuoret voidaan liittää toisiinsa liimaamalla tai hitsaamalla. Tällöin tulee kuitenkin huomioida korjattavuudessa esimerkiksi pääsy turvavyömekanismiin sen vaihtamiseksi. Mekaaninen liitos voidaan tehdä esimerkiksi pulttien ja kuvissa näkyvien ruuvitornien avulla. Kuoriosat voidaan liittää pitkittäispalkkiin mekaanisesti työstämällä profiilissa näkyviin laippoihin reiät ja liittämällä sen mekaanisesti ruuvitornien avulla. Lisäksi helman sivuissa olevat suuret yhteydessä olevat alueet tulisi hyödyntää liimaamista varten. Pystylaippoja voidaan lisäksi hyödyntää kyljen ulkopaneeleissa sekä ovien saumauksessa.

Seuraava kuva esittää ruuvitornilla tehtävän liitoksen rakenneperiaatteen. Vihreä esittää ruiskuvalettua osaa, jossa on ruuvitorni ja sininen tämän kuoriosan vastakappale. Iso ruskea osa esittää inserttiä, jonka laippa on ruiskuvaluosaan valetussa syvennyksessä. Pultin (punainen) ja sinisen vastakappaleen väliin asetetaan aluslevy ja pultti kiristetään inserttiin kiinni. Insertti voidaan kiinnittää esimerkiksi liimaamalla tai kuumentamalla ja painamalla kohdilleen riippuen liitoksessa käytettävistä toleransseista ja raoista.



Kuva 41. Liitostapa

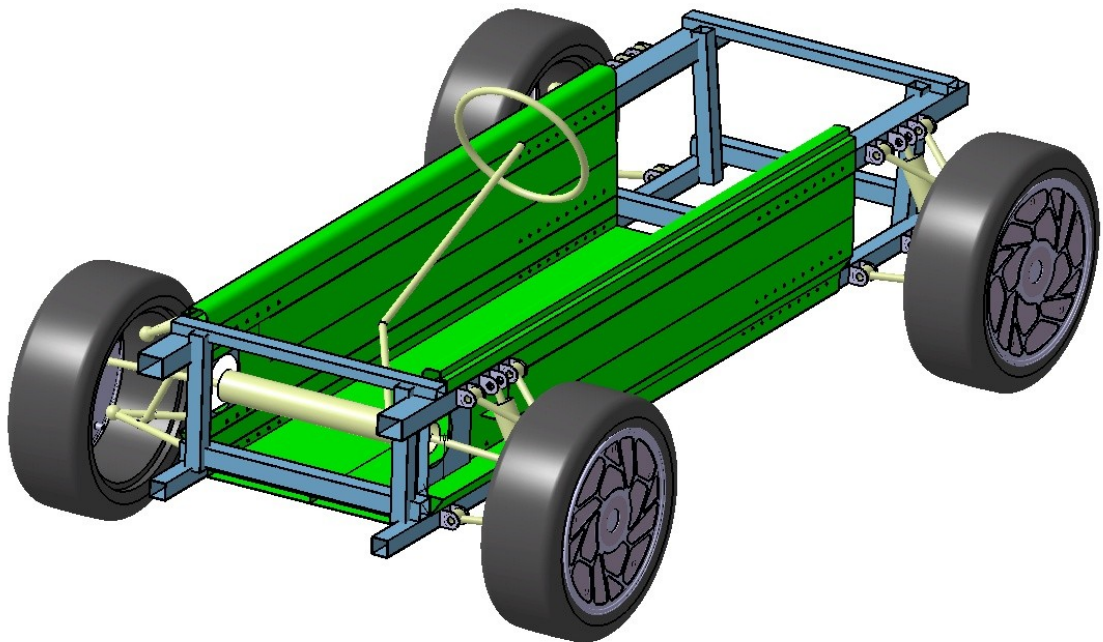
Ruuvitorneja voidaan käyttää esimerkiksi ruiskuvalun jälkeen asennettavien metalli-inserttien avulla. Torneissa on reikä, jotta niissä voitaisiin käyttää inserttiä, jossa on suuri kaulus toisessa päässä. Tämä kaulus tukeutuu pilarin ulkoseinämiin ja jakaa siten mekaanisesta liittämisestä johtuvia rasituksia suuremmalle alueelle. Samalla liitoslujuus paranee, sillä insertti saa tukea kiristysuuntaan nähden poikittaisessa suunnassa.

Materiaaliksi osiin on valikoitu hiilikuitu. Käytännössä ruiskuvaluosan täytyy olla hiilikuitulujitteinen, jolloin myös sen hinta on kallis. Tästä syystä ei ympäröivää rakennetta välttämättä kannata suunnitella ainakaan mekaanisesti huonommista materiaaleista. Hiilikuidun hinnan takia osat soveltuvat käytännössä ainoastaan hieman keskimääräistä kalliimman hintaluokan tuotteisiin. Ruiskuvaluun voisi soveltua esimerkiksi 40 painoprosenttia hiilikuitua sisältävä polyamidi, kuten EMS Grivory GC-4H(139), jolla on suuri jäykkyys ja alhainen tiheys, mutta samalla suhteellisen alhainen lujuus ($E = 28 - 31 \text{ GPa}$, $\rho = 1,34 \text{ g/cm}^3$, $\sigma_{\text{veto}} = 225 - 260 \text{ MPa}$).

B-pilariin kiinnittyviä osia on pyritty myös ajattelemaan rakenteessa. Oven lukon vastakappale ja takaoven saranat voidaan kiinnittää rakenteeseen ennen kuorien toisiinsa yhdistämistä. Osia varten voidaan tarvittaessa valmistaa jo muotissa sopivat syvennökset, jos ne koetaan tarpeellisiksi. Osien vaatimat kiinnitysreiät tulee tosin työstää jälkikäteen. Rakenteessa on ajateltu myös turvavyön asettamia vaatimuksia. Mekanismi voidaan asentaa ruuvitornien avulla halutulle korkeudelle pilarin sisälle. Ulko- ja sisäverhoiluja varten voidaan käyttää ruuvitorneja, joihin saadaan esimerkiksi kiinnikkeet tai osat suoraan kiinni. Pintaan voidaan myös liittää esimerkiksi hitsaamalla ruiskuvalulla valmistettuja kiinnikkeitä tai joissain tapauksissa myös kiinnikkeet voidaan valmistaa suoraan samassa ruiskuvaluprosessissa.

9.6 Matkustamo

Pultruusiota voidaan hyödyntää myös suurempiin kokonaisuuksiin kuin aikasemmissä esimerkeissä on esitetty. Pultruusio voisi soveltua myös lähes kokonaisen matkustamon valmistamiseen. Sovelluskohde voisi olla esimerkiksi space frame-rakenteessa etu- ja takaseinän välinen alue. Tässäkin tapauksessa menetelmän rajoitteet määräävät poikkeileikkauksen käytännössä vakioksi. Tämä voi aiheuttaa ongelmia esimerkiksi sisustan ja muotoilun kannalta. Etuina on kuitenkin osien vähäinen määrä ja yksinkertainen kiinnityskonsepti. Seuraavassa kuvassa on esitetty osittainen space frame-rakenne, jossa pultruusiolla valmistettu matkustamo (vihreä) ylittää lähes auton päästä päähän. Rakenne liittyy konseptiin, joka on esitelty paremmin liitteessä 3.



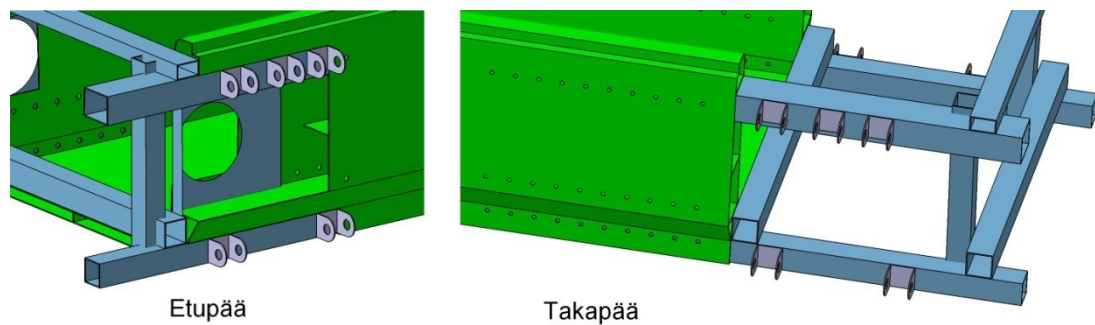
Kuva 42. Matkustamo

Rakenne voitaisiin tehdä mistä tahansa jo aikaisemmin esitetystä kuituvaihtoehdosta, ja esimerkin tilanteessa on ajateltu hyödynnettäväksi halvempia lasi- ja basalttikuituja. Tässä tapauksessa kuiturakennetta ei ole ajateltu yksinään tarpeeksi riittäväksi mekaaniselta kestävyydeltään ja jäykkyydeltään, jonka takia on päätetty hyödyntää hybridirakennetta. Kuitusuuntien suunnittelua ei ole tässä tapauksessa juurikaan tehty, sillä autoon kohdistuvat voimat eivät ole selvillä. Onkalon seinämissä voidaan kuitenkin käyttää $\pm 45^\circ$ ja 0° kuituja ja pyrkiä optimoimaan rakenne halutulla tavalla esimerkiksi jäykkyyden tai lujuuden suhteen. Ulkopinnoissa tulisi käyttää $\pm 45^\circ$ tai $0/90^\circ$ kuituja, jotta pultruusioprofiili kestäisi mekaaniset liitokset paremmin.

Rakenteessa voimalinja, ja alustan osat on tarkoitettu kiinnitettäväksi erillisiin alumiinisiin apu- ja tukirakenteisiin mekaanisesti, hitsaamalla ja liimaamalla. Alumiiniputket voisivat olla mahdollisia lisätä rakenteeseen myös pultruusion aikana, mutta to-

dennäköisesti se lisää liikaa valmistuksen hankaluutta. Pultruusioprofiilin läpi on tarkoitettu asennettavaksi alumiiniset putket, jotka liitetään mekaanisesti ja liimaamalla. Alumiinirakenteisiin voidaan asentaa kierreinsertit ja pultruusioprofiiliin työstää sopivat aukot ja reiät mekaanista kiinnittämistä varten. Läpimenevät putket mahdollistavat suuren liitospinta-alan liimasaumaa varten, joka tekee rakenteesta yhtenäisemmän.

Seuraavassa kuvassa on paremmin esitettynä liitostavan perusidea. Kiinnitystavasta on esillä kaksi eri vaihtoehtoa, joilla on omat etunsa ja haittansa. Etupään rakenteessa profiiliin työstetään muotoja ja suurempia aukkoja, sekä reikiä. Takapään rakenteessa työstetään ainoastaan kiinnitysreiät alumiinirakenteita varten. Etupään rakenne mahdollistaa levyrakenteiden käytön ja monipuolisemmat liitostavat ja liitoskappaleet. Samalla voidaan pultruusioprofiilista tehdä mahdollisimman pitkä jolloin rakenteenosien määrää voidaan optimoida. Haittapuolena on koneistuksen hankaloituminen. Takapäessä pultruusiorakenteeseen liitetään alumiininen apurunko, jolloin profiilia ei voida viedä yhtä pitkälle, sillä osien kiinnitys ja letkut ja johdot vaativat tilaa ja avoimempia rakenteita. Etuna on kuitenkin työstön helppous.



Kuva 43. Matkustamon kiinnitystapa

Kolmantena vaihtoehtona voisi olla rakenne, jossa käytetään edelleen rakenteen läpimeneviä putkia, mutta liitetään myös erilaiset alustaosien kiinnikkeet suoraan profiiliin ja tehdään pultruusioprofiiliin rei'illä läpiviennit tarvittaville komponenteille. Esimerkiksi metallinen tukivarren kiinnike kiinnityisi tällöin rakenteen läpi mekaanisesti ja rakenteen sisimmäinen alumiini toimisi tukevana ja jäykistävänä rakenteena. Kiinnike voitaisiin myös liimata lisätuen saamiseksi pultruusioprofiilin pintaan. Tämä mahdollistaisi mahdollisimman suuren pultruusioprofiilirakenteen, mutta hitsattavat liitokset eivät ole kovin helppoja toteuttaa.

10 YHTEENVETO

Diplomityön päätarkoitus oli selvittää voidaanko pultruusioprofiileja hyödyntää auton korin space frame-rakenteissa. Työstä päädyttiin tekemään oppikirjamainen, jossa sisäl-
lön puolesta selitetään perusteet myös muovikomposiiteista, sillä komposiittirakenteet
eivät välttämättä ole kovin hyvin tunnettu materiaaliryhmä autoteollisuuden suunnitteli-
joille. Muovikomposiiteista esiteltiin perusteet valmistusmenetelmistä, liittämismene-
telmistä, kierrätyksestä ja suunnittelusta, sekä annettiin esimerkkejä niiden nykyisistä ja
mahdollisista käyttökohteista. Tarkoitus on antaa lähtökohta materiaali- ja valmistus-
menetelmävalinnoille, joiden pohjalta suunnittelija voi aloittaa komposiiteista valmis-
tettävien tuotteiden suunnittelun.

Pultruusioprofiilien soveltuvuuteen space frame-rakenteissa ei voida yksiselittei-
sesti vastata. Pultruusioprofiilin vakiopoikkileikkaus rajoittaa profiilien käytön ainoas-
taan osiin joissa ei tarvita kaksoiskaarevia ja muuttuvia muotoja. Sarjakoko ja halutun
osan koko vaikuttavat menetelmän soveltuvuuteen. Pienissä kappaleissa alumiiniprofiili
on usein taloudellisesti kannattavampi ja suunnittelun kannalta helpompi. Suurissa osis-
sa voidaan etuja saada aikaan alumiiniin verrattuna.

Pultruusiomenetelmä mahdollistaa alumiiniekstruusiota suuremmat kappaleet.
Pultruusiolla voi käytännössä valmistaa niin suuria kappaleita kuin valmistajien laitteis-
tot ja tilat ovat. Leveimmät valmistettavat tuotteet ovat yli 3 metriä leveitä ja suurimmat
tuotteet voivat olla poikkileikkaukseltaan jopa 1 metriä korkeita ja leveitä. Menetelmäl-
lä valmistettavan kappaleen pituudella ei ole käytännössä muita rajoja kuin valmistajan
tilat. Suuret sarjakoot voivat tosin olla ongelmallisia varsinkin suurille pultruusiotuot-
teille ja tällöin menetelmä voi soveltua paremmin piensarjoille. Käytännössä menetel-
män nopeus riippuu kestopuoveilla sulamis- ja jäähtymisnopeudesta ja kertamuoveilla
kovettumiseen liittyvistä kemiallisista reaktioista. Tällöin merkittäviä tekijöitä valmis-
tusnopeuden kannalta ovat materiaalivalinta ja seinämäpaksuudet. Käytännössä alumi-
niiniekstruusio soveltuu suurille sarjoille ja lisäksi alumiiniprofiileilla selvä etu on jälki-
työstön mahdollisuus esimerkiksi hydroformaamalla.

Nykyinen tekniikka pultruusiolaitteistoissa mahdollistaa ainoastaan suorat kap-
paleet tai vakiona pysyvän kaarevuussäteen. Lisäksi ongelmana on vakiona pysyvä
poikkileikkaus. Erikoismenetelmät mahdollistavat myös muutoksia poikkileikkauksessa
tai kaarevuudessa, mutta menetelmät ovat vähemmän tunnettuja ja osittain myös perus-
menetelmää hitaampia. Tosin perusmenetelmäkin mahdollistaa monille muille mene-
telmille mahdottomia tai hankalia kappaleita. Pultruusiolla voidaan valmistaa tuotteita,
joissa on negatiivisia ja positiivisia päästöjä sekä onttoja osuuksia. Kertamuoveja käy-
tettäessä tuotetta ei voida muokata valmistukseen jälkeen ainetta rikkomatta, mikä vä-

hentää käyttömahdollisuuksia verrattuna esimerkiksi alumiiniprofileihin. Kestomuovisia pultruusioprofiileja ei juurikaan valmisteta teknisten ongelmien takia, mutta niitä käytettäessä on mahdollisuus jälkimuokkaukseen lämmön avulla.

Komposiittien käyttäminen mahdollistaa kuitenkin ominaisuuksien muokkaamisen ja räätälöimisen lujitteiden kuitusuuntia ja materiaaleja muokkaamalla. Tosin pultruusiossa kappale on aina osittain vetosuuntaan lujitettu ja esimerkiksi onkaloiden sisäseinämät ovat käytännössä 0° tai $\pm 45^\circ$ suunnattuja lujitteiltaan. Pultruusioprofiileissa muihin menetelmiin verrattuna ongelmana on kuitenkin rajoittuneet geometriset muodot. Korirakenteiden kannalta voisikin olla paras hyödyntää pultruusiota ainoastaan paikoissa, joissa niiden rajoitteet aiheuttavat vähiten haittoja. Mahdollisia käyttökohteita voivat olla esimerkiksi erilaiset pitkittäis- tai poikittaispalkit, kattopalkit, akku- ja keskittunnelit, sekä suorat paneelit. Monimutkaisia geometrioita tarvitsevilla osilla, kuten a- ja b-pilarissa, vaaditaan käytännössä muita valmistusmenetelmiä. Runkorakenteissa kannattaisikin hyödyntää paljon erilaisia menetelmiä, jotta saataisiin komposiiteista suurin hyöty irti. Hyödyntämällä esimerkiksi RTM-, SRIM- tai ruiskuvalumenetelmiä voidaan valmistaa kappaleita, joihin integroituu esimerkiksi teräslevytekniikkaan verrattuna usean eri osan toiminnot. Esimerkiksi RTM-menetelmä on autovalmistajien suosiossa tällä hetkellä uusiin komposiittisiin runko- ja koriratkaisuihin. Suurissa ja monimutkaisissa osissa tulee kuitenkin huomioida korjattavuuden mahdollinen heikkeneminen.

Koko rakenteen kannalta eri osien väliset liitokset nousevat suureen rooliin. Kertamuovikomposiiteilla voidaan käyttää pääasiassa mekaanista tai adhesiivistä liittämistä. Kestomuoveilla myös erilaiset matriisin sulamiseen perustuvat hitsausmenetelmät ovat mahdollisia. Komposiittien anisotropiasta ja heterogeenisestä rakenteesta johtuen liittäminen vaatii kuitenkin usein tarkempaa suunnittelua kuin metalleilla. Liitososissa käytännössä vaaditaan myös pultruusiosta poikkeavia ratkaisuja, kuten ruiskuvalua tai RTM-menetelmää. Muovikomposiittien käyttö tosin mahdollistaa liittämässä myös uusia ratkaisuja, kuten napsautusliittimiä, joiden avulla voidaan esimerkiksi paikottaa osia tai kiinnittää ne alustavasti toisiinsa yhteen liimauksen ajaksi.

Materiaalivaihtoehtoja muovikomposiitteja hyödyntäessä tulee lukematon määrä. Käytännössä kuitenkin lujitteiksi valikoituvat aramidi-, hiili-, lasi- tai basalttikuidut. Aramidi- ja hiilikuiduilla voidaan saavuttaa suurimmat jäykkyydet, lujuudet ja alhaisin massa, mutta ne ovat myös vaihtoehtoista kalleimmat. Matriisiksi valikoituu lähinnä kertamuoveista epoksit tai polyuretaani ja kestomuoveista esimerkiksi polyamidit. Materiaalivalintojen lisäksi osasuunnittelu nousee merkittävään rooliin. Alumiinin ja kvasiisotrooppisen hiilikuitukomposiitin väliset erot painossa ja jäykkyydessä ovat minimaaliset jolloin pultruusiolla ei saavuteta käytännön etuja. Haluttaessa teräsrakennetta vastaava jäykkyys joudutaan puolestaan kasvattamaan verrattavan rakenteen ulkomittoja tai pahimmassa tapauksessa pultruusio-osan osan massa saattaa olla jopa teräsrakennetta suurempi. Muita materiaaliominaisuuksia verratessa komposiiteilla on kuitenkin metallirakenteita parempi sähkön- ja lämmöneristävyys ja korroosion kestävyys.

Autoteollisuudessa tärkeäksi aiheeksi on noussut kierrätys, lähinnä laki- ja kuluttajavaatimuksista. Komposiittien kierrätys on lähtökohtaisesti hankalampaa kuin metal-

lien, sillä lujitteet ja matriisi on hankala erottaa toisistaan. Kestomuoveilla kierrätys on kertamuoveja helpompaa, sillä niitä voidaan esimerkiksi sulattamalla käyttää uudestaan. Kertamuovien kierrätykseen on mahdollisesti tulossa parannuksia, sillä esimerkiksi markkinoille on tulossa uusia epoksilaatuja, jotka voidaan helposti liuottaa sopivissa prosesseissa. Tulevaisuudessa kierrätys on luultavasti helpompaa, sillä varsinkin hiilikuidun ja hiilikuituosien valmistajat pyrkivät jatkuvasti kehittämään kierrätysmenetelmiä.

10.1 Jatkotutkimusehdotukset

Tämä työ raapaisee ainoastaan pintaa liittyen komposiittien käyttöön autoteollisuudessa ja runkorakenteissa. Työn pohjalta voidaan kuitenkin antaa ehdotuksia eri tyyppisiin jatkotutkimuksiin. Mahdolliset jatkoprojektit voidaan jakaa monella tapaa, mutta tässä osiossa esitellään konseptinomainen lähtökohta, jonka alle voidaan jakaa useita pienempiä, mutta tärkeitä osaprojekteja. Ehdotuksessa ei oteta kantaa muihin auton osaluoksiin, kuten voimansiirtoon ja alustaan.

Lähtökohtana jatkotutkimuksille voisi toimia muovikomposiitteja hyödyntävä konseptiplatform, jota pyritään Valmet Automotiven tuotekehityksessä kehittämään jatkuvana kehitysprojektina. Koulutusmielessä konsepti kannattaisi pitää hyvin modulaarisena. Osittaisiin parannuksiin voitaisiin pyrkiä hyödyntämällä pienempiä osaprojekteja, jotka parantavat konseptin valmistettavuutta, kannattavuutta ja monipuolisuutta tai yleistä toimivuutta. Kehitystyön avulla voitaisiin parantaa henkilöstön ammattitaitoa ja pyrkiä saamaan kilpailuetua. Konseptissa voitaisiin pyrkiä tekemään esimerkiksi jossain määrin modulaarinen piensarjaurheiluautoon soveltuva monokokkirakenne, joka koostuisi matkustamon moduulista, sekä erillisistä etu- ja takapäähän moduuleista.

Helpoin tapa lähestyä kehitystä olisi aloittaa jo tunnetuista alumiini space frame-rakenteista. Näissä voitaisiin pyrkiä korvaamaan osia komposiittisilla suoraan, jotta ymmärrettäisiin niiden käyttäytyminen paremmin. Hyvä lähtökohta kehitystyöhön voisi olla esimerkiksi helmapalkin tai akkukotelon korvaaminen uusilla ratkaisulla.

Varsinaiseen monokokin kehityksessä voitaisiin ensiksi pyrkiä kehittää matkustamon osuutta komposiiteista ja pyrkiä liittämään siihen metalliset etu- ja takarungot. Ulkopintaa voitaisiin tehdä erillisillä pintapaneeleilla. Tällainen alku antaisi mahdollisuuden oppia aluksi rajoitetussa ympäristössä komposiittien rakenteellista suunnittelua. Alaprojekteina voitaisiin tutkia esimerkiksi a-pinnan aikaansaamista rakenteellisiin osiin, matkustamon kustannustehokasta valmistusta, sisustaosien integroimista kantavaan rakenteeseen, tarvittavia kiinnitysmenetelmiä ja komposiittien kolarimallinnusta. Osaprojektit vaatisivat johdonmukaista henkilöstön koulutusta sekä komposiittien ja kolarikäyttäytymisen mallintamiseen soveltuvia ohjelmistoja. Projektien edetessä voitaisiin pyrkiä lopulta suunnittelemaan monokokkirakenne, jossa ei tarvita erillisiä ulkopaneeleja a-pintaa varten ja jonka valmistuksessa voidaan valita soveltuvimmat menetelmät ja materiaalit metallien ja komposiittien väliltä. Lopputuloksena pystyttäisiin

samalla esittämään, että Valmet Automotiven suunnittelupalvelut kykenevät vastaamaan myös komposiittimateriaalien tuomiin haasteisiin ja mahdollisuuksiin.

Hyvänä esimerkkinä osaprojektista toimii projekti, jonka tarkoituksena on tutkia uusien liitosmenetelmien mahdollisuutta komposiiteilla. Markkinoilla olevaa melko uutta naulausmenetelmää halutaan tutkia komposiittien liittämässä. Naulaus voisi mahdollistaa nopeat liitokset komposiittien ja komposiitin ja metallin välillä. Testimateriaaleiksi valitaan alumiini, teräs, ja komposiittimateriaalit. Komposiiteista valitaan kattava osuus erilaisista lujitteista ja matriiseista saatavista yhdistelmistä. Naulaukselle otetaan vertailutavoiksi niittiliitos, hitsausliitos, liimaus sekä näiden yhdistelmiä. Liitoksille voidaan tehdä liitoslujuustestaus, väsymistestaus sekä esimerkiksi tutkia kuinka vanhennus ja korrodoituminen vaikuttavat liitoslujuuteen ja väsymiskestävyyteen.

Testit kertovat kuinka naulaus vertautuu jo tunnettuihin liitosmenetelmiin, mutta samalla esimerkiksi antavat tietoa metallien ja komposiittien liitosten eroista. Toissijaisena tuloksena saadaan myös tietoa esimerkiksi naulauksen soveltuvuudesta alumiini- ja teräслиitoksiin, mikä saattaa olla tuotannon kannalta ajankohtaisempi aihe. Tällöin tutkimus antaa lisäarvoa komposiittirakenteiden kehitykselle sekä jo olemassa olevalle liiketoiminnalle.

LÄHTEET

1. Brown, Jason C., Robertson, A. John and Serpento, Stan T. *Motor Vehicle Structures: Concepts and Fundamentals*. Woburn: Butterworth-Heinemann, 2002. p. 285.
2. Saudi Gazette. Saudi Gazette. [Online] 8.9.2012. [Viitattu: 18.12.2012] <http://www.saudigazette.com.sa/index.cfm?method=home.regcon&contentid=20120908135397>.
3. Woodyard, Chris. 2011 Ford Explorer aims to be rugged while boosting mileage. USA TODAY. [Online] 28.12.2010. [Viitattu: 14.11.2012] http://usatoday30.usatoday.com/money/autos/2010-12-28-explorer28_ST_N.htm?csp=34money&utm_source=twitterfeed&utm_medium=twitter&utm_campaign=DTN+USA%3A.
4. Greimal, Hans and Rehtin, Mark. Lexus looks to expand lineup. *Automotive News*. [Online] 1.16.2012. [Viitattu: 11.14.2012] <http://www.autonews.com/apps/pbcs.dll/article?AID=/20120116/OEM03/301169939/1292>.
5. Encyclopedia Britannica. space frame. Encyclopedia Britannica. [Online] 2012. [Viitattu: 10.12.2012] <http://www.britannica.com/EBchecked/topic/667985/space-frame>.
6. Fisker Automotive. Newsroom. [Online] 2012. [Viitattu: 14.11.2012] <http://media.fiskerautomotive.com/global/en-us/photos/gallery.aspx?&pagesize=240&pagenumber=2>.
7. Lotus Cars. EVORA PLATFORM AND LOW VOLUME VVA. *Lotus Cars*. [Online] 2012. [Viitattu: 14.11.2012] <http://www.lotuscars.com/gb/engineering/vehicle-platform-evora>.
8. Lotus Cars. SMALL CAR (ELISE) PLATFORM. [Online] 2012. [Viitattu: 14.11.2012] <http://www.lotuscars.com/gb/engineering/vehicle-platform-elise>.
9. Seiffert, Ulrich & Wech, Lothar. *Automotive Safety Handbook*. s.l.: Society of Automotive Engineers, 2003. p. 309.
10. Davies, Geoffrey. *Materials for Automotive Bodies*. Elsevier, 2012. p. 423.
11. Innovative Developments for Lightweight Vehicle structures. Wolfsburg 26.-27.5.2009.
12. Campbell, F.C. *Structural Composite Materials*. ASM International, 2010. p. 646.
13. Saarela, Olli; Airasmaa, Ilkka; Kokko, Juha; Skrifvars, Mikael; Komppa, Veikko. *Komposiittirakenteet*. Helsinki, Muoviyhdistys ry, 2007. 494 s.
14. Reinforced Plastics Magazine. Can epoxy composites be made 100% recyclable? [Online] 11.9.2012. [Viitattu: 18.12.2012] <http://www.reinforcedplastics.com/view/27669/can-epoxy-composites-be-made-100-recyclable/>.

15. Creative Pultrusion. Creative Pultrusion Library. [Online] [Viitattu: 14.9.2012] <http://www.creativepultrusions.com/LitLibrary/properties/urethanedata.pdf>.
16. BASF; SGL Group. BASF and SGL Group on the Way to Reactive Polyamide-Carbon Fiber Composites. [Online] 4.10.2012. [Viitattu: 15.10.2012] <http://www.basf.com/group/pressrelease/P-12-442>.
17. MatWeb, LLC. Material property data. [Online] 2012. [Viitattu: 9.10.2012] <http://www.matweb.com/index.aspx>.
18. Griffith, W.L.; Compere, A.L.; Leitten, C.F. & Shaffer, J. T. Low-cost, lignin-based carbon fiber for transportation applications. Oak Ridge : Oak Ridge National Laboratory , 2004.
19. Sudaglass Fiber Technology. Comparative Technical Characteristics of Filament. [Online] 2002. [Viitattu: 10.3.2012] <http://www.sudaglass.com/chars.html>.
20. Basaltm. Basalt Continuous Fiber - Information and Characteristics. [Online] 2005. [Viitattu: 3.10.2012] <http://www.basaltfm.com/eng/fiber/info.html>.
21. Dodson, Brian. Wood pulp extract stronger than carbon fiber or kevlar. Gizmag. [Online] 3. 9.2012. [Viitattu: 3.10.2012] <http://www.gizmag.com/cellulose-nanocrystals-stronger-carbon-fiber-kevlar/23959/>.
22. Ashley, Steven. Oak Ridge collaborates for cheaper carbon fiber. Automotive Engineering international Online. [Online] 8 27, 2012. [Cited: 10 4, 2012] <http://www.sae.org/mags/AEI/11104>.
23. Valmet Automotive, kysely valmistusmenetelmistä. 2012. Julkaisematon selvitys. 2s.
24. Manufacturing method questionnaire. 2012. Julkaisematon selvitys. 2 s.
25. Stewart, Richard. New prepreg materials offer versatility top performance. Reinforced plastics.com. [Online] 21.5.2009. [Viitattu: 9.10.2012] <http://www.reinforcedplastics.com/view/1839/new-prepreg-materials-offer-versatility-top-performance/>.
26. Lankhorst. Pure Composites. [Online] 2008. [Viitattu: 29.10.2012] <http://www.pure-composites.com/index.php>.
27. Propex. Curv. [Online] 2007. [Viitattu: 29.10.2012.] <http://www.curvonline.com/index.html>.
28. Corum, J. M.; Battiste, R. L.; Liu, K. C. & Ruggles, M. B.. Basic Properties of Reference Crossply Carbon-Fiber Composite. Oak Ridge National Laboratory, Lockheed Martin Energy Research Corp., U.S. Department of Energy. 2000.
29. The Steel Construction Institute. Design Manual For Structural Stainless Steel. The Steel Construction Institute. [Online] 2006. [Viitattu: 05.12.2012] www.steel-stainless.org/designmanual/Docs/En/English.pdf.
30. Sapa Group. Design Manual. 2009. s. 200.
31. ACP Composites Inc. Mechanical Properties of Carbon Fiber Composite Materials, Fiber / Epoxy resin (120°C Cure). ACP Sales. [Online] 2012. [Viitattu: 5.12.2012] <http://www.acpsales.com/upload/Mechanical-Properties-of-Carbon-Fiber-Composite-Materials.pdf>.
32. ASM International. ASM Handbooks Online. Volume 21, Composites. 2001.

33. Fiberline Composites. Pultrusion. Fiberline Composites. [Online] [Viitattu: 14.9.2012] <http://www.fiberline.com/komposit/pultrusion/pultrusion>.
34. Thomas Technik Gmbh. Pultrusion. Thomas Technik. [Online] [Cited: 24.9.2012] <http://www.thomas-technik.com/pultrusion.htm>.
35. Creative Pultrusion. Creative Pultrusion Design Manual. Creative Pultrusion. [Online] 2000. [Viitattu: 14.9.2012] <http://www.creativepultrusions.com/LitLibrary/DMCD-ROM/mettoc.pdf>.
36. Kamenny Vek. Basfiber® for Civil Engineering. Basfiber. [Online] 2010. [Viitattu: 14.9.2012] <http://www.basfiber.com/engineering>.
37. Exel Composites. Pullwinding. Exel Composites. [Online] 2009. [Viitattu: 14.9.2012] <http://www.exelcomposites.com/fi-fi/english/composites/manufacturingtechnologies/pullwinding.aspx>.
38. Niu, Michael C. Y. Composite Airframe Structures - Practical Design Information and Data. AD Adaso/Adastra Engineering LLC, 1992. p. 702.
39. Bralla, James G. Handbook of Manufacturing Processes - How Products, Components and Materials are Made. Industrial Press, 2007. p. 948.
40. Processing and Finishing of Polymeric Materials, 2 Volume Set. John Wiley & Sons, Inc., 2011. s. 1488.
41. Kulshreshtha, A.K. & Vasile, C. Handbook of Polymer Blends and Composites, Volumes 1-4. Smithers Rapra Technology, 2002, Chapter 1.5.16, p. 2536.
42. Sakai, T.; Hatano, D.; Tanaka, Y. & Nakai, A. BRAIDING PULTRUSION SYSTEM FOR CONTINUOUS FIBER REINFORCED. Antec. 2011.
43. Fiberline Composites. Fiberline Composites: Design flexibility. Fiberline Composites. [Online] 2012. [Viitattu: 9.24.2012] <http://www.fiberline.com/composites/designmuligheder/design-flexibility>.
44. Fulcrum Composites. Fulcrum Composites. [Online] 2011. [Viitattu: 24.9.2012] <http://www.fulcrumcomposites.com/>.
45. EN 13706. 2002. European Committee for Standardization.
46. Kazak Composites Inc. Kazak Composites Inc. [Online] [Viitattu: 9.24.2012] <http://kazakcomposites.com/index.html>.
47. ASTM D3917 - 12. Standard Specification for Dimensional Tolerance of Thermosetting Glass-Reinforced Plastic Pultruded Shapes. 2012. American society for testing and materials.
48. SFS-EN 755-9: Alumiini ja alumiiniseokset. Pursotetut tangot, putket ja profiilit. Osa 9: Profiilien mitta- ja muototoleranssit. Helsinki 2008, Suomen standardisoimisliitto SFS ry.
49. SFS-EN 12020-2: Alumiini ja alumiiniseokset. Seoksista EN AW-6060 ja EN AW-6063 pursotetut tarkkuusprofiilit. Osa 2: mitta- ja muototoleranssit. Helsinki 2008, Suomen standardisoimisliitto SFS ry.
50. EN 13706-2: Reinforced plastics composites - Specifications for pultruded profiles - Part 2: Methods of test and general requirements. Helsinki 2002, Suomen standardisoimisliitto SFS ry.
51. Korhonen, Jouni. Project Engineer, Valmset Automotive Oy. Uusikaupunki, Haastattelu 23. 10 2012.

52. EPTA. Pultrusion. EPTA - European Pultrusion Technology Association. [Online] 2012. [Viitattu: 14.12.2012]. http://pultruders.com/index.php?option=com_content&task=view&id=15&Itemid=29.
53. Bauser, M., Sauer, G. and Siegert, K. Extrusion. 2nd Edition. ASM International, 2006. p. 624.
54. Luoyang Jianyuan Mould Manufacture Co., Ltd. FRP Pultrusion Mould. [Online] 2012. [Viitattu: 17.12.2012]. <http://www.made-in-china.com/showroom/milton-shen/product-detailbREkUKCXHVr/China-FRP-Pultrusion-Mould.html>.
55. Strong, A. Brent. Fundamentals Of Composites Manufacturing: Materials, Methods and Applications. Society of Manufacturing Engineers, 2008. s. 620.
56. Iten Industries. Plant 3 Politen® Pultrusions. Iten Industries. [Online] [Viitattu: 17.12.2012]. <http://www.itenindustries.com/pultrusion.shtml>.
57. Marsh, George. "De-autoclaving" prepreg processing. Reinforced plastics. [Online] 18.9.2012 [Viitattu: 10.12.2012]. <http://www.reinforcedplastics.com/view/27939/de-autoclaving-prepreg-processing-part-1/>
58. RTM accelerates to facilitate mass production in the automotive composites market. Jec composites. [Online] 5.9.2012. [Viitattu: 8.2.2013]. <http://www.jeccomposites.com/news/features/automotive/rtm-accelerates-facilitate-mass-production-automotive-composites-market>.
59. Sniderman, Debbie. 3D Printing takes off. ASME.org. [Online] 2012. [Viitattu: 10.01.2012]. <http://www.asme.org/kb/news---articles/articles/design/3d-printing-takes-off>.
60. Turunen, Milla-Riina. 3D-tulostimen käyttö komposiittimuottien valmistuksessa. 2011. Savonia-ammattikorkeakoulu. 50+38 s.
61. Campbell, F. C. Manufacturing Processes for Advanced Composites. Elsevier, 2004. s. 520.
62. Bond Laminates. Tepex forming. Bond Laminates. [Online] [Viitattu: 10.12.2012]. <http://www.bond-laminates.com/en/processing-technology/tepex-forming.html>.
63. Bonding on command. Evonik Industries web site. [Online] 2012. [Viitattu: 15.10.2012]. <http://nano.evonik.com/sites/nanotechnology/en/technology/applications/magsilica/pages/default.aspx>.
64. da Silva, Lucas F. M.; Öchsner, Andreas & Adams, Robert D. Handbook of Adhesion Technology. Springer, 2011. s. 1543.
65. Sika Group. Sika Group. [Online] 2012. [Viitattu: 8. 1 2013.] <http://www.sika.com/>.
66. da Silva, Lucas F.M. & Adams, R.D. Adhesive joints at high and low temperatures using similar and dissimilar adherends and dual adhesives. International Journal of Adhesion & Adhesives 27(2007)3, pp. 216-226.
67. Vallée, Till; Correia, João R. & Keller, Thomas. Optimum thickness of joints made of GFPR pultruded adherends and polyurethane adhesive. Composite structures 92(2010)9, pp. 2102-2108.

68. Vallée, Till; Correia, João R. & Keller, Thomas. Probabilistic strength prediction for double lap joints composed of pultruded GFRP profiles part I: Experimental and numerical investigations. *Composite Structures* 66(2006)9, pp. 1903-1914.
69. Keller, Thomas & Till, Vallée. Adhesively bonded lap joints from pultruded GFRP profiles. Part I: stress-strain analysis and failure modes. *Composites: Part B* 36(2005)4, pp. 331-340.
70. Keller, T. ja Vallée, T. Adhesively bonded lap joints from pultruded GFRP profiles. Part II: joint strength prediction. *Composites: Part B* 36(2005)4, pp. 341-350.
71. Zhang, Ye; Vassilopoulos, Anastasios P. & Keller; Thomas. Effects of low and high temperatures on tensile behavior of adhesively-bonded GFRP joints. *Composite Structures* 92(2010)7, pp. 1631-1639.
72. Department of Defense. *Composite Materials Handbook: Volume 3. Polymer matrix composites material usage, design, and analysis.* 2002.
73. Böllhoff. High-strength and reliability joining of materials . Böllhoff. [Online] 2012. [Viitattu: 16.10.2012]. http://www.boellhoff.de/en/de/assembly_systems/riveting/rivset.php.
74. Böllhoff. RIVTAC® High-speed joining . Böllhoff. [Online] 2012. [Viitattu: 16.10.2012]. http://www.boellhoff.de/en/de/assembly_systems/rivtac.php
75. Bonenberger, Paul R. *First Snap-Fit Handbook - Creating and Managing Attachments for Plastic Parts.* Hanser Publishers, 2005. p. 297.
76. Minards, Ian. *Eurocar body: Aston Martin Rapide.* 2010.
77. Fiberline Composites. Machining of pultruded profiles. Fiberline Composites. [Online] [Viitattu: 29.10.2012]. <http://www.fiberline.com/komposit/machining/machining-pultruded-profiles/machining-pultruded-profiles>.
78. Peters, S.T. *Handbook of Composites.* Springer - Verlag, 1998. p. 1365.
79. Savage, G. *Formula 1 Composites Engineering. Engineering Failure Analysis,* 17(2010)1, pp. 92-115.
80. Strong, A.Brent. *Fundamentals of Composites Manufacturing - Materials, Methods and Applications.* 2nd Edition. Society of Manufacturing Engineers 2008. p. 682.
81. De Oto, Luciano. *Lamborghini Aventador repair techniques.* ACRC 2011.
82. Mallick, P. K. *Materials, design and manufacturing for lightweight vehicles.* Cambridge : Woodhead publishing 2010. p. 399.
83. SFS-EN ISO 14040: Ympäristöasioiden hallinta. Elinkaariarviointi. Periaatteet ja pääpiirteet. Helsinki 2006. Suomen standardisomisliitto s. 49.
84. Yang, Yongxiang, Boom, Rob;ym. Recycling of composite materials. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification* 51(2012), pp. 53-68.
85. EUVL. 2000/53/EY. 30.09.2012. Romuajoneuvoista
86. Morin, Christelle; Loppinet-Serani, Anne; Francois, Cansell & Aymonier, Cyril. Near- and supercritical solvolysis of carbon fibre reinforced polymers (CFRP) for recycling carbon fibers as valuable resource: State of the art. *The Journal of Supercritical fluids* 66(2012), pp. 232-240.

87. Otheguy, M.E.; Gibson, A.G.; Robinson, M.; Findon, E.; Cripps, B.; Mendoza, A. Ochoa & Castro, M.T. Aguinaco. Recycling of end-of-life thermoplastic composite boats. 9-10, s.l.: Maney Publishing, 2009, *Plastics, Rubber and Composites*, Vol. 38, pp. 406-411.
88. Palmer, J.; Ghita, O.R.; Savage, L. & Evans, K.E. Successful closed-loop recycling of thermoset composites. *Composites: Part A* 40(2009)4. pp. 490-498.
89. Mchardy, J. & Sawan, S.P. *Supercritical Fluid Cleaning - Fundamentals, Technology, and Applications*. William Andrew Publishing/ Noyes, 1998. p. 310.
90. Reinforced Plastics. Boeing and BMW Group collaborate on carbon fibre recycling. *Reinforced Plastics*. [Online] 13.12.2012. [Viitattu: 20.12.2012]. <http://www.reinforcedplastics.com/view/29839/boeing-and-bmw-group-collaborate-on-carbon-fibre-recycling/>.
91. Strongwell. Composite Driveshafts. Strongwell. [Online] 2012. [Viitattu: 17.12.2012]. http://www.strongwell.com/selected_markets/comp_driveshaft/.
92. Murray, Gordon. Structural Composites in Cars - Special Report. Road & Track. [Online] 11.2.2011. [Viitattu: 11.12.2012]. <http://www.roadandtrack.com/special-report/structural-composites-in-cars>.
93. ACMA. History of Automotive Composites. Automotive Composites Alliance. [Online] 2012. [Viitattu: 11.12.2012]. <http://www.autocomposites.org/composites101/history.cfm>.
94. SMCARS. WIP: Lotus Elite 1959. SMCARS. [Online] 2012. [Viitattu: 11.12.2012] <http://www.smcars.net/forums/attachments/wip-critique-3d-advanced/139568d1348950011-lotus-elite-1959-021.jpg>.
95. Ferrari. Enzo Ferrari. Ferrari. [Online] 2012. [Viitattu: 11.12.2012] http://www.ferrari.com/english/gt_sport%20cars/classiche/all_models/pages/enzo_ferrari.aspx.
96. Reinforced Plastics. Ferrari unveils carbon composite chassis for hybrid model. *Reinforced Plastics*. [Online] 5.10.2012. [Viitattu: 11.12.2012] <http://www.reinforcedplastics.com/view/28605/ferrari-unveils-carbon-composite-chassis-for-hybrid-model/>.
97. Cars UK. Ferrari F70 Tub & FF Roof. Cars UK. [Online] 1.10.2012. [Viitattu: 12.12.2012.] <http://www.carsuk.net/ferrari-f70-tub-ff-roof-paris-2012/>.
98. Simona. Next Ferrari F70 Will Feature Advanced Carbon Composites. *Topspeed.com*. [Online] 19.11.2012. [Viitattu: 11.12.2012.] <http://www.topspeed.com/cars/car-news/next-ferrari-f70-will-feature-advanced-carbon-composites-ar138286.html>.
99. Rsportscars. McLaren Automotive introduces the McLaren MP4-12C. *Rsportscars.com*. [Online] [Viitattu: 11.12.2012]. <http://www.rsportscars.com/mclaren/2011-mclaren-mp4-12c/>.
100. Motortrend. 2012 McLaren MP4-12C Photo Gallery. Motortrend. [Online] [Viitattu: 11.12.2012]. http://www.motortrend.com/roadtests/exotic/1104_2012_mclaren_mp4_12c_drive/photos/.
101. Reinforced Plastics. Lamborghini uses Araldite resin for Aventador carbon chassis. *Reinforced Plastics*. [Online] 11.5.2011. [Viitattu: 12.12.2012]. <http://www.reinforcedplastics.com/view/17914/lamborghini-uses-araldite-resin-for-aventador-carbon-chassis/>.

102. The Carbon Fiber Journal. Lamborghini shows off Aventador LP700-4's Carbon Fiber Monocoque. The Carbon Fiber Journal. [Online] 2011. [Viitattu: 11.12.2012]. <http://www.thecarbonfiberjournal.com/?p=491>.
103. Lucra Cars. Lucra Lc470. [Online] 2012. [Viitattu: 11.12.2012]. <http://www.lc470.us/index.htm>.
104. Huet Brothers. Huet Brothers. [Online] 2012. [Viitattu: 11.12.2012]. <http://www.huetbrothers.com/>.
105. Vink, David. Black carbon fibre appearing in car bodies. European Plastics. [Online] 30.7.2012. [Viitattu: 12.12.2012]. <http://www.europeanplasticsnews.com/subscriber/featured2.html?cat=1&featuredid=1752>.
106. Loveday, Eric. Overview of BMW i3 LifeDrive tech shows how the skateboard has evolved . Autoblog Green. [Online] 17.10.2011. [Viitattu: 12.12.2012]. <http://green.autoblog.com/2011/10/17/overview-of-bmw-i3-lifedrive-tech/>.
107. Markovich, Tony. A Closer Look at the BMW i3's Carbon Fiber Body. Complex Rides. [Online] 14.10.2012. [Viitattu: 12.12.2012]. <http://www.complex.com/rides/2012/11/a-closer-look-at-the-bmw-i3s-carbon-fiber-body>.
108. Kim, Byuong Jung & Lee, Dai Gil. Characteristics of joining inserts for composite sandwich panels. *Composite Structures* 86(2008)1-3. pp. 55-60.
109. Zetterberg, Tobias; Åström, Tomas; Bäcklund, Jan & Burman, Magnus. On design of joint s between composite profiles for bridge deck applications. *Composite Structures* 51(2001)1. pp. 83-91.
110. Egan, B.; McCarthy, C.T. & Frizzell, R.M. Stress analysis of single-bolt, single-lap, countersunk composite joints with variable bolt-hole clearance. *Composite Structures* 94(2012)3. pp. 1038-1051.
111. Cooper, C. & Turvey, G.J. Effects of joint geometry and bolt torque on the structural performance of single bolt tension joints in pultruded GRP sheet material. *Composite Structures* 32(1995)1-4. pp. 217-226.
112. Lim, Tae Seong; Kim, Byung Chul & Lee, Dai Gil. Fatigue Characteristics of the bolted joints for unidirectional composite laminates. *Composite Structures* 72(2006). pp. 58-68.
113. Oh, Je Hoon, Kim, Young Goo & Lee, Dai Gil. Optimum bolted joints for hybrid composite materials. *Composite structures* 38(1997)1-4. pp. 329-341.
114. Camanho, P.P.; Tavares, C.M.L.; de Oliveira, R.; Marques, A.T. & Ferraira, A.J.M.. Increasing the efficiency of composite single-shear lap joint using bonded inserts. *Composites: Part B* 36(2005). pp. 372-383.
115. Imanaka, M., Ishii, K. & Nakayama, H. Evaluation of fatigue strength of adhesively bonded single and single step double lap joints based on stress singularity parameters. *Engineering Fracture Mechanics* 62(1999)4-5. pp. 409-424.
116. Shin, Kum Cheol & Lee, Jung Ju. Effects of thermal residual stresses on failure of co-cured lap joints with steel and carbon fiber-epoxy composite adherends under static and fatigue tensile loads. *Composites: Part A*, 37(2006)3, pp. 476-487.
117. Shin, Kum Cheol; Lim, Jeong Ok & Lee, Jung Ju. The manufacturing process of co-cured single and double lap joints and evaluation of the load-bearing

- capacities of co-cured joints. *Journal of Materials Processing Technology* 138(2003)1-3. pp. 89-96.
118. Naaryan, S. Sathiya; Kumar, D.V.T.G. Pavan & Chandra, Satish. Implication of unequal rivet load distribution in the failures and damage tolerant design of metal and composite civil aircraft riveted lap joints. *Engineering Failure Analysis* 16(2009)7, pp. 2255-2273.
 119. Kumar, D.V.T.G. Pavan; Naarayan, S. Sathiya & Chandra, Satish. Further numerical and experimental failure studies on single and multi-row riveted lap joints. *Engineering Failure Analysis* 20(2012) pp. 9-24.
 120. World Auto Steel. ULSAB Programme Report. World Auto Steel. [Online] [Viitattu: 20.12.2012]. <http://www.worldautosteel.org/projects/ulsab/ultralight-steel-auto-body-ulsab-programme/>.
 121. Bonnet, R. E., Carpenter, R. A. & Gallagher, S. W. Two Piece Composite Truck Cab. In: *Polymer Composites for Structural Automotive Applications*. Michigan 1990, Society of Automotive Engineers. pp. 85-89.
 122. US5228259. Space Frame Connector. Haddad, Charles J.; Marasco, Joe; Fobar, William J.; Gentle, Derek F.; Janotik, Adam M. & Kazyak, Lawrence P. Ford Motor Company. 29.4.1992 (20. 7 1993).
 123. US2012/0104793 A1. Danielson, Kurt, Henry & Thomas, Lawrence Scott. Automotive Vehicle Composite Body Structure. Aptera Motors Inc. 29.10.2010 (3.5.2012).
 124. US4986597. Vehicle space frame and a method for manufacturing space frame parts. Clausen, Edvin L. Norsk Hydro. 9.5.1990 (22.1.1991).
 125. US5059056. Extruded Node. Banthia, Vinod K., Long, S. Russel & Klingensmith, James D. Aluminum Company of America. 31.12.1990 (22.10.1991).
 126. US5209541. Space Frame Joint Construction. Janotik, Adam M. Ford Motor Company. 13.4.1992 (11.5.1993).
 127. US5271687. Space frame joint construction. Holka, Thomas C. & Tant, Sean W. Ford Motor Company. 3.4.1992 (21.12.1993)
 128. US5332281. Space frame construction. Janotik, Adam M. & Kazyak, Lawrence P. Ford Motor Company. 30.4.1992 (26.7.1994)
 129. US5343666. Space frame joint construction. Haddad, Charles J. & Maliszewski, Robert L. Ford Motor Company. 28.10.1992 (6.9.1994).
 130. US5549352. Split joint construction for a space frame. Janotik, Adam M. & Kazyak, Lawrence P. Ford Motor Company. 23.3.1995 (27.8.1996).
 131. US5715643. Automotive space frame joining system. Parkinson, Raymond D. Kaiser Aluminum & Chemical Corporation. 14.6.1996 (10.2.1998)
 132. US6168226 B1. Composite Laminate Automotive Structures. Wycech, Joseph S. Henkel Corporation. 7.5.1998 (2.1.2001)
 133. US 2012/0104799 A1. Automotive Vehicle Composite Body Structure. Danielson, Kurt Henry; Thomas, Lawrence Scott; Bartlett, Andrew Charles & Eggerding, Richard Scott. Apter Motors Inc. 6.5.2011 (3.5.2012)
 134. US2012/0104803. Automotive Vehicle Composite Body. Thomas, Lawrence Scott & Danielson, Kurt Henry. Aptera Motors Inc. 29.10.2010 (3.5.2012)

135. US6168231. Two piece plastic vehicle panel construction. Fielding, Russell C.; Schroeder, Del C.; Burns, John D. & Hoffman, Bernhard U. DaimlerChrysler Corporation. 1.4.1999 (2.1.2001).
136. Champion, Ron. Build Your Own Sports Car for as Little as £250 and Race It! Haynes Publications 2000. p. 192.
137. McSorley, Jim. Building a Sevensesque roadster. [Online] 2012. [Viitattu: 23.11.2012]. <http://www.sevenesque.com/>.
138. Bond Laminates. TEPEX® forming. Bond Laminates. [Online] 2012. [Viitattu: 17.1.2013]. <http://www.bond-laminates.com/en/processing-technology/tepex-forming.html>.
139. EMS Grivory. EMS Grivory Material Database. EMS Grivory. [Online] 2012. [Viitattu: 21.1.2013]. <http://www.emsgrivory.com/index.cfm?id=185>.
140. SAE J4004. 2008-8. Positioning the H-point Design Tool - Seating Reference Point and Seat Track Length. SAE International
141. DE 102011105858 (A1). Method for manufacturing fiber reinforced plastic pultrusion profile used during manufacturing of components of motor vehicle, involves curing plastic material for obtaining fiber reinforced plastic pultrusion profile. Daimler AG (De). 1.6.2011 (6.12.2012).

LIITE 1: TAIVUTUSJÄYKKYYDEN VERTAILU

Tässä liitteessä on esitettyä kaaviot, joista nähdään kuinka profiilin seinämäpaksuuden muutokset vaikuttavat vaadittavaan seinämäpaksuuteen pyrittäessä pitämään taivutusjäykkyys vakiona verrattuna ennaltavalitun kokoiseen teräsputkeen. Lisäksi on esitetty vastaavien profiilien paino pituusyksikköä kohden. Poikkileikkauksen muoto pidetään vakiona eli esimerkiksi neliöprofiileissa muuttuu kummankin sivun pituus samassa suhteessa toisiinsa. Valitut kimmomodulien arvot ovat kirjallisuudesta löytyviä vaihtelevia arvoja ja kuvaavat käytännössä kirjoittajan mielestä järkeviä minimi- ja maksimiarvoja suunnittelun suhteen. Esimerkiksi lasikuidun minimiarvo pohjautuu EN-13706 mukaiseen standardiin lasikuituprofiileista. Laskennassa käytetyt materiaaliarvot ovat esitettyinä seuraavassa taulukossa. Laskennassa ei huomioida komposiittien poikkisuuntaista eroa esimerkiksi kiertojäykkyydessä.

Taulukko 31. Jäykkyydlaskennan materiaaliarvot

Teräs	
Tiheys (1000 kg / m ³)	7,85
Kimmomoduli (GPa)	200
Seinäämä (mm)	1,5
Lasikuitu 1	
Tiheys (1000 kg / m ³)	2
Kimmomoduli (GPa)	23
Lasikuitu 2	
Tiheys (1000 kg / m ³)	2
Kimmomoduli (GPa)	40
Hiilikuitu 1	
Tiheys (1000 kg / m ³)	1,65
Kimmomoduli (GPa)	45
Hiilikuitu 2	
Tiheys (1000 kg / m ³)	1,65
Kimmomoduli (GPa)	130
Alumiini	
Tiheys (1000 kg / m ³)	2,75
Kimmomoduli (GPa)	70

Laskut perustuvat alla olevaan jäykkyyden kaavaan, jossa kahden materiaalien taivutusjäykkyys oletetaan vakioksi:

$$E_1 I_1 = E_2 I_2 \quad (1),$$

jossa E on kimmomoduli ja I on neliömomentti. Ontolle poikkileikkaukseltaan neliömäiselle profiilille neliömomentti voidaan esittää:

$$I = \frac{H^4 - h^4}{12} \quad (2),$$

jossa H on neliön ulkosivun pituus ja h on onton neliöosuuden sivun pituus. Onton ympyräputken neliömomentti on puolestaan:

$$I = \frac{(D^4 - d^4)\pi}{64} \quad (3),$$

Yhdistämällä kaavat 1 ja 2 tai 1 ja 3 voidaan laskea esimerkiksi jäykkyydeltä teräsputkea vastaavan profiilin ulkohalkaisija antamalla sisemmän halkaisijan arvolle eri arvoja. Tästä voidaan edelleen laskea tarvittava seinämäpaksuus vähentämällä ulkohalkaisijasta sisähalkaisija ja jakamalla kahdella. Profiilit oletetaan teräväkulmaisiksi eikä pyöristen mahdollista vaikutusta huomioida, sillä se voidaan olettaa alhaiseksi.

Valitut terästen putkikoot ovat esitettynä seuraavassa taulukossa. Putket 2, 3 ja 4 ovat valittu, sillä niitä käytetään Lotus 7 tyyppisen auton runkorakenteessa. Putki 1 on valittu esittämään hieman suurempaa teräsrakennetta.

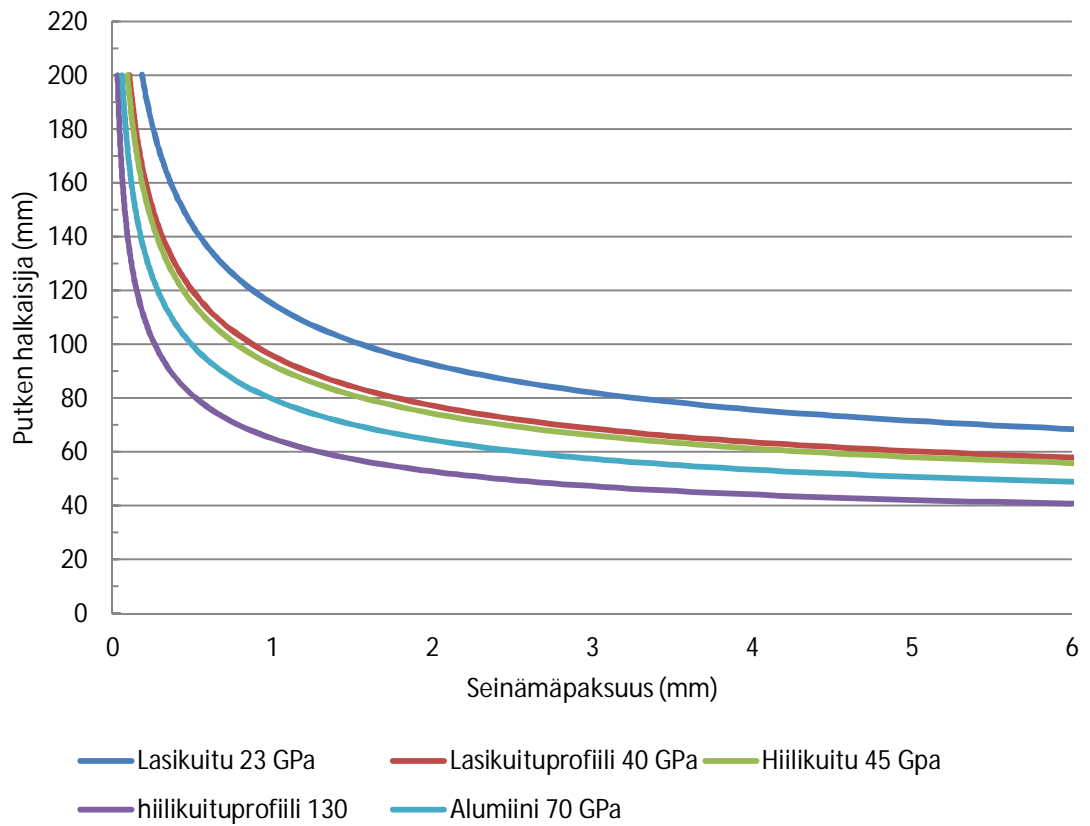
Taulukko 32. Laskennassa käytetyt putkikoot

Putkikoko (mm)	
Neliö	
Putkikoko 1	50x50x1,5
Putkikoko 2	25x25x1,5
Putkikoko 3	20x20x1,5
Pyörö	
Putkikoko 4	19x1,5

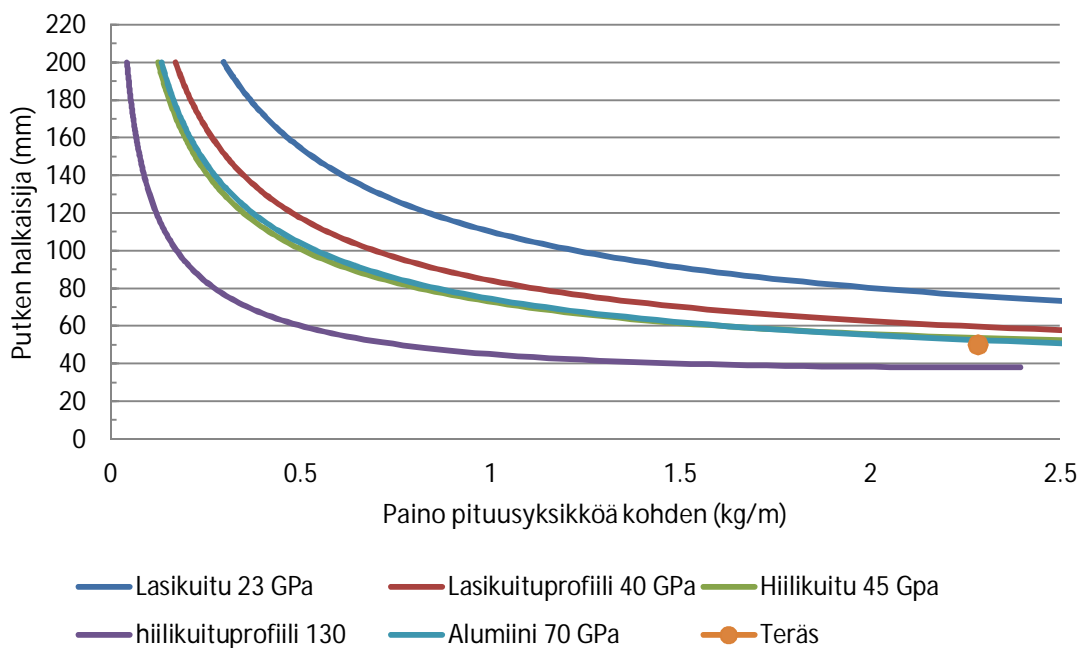
Kuvaajista voidaan nähdä, että tietyn kokoisen metalliputken korvaamiseksi vaaditaan muilta materiaaleilta tietty vähimmäiskoko, eikä edes ulkomitoiltaan vastaava umpitanko yllä aina samaan jäykkyyteen. Voidaan myös havaita, että kasvattamalla profiilin ulkomittoja erittäin paljon päästään erittäin pieneen ainevahvuuteen ja samalla alhaiseen massaan. Tämä ei kuitenkaan ole realistinen, sillä äärettömän ohut rakenne on mahdoton valmistaa materiaaliominaisuuksista ja valmistusmenetelmistä johtuen ja sen vaurion ja iskunkestävyys olisi käytännössä liian huono. Kuvaajista voidaan myöskin nähdä, että pyrkimällä mahdollisimman lähelle alkuperäisiä teräsputkien dimensioita lähestytään niitä myös painossa tai pahimmassa tapauksessa ylitetään ne. Profiilin halkaisijan ja massan pituusyksikköä esittävät kuvaajat kertovat käytännössä materiaalin ominaisjäykkyydestä. Esimerkiksi 45 GPa hiilikuituprofiilin ja alumiiniprofiilin ominaisjäykkyys on lähes sama, jolloin myös niiltä vaadittava massa on lähes sama. Tällöin materiaalien kilohinta voidaan ottaa huomioon ja ero standardihiilikuitu ja alumiiniprofiilien välillä kallistuu alumiiniprofiileihin. 45 GPa:n hiilikuituprofiili on ominaisuuksiltaan luultavasti melko isotrooppinen jolloin poikittaissuuntaiset ominaisuudet voivat olla myös hyviä. Profiilien tutkiminen, joiden poikkileikkaus muuttaa muotoaan jäykkyyden vakioimiseksi voisi antaa erilaisia tuloksia. Alustavasti voidaan kuitenkin arvi-

oida, että hiilikuidun kannattaa olla palkkina hyvä laatuista ja siinä pitää olla melko paljon yksittäissuunnattuja kuituja, jotta saadaan riittävän suuri ero alumiiniin. Myös lasikuituprofiilien voidaan havaita toimivan mahdollisena keinona säästää painoa. Tällöin tosin tarvitaan suurempia rakenteita.

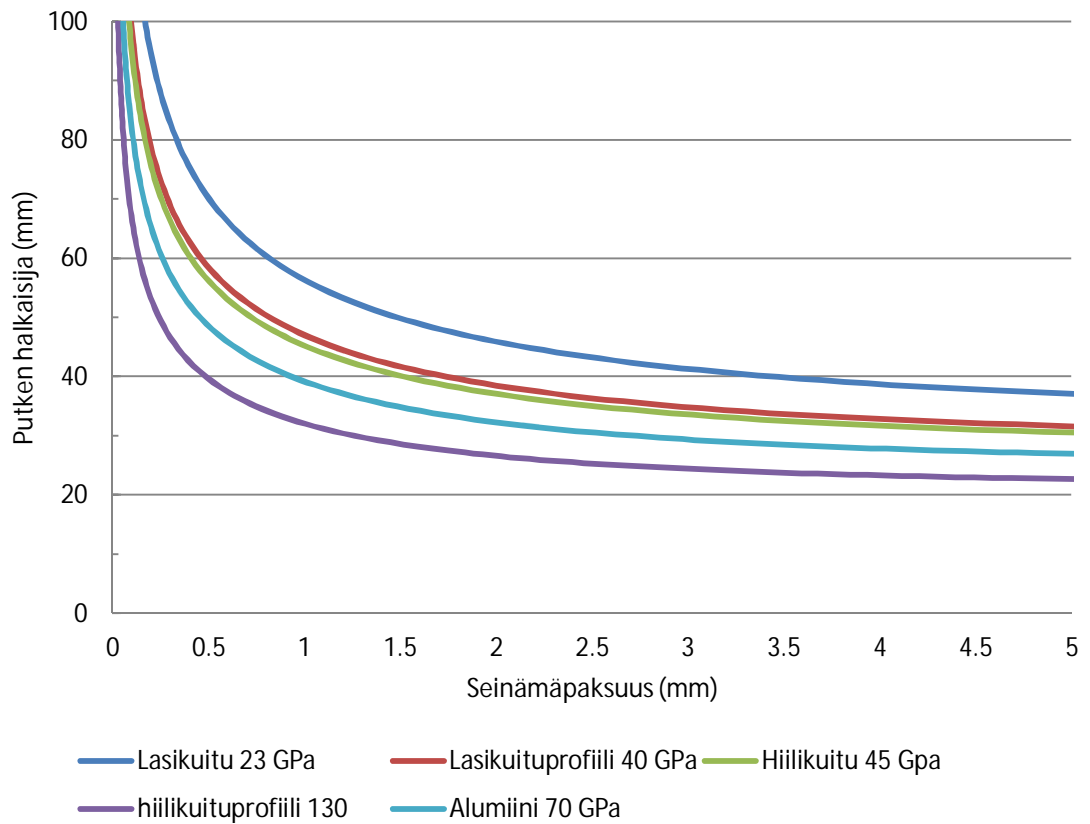
50x50x1,5 Neliöteräsputkea vastaava taivutusjäykkyys



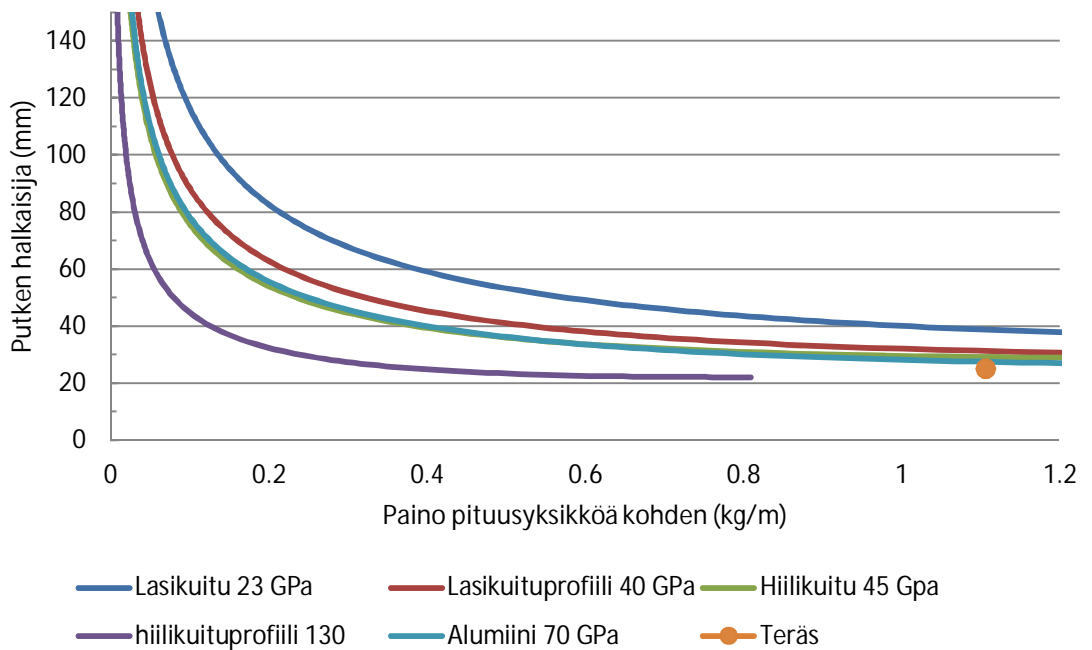
50x50x1,5 Putkiterästä jäykkyydeltään vastaava profiili



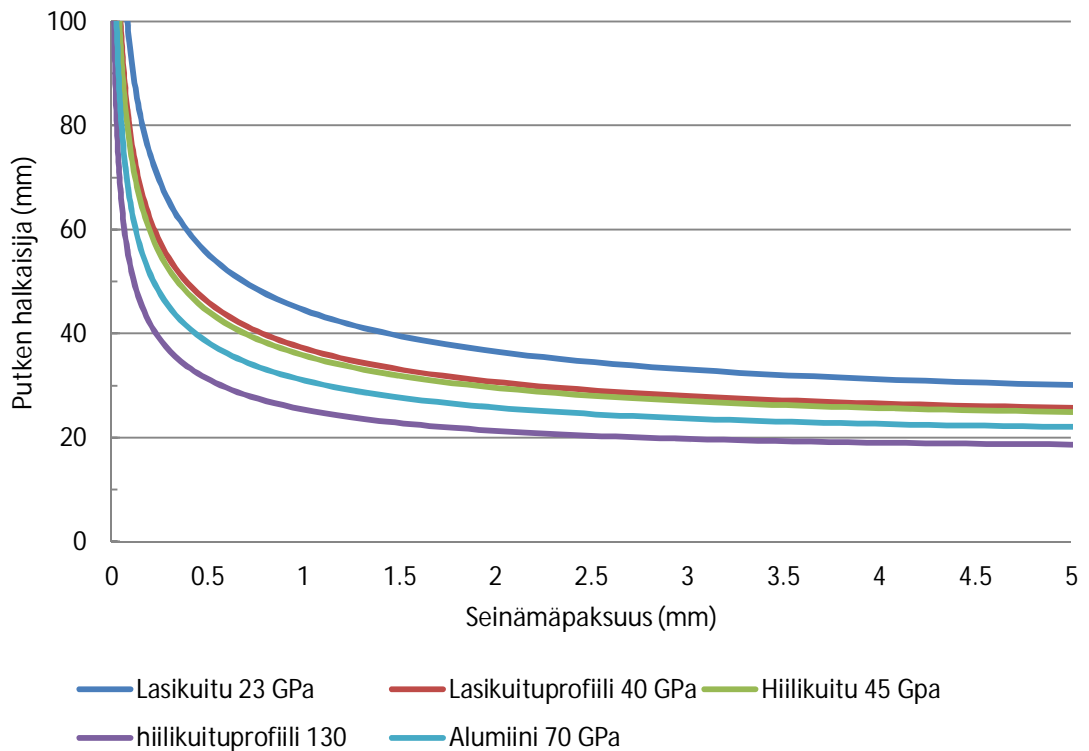
25x25x1,5 Neliöteräsputkea vastaava taivutusjäykkyys



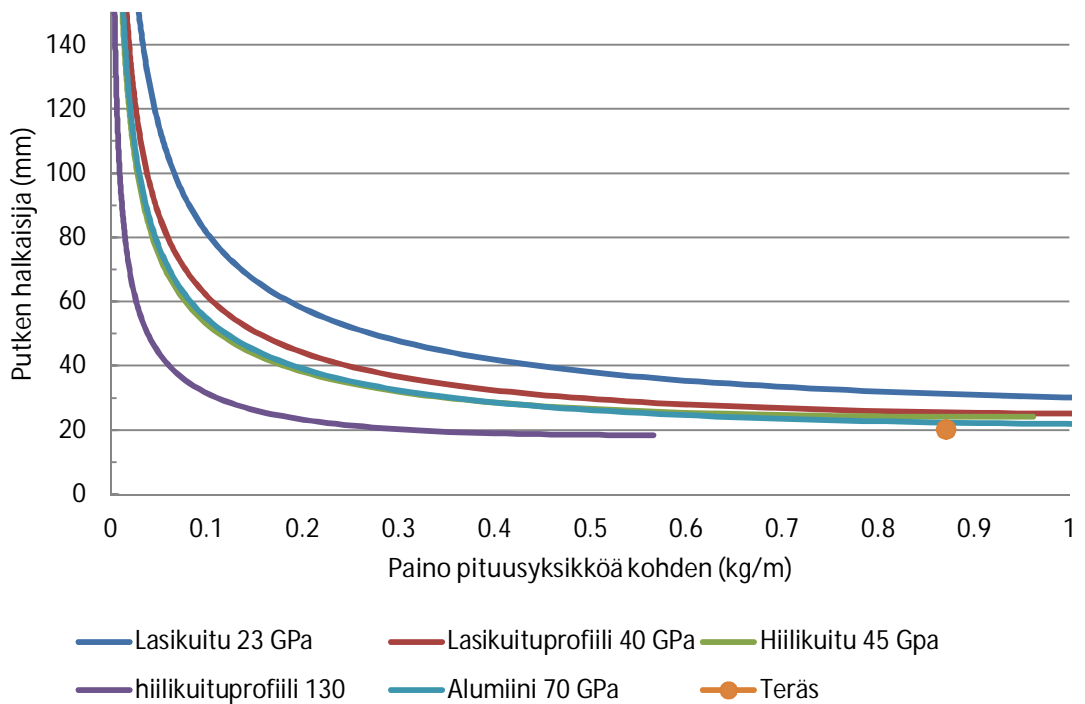
25x25x1,5 Putkiterästä jäykkyydeltään vastaava profiili



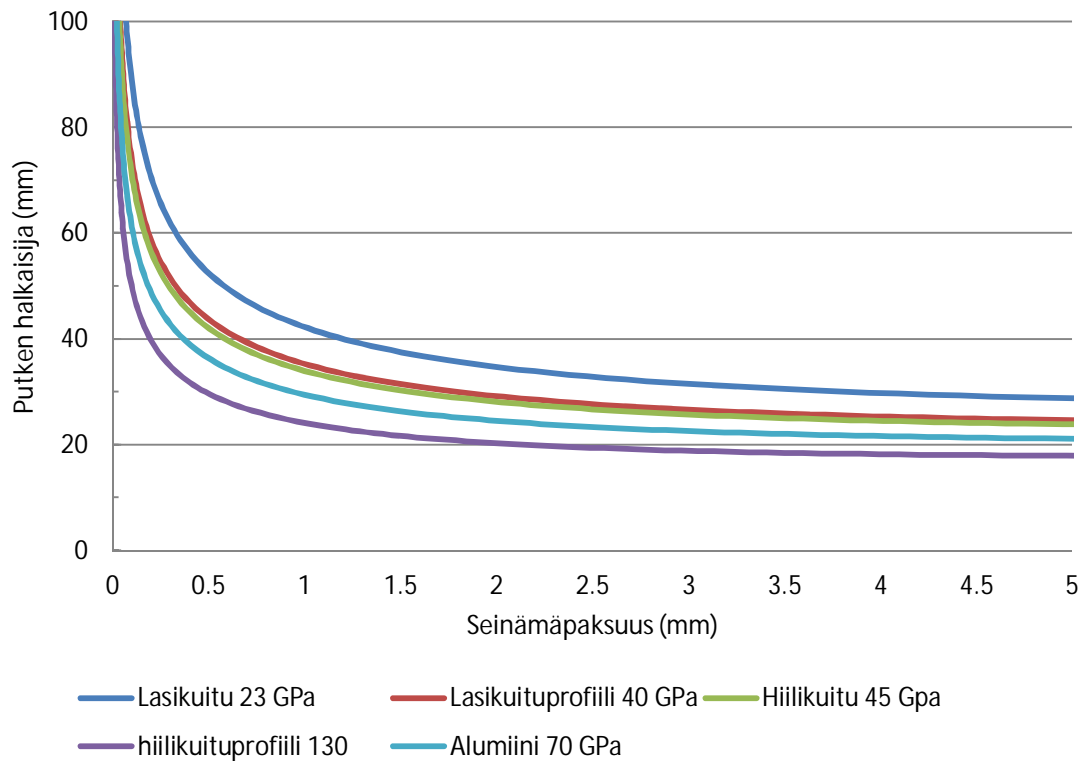
20x20x1,5 Neliöteräsputkea vastaava taivutusjäykkyys



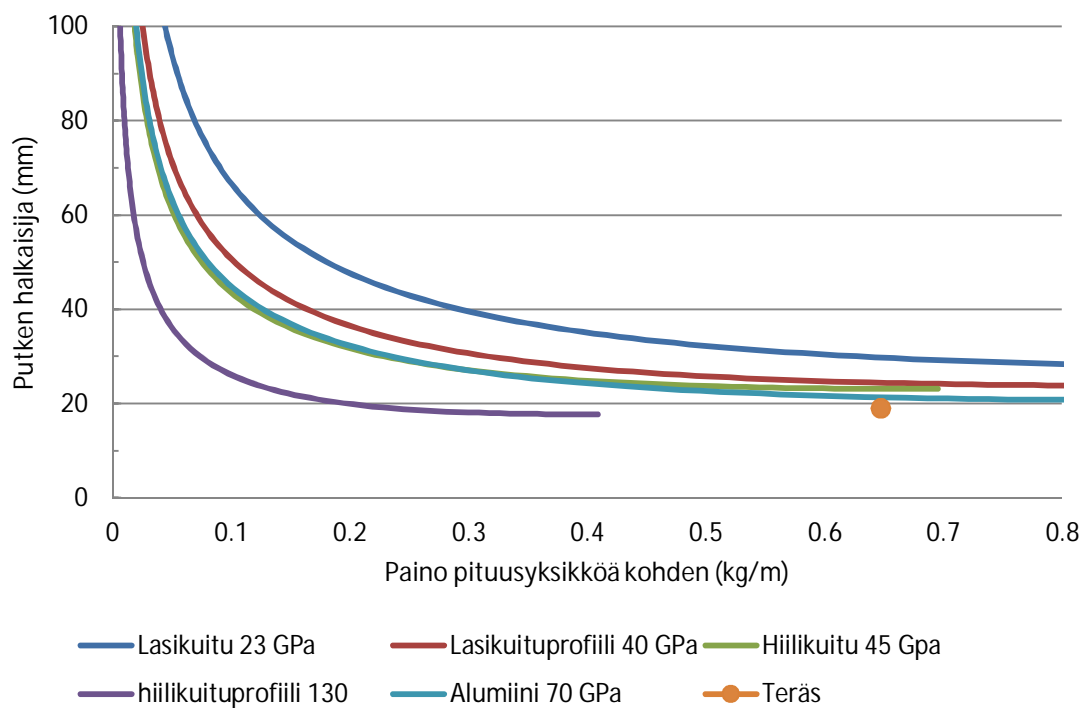
20x20x1,5 Putkiterästä jäykkyydeltään vastaava profiili



19x1,5 Putkiterästä vastaava taivutusjäykkyys



19x1,5 Putkiterästä jäykkyydeltään vastaava profiili



LIITE 2: MENETELMÄVERTAILU

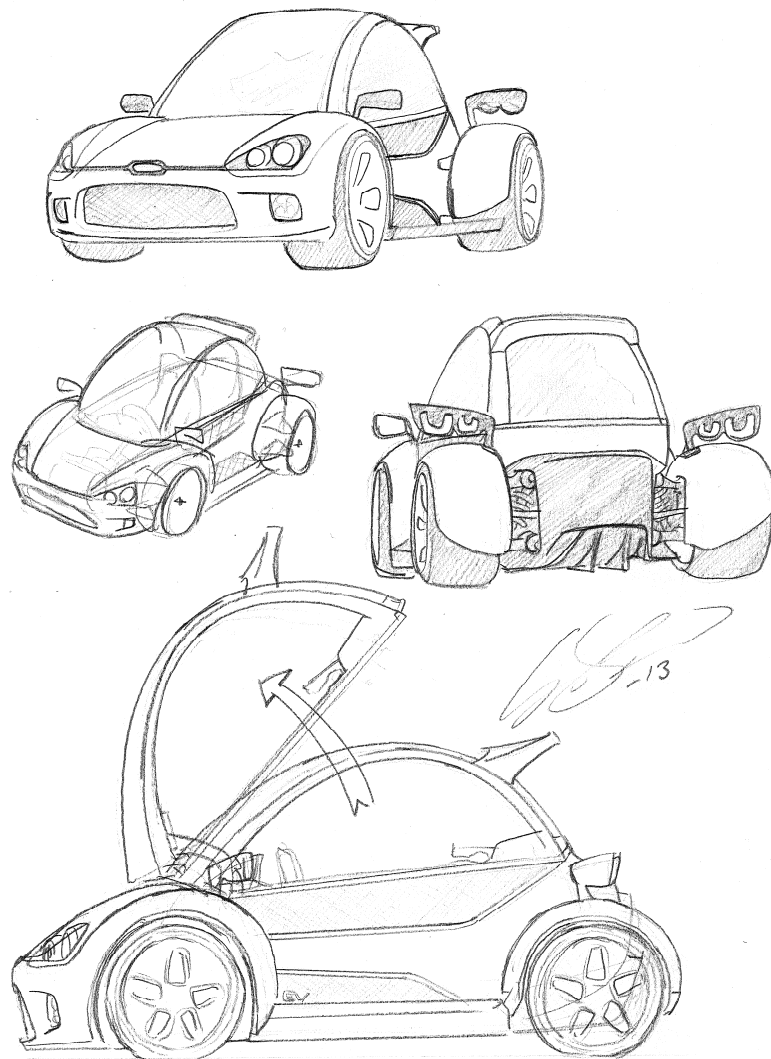
Taulukko 33. Komposiittien valmistusmenetelmien etuja ja haittoja. (13)(57)

	Edut	Haitat
Märkälaminointi	<p>Alhaiset muotti- ja laitekustannukset</p> <p>Suuret kappaleet ja prototyypit olla taloudellisesti kannattavia</p> <p>Voidaan käyttää inserttejä</p> <p>Erilaiset lujitemuodot ja lisävahvistukset mahdollisia</p> <p>Kerroslevyt mahdollisia</p>	<p>Manuaalisen työn osuus suuri</p> <p>Ei sovellu suuriin sarjoihin</p> <p>Tarvitsee ilmastoinnin</p> <p>Työntekijän ammattitaidolla suuri vaikutus</p> <p>Yksi sileä pinta</p>
Prepreg-laminointi	<p>Erittäin hyvät mekaaniset ominaisuudet</p> <p>Vähäinen huokosten määrä</p> <p>Kerroslevyt mahdollisia</p> <p>Ei sotkevaa nestemäistä hartsia</p>	<p>Autoklaavimuotit ja -laitteet kalliita</p> <p>Monimutkaisten muotojen laminointi hidasta</p> <p>Pitkä kovetus aika</p> <p>Kalliimmat raaka-aineet</p>
Kelaus	<p>Nopea prosessi</p> <p>Monipuoliset lujiterakenteet</p>	<p>Aksiaalisuuntainen lujitus hankala</p> <p>Lujitus kaksidimensionaalista</p>
Punonta	<p>Aksiaalinen lujitus helppo toteuttaa</p> <p>Kolmidimensionaalinen lujitus mahdollinen</p>	<p>Hidas</p> <p>Rajattu määrä erilaisia lujiterakenteita</p>
Paineinjektio	<p>Kohtuulliset muottikustannukset</p> <p>Mahdollisuus kerroslevyjen valmistamiseen</p> <p>Erilaiset lujitemuodot mahdollisia</p> <p>Voidaan käyttää täyteaineita</p> <p>Kaikki pinnat sileitä muottipintoja</p> <p>Vähäiset liuotepäästöt</p> <p>Kohtuullinen paine</p> <p>Puristusmenetelmiä matalammat laiteinvestoinnit</p>	<p>Ei sovellu suuriin sarjoihin</p> <p>Alle 2 mm seinämäpaksuudet hankalia</p> <p>Ei suuria seinämäpaksuuden vaihteluita</p>

Alipaineinjektio	<p>Voidaan käyttää halvempia avolaminointimuotteja</p> <p>Voidaan valmistaa suuria kappaleita</p> <p>Korkea lujitepitoisuus</p> <p>Erilaiset lujitemuodot mahdollisia</p> <p>Mahdollisuus prepregien käyttöön</p>	<p>Jätteet</p> <p>Syöttö vaatii optimointia</p>
Kalvoinjektio	<p>Varmemmin hyvä kostutus ja oikea hartsimäärä</p> <p>Hyvä pinnanlaatu</p> <p>Vähemmän lisätarvikkeita kuin alipaineinjektiossa</p> <p>Prepreg-laminointia edullisempi</p>	<p>Alipaineinjektiota kalliimpi</p> <p>Rajoitettu tuotteiden käyttöaika</p> <p>Vaatii lämmityksen</p>
RIM	<p>Nopea prosessi</p> <p>Matalat muottipaineet</p> <p>Mittatarkat kappaleet</p> <p>Sileät pinnat</p> <p>Hyvät elastiset ominaisuudet</p>	<p>Alhaiset mekaaniset ominaisuudet</p> <p>Kalliit laitteet</p> <p>A-pinta voi vaatia maalauksen</p>
Ruiskuvalu	<p>Nopea prosessi</p> <p>Erittäin automatisoitu</p> <p>Monimutkaiset kappaleet mahdollisia</p> <p>Paljon erilaisia raaka-aineita</p> <p>Tasainen laatu</p> <p>Vakioitu mittatoleranssi</p>	<p>Kalliit laitteet ja muotit</p> <p>Suuret kappaleet kalliita</p> <p>Suunnatut lujitteet vaikeasti toteutettavissa</p>
Pultruusio	<p>Hyvät mekaaniset ominaisuudet</p> <p>Kohtuullinen tuotehinta</p> <p>Nopea prosessi</p> <p>Ei kokorajoitteita</p>	<p>Alumiinipursotustyökaluja suuremmat muottikustannukset</p> <p>Yleisessä menetelmässä vain vakio-poikkipinta-ala</p>

LIITE 3: KONSEPTIAUTO

Tässä osiossa esitellään konseptiauto, jonka space frame-rakenne perustuu pitkälti pulttuasiomenetelmän hyödyntämiseen. Konseptin esittely keskittyy työn aiheen vuoksi space frame-rakenteeseen. Tulee kuitenkin huomioida, että myös muiden systeemien ja komponenttien olemassaolo ja vaatimukset tulee tiedostaa runkosuunnittelussa. Tästä syystä myös niiden pakkaus on suunniteltu alustavalla tasolla. Työn aiheesta johtuen ei myöskään muotoilua mallinnettu vaan se ajateltiin space frame-rakenteeseen liitettäväksi osaksi. Kappale on jaettu konseptin määrittelyyn, pakkauksen kehityksen esitykseen sekä pakkauksen arviointiin. Seuraava kuva esittää ajoneuvosta piirrettyjä muotoiluhahmotelmia.



Kuva 44. Muotoiluhahmotelma (S.Hyypiä)

Konseptin määrittely

Konseptiajoneuvossa lähtökohtana oli pultruusion hyödyntäminen yksinkertaisessa, kustannustehokkaassa, taloudellisessa, pienessä ja ennenkaikkea hausassa ajoneuvossa. Käyttövoimaksi haluttiin sähkö, mutta polttomoottoriakaan ei suljettu pois. Sähköauton komponenttien vaatima tilavaraus on polttomoottorikäyttöistä suurempi, jonka takia sähköautolle suunniteltu konsepti on helpompi muuttaa myös eri käyttövoimalle näin haluttaessa.

Ajoneuvoluokaksi valittiin L7e, joka mahdollistaa M1-henkilöautoluokkaa vapaammat kädet säädösten ja suunnittelun kanssa. Pääasialliset rajoitteet konseptin rakenteellisten osien kannalta ovat suurin sallittu massa (550 kg, tavarankuljetukseen soveltuva) sekä teho (15 kW). Nykysäädöksillä akkujen painoa ei lasketa massaan mukaan, mikä helpottaa suunnittelua. Ajoneuvon turvallisuuteen pyrittiin kiinnittämään huomiota, sillä niin sanotut mopoautot ovat saaneet tällä osa-alueella kyseenalaista huomiota.

Mopoautot kuuluvat myös L-luokitukseen, mutta niiden L6e-luokassa paino- ja tehorajat ovat tiukemmat ja niissä L7e-luokasta poiketen rakenteellinen nopeusrajoitus. Tulee kuitenkin huomioida, että L7e- ja L6e-luokan ajoneuvoilta ei vaadita turvallisuuden liittyviä törmäystestejä. Konseptin tässä vaiheessa ei kuitenkaan kannata optimoida rakennetta liaksi, sillä käytännössä komponentteja ei ole vielä tarkkaan valittu. L7e-luokan valintaa puoltaa myös kuluttajien suuret vaatimukset tavalliselle henkilöautolle, jolloin erikoisemmat ja uudet ratkaisut eivät ole mahdollisia.

Kokoa ei ollut muutoin tarkkaan määrittetty, mutta alustavaksi kooksi haluttiin noin 3000 mm pitkä, korkeintaan 1600 mm leveä ja noin 1300 mm korkea ajoneuvo. Tällöin auto olisi vertailuautoja leveämpi, pidempi ja matalampi mahdollistaen urheilullisemman ulkonäön. Akseliväliksi haluttiin noin 2100 mm. Maavara pyrittiin suunnittelemaan 100-130 mm välille, jotta voidaan saavuttaa urheiluautomainen rakenne. Kuskin ajoasento haluttiin urheiluautojen tapaan melko matalaksi.

Ajoneuvosta haluttiin taka- tai nelivetoinen ajotuntuman ja ajettavuuden takia. Neliveto ajateltiin mahdollisuutena, jota segmentissä ei vielä hyödynnetä ja takavedolla haluttiin tuoda konseptiin urheilullisuutta.

Konseptiautosta haluttiin kaksipaikkainen ja selkeästi muista segmentissä olevista ajoneuvoista erottuva. Ainoastaan yksipaikkaisen ajoneuvon suunnittelu koettiin liian suurena rajoitteena verrattuna muihin segmentin ajoneuvoihin. Tavaratilan suuruutta ei pidetty kovin tärkeänä kriteerinä, mutta tilan tulisi riittää kevyille ostoksille. Tällöin auton tilat eivät rajaa mahdollisia asiakkaita niin paljoa pois.

Rakenteellisissa määrittelyissä päädyttiin kehittämään yksinkertaiset kasa- ja kiinnitysmekanismit. Toleranssien vaikutus ja toleranssiketjun pituus pyrittiin saamaan mahdollisimman pieneksi eli osien mittavaihteluiden ja näistä ketjureaktion lailla kasvava yhteisvaikutus minimoidaan. Määrittelyperusteet ja lisämotiiveja niille on myös esitettyä seuraavassa taulukossa.

Taulukko 34. Konseptin määrittely

Määrittely	Syyt, motiivit, ja seurakset
Yksinkertainen rakenne	Kustannusten minimointi, osien määrän minimointi, helppo kasattavuus, toleranssien vaikutusten minimointi
Pieni ajoneuvo	Soveltuu segmenttiin paremmin, vaatimuksia pituuden, leveyden ja korkeuden suhteen
Hauska ja muista erottuva	Kilpailuvaltti
Urheilullinen	Vaatii matalan ja pitkän muodon
Space frame-rakenne	Soveltuu monokokkia paremmin konseptiin ja pulttuusioon.
Pultrusion hyödyntäminen	Uusi ja erilainen menetelmä
Sähkökäyttöinen	Valmet Automotiven erikoisosaaminen, mahdollisuus myös polttomoottoriin, taloudellinen käyttökustannuksilta
L7e-luokitus	Suunnitteluvapaus, vähäiset rajoitteet, mahdollisuus pieneen ajoneuvoon
Kaksi matkustajaa	Kilpailijavertailu muihin segmentin ajoneuvoihin
Pieni tavaratila	Ei rajoita pientä kokoa tai muotoilua
Sarjakoko	Ei määritelty

Konseptin esikuviksi suunnittelun kannalta ajateltiin Renault Twizy onnistuneena sähkökäyttöisenä L7e-luokan ajoneuvona, Messerschmitt KR200 tehokkaan pakkaussuunnittelun kannalta, Lotus 7 yksinkertaisuuden vuoksi ja KTM X-Bow rajoja rikkovan muotoilun takia.

Benchmark- eli vertailutuotteita ovat käytännössä Estrima Biro (sähkökäyttöinen L6e), Renault Twizy (sähkökäyttöinen L6e ja L7e), sekä Tazzari Zero (sähkökäyttöinen L7e). Ajoneuvot ovat valittu segmenttiin kuuluvina sähkökäyttöisinä laitteina. Niistä pyritään vertaamaan saatavan tiedon valossa kapasiteettia, ajoneuvon massaa ja kokoa sekä yhdellä latauksella saatavaa kantamaa. Benchmark-tuotteiden tiedot ovat esitetty seuraavassa taulukossa

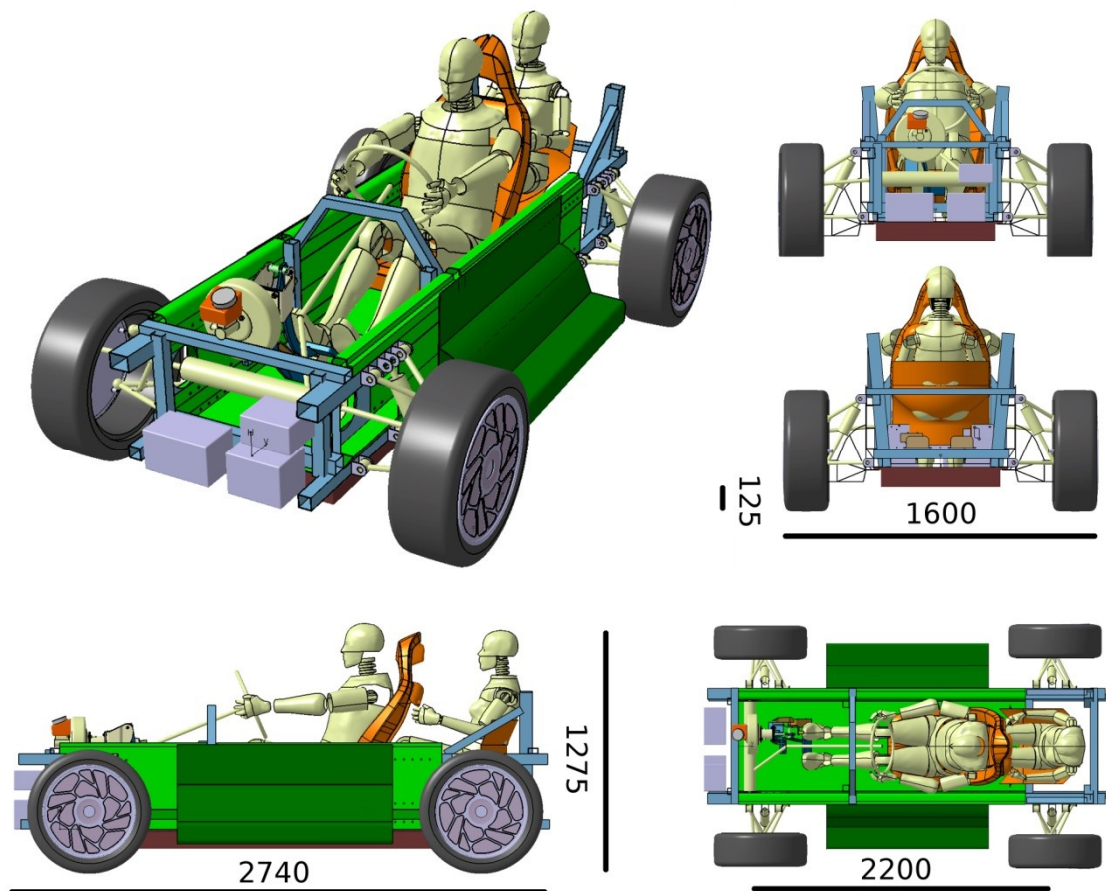
Taulukko 35. Benchmark-tuotteet

	Pituus (mm)	Leveys (mm)	Korkeus (mm)	Teho (kW)	Paino (kg) */**	Kapasiteetti (kWh)	Teho/ paino- suhde	Kantama (km)
Biro	1740	1030	1565	4	245/370	?	0,011	50
Twizy	2320	1190	1460	4/15	374/474	7	0,008/0,031	50-100
Zero	2880	1560	1425	15	?/542	?	0,028	140

*= Paino ilman akkuja, ** = Paino akkujen kanssa

Konseptiauton rakenteen ja pakkauksen kehittyminen

Tässä osiossa esitellään kuinka konseptiauton rakenne ja pakkaus kehittyi. Samalla kerrotaan miksi päädyttiin tiettyihin valintoihin ja kuinka ne vaikuttavat kokonaisuuteen. Seuraavaksi on esitettyä kuvia pakkauksesta. Kuvat on tarkoitettu silmäiltäväksi ensimmäisellä näkemällä, mutta tekstiä luettaessa voidaan kuviin palata, jotta ymmärtään paremmin ratkaisut ja niiden vaikutus pakkaukseen.



Kuva 45. Konseptin pakkauksen space frame rakenteen pääpiirteet

Yksinkertaisen rakenteen vuoksi päädyttiin ajatukseen, jossa osien määrä ja rakenteen monimutkaisuus voitaisiin minimoida käyttämällä ainoastaan yhtä osaa, joka kulkee koko auton rakenteen läpi pituussuunnassa. Tällöin tähän yhteen osaan voidaan kiinnittää kaikki muut tarvittavat komponentit. Käytännössä pultruusion havaittiin soveltuvan tähän tarkoitukseen erinomaisesti. Menetelmän avulla on mahdollista valmistaa yksi profiili kustannustehokkaasti. Haittapuolena on tosin rakenteen yksinkertaisuus, joka päätettiin kääntää konseptissa eduksi.

Pultruusioprofiilin vakioitu poikkileikkaus pakottaa käytännössä liittämään alustan ja pyörän tuennat profiilin ulkoreunaan, jolloin auton raideväli kasvaa profiilin leveyden kasvaessa. Tällöin kahden matkustajan istuessa vierekkäin auton leveys kasvaa liiaksi. Ongelma ratkaistiin sijoittamalla toinen matkustaja kuljettavan taakse, jolloin konsepti muuttui peräkkäin istuttavaksi. Kyseinen ratkaisu lisää tosin autolta vaadittavaa minimipituutta verrattuna vieräkkäin istuttavaan ajoneuvoon. Leveyden kasvu olisi voitu tosin ratkaista käyttämällä apurunkoa, jossa on kiinnityspisteet lähempänä auton keskilinjaa. Apurungon rakenne sotisi tällöin yksinkertaisuuden ja yhtenäisen rakenteen vaatimusta ja konsepti päätettiin pitää peräkkäinistuttavana. Lisäksi peräkkäinistuttavan mallin koettiin lisäävän ajoneuvon hauskuutta ja tekevän siitä muodoiltaan urheilullisemmän oloisen.

Pultruusioprofiilin ulkomitoiksi päätettiin 1950 mm x 774mm x 443 mm ja sisäleveydeksi 598 mm. Seinämäpaksuus on 2 mm ja muodoiltaan profiili pyrittiin pitämään mahdollisimman yksinkertaisena työkalukustannusten vähentämiseksi. Onkaloiden määrä on tässä vaiheessa pyritty pitämään mahdollisimman vähäisenä, mutta rakennetta optimoidessa onkaloiden määrä voi muuttua turvallisuuden parantamiseksi. Seinämäpaksuutta voidaan muuttaa myös, jos turvallisuusvaatimukset eivät muutoin täyty.

Sisäleveys mahdollistaa mukavan sisätilan, mutta jos konseptin mitat haluttaisiin minimoida, voitaisiin profiilia kaventaa. Esimerkiksi Lotus 7 matkustamossa on varattu noin 400-450 mm tilaa henkilöä kohden ja Birossa on 780 mm leveä penkki kahdelle. Kummassakin tapauksessa tosin ylävartalolle on varattu leveämpi tila. Nämä esimerkit kuitenkin koettiin liian kapeaksi mukavuuden kannalta, jonka takia päädyttiin leveämpään ratkaisuun.

Segmentin alhainen hintaluokka ja vaatimukset kustannustehokkaasta rakenteesta määrittävät pitkälti konseptin materiaalivalintoja. Materiaalihinnan rajatessa hiili- ja aramidikuidut pois jää jäljelle ainoastaan lasi- ja basalttikuidut järkevinä vaihtoehtoina. Basalttikuitu on lujitteista mielenkiintoisempi, sillä sen avulla on mahdollista saada hieman paremmat mekaaniset ominaisuudet. Basalttikomposiittien lasikuitukomposiitteja parempi palon kestävyys on myös haluttava ominaisuus onnettomuuksien kannalta. Basalttituotteiden hiilikuitua muistuttava ulkonäkö antaa myös mahdollisuuden rakenteeseen, jossa osa pultruusiotuotetta käytetään suoraan näkyvänä pintana. Tämä antaa mahdollisuuden erottua muista segmentin tuotteista. Lisäksi kustannukset, paino ja osamäärää saadaan alhaisemmaksi. Ulkonäkö ei tosin luultavasti täytä M1-luokassa normaaleja A-pinnan vaatimuksia, mutta L-luokan ajoneuvoissa pinnanlaadun vaatimukset eivät vaikuta yhtä tiukoilta. Pintaan saadaan näkyville "hiilikuitumainen" kuvio

hyödyntämällä pinnoissa esimerkiksi twill-tyyppistä lujitekangasta. Samalla tuotteen käyttöympäristön vaatimat mekaaniset ominaisuudet paranevat lujitesuuntien lisääntyessä ja mekaanisen kiinnittämisen aiheuttamat kuormat tasaantuvat paremmin. Mat-siisivaihtoehdoksi määräytyy helposti materiaalit - kappaleessa esille tuotu epoksi.

Basalttikuitulujitteinen komposiitti ei välttämättä pelkästään riitä mekaanisilta ominaisuuksiltaan ja jäykkyydeltään. Varsinkaan pultruusiomenetelmässä, jossa suurin osa lujitteista on vetosuunnassa. Rakenteen lujuuden parantamiseksi ja jäykkyyden kasvattamiseksi päätettiin rakenteeseen lisätä alumiiniset pitkittäisputket, jotka yhdistetään toisiinsa auton päistä poikittaisputkilla. Tällöin rakenteeseen saadaan lisää lujuutta ja jäykkyyttä eri suunnissa. Pitkittäisputket kulkevat koko profiilin lävitse. Alumiiniset insertteinä toimivat pitkittäisputket mahdollistavat myös täysin uudenlaisen kiinnityskonseptin. Toleranssien kannalta paikoitus tapahtuu yhteen pitkään putkeen monille osista. Tällöin toleranssiketju pysyy lyhyenä ja toleranssit helpommin hallittavissa. Käytännössä lähes kaikki space framen kannalta tärkeät liittimet, kiinnikkeet ja kiinnitykset voidaan paikoittaa pitkittäisputkiin. Osa liitoksista vaatii tosin myös pultruusio-profiilin työstöä.

Pitkittäisputkien kiinnitys pultruusioprofiiliin tapahtuu mekaanisesti ja liimamalla kappaleen 9.6 mukaisella tavalla. Rakenteen ja kiinnityskonseptin periaate voidaan nähdä myös samassa kappaleessa olevista kuvista (Kuva 42 s. 125 ja Kuva 43 s. 126). Pitkittäisputkiin liitetään osat mekaanisesti, hitsaamalla tai liimaamalla. Rakenteessa on päädytty tekemään esittelymielessä lyhyet apurakenteet eteen ja taakse. Rakenteet koostuvat poikittaisista ja pystyputkista, joilla jäykistetään space frame-runkoa lisää ja tuodaan samalla kiinnityspisteet mahdollisille ulkopaneeleille, katolle, kattokaarille ja muille tarvittaville osille.

Alustan ja ohjauksen osien kannalta havaittiin, että urheiluautomaisesti kaksi A-tukivartta ja jousen ympäröimä iskunvaimennin soveltuvat parhaiten rakenteeseen tilavaatimusten ja ajettavuuden takia. Ohjauksen komponentit puolestaan tulisi tuoda mahdollisimman eteen etteivät ne vie tilaa polkimilta. Tällöin voidaan autosta saada hieman lyhyempi.

Voimansiirron kannalta päädyttiin hyödyntämään vanteissa sijaitsevia napamoottoreita, sillä niillä voidaan optimoida tilatarvetta. Tilankäytön kannalta L7e-luokka on myös sähköautoissa edullinen, sillä matalatehoiset moottorit eivät vaadi yhtä massiivisia ja painavia ohjauslaitteita kuin normaalit henkilöautotehoiset moottorit. Nelivedosta ja sen suomista eduista muun muassa pidon kannalta luovuttiin, sillä tarvittavien moottorien ja ohjainten lukumäärä olisi tuplaantunut. Tällöin hankalin suunnittelukriteeri eli painoraja on helpompi toteuttaa. Samalla nousee tietysti myös kustannukset. Napamoottorien haittana voidaan pitää niiden sijaintia renkaissa, jolloin ne ovat osa jousitamaton massaa. Tällöin ne heikentävät ajo-ominaisuuksia. Tosin L7e-luokassa ajoneuvon maksiminopeudet jäävät tavallisia M1-luokan henkilöautoja alhaisemmiksi jolloin myös vaikutukset ovat pienemmät. Toisaalta vaikutusta suurentaa auton pieni kokonaispaino. Napamoottorien suurin etu kyseisessä rakenteessa on kuitenkin mahdollisuus lyhentää autoa hieman verrattuna perinteisiin sähkömoottoreihin.

Konseptin space frame suosii akkupaketin (Kuva 45, ruskea osa) liittämistä erillisenä pohjalevynä autoon. Akkujen tasainen sijoittuminen auton pohjaan on edullinen painopisteen ja painojakauman kannalta. Akkupaketti on tarkoitettu kiinnittämään pohjaan mekaanisesti hyödyntämällä alempia pitkittäisputkia. Benchmark-tuotteiden pohjalta havaittiin, että 5-10 kWh voisi olla riittävä kapasiteetti. Akkujen kemiaksi ajateltiin soveltuvan litium-titanaatti, jolloin 4- 10 cm korkealla pohjalevyllä saadaan aikaan 5-17 kWh kapasiteetti. Pohjalevy kiinnitetään alempiin pitkittäisiin putkiin, jolloin se jäykistää ja tukevoittaa space frame- rakennetta lisää. Suurin haittapuoli pohjassa olevassa akkupaketissa on auton kokonaiskorkeuden kasvu ja akkupaketin pohjalta vaadittava suojaus iskuja vastaan. Valittu akkukemia on lisäksi melko kallis ja vaadittavan akun hinta saattaa nostaa koko ajoneuvon hintaluokkaa liiaksi. Ratkaisu tähän voisi olla esimerkiksi Renault Twizyn tyylinen, jossa akkupaketti vuokrataan jolloin sen materiaalikustannukset eivät sisälly ostohintaan.

Latauslaite, 12 voltin akku ja muut 12 voltin järjestelmän osat on tarkoitettu sijoitettavaksi auton etuosaan, jotta voidaan tasata takana sijaitsevien komponenttien aiheuttamaa epäsuhtaa painojakaumassa. Johdotukset voidaan viedä akkupaketin vierestä pohjassa tai pultruusioprofiilin sisäpuolella seinämän vierestä. Akkupaketin erillisen nestejäähdyksen tarvetta ei ole määritetty tässä vaiheessa konseptia, mutta käytännössä jäähdytys ja sen vaatimat osat voidaan sijoittaa auton etuosaan jälleen parantaen painojakaumaa. Jäähdytysletkujen viennit voidaan tehdä samaan tapaan kuin johdotukset.

Turvallisuutta konseptissa on ajeltu alumiinisiin pitkittäisputkiin liitettävillä kolarivyöhykkeillä. Kolarivyöhykkeet voisivat olla kappaleessa 9.3 esitetyn mukainen puskuripalkki yhdistettynä muotoa muuttavaan lisäosaan tai kappaleen 9.5.3 tyyppinen rakenne, jossa ulkomuodon antavan osan sisään on valmistettu rivoista energiaa imevä rakenne. Suunnittelussa on pyritty pitämään pultruusioprofiilin muodonmuutokset mahdollisimman pieninä jolloin matkustajien turvallisuus ja rakenteiden korjattavuus paranevat. Turvallisuutta voidaan myös parantaa lisäämällä kylkialueelle erilliset sivutörmäysalueet, jotka voidaan valmistaa esimerkiksi pultruusion avulla. Kuitusuuntien kannattaisi sivutörmäyssuojien kohdalla olla suurelta osin 0 °, sillä tällöin rakenne imee paremmin energiaa sivuttaissuunnassa, eikä ole varsinaista pultruusiomatkustamoalujempi kolaritilanteessa. Tosin käyttämällä muuta rakennetta ohuempia seinämiä ja pyrkimällä ohjaamaan sivutörmäysalueeseen kohdistuvat voimat oikein matkustamon rakenteeseen voidaan vähentää muiden kuitusuuntien vaikutusta. Pitkittäiskuidut edesauttavat myös pitkittäissuunnassa tapahtuvaa törmäystä, sillä tällöin renkaan muodonmuutos saadaan hyödynnettyä paremmin.

Sivutörmäyspalkit lisäävät muodonmuutosaluetta ja siirtävät voimia akkupaketista pois päin runkorakenteeseen. Samalla etu- tai takatörmäyksessä pyörät ottavat kiinni sivualueisiin, jolloin niidenkin muodonmuutokseen kuluva energia voidaan hyödyntää törmäysenergian absorboimiseen. Samalla saadaan aikaan uusi voiman kulureitti sivutörmäyssuojien kautta jolloin vähennetään matkustamoon kohdistuvia rasituksia. Pakkausta esittävässä kuvassa (Kuva 45) on esimerkki pultruusiolla valmistetusta sivutörmäyssuojasta (tummanvihreä osa). Rakenne voidaan kiinnittää mekaanisesti pit-

kittäispalkkeihin, jolloin se voidaan korjaustilanteessa vaihtaa helposti uuteen osaan. Lisäturvallisuutta konseptiin on ajateltu asentamalla kuljettajalle eteturvatyyny. Sivuturvatyynyjä ei ole ajateltu järkeviksi huomioitaessa auton muoto.

Kuljettajan ja hallintalaitteiden asennot ja asemointi on määritetty SAE J4004 standardin mukaan (140). Kuskin kooksi on määritetty standardin mukainen 95 % miesmalli. Takamatkustajaksi on valikoitu 5 % naismalli, ja sen asento ja jalkatilat perustuvat alan tietämykseen ja kokemukseen. Rakenteessa ei ole ajateltu ovien välttämättömyyttä. Ovien tarve voidaan ratkaista esimerkiksi Messerschmitt KR200 tyyppisellä ratkaisulla, jossa ovi on saranoitu sivusta ja aukeaa samaan tapaan kuin hävittäjälentokoneissa. Rakenne voi olla myös avonainen jolloin voidaan käyttää turvakaaria. Pulttuosioprofiilin laidat ovat korkeat ja tällöin kyytiin nouseminen voi olla hankalaa. Sivutörmäyssuojien lisääminen tosin helpottaa tilannetta, sillä ne voivat toimia myös astinlautoina.

Konseptin arviointi

Konseptin onnistuminen säädösten kannalta edellyttää, että painoraja ei ylity. Seuraavassa taulukossa on esitetty arviot auton massasta sekä auton teho/paino-suhte. Painoarvioinnista voidaan huomata, että akkupaketin massa (noin 235 kg) on erittäin suuri verrattuna muuhun rakenteeseen (noin 332 kg). Tällä on suora vaikutus auton suorituskykyyn teho/paino-suhteen kasvaessa. Tällöin polttomoottori-tekniikalla voitaisiin säästää korkeampi teho/paino-suhte jolloin myöskin auto tuntuisi suorituskyvyltään tehokkaammalta. Polttomoottorillisen version massaksi voidaan olettaa auton massa ilman akkupakettia. Akkupakettia pienentämällä esimerkiksi 5 kW:iin voidaan kuitenkin auton massaa pienentää huomattavasti jolloin myös teho/paino-suhte paranee. Akkupaketin painoa ei kuitenkaan tällä hetkellä lasketa auton kokonaismassaan lakivaatimuksissa, jonka takia se ei suoranaisesti hankaloita suunnittelua. Teho/paino-suhteen vertaamista sähkö- ja polttomoottorisella laitteella hankaloittaa tosin lakisäädökset jolloin sähkömoottorilla käytetään jatkuvaa tehoa, mutta hetkellinen piikkiteho saa olla mitä vain. Tämä kasvattaa käytännössä kiihtyvyyttä ja tasoittaa poltto- ja sähkömoottorimallien eroja.

Taulukko 36. Auton massan ja teho/paino-suhteen arviointi

Osio	Massa (kg)
Pultruusioprofiili	30
Alumiinirakenteet	25
Sivutörmäyssuojat	15
Runkorakenne	70
Voimansiirto ja sähköosat	87,5
Alusta, ohjaus ja renkaat	82
Sisusta	41,5
Ulko-osat	51
Rakenne ilman akkupakettia	332
Akkupaketti 5 kW	80
Akkupaketti 17 kW	235
Auto 5 kW akkupaketilla	412
Auto 17 kW akkupaketilla	567
Teho-paino suhde	
5 kW akkupaketilla	0,036
17 kW akkupaketilla	0,026
Polttomootorilla	0,045
5 kW akkupaketilla (30 kW piikkiteho)	0,073
17 kW akkupaketilla (30 kW piikkiteho)	0,053

Törmäysalueet ovat turvallisuuden kannalta koettu tarpeellisiksi, mutta huomataan niiden tuovan paljon massaa rakenteeseen lisää. Varsinkin verrattuna Messerschmitt KR-200 tapaiseen vanhaan ajoneuvoon on konseptin massa huomattavasti suurempi. Twi-zyyn ja Tazzari Zeroon kanssa konsepti on lähes samalla viivalla massan suhteen, jos otetaan huomioon myös akkupakettien eri suuruiset massat.

Työn kannalta kuitenkin pultruusion hyödynnettävyys konseptissa on tärkein kriteeri. Pultruusion voidaan havaita soveltuvan valittuun käyttökohteeseen tietyin rajoittein. Monimutkainen ja iso osa on luultavasti hidas valmistaa ja vaadittava muotti on luultavasti melko kallis. Kokonaiskustannuksia alentaa kuitenkin muottien vähäinen määrä, sillä space frame-rakenne voidaan valmistaa käytännössä hyödyntämällä yhtä pultruusiomuottia ja yksinkertaisia alumiiniprofiileja. Pitkittäisputkien liittämiseen liittyviä mahdollisia toleranssiongelmia aiheuttaa lähinnä alumiiniprofiilien suoruuden vaihtelu. Esimerkiksi käyttämällä AW-6063 alumiinilaatua voi profiilin suoruus vaihdella standardin sallimissa rajoissa noin 2 mm 3 metrin matkalla. Vaikutus voidaan hävittää käyttämällä esimerkiksi hieman väljempää onkaloa pultruusioprofiilissa. Samalla väljyys antaa vaadittavan tilan liimasaumalle. Liiman leviäminen koko pultruusioprofiilin matkalle voi olla hankalaa, mutta levittämässä voidaan käyttää injektiota poraamalla muutamia pieniä reikiä pultruusioprofiiliin ja injektoimalla liima näiden kautta.

Matkustamoä tarkastellessa voidaan huomata, että kyseinen rakenne olisi mahdollista toteuttaa myös alumiiniprofiileja käyttämällä. Tällöin tosin tarvitaan yhden profiilin sijaan useampia. Lisäksi tarvittaisiin liitosalueet eri profiilien välille. Alumiinilla

ei myöskään onnistuisi pitkittäisputkien käyttö vastaavalla tavalla, mutta käytännössä pitkittäisputket voitaisiin korvata kasvattamalla seinämäpaksuutta sopivissa kohdissa profiileja.

Pultruusiomenetelmä rajoittaa myös sarjakokoa. Käytännössä pultruusioprosessi voi olla jatkuva, jolloin 1950 mm pitkiä matkustamon osia voidaan valmistaa vuodessa noin 5400 (Taulukko 11 s.40). Tällöin valmistusnopeus yhdellä muotilla ei riitä kovin suureen sarjakokoon vuodessa. Tosin voidaan arvioida, että sähkökäyttöisen L7e-luokan ajoneuvon järkevä sarjakoko on korkeintaan 10000 vuodessa ja luultavasti sekin on erittäin korkea arvio.

Alumiinia käytettäessä päästäisiin luultavasti suurempiin sarjakokoihin, mutta sitä ei koeta tarpeelliseksi. Kustannuksissa alumiini luultavasti tulisi halvemmaksi myös muottien osalta, vaikka niitä tarvitaankin enemmän. Painon kannalta alumiini ei olisi kyseisessä rakenteessa edullinen, sillä seinämäpaksuutta ei voida ohentaa kovin paljoa. Tosin rakenteesta tulisi alumiinisena jäykempi. Lujuuden kannalta on vaikea arvioida onko komposiitit vai alumiini parempi, sillä muuttamalla kuitusuuntaa voidaan basalttikuiduilla saada aikaan lujempi rakenne yhteen suuntaan kuin alumiinilla, mutta tällöin muiden suuntien lujuus heikkenee. Sivutörmäyssuojien kannalta pultruusio kuitenkin koetaan paremmaksi ratkaisuksi lujuusominaisuuksien paremman säädettävyyden ja komposiittien korkeamman energian absorboimiskyvyn takia.

Konseptin kannalta tulee huomioida myös lämpölaajeneminen. Arvioinnin kannalta ajatellaan kokoonpanon ja työstöjen tapahtuvan noin 20 °C lämpötilassa, ja profiilin lämpötilan muuttuvan pakkasen vaikutuksesta (- 30 °C) aina auringonpaisteen aiheuttamaan lämpöpiikkiin (80 °C). Tällöin alkulämpötilasta suurin muutos on noin 60 °C. 1950 mm pitkä lasi- tai basalttikuitulujitteinen pultruusioprofiili laajenee silloin noin 1,01 mm ja 2700 mm pitkä alumiiniprofiili laajenee noin 3,79 mm. Erotus on tällöin 2,79 mm. Rakenteen kannalta vaikein tilanne voidaan ajatella olosuhteissa, joissa alumiiniprofiili on täysin kiinteästi kiinni eikä mitään elastisia muodonmuutoksia tapahdu vaan ainoastaan 60 °C muutos huomioidaan. Tällöin alumiiniprofiiliin kohdistuu 98 MPa jännitys, joka on jo merkittävä lujuuden kannalta. On kuitenkin erittäin epätodennäköistä, että profiilien lämpötila nousisi näin paljon ja kauttaaltaan tasaisesti. Muutenkin tilannetta helpottaa liiman ja pultruusioprofiilin lämpölaajeneminen ja kaikkien osien elastinen muodonmuutos.

Todennäköisempi vaihtoehto suurimmaksi lämpötilamuutokseksi on pakkasen vaikutuksesta tapahtuva kutistuma. Tällöin syntyvät jännitykset tulee huomioida erityisen tarkkaan ja varsinkin liiman valintaan tulee kiinnittää huomiota ettei se muutu liian hauraaksi lämpötilan laskiessa. Jos haluttaisiin mahdollisimman lämpöyhteensopivat materiaalit niin alumiinirakenteet tulisi korvata teräksisillä. Lisäksi tulee huomioida, että edellä mainitut teoreettiset arvot ovat liian tarkkoja, sillä esimerkiksi komposiittiprofiilin lämpölaajenemiskerroin riippuu kuitusuunnista ja lujitepitoisuuksista.

Kokonaisuutena ajatellessa ei konseptista löydetty tässä vaiheessa mitään teknisiä esteitä toteutuksen kannalta. Etuja olisi kuitenkin valmistettavuus sekä yksinkertaisuus. Suurinta uutuusarvoa rakenteessa on koko rakenteen lävitse kulkeva profiili, johon liitetyjä pitkittäisputkia voidaan käyttää paikottamiseen.