

Tino Tuominen

Kaupunkiauton komposiittikorin suunnittelu ja siinä käytettävien materiaalien testaus

Metropolia Ammattikorkeakoulu
Insinööri (AMK)
Auto- ja kuljetustekniikka
Insinöörityö
8.5.2012

Tekijä Otsikko	Tino Tuominen Kaupunkiauton komposiittikorin suunnittelu ja siinä käytettävien materiaalien testaus
Sivumäärä Aika	87 sivua + 5 liitettä 8.5.2012
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Auto- ja kuljetustekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Tuotetekniikka
Ohjaaja	Projekti-insinööri Harri Santamala
<p>Tämä insinööryö tehtiin Metropolia ammattikorkeakoulun vuonna 2010 käynnistyneeseen kaupunkiautoprojektiin. Tämän insinööryön tarkoituksena oli suunnitella ja mallintaa kaupunkiauton komposiittinen kori sekä suorittaa korissa käytettävien rakennusmateriaalien lujuuskokeet. Korin rakennusmateriaalina käytetään pääosin hiilikuitukomposiittia, jonka lisäksi joissakin kohdissa käytetään myös selluloosakuitukomposiittia.</p> <p>Tässä insinööryössä tarkastellaan komposiittisen korin suunnitteluperusteita sekä miten suunniteltu kori jakautuu eri koripaneeliin valmistusta varten. Koripaneelien suunnitteluprosessi käydään yksitellen läpi ja dokumentoidaan niiden suunnitteluun vaikuttaneet olennaisimmat seikat. Tämän lisäksi työssä tarkastellaan koripaneelien liitostekniikkaa sekä seikkoja, jotka pitää huomioida paneelien yhteen liittämässä. Kori suunniteltiin ja mallinnettiin Catia V5 -ohjelmalla pintamallinnustekniikkaa käyttäen. Suunnittelutyön lisäksi työn puitteissa suoritettiin hiili- ja selluloosakuidusta valmistetuille koesauvoille veto- ja taivutuskokeet. Kokeiden tarkoituksena oli määrittää projektissa käytettävillä valmistustekniikoilla saavutettavat materiaalien lujuusominaisuudet. Olennaisena osana työhön kuului valmistustekniikoiden tarkka dokumentointi, jotta jatkossa voidaan valmistusprosessit toistaa samanlaisina ja materiaalien ominaisuudet voidaan näin ollen olettaa kokeiden tuloksia vastaaviksi.</p> <p>Insinööryön tuloksena syntyi valmis komposiittikorin malli, joka koostuu yhteensä 17 eri koripaneelista. Työ toimii myös tukimateriaalina tulevissa projekteissa, joissa auton kori on tarkoitus valmistaa komposiitista. Materiaalikoekiden osalta tulokset olivat osaltaan melko ristiriitaisia valmistajan ilmoittamiin arvoihin verrattuna. Materiaalien valmistus kuitenkin dokumentoitiin riittävän tarkasti, jotta ne voidaan valmistaa täsmälleen samanlaisella prosessilla ja uusia kokeet tarvittaessa.</p>	
Avainsanat	komposiittikori, koripaneeli, hiilikuitu, selluloosakuitu, injektointi

Author Title	Tino Tuominen Designing a composite car body for a city car and testing the materials used in the body
Number of Pages Date	87 pages + 5 appendices 8 May 2012
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Automotive and Transport Engineering
Specialisation option	Automotive Design Engineering
Instructor	Harri Santamala, Project Engineer
<p>In 2010 Helsinki Metropolia University of Applied Sciences launched a city car project and this Bachelor's thesis was carried out during its design process. The objective of this thesis was to design and model a composite body for a city car and to perform strength tests for the materials used in the body. The body consists mainly of carbon fiber composite but in some parts of the body cellulose fiber composite is used as well.</p> <p>First the design principles of a composite body were studied and how the body is divided into different body panels for manufacturing purposes. The design process of the body panels is described one panel at the time. The main factors which have an effect on the design of the panels are also described. In addition, joint technique of the body panels is reviewed in this thesis as well the facts which one should consider when designing a joint between different body panels. The body was designed and modeled with Catia V5 software using surface modeling tools. In addition to design work, strength tests were performed for both carbon and cellulose fiber based specimens. Strength tests included both tensile and flexural tests and the purpose of the tests was to determine the strength properties which are achievable with the manufacturing techniques used in the project. An essential part of this thesis was to accurately document the manufacturing processes of materials used in the body, which assures that the process could be repeated precisely in the same way in the future. Due to the same manufacturing process it can be assumed that the strength properties should be the same as achieved by the strength tests.</p> <p>As a result of this thesis a finished model of a composite body was designed. The model consists of 17 different body panels in total. This thesis can also be used as supporting material in the upcoming projects in which the aim is to design and manufacture a composite body. Regarding the material tests the achieved results were quite contradictory compared to the information that the material supplier provided. On the other hand, manufacturing of the materials was documented so accurately so they could be manufactured precisely in the same way and repeat the strength test, if necessary.</p>	
Keywords	composite body, body panel, carbon fiber, cellulose fiber,

Sisällys

1	Johdanto	1
1.1	Lähtökohdat	1
1.2	Tavoitteet	2
2	Komposiittikorin esisuunnittelu	3
2.1	Hiilikuitu ja laminaattirakenne	3
2.1.1	Laminaattirakenne	4
2.1.2	Hiilikuidun ominaisuudet	5
2.2	Mock-up	6
2.3	Korin ensimmäinen versio	8
3	Komposiittikorin suunnittelu	9
3.1	Benchmarking	9
3.2	Lujuusopin perusteita	11
3.2.1	Jäyhyysmomentti ja taivutusvastus	11
3.2.2	Nurjahdus	13
3.3	Valmistustapa	14
3.4	Mallintaminen	15
3.5	Koripaneelien liitostekniikka	16
4	Korin osajako	18
4.1	Tulipelti	19
4.1.1	Polkimien paikan määrittäminen	20
4.1.2	Tulipellin mallintaminen	20
4.1.3	Tulipellin kiinnitys	22
4.2	Lattiapaneeli	23
4.2.1	Lattiapaneelin suunnittelu ja mallinnus	24
4.2.2	Lattiapaneelin kiinnitys	26
4.3	Ulkokyljet	27
4.3.1	Oviaukko	29
4.3.2	Ikkunoiden liimapinnat	32
4.3.3	Ovien saranoiden ja eturungon kiinnitys	33
4.3.4	Takaluukun aukko	35

4.3.5	Ulkokylkien kiinnitys	35
4.3.6	Muottipuoli ja päästö	36
4.4	Sisäkyljet	37
4.4.1	Komponenttien kiinnitys sisäkylkeen	39
4.4.2	A-, C- ja D-pilari	41
4.4.3	Kattorakenne	44
4.4.4	Kiinnitys ja muottipuoli	48
4.5	Lattiapalkit	48
5	Koripaneelien kokoamisjärjestys ja offset-mitat	51
5.1	Kokoamisjärjestys	52
5.2	Offset-mitat	52
6	Materiaalikoheet	57
6.1	Materiaalit	57
6.1.1	Hiilikuitupreg	57
6.1.2	Selluloosakuitukomposiitti	58
6.2	Koesauvat	59
6.3	Selluloosakuitukoesauvojen valmistaminen	61
6.3.1	Muottilevyjen valmistus	61
6.3.2	Selluloosakuitulaminaatti	63
6.3.3	Lasikuitulaminaatti	67
6.3.4	Injektointi	68
6.3.5	Kovetus	71
6.3.6	Koesauvojen leikkaus	74
6.4	Hiilikuitukoesauvojen valmistaminen	74
6.4.1	Laminaatin valmistaminen	75
6.4.2	Kovetus	75
6.4.3	Koesauvojen leikkaus	75
6.5	Vetokoe	76
6.5.1	Selluloosakuitu	77
6.5.2	Hiilikuitu	78
6.6	Taivutuskoe	79
6.6.1	Selluloosakuitu	80
6.6.2	Hiilikuitu	81
7	Yhteenveto	82
7.1	Komposiittikori	82

7.1.1 Ongelmakohtat	83
7.2 Materiaalikoheet	84
Lähteet	86
Liitteet	
Liite 1. Injektointihartsin työohje	
Liite 2. Selluloosakuidun vetokoe	
Liite 3. Hiilikuidun vetokoe	
Liite 4. Selluloosakuidun taivutuskoe	
Liite 5. Hiilikuidun taivutuskoe	

1 Johdanto

Tämä insinööri työ tehtiin opinnäytetyönä Helsingin Metropolia Ammattikorkeakoulun kaupunkiautoprojektiin. Insinööri työn aiheena on projektin tuloksena syntyvän kaupunkiauton itsekantavan hiilikuitukorin suunnittelu ja mallinnus. Tämän lisäksi työssä käydään läpi eri komposiittimateriaaleille tehtyjä lujuskokeita ja niiden tuloksia. Näiden tuloksien avulla voidaan määrittää materiaalin paksuus eri korin osissa tarvittavan jäykkyyden saavuttamiseksi.

1.1 Lähtökohdat

Ihmisten ympäristötietoisuus lisääntyy jatkuvasti ja tänä päivänä autonomistajat kiinnittävät yhä enemmän huomiota automallien ympäristöystävällisyyteen. Tämä on hyvin huomattavissa autonvalmistajien markkinoinnissa, sillä autonvalmistajat kilpailevat keskenään automallien hiilidioksidipäästöjen alhaisella määrällä. Myös lainsäädännön vaatiessa yhä ympäristöystävällisempiä autoja muun muassa määrittelemällä polttoaineisiin lisättävän biokomponentteja on selvää mikä on tämän päivän trendi automarkkinoilla. Metropolia ammattikorkeakoulu vastaa tähän haasteeseen kestäväen kehityksen kaupunkiautohankkeella. Hankkeen käynnistämisen mahdollisti Tekes-rahoitus.

Kaupunkiautoprojekti käynnistyi esisuunnitteluvaiheella, johon rekrytoitiin Metropolia kymmenkunta insinööriopiskelijaa sekä saman verran teollisen muotoilun opiskelijoita. Projektin tavoitteena on suunnitella ja valmistaa konseptiauto urbaaniin ympäristöön. Esisuunnitteluvaiheen aikana insinööriopiskelijat yhdessä muotoilupuolen opiskelijoiden kanssa määrittivät ominaisuuksia, joita tulevaisuuden ekologisessa kaupunkiautossa olisi. Päällimmäisinä esille nousivat ketteryys ja siihen liittyen helppo pysäköitävyys, vähäinen kulutus, ekologiset rakennusmateriaalit sekä muutenkin auton kuvitteellisen omistajan vihreiden arvojen näkyminen. Vihreys oli yksi projektin rahoittajan vaatimuksista. Kun oli päästy yksimielisyyteen tulevan auton ominaisuuksista, ryhtyivät insinööriopiskelijat suunnittelemaan auton teknistä toteutusta ja muotoilupuolen opiskelijat taas luonnostelemaan auton ulkomuotoa.

Tulevaisuuden kaupunkiauton määriteltiin olevan ennen kaikkea ketterä sekä ympäristöystävällinen, joten tuli pohtia miten nämä seikat toteutuvat tekniikan osalta. Moottoritekniikassa downsizing eli iskuilavuuden pienentäminen on ollut trendinä jo usean vuoden ajan ja tästä syystä moottoriksi valittiin Volkswagen konsernin 1,2-litrainen turbodiesel. Jotta autossa olisi jotain täysin uutta, aiotaan moottori muuntaa käyttämään polttoaineena uusiutuvaa dieseliä. Uusiutuva diesel valmistetaan kasvijätteestä tai sitä varten tarkoituksellisesti kasvatetuista kasveista. Näin ollen se on uusiutuvana energianlähteenä huomattavasti ympäristöystävällisempää kuin perinteinen dieselöljy. Projektiauton hiilijalanjälkeä pyritään myös pienentämään käyttämällä korin rakennuksessa hiilikuidun sijasta myös tietyissä kohdissa selluloosakuituja. Kun hiilikuidun tiedetään olevan huomattavasti kevyempää kuin perinteinen korin valmistusmateriaali teräs, pienentää hiilikuidun käyttö auton polttoaineen kulutusta. Tämän lisäksi tavoitteena on käyttää myös verhoilussa ja ulkopaneeleissa uusiutuvia materiaaleja.

Kaupunkiautoa varten projekti osti VV-Auto -konsernilta lehdistöautona olleen Volkswagen Polon. Polo ostettiin ennen kaikkea jo edellä mainitun moottorin takia, mutta siitä aiotaan myös hyödyntää kaikki osat, jotka vain pystytään. Siitä tullaan muun muassa hyödyntämään pyöräntuennan sekä sisustan komponentteja.

1.2 Tavoitteet

Tämän insinööriyön tavoitteena on ensisijaisesti suunnitella ja mallintaa komposiittimonokokki eli itsekantava komposiittikori. Itsekantavassa korissa ei ole erillistä runkoa ja ulkokuorta vaan koko kori osallistuu kuorman kantaan. Tämä tarkoittaa siis sitä, että auton ulkopinnat, joitakin muotoilullisia osia lukuun ottamatta, ovat myös kantavaa rakennetta. Koria suunnitellessa tavoitteena on suunnitella se siten, että se voidaan koota mahdollisimman vähistä osista. Näin korissa ei ole suurta määrää eri osien liitoskohtia, minkä johdosta kokoaminen on helpompaa, korimuottien määrä vähäisempi sekä korin lujuus suurempi yhtenäisemmän rakenteen johdosta. Eri koripaneelien liitoskohdat haluttiin myös sellaisiin paikkoihin, joissa liitos ei joudu kohtuuttomalle rasitukselle. Osajako käydään läpi luvussa 4. Suunnittelutehtävän lisäksi tämän insinööriyön tavoitteena on toimia tulevissa projekteissa tukimateriaalina komposiittikorin suunnittelussa.

Kaupunkiauton kori koostuu pääosin hiilikuitukomposiitista, mutta sen lisäksi siinä käytetään myös selluloosakuitukomposiittia. Materiaalikoekiden tavoitteena on selvittää korissa käytettävien materiaalien ominaisuudet ja ennen kaikkea selluloosakuidun ominaisuudet. Selluloosakuidun käyttö auton korissa on tässä projektissa prototyyppiasteella, sillä tuote itsessään on saapunut markkinoille vasta 2010 eikä tiedossa ole aiempaa tapausta, jossa sitä olisi käytetty auton korissa. Selluloosakuitua on tarkoitus käyttää vain sellaisissa paikoissa, joissa ei tarvita hiilikuidun lujuusominaisuuksia. Tästä syystä niiden lujuusominaisuudet tulee selvittää, jotta tiedetään missä suhteessa selluloosakuitua voidaan käyttää hiilikuidun kanssa. Näin korin lujuus on riittävä myös niillä alueilla, joissa selluloosakuitua käytetään. Materiaalikoekisiin valmistettavien materiaalien valmistusprosessi on myös tarkoitus dokumentoida niin tarkasti, että varsinaisessa korin rakennuksessa prosessi voidaan toistaa täysin samalla tavalla. Näin saadaan eliminointia valmistustekniikasta johtuvat laadun vaihtelut mahdollisimman hyvin.

2 Komposiittikorin esisuunnittelu

Metropolia ammattikorkeakoululla on jo aikaisempaa kokemusta komposiittikorin valmistamisesta, sillä oppilaitoksen aiemmissa CityCab- ja ERA-projekteissa on korimateriaalina käytetty hiilikuitua. CityCabin kori ei ole täysin hiilikuituinen vaan se koostuu teräksisestä lattiakehikosta sekä hiilikuituisesta korin yläosasta. ERAn kori on puolestaan ensimmäinen Metropolia ammattikorkeakoulun suunnittelema ja valmistama kori, joka valmistettiin täysin hiilikuidusta. Tässä projektissa jatketaan edellä mainittujen projektien viitoittamaa tietä ja pyritään lisäämään oppilaitoksen tietotaitoa komposiittikorin suunnittelusta ja valmistamisesta.

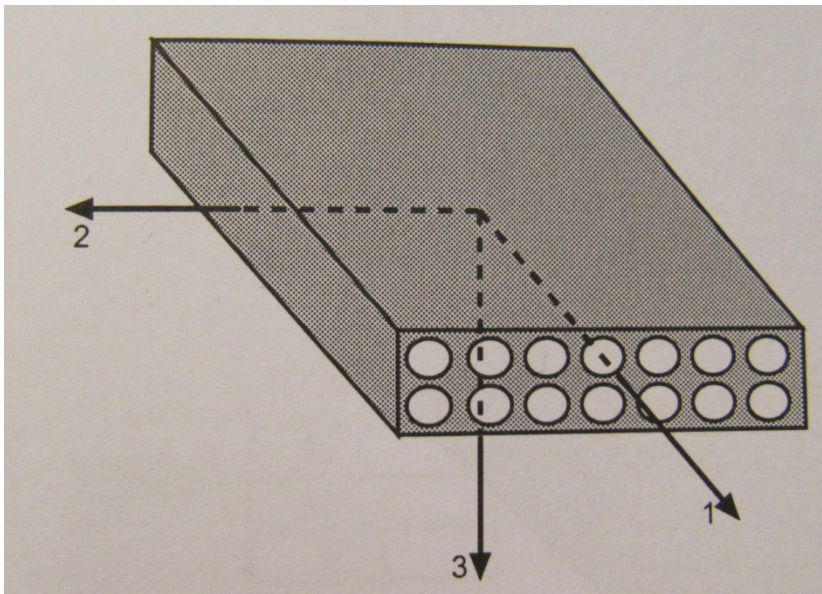
2.1 Hiilikuitu ja laminaattirakenne

Hiilikuidusta puhuttaessa arkikielessä tarkoitetaan sillä muovikomposiittia, joka koostuu hiilikuitulujitteesta ja muovisesta matriisiaineesta. Lujitteet kastetaan matriisiaineeseen, joka toimii sitovana aineena. Komposiitin lujuusominaisuudet määräytyvät suurimmalta osin käytettävän lujitteen mukaan, mutta siihen vaikuttavat myös käytettävän matriisin

ominaisuudet. Matriisin ominaisuudet vaikuttavat varsinkin kuitusuuntaan nähden poikittain vaikuttavien voimien keston.

2.1.1 Laminaattirakenne

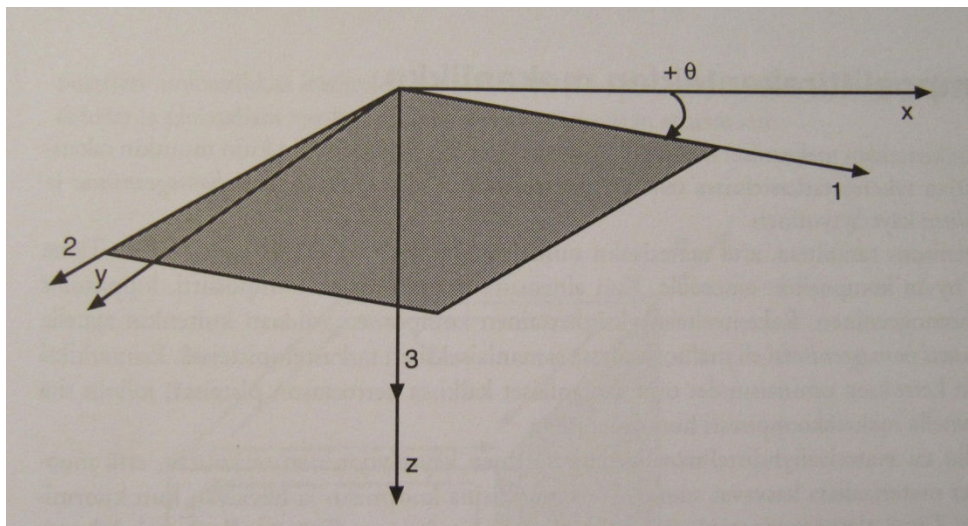
Komposiitti muodostuu yleensä useammasta kerroksesta lujitekuituja ja tällaista kerroksittaista rakennetta kutsutaan laminaatiksi. Kerrokset voivat muodostua esimerkiksi yhdensuuntaisista lujitekuiduista, joissa kuitusäikeet kulkevat kaikki samaan suuntaan. Laminaatin ominaisuudet ovat erilaiset eri suunnista tarkasteltuna, ja nämä suunnat voidaan määrittellä kahden koordinaatiston avulla, joita ovat laminaatti- ja kerroskoordinaatisto. Kerroskoordinaatisto muodostuu kolmesta xyz-akseleista vastaavista 123-akseleista. Näistä akselit 1 ja 2 kulkevat samassa tasossa ja akseli 3 niiden muodostamaa tasoa kohtisuorassa. Kuitujen suunta kerroksessa ilmoitetaan pääakselin 1 suhteen ja esimerkiksi yhdensuuntaiskuiduista muodostuvassa kerroksessa kuitujen suunta on 0° . (1, s. 23.) Kuvassa 1 on kuvattu koordinaatiston asema kuituihin nähden ja siitä voidaan huomata kuitujen kulkevan samaan suuntaan kuin pääakseli 1.



Kuva 1. Kerroskoordinaatisto (1, s. 23)

Laminaatti voi muodostua kerroksista, jotka ovat kulmassa toisiinsa nähden. Jotta voitaisiin ilmaista kerrosten suuntausta toisiinsa nähden, tarvitaan toista

koordinaatistoa, laminaattikoordinaatistoa. Laminaattikoordinaatiston ja kerroskoordinaatiston avulla ilmoitetaan astelukuna eri kerrosten suuntaus kerroskoordinaatiston 1-akselin ja laminaattikoordinaatiston x-akselin välillä. (Kuva 2.) (1, s. 23.) Laminaatin rakenne on tärkeä tietää, sillä yleisesti ottaen lujitekuiduilla on parhaat ominaisuudet kuitujen suunnassa.



Kuva 2. Laminaatti- ja kerroskoordinaatiston välinen kulma θ (1, s. 25)

2.1.2 Hiilikuidun ominaisuudet

Hiilikuidun mekaaniset ominaisuudet ovat erinomaiset. Sillä on erinomaiset veto-, puristus- ja taivutuslujuudet minkä lisäksi hiilikuitulaminaatit ovat täysin kimmoisia murtorajaan asti. Sen mekaaniset ominaisuudet ovat parhaat kuitusuunnassa, mikä voidaan huomioida korin lujuuslaskelmissa. (1, s. 87.) Hiilikuitukomposiitti voi muodostua suunnatuista kerroksista, tai kerrokset voivat muodostua kudotuista matoista, jolloin komposiitilla on lujuusominaisuuksia useaan suuntaan. Lujuuslaskelmilla selvitetään, kuinka paksu kerros hiilikuitua tarvitaan kuhunkin kohtaa sekä tarvittaessa kuidun suuntauksella saadaan lujuutta tarvittavaan suuntaan.

Auton kori joutuu jatkuvalla rasitukselle tienpinnan epätasaisuuksien johdosta. Hiilikuidun erinomaiset väsymisominaisuudet vaihtokuormituksella tekevät siitä korin rakennusmateriaalina erinomaisen (1, s. 87). Erinomaiset lujuusominaisuudet painon suhteen tekevät hiilikuidusta optimaalisen rakennusmateriaalin ekologiseen

kaupunkiautoon. Verrattuna perinteiseen korin rakennusmateriaaliin teräkseen hiilikuidulla saavutetaan tarvittava jäykkyys huomattavasti kevyemmällä rakenteella. Ei ole siis ihme, miksi hiilikuitu on esimerkiksi niin suosittu materiaali myös kilpa-autoissa. Kaupallisissa henkilöautoissa hiilikuidun käyttö sen keveydestä johtuen alentaa merkittävästi polttoaineen kulutusta, sillä mitä raskaampi auto, sitä enemmän vaaditaan energiaa sen liikuttamiseen. Kaupunkiolosuhteissa tämä korostuu, sillä kaupungissa joudutaan vuoroin pysähtymään ja kiihdyttämään uudelleen. Massan hitaudesta johtuen liikkeellelähdöt kuluttavat enemmän energiaa kuin tietyn nopeuden ylläpitäminen. Vähentämällä liikutettavaa massaa vähenee myös siihen tarvittava energia. Kun vaadittava energia otetaan polttoaineesta, polttoainetta kuluu vähemmän ja sen seurauksena hiilidioksidipäästöt pienenevät. Tästä syystä projektissa päädyttiin käyttämään hiilikuitua korin rakennusmateriaalina.

2.2 Mock-up

Ennen varsinaisen korin suunnittelua suunniteltiin ja rakennettiin tulevan auton mock-up eli tilankäyttömalli. Tilankäyttömalli tehtiin muotoilijoiden luonnostelemien auton ensimmäisten muotoversioiden pohjalta. Näistä alustavista versioista lyötiin lukkoon tulevan auton kriittisiä mittoja kuten pituus, leveys, akseliväli ja raideleveys. Mock-upin rakennusmateriaalina käytettiin alumiinia, sillä siitä haluttiin mahdollisimman kevyt ja helposti siirreltävä.

Tilankäyttömallia suunniteltaessa tuli ottaa huomioon muotoilijoiden määrittämät auton päämitat sekä eri komponenttien vaatima tilantarve. Suunnitteluprosessi lähti liikkeelle piirtämällä Catia V5 -ohjelmalla mock-upin runkopalkit ja niitä yhdistävät tukipalkit. Tämän jälkeen malli siirrettiin Abaqus-lujuuslaskentaohjelmaan, jossa runkoa kuormitettiin sopivilla voimilla. Simuloinnissa käytetyt voimat ovat arvioita oikeaan autoon kohdistuvista voimista, sillä tilankäyttömallin ei tarvitse kestää samanlaisia rasisitustilanteita, joihin normaalit autot joutuvat. Rungon laskennassa käytettiin kuitenkin melko suuria varmuuskertoimia, koska mock-upista päätettiin tehdä ajettava malli ja sen tulisi kestää hitaita ajonopeuksia. Kun tilankäyttömallin kantavat rakenteet oli suunniteltu, voitiin ryhtyä suunnittelemaan eri komponenttien kiinnityksille paikkoja joko kantaviin rakenteisiin tai omia kiinnityspalkkeja. Suunnittelun päätyttyä mock-up hitsattiin alumiinipalkeista TIG-hitsausta käyttäen. (Kuva 3.)



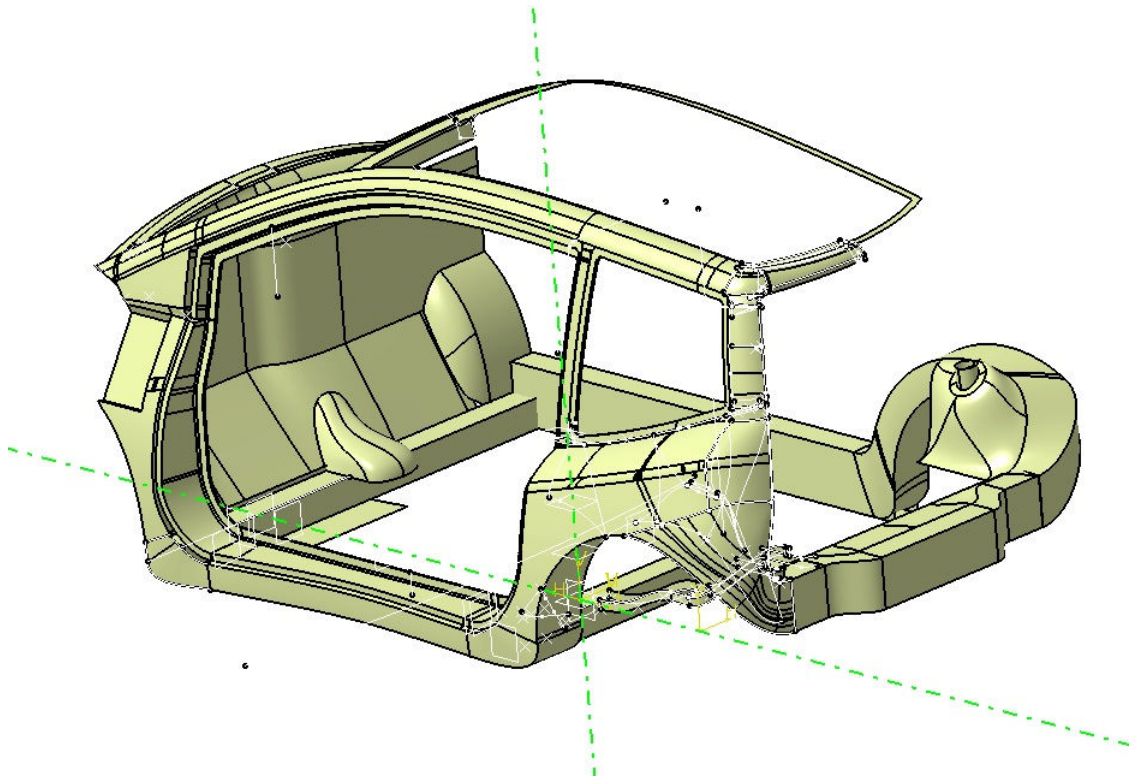
Kuva 3. Mock-up ajokunnossa

Tilankäyttömallin yhtenä tarkoituksena on konkretisoida auton todellinen koko, sillä tietokoneen ruudulla asioilla on tapana näyttää paremmalta kuin mitä ne todellisuudessa ovat. Tätäkin seikkaa tärkeämpänä voidaan pitää tilankäyttömallin roolia suunnannäyttäjänä auton eri komponenttien tilantarpeesta. Nimensä mukaisesti mallin tarkoituksena on selvittää miten hyvin autoon suunnitellut komponentit autoon sopivat vai sopivatko lainkaan. Tähän projektiin tehty tilankäyttömalli on ensimmäinen laatuaan, sillä alusta alkaen siitä haluttiin tehdä ajettava malli. Näin ollen malliin oli kiinnitettävä kaikki pyöräntuennan komponentit, moottorin komponentit apulaitteineen, hallintalaitteet sekä istuimet. Kaikki tarvittavat komponentit otettiin kanta-autosta. Tämän lisäksi oli mahdollista sovittaa autoon tulevan pysäköintiavustimen komponentit, sillä haluttiin selvittää, kuinka paljon todellisuudessa ne vievät tilaa auton peräpäästä. Tällä tavalla mallista saadaan kaikki hyöty irti, sillä siitä nähdään välittömästi, miten eri osat käyttäytyvät ajotilanteessa toistensa suhteen, ja voidaan varmistua, etteivät mitkään osat osu toisiinsa. Näin saadaan eliminoitua nopeammin monia epävarmuustekijöitä, joita aiheutuisi pelkän tietokoneella mallintamisen ja simuloinnin johdosta. Myös auton ulkomuodosta ja ergonomiasta vastanneet teolliset muotoilijat pystyivät tilankäyttömallin avulla asettelemaan hallintalaitteet ja istuimet oikeaan paikkaan, jotta lopullisen ulkomuodon suunnittelu saataisiin alulle. Tilankäyttömallin suunnittelu ja rakentaminen tapahtui kevään ja kesän 2011 aikana. Keväällä 2012

lopullisen muotoilun ollessa valmis valmistettiin vanerista auton ulkomuotoa mukailevia paloja, jotka havainnollistavat lopullista kokoluokkaa ja muotokieltä.

2.3 Korin ensimmäinen versio

Ennen lopullista auton ulkomuotoa teolliset muotoilijat toimittivat insinööripuolelle muutaman alustavan version tulevasta auton ulkomuodosta. Näistä valittiin yksi ja sen pohjalta päätettiin tehdä alustava malli tulevan auton korista (kuva 4). Tämän mallin on tarkoitus karkeasti hahmotella korin palkkien sijainteja sekä ovien ja ikkunoiden tiivistepintojen offset-mittoja. Offset-mitoista puhuttaessa tarkoitetaan niillä kahden pinnan välistä mitta. Esimerkiksi ikkunalasin ja sitä vastaavan kiinnityspinnan väliin tulee mallintaessa jättää liimalle viiden millimetrin ilmarako eli offset. Komponenttien sijainti oli tässä vaiheessa lyöty aika lailla lukkoon, joten pystyttiin hieman hahmottelemaan miten koripinnat liittyvät eri komponentteihin.



Kuva 4. Korin ensimmäinen versio

Ensimmäistä versiota mallintaessa oli jo selvillä, että komposiittikori päättyy tulipeltiin ja tulipelistä eteenpäin jatkuu teräksinen eturunko. Eturunkoon kiinnitetään moottori, iskunvaimentimet sekä apurunko pyöräntuntoineen. Teräksinen eturunko ottaa

vastaan etutörmäyksessä syntyvän törmäysenergian, ja näin komposiittikoriin ei kohdistu niin suuria rasituksia. Eturungon ja korin liitostapa ja -kohta on suunniteltava siten, että mahdollisen törmäyksen jälkeen voidaan eturunko korvata ehjällä. Jos autossa ei olisi erillistä eturunkoa ja kori olisi komposiittia perästä keulaan, olisi sen korjaaminen erittäin työlästä. Eturungon suunnittelusta tehdään oma insinööriyö, joten siihen ei paneuduta tässä työssä enempää. Edellä mainittua eturungon ja korin liitoskohtaa pystyttiin hahmottelemaan tässä versiossa ja lopullinen liitoskohta käydään läpi luvuissa 4.1 ja 4.3.

Alustavaan malliin mallinnettiin myös taka-akselin ja -iskunvaimentimien kiinnityskohdat, jotta varsinkin taka-akselin kohdalla nähdään miten mahdollinen kiinnitys tapahtuisi koriin. Taka-akselin kiinnitystapa ja -kohta muuttuivatkin radikaalisti lopulliseen versioon, sillä ensimmäisessä versiossa tuli ongelma juuri kiinnityskohdan pintojen liittämässä muuhun koriin. Tähän versioon tehtiin myös tilanvaraus autoon tulevan pysäköintiavustimen komponenteille, jotta nähtäisiin, miten koripinnat ja takapään pyöräntuentojen komponentit yhdessä pysäköintiavustimen komponenttien kanssa sopivat yhteen.

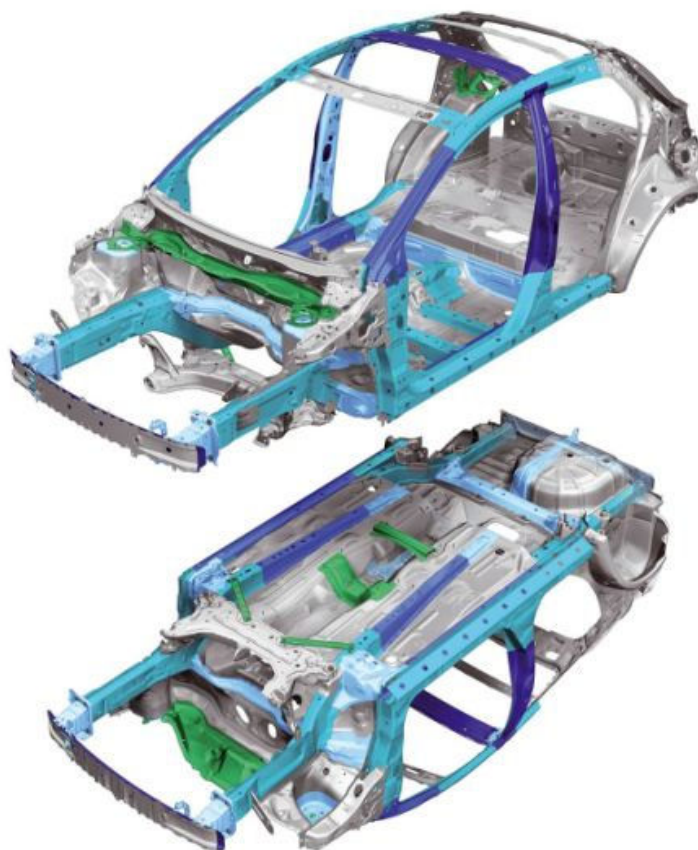
Ensimmäisen koriversion tarkoitus oli myös kehittää tämän insinööriyön tekijää pintamallinnuksessa ja auttaa hahmottamaan, miten lopullinen kori jaettaisiin osiin valmistusta varten.

3 Komposiittikorin suunnittelu

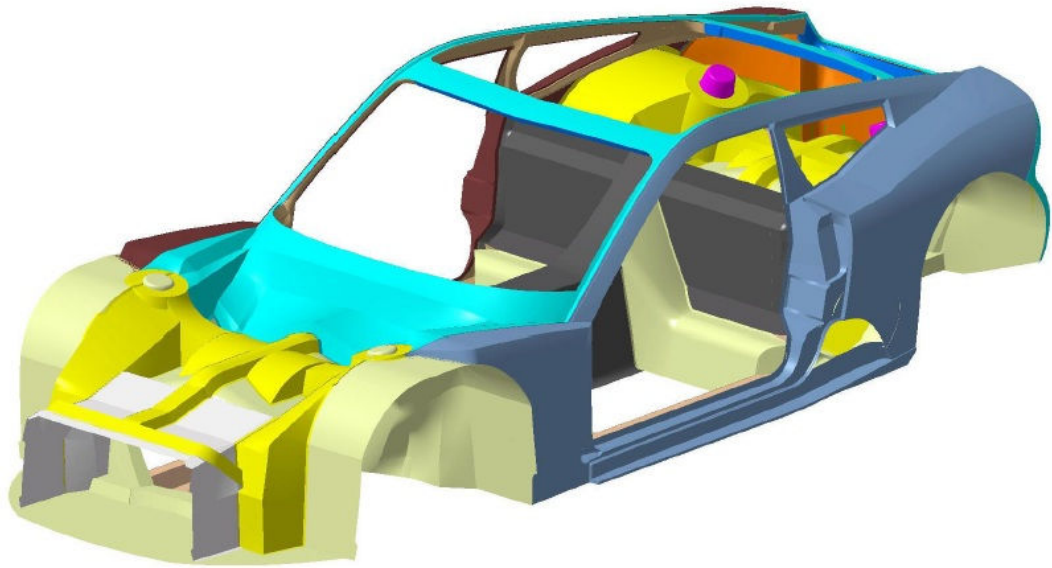
3.1 Benchmarking

Benchmarkingilla tarkoitetaan jo olemassa olevien rakenteiden ja vaihtoehtojen kartoittamista. Täysin uudenlaista koria suunnitellessa tulisi mallintaa ensin koko kori ja suorittaa lukuunlaskenta sille, jotta tiedettäisiin onko sen jäykkyys riittävä. Täysin tyhjästä lähdettäessä liikkeelle tulisi luultavasti tehtyä paljon turhaa työtä. Tutkimalla jo valmistettuja koreja saadaan jonkinlainen käsitys, minkälainen korirakenteen tulisi olla, ja näin suunnitteluprosessin kesto voidaan lyhentää merkittävästi. Tässä insinööriyössä tutkittiin Metropolia Ammattikorkeakoulun valmistamien CityCabin sekä

ERAn komposiittikoreista tehtyjä insinööritöitä (2; 3) ja näiden lisäksi käytettiin apuna kuvia teräsrakenteisista koreista (kuvat 5 ja 6). Benchmarkingilla saadaan selvitettyä, miten olemassa olevissa koreissa on saatu aikaan korin jäykkyys, ja näiden rakenteiden pohjalta voidaan suunnitella uusi kori.



Kuva 5. Mazda 2:n korirakenne (4)



Kuva 6. ERAn korin pintamalli (3)

3.2 Lujuusopin perusteita

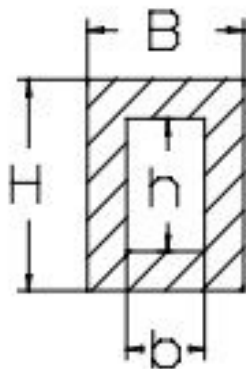
Korin lopullisen lujuuslaskennan tapahtuessa lujuuslaskentaohjelmistolla on kuitenkin hyvä tiedostaa muutamia lujuusopin perusasioita. Korin palkkien koko ja määrä määrittävät korin jäykkyyden ja niitä mallinnettaessa on hyvä tietää miten jäykkyyteen voidaan vaikuttaa. Tiedettäessä, miten palkkien koko ja muoto vaikuttavat niiden kuormankantokykyyn, voidaan tätä tietoa yhdessä benchmarkingin kanssa käyttää hyväksi korin suunnittelussa.

3.2.1 Jäyhyysmomentti ja taivutusvastus

Jäyhyysmomentti (tunnus I) on lujuusopin suure, joka kuvaa poikkileikkaukseltaan tietyn muotoisen homogeenisen kappaleen kykyä vastustaa taipumaa poikkileikkaustason tietyn akselin suuntaan. Palkin poikkileikkauksen muoto vaikuttaa taivutuksessa syntyviin rasituksiin palkissa. Jäyhyysmomenttiin vaikuttavia tekijöitä voidaan havainnollistaa poikkileikkaukseltaan suorakaiteen muotoisen palkin jäyhyysmomentin kaavalla 1.

$$I = \frac{1}{12} (BH^3 - bh^3) \quad (1)$$

Kaavan 1 kirjaimet B, H, b ja h selittyvät kuvassa 7. Korin palkit eivät muodoltaan ole kuvan 7 kaltaisia, mutta kuva 7 ja kaava 1 havainnollistavat kuinka jäyhyysmomenttia voidaan kasvattaa suurentamalla palkin poikkileikkausta. Kaava 1 on tilanteesta, jossa palkkia rasitetaan ylhäältä päin. Täten kaavasta ja kuvasta on huomattava se, että palkin paksuus voiman vaikutussuunnassa on potenssissa ja on näin merkitsevämpi mitta. Suurentamalla jäyhyysmomenttia suurennetaan palkin kykyä vastustaa taipumaa.



Kuva 7. Kotelopalkin esimerkkikuva ja selitteet jäyhyysmomentin kaavalle

Jäyhyysmomentti vaikuttaa olennaisesti palkin taivutusvastukseen, joka kuvaa tietyn muotoisen kappaleen kykyä vastustaa taipumaa. Taivutusvastus W voidaan laskea suoraan jäyhyysmomentin avulla kaavalla 2.

$$W = \frac{I}{e} \quad (2)$$

Kaavassa 2 tunnus I on jäyhyysmomentti ja e palkin reunan suurin etäisyys neutraaliakselista. Kappaletta taivuttaessa siihen muodostuu sisäisiä jännityksiä joko puristus- tai vetojännitystä. Tietyissä pisteissä kappaletta ei muodostu lainkaan jännityksiä, ja tätä kohtaa kutsutaan neutraaliakseliksi (5, s. 91). Jos esimerkiksi palkin

keskeltä painetaan jollain voimalla alaspäin, palkki taipuu alaspäin, jolloin neutraaliakselin yläpuolelle muodostuu puristusjännitystä ja alapuolelle vetojännitystä (5, s. 93). Taivutusvastuksen kaavasta nähdään, että suurentamalla reunaetäisyyttä taivutusvastus pienenee. Taivutusvastus on tietyllä palkin poikkileikkauksella suurin kun neutraaliakseli kulkee palkin keskellä, jolloin mitta e on pienin mahdollinen. Neutraaliakselin sijainti riippuu kuitenkin palkin muodosta, ja valtaosa korin palkkirakenteista on muodoltaan monimutkaisia, joten neutraaliakselin sijaintia on käytännössä mahdotonta ratkaista manuaalisesti. Tästä syystä palkkirakenteiden kuormankantokykyä ei voitu laskea etukäteen vaan korin jäykkyys selvisi vasta tekemällä lujuuslaskelmat laskentaohjelmistolla.

3.2.2 Nurjahdus

Nurjahduksesta puhuttaessa tarkoitetaan ilmiötä, jossa päistään puristuksessa oleva sauva taipuu sivulle kuormituksen kasvaessa tietyn pisteen yli. Sauvan alttius nurjahtamiseen riippuu sen mitoista, materiaalista sekä siitä miten se on tuettu. Mitä hoikempi ja pidempi sauva, sitä helpommin se nurjahtaa. Kun sauvan paksuutta kasvatetaan tarpeeksi, se ei enää nurjahda vaan tyssääntyy. Tyssääntyminen tarkoittaa sauvan painumista kasaan pituusakselinsa suunnassa. Palkkirakenteissa nurjahtamisen sijasta puhutaan lommahtamisesta (kuva 8), jolloin jostain kohtaa palkkia osa palkista rutistuu sisäänpäin ja palkki taittuu. (6, s. 8.)



Kuva 8. Lommahtanut palkki (7)

Korin palkkien nurjahdusalttiuteen voidaan vaikuttaa kasvattamalla palkin poikkileikkauspinta-alaa sekä tukemalla palkkeja useammasta kohdasta.

3.3 Valmistustapa

Komposiittikorin valmistustapoja on monia ja tässäkin projektissa valittiin toinen kahdesta vaihtoehdosta. Ensimmäisenä vaihtoehtona pohdittiin McLarenin käyttämää tapaa McLaren MP4-12C-auton hiilikuitumonokokissa. Siinä monokokki on valmistettu ammemaaisesti kahdesta eri osasta, jotka on liitetty toisiinsa. Toinen osista muodostaa ammeen sisäpinnan ja toinen ammeen ulkopinnan. (Kuva 9.) Tapa kuitenkin osoittautui liian kalliiksi konseptiauton valmistuksessa, joten korin osalta piti keksiä parempi ja halvempi ratkaisu.



Kuva 9. McLaren MP4-12C auton hiilikuitumonokokki. (8)

Korin valmistustavassa otettiin mallia aiemmin mainitun ERAn korista, sillä valmistustapa on todettu toimivaksi ja kustannukset pysyvät alhaisempina. ERAssa kori on valmistettu jakamalla suunnitteluvaiheessa kori useampaan pienempään osaan, jotka niiden valmistuksen jälkeen liimattiin yhtenäiseksi koriksi. Tässä projektissa kori suunnitellaan saman valmistusmenetelmän pohjalta sillä erotuksella, että tähän

projektiin haluttiin kehittää ERAssa käytettyä metodia eteenpäin. ERAn koripaneelien määrä on melko suuri ja niiden määrä haluttiin saada tässä projektissa pienemmäksi. Yksi merkittävä syy paneelien määrän pienentämiseen on kokoonpanon helpottaminen. Paneelien suuri lukumäärä tarkoittaa sitä, että on enemmän osia, jotka pitää saada liitettyä toisiinsa oikeassa asennossa oikeaan paikkaan. Suurentamalla yksittäisten paneelien kokoa saadaan vähennettyä niiden määrää. Kun paneelien koko suurenee, tulee rakenteesta yhtenäisempi, ja yhdessä sen seikan kanssa, että paneelien liitoskohdat on pyritty suunnittelemaan järkevämpiin paikkoihin, se tekee korista lujemman. Näiden seikkojen johdosta koripaneeleista pyritään suunnittelemaan mahdollisimman suuria valmistettavuuden rajoissa. Paneelien yhteenliitos tapahtuu tässä projektissa muilta osin vastaavalla tavalla kuin ERAssa, mutta liiman lisäksi käytetään myös niittejä.

Koripaneelit valmistetaan laminoimalla hiilikuituprepegia ja selluloosakuitua koneistettuihin muotteihin. Tässä projektissa paneelit valmistetaan yksipuolisilla muoteilla, joihin paneelista riippuen ladotaan joko hiilikuituprepegia tai selluloosakuitua päällekkäin. Yksipuolisesta muotista puhuttaessa tarkoitetaan muottitekniikkaa, jossa laminaatin toisella puolella on kiinteä muottipinta ja vastakkaisella puolella säkityskalvo, joka alipaineen avulla painaa lujitekuidut tiukasti muottipintaa vasten. Hiilikuituprepegin ja selluloosakuidun valmistus eroavat suuresti toisistaan, ja niiden valmistusprosessi käydään tarkemmin läpi materiaalikokeita käsittelevässä luvussa 6.

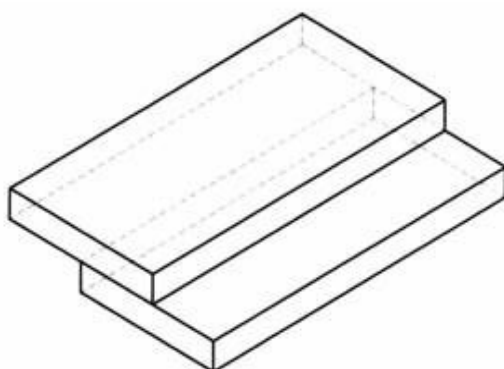
3.4 Mallintaminen

Korin mallinnus suoritettiin käyttämällä Catia V5 -ohjelman pintamallinnustyökaluja. Koska koripaneelit valmistetaan muottien avulla, pitää ottaa huomioon se seikka, että niiden pitää myös irrota muotista. Tämä tarkoittaa sitä, että jokaisessa paneelissa piti miettiä sen päästöä eli ettei ole muottiin lukitsevia muotoja. Korista mallinnettiin valtaosin vain toinen puolisko, koska suurin osa koripaneeleista oli symmetrisiä auton keskilinjan suhteen. Jos jotkin paneelit olivat symmetrisiä keskenään joitain pieniä seikkoja lukuun ottamatta, ne peilattiin keskilinjan suhteen ja tarvittaessa muokattiin peilattua puoliskoa.

Korin mallinnuksessa tuli ottaa huomioon lukuisien muiden komponenttien sijainti. Tässä apuna toimi kokoonpanotiedosto nimeltään Mainassembly. Tässä tiedostossa sijaitsevat kaikki autoon tulevat komponentit, jotka on sijoitettu oikeille paikoille oikeaan asentoon. Komponenttien paikat tiedossa pystyttiin koriin mallintamaan niille kiinnityspinnat sekä tarvittaessa varata tilaa niiden liikkumiselle.

3.5 Koripaneelien liitostekniikka

Valmistustekniikka vaikuttaa olennaisesti korin suunnitteluun, ja varsinkin koripaneelien liitostekniikka toisiinsa täytyy pitää kokoajan mielessä. Koska paneelit liitetään toisiinsa liiman ja niitten avulla, tulee niitä varten olla kiinnityspinnat. Parhaiten paneelien yhteen liittäminen onnistuu käyttämällä limiliitosta. Limiliitoksesta puhuttaessa tarkoitetaan liitostapaa, jossa esimerkiksi kahden levyn pinnat asetetaan jonkin matkaa toistensa päälle ja liitetään toisiinsa. (Kuva 10.)

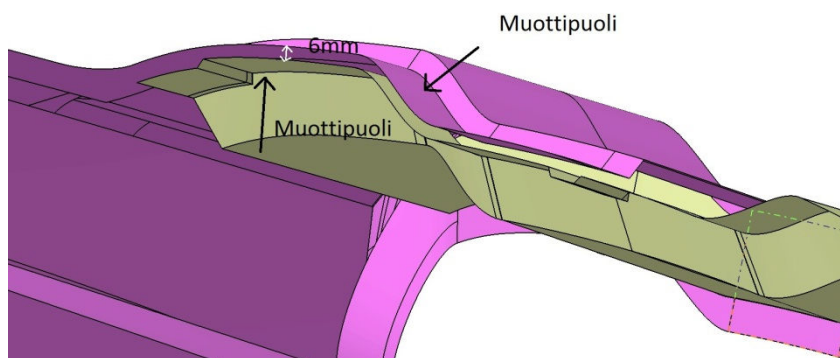


Kuva 10. Esimerkkikuva kahden levyn limiliitoksesta

Limiliitosta varten suurimpaan osaan koripaneeleista on mallinnettu liitosta varten oma kiinnityspinta. Yhteen liitettävien paneelien kiinnityspinnat on suunniteltu ja mallinnettu siten, että paneelien kiinnityspinnat menevät päällekkäin vähintään 16 millimetriä. Tämä mitta on ERA-projektissa laskettu riittävä arvo liimaliitoksille, mutta sellaisiin paikkoihin, joissa on mahdollista käyttää suurempaa kiinnityspintaa, on käytetty 25:tä millimetriä.

Koska koripaneelit mallinnetaan pintamallinnustekniikalla ja paneelien valmistuksessa käytetään yksipuolisia muoteja, tulee tällöin tietää kumpi pinta mallinnetuista pinnoista

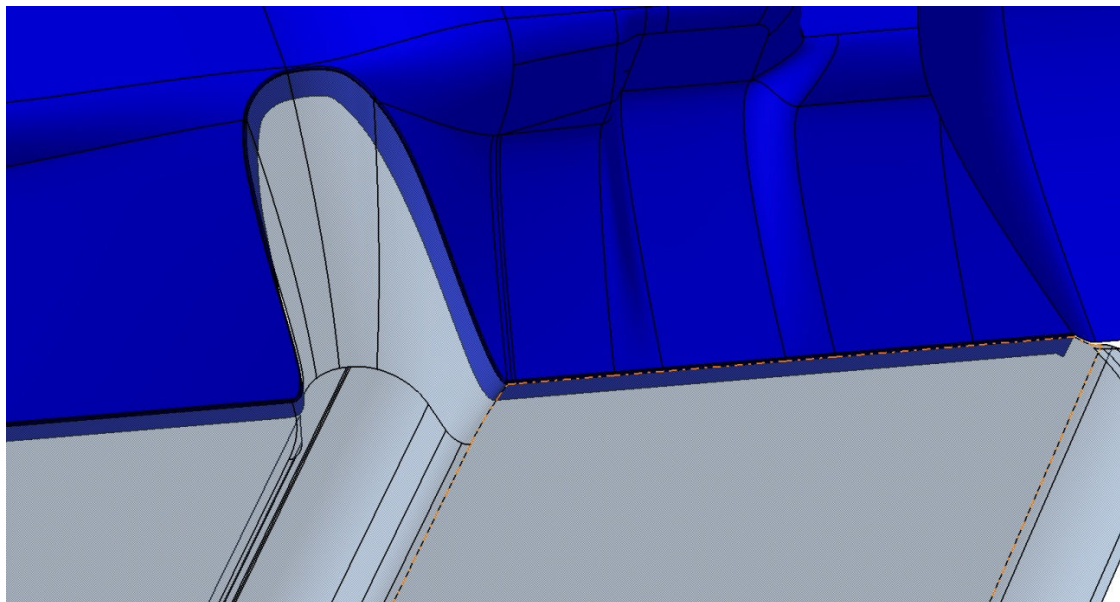
on muottipinta. Jos esimerkiksi ajatellaan hiilikuidusta valmistettavan puolipallon muotoinen esine, voi muotti olla joko puolipallon ulkopinnalla tai sisäpinnalla. Pintamallinnuksessa mallinnetaan pelkkää pintaa, jolla ei ole lainkaan paksuutta, ja näin ollen tulee ottaa huomioon, mihin suuntaan materiaalin paksuus kasvaa. Muottipinta tiedossa tiedetään materiaalin paksuuden kasvavan siitä pois päin. Kun tiedetään, mihin suuntaan materiaalin paksuus kasvaa eri koripaneeleissa, voidaan se ottaa huomioon kahden koripaneelin liitoskohdan mallinnuksessa. Ilman rajoittavia tekijöitä limiliitos voidaan tehdä kahdella tavalla. Tästä hyvänä esimerkkinä voidaan ajatella kahden levyn yhteen liitosta limiliitoksella, jolloin levy yksi voi olla levyn kaksi päällä tai päinvastoin. Kun kahden yhteen liitettävän osan muottipinnat ovat tiedossa, tiedetään kummalle puolelle mallinnettua pintaa materiaalin paksuus kasvaa. Se tiedossa voidaan helposti laskea kuinka suuri offset-mitta kahden eri osan kiinnityspintojen välillä on oltava. Paneelien paksuudeksi on suunnitteluvaiheessa oletettu 2 mm sekä niiden väliin tulevan liimamassan paksuudeksi niin ikään 2 mm. Kuvassa 11 ilmenee kahden koripaneelin yhteen liitos, jossa paneelien muottipinnat ovat niiden ulkopinnoilla ja materiaalin paksuus kasvaa toisiaan kohden. Kun otetaan huomioon liimamassan paksuus, tarvitaan näin ollen offset-mitaksi 6 mm.



Kuva 11. Paneelien yhteenliitos

Koria suunnitellessa tuli myös ottaa huomioon paneelien kasauserjestys. Limiliitoksesta johtuen kiinnitys siis voitiin suorittaa paneelin kummallekin puolelle. Paneeleja ei mallinnettu kokoamisjärjestyksessä, joten kun mallinnettiin uusi osa, tuli tietää, missä vaiheessa se kiinnitetään mihinkin paneeliin. Näin voitiin kasaamisen mahdollistamiseksi ja helpottamiseksi mallintaa uuden osan kiinnityspinnat sille puolelle

vastinpintaa, jolle se oli järkevintä. Kuvassa 12 on lattiapaneelin ja tulipellin yhteenliitos, jossa niiden liitoskohta näkyy himmeämmällä sinisellä. Tulipelti on tässä mallinnettu lattiapaneelin päälle, mutta se voitaisiin niin halutusti myös mallintaa sen alapuolelle kiinnitettäväksi.



Kuva 12. Tulipellin ja lattiapaneelin liitos

4 Korin osajako

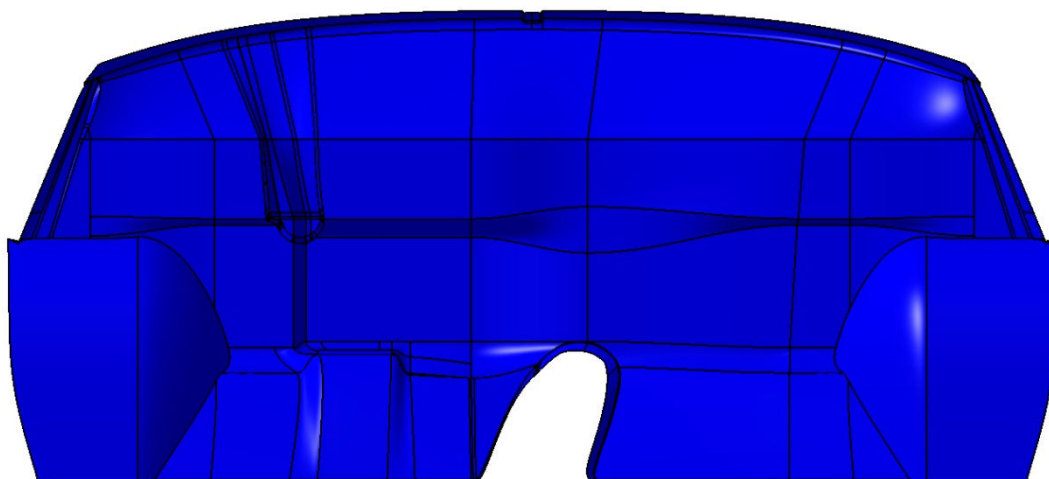
Tässä insinööriyössä haluttiin minimoida korin muodostavien yksittäisten paneelien määrää. Jotta tässä onnistuttaisiin, on korin muodostavien osien koon kasvettava. Osien kokoa rajoittaa niiden valmistukseen käytettävän uunin koko. Korin osajako pyrittiin saamaan mahdollisimman järkeväksi valmistettavuuden kannalta ja aluksi käytiin eri variaatioita läpi. Lopullinen osajako on seuraavanlainen:

- tulipelti
- lattiapaneeli
- ulkokyljet
- sisäkyljet
- kattopalkit
- lattiapalkit.

Kaikki osat yhteenlaskettuna kori koostuu yhteensä 17 osasta. Seuraavissa luvuissa käydään läpi korin eri osat sekä niiden suunnitteluprosessi.

4.1 Tulipelti

Tulipelliksi kutsutaan autossa sitä korin osaa joka on moottoritilan ja matkustamon välissä (kuva 13). Tulipelti toimii yhdessä lämmöneristeiden kanssa eristeenä moottorin ja matkustamon välillä. Lämmöneristyksen lisäksi tulipelti eristää myös moottorin aiheuttamaa melua äänieristeiden avulla. Se toimii myös kiinnitysalustana eri komponenteille, ja tässä projektautossa siihen kiinnittyvät polkimet sekä osa eturungosta.



Kuva 13. Tulipelti matkustamon puolelta kuvattuna

Tulipellin suunnittelu aloitettiin miettimällä sopivaa etäisyyttä moottorin ja tulipellin välissä. Moottorin takaosassa sijaitseva turboahdin lisää olennaisesti tulipellin lämpökuormitusta. Tämä silmällä pitäen olisi hyvä viedä tulipelti melko kauas ahtimesta. Samalla piti kuitenkin pitää mielessä se seikka, että matkustamosta haluttiin saada mahdollisimman tilava. Oli löydettävä sopiva kompromissi tulipellin lämpörasituksen ja matkustamon tilojen väliltä. Turboahdetuissa autoissa käytetään ahtimen tuottaman lämmön eristämiseen erilaisia lämmöneristyspeltejä ja -mattoja. Suojaamalla tulipelti tarpeeksi hyvin voidaan se viedä melko lähelle moottoria.

Etäisyyksien määrittäminen tapahtui Catialla, jolla oli mallinnettu moottorista tarkka malli. Lopullinen etäisyys moottorista on noin 55 mm.

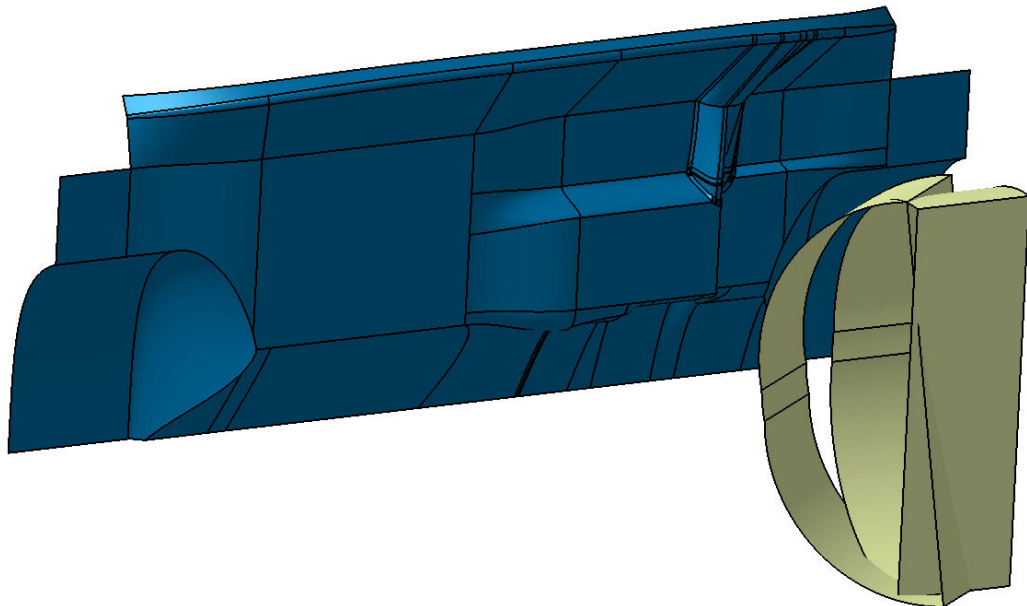
4.1.1 Polkimien paikan määrittäminen

Suunnittelun yhtenä suurimpana kulmakivenä oli polkimien kiinnityspintojen kohdalleen saaminen. Polkimien oikeassa asemoinnissa mock-up oli korvaamaton apu, sillä mock-upin avulla polkimien paikkaa voitiin kokeilla istuimen kanssa ja todeta, missä kohdassa ne tuntuvat luonnolliselta. Kun teolliset muotoilijat olivat aikaisemmin määrittäneet istuimen sijainnin, insinöörien tehtäväksi jäi määrittää polkimien lopullinen sijainti. Tämä tehtävä osoittautui luultua hankalammaksi, sillä projektin toinen jäsen oli ehtinyt jo suunnitella hammastangon paikan optimaaliseksi joustoaurausta ajatellen. Koska projektiautossa käytetään kanta-auto Polon osia, hammastangon sijainti Poloon verrattuna muuttui. Polkimet ja hammastanko sijaitsevat Polossa siten, että polkimet mahtuvat liikkumaan esteettä. Kun toisen paikkaa muuttaa, eivät ne tällöin välttämättä enää sovi yhteen. Näin kävi tällä kertaa, kun hammastangon sijaintia korotettiin ja tuotiin aavistus taaksepäin. Suurimmaksi ongelmaksi muodostui jarrupoljin, joka pohjaan painettaessa otti hammastangon rattiakselin kiinnikkeeseen kiinni. Auton yhtenä ominaisuutena haluttiin, että siihen olisi helppo istua ja poistua siitä. Tämä tarkoittaa sitä, että istuinkorkeus lattiapinnasta on melko suuri ja istuma-asento on hieman pystympi. Tällöin polkimien tulee olla melko lähellä lattiaa, jotta ajoasento olisi mukava. Hammastangon paikkaa sivusuunnassa pystytettiin hieman muuttamaan sen vaikuttamatta radikaalisti joustoauraukseen ja tällä saatiin hieman lisää tilaa jarrupolkimelle. Polkimet jouduttiin kuitenkin hammastangon sijainnin vuoksi jättämään hieman ylemmäksi kuin oli tarkoitus. Näihin edellä mainittuihin mittauksiin ja säätöihin kului eniten aikaa tulipellin suunnittelussa ja mallintamisessa.

4.1.2 Tulipellin mallintaminen

Koska muottipintaa vasten tulevat pinnat ovat pinnanlaadultaan parempia kuin laminointisuunnasta, tulipellin muotti suunniteltiin tulevan matkustamon puolelle. Näin matkustamoon näkyviin jäävät osat ovat pinnaltaan paremman näköisiä. Tulipellin mallinnuksessa käytettiin apuna edellä kuvattuja polkimien mittauksia, rattiakselia, hammastankoa, moottoria sekä pyörän liikkeistä tehtyä tilamallia jousto- ja

kääntötilanteessa. Kun tulipellin etäisyys moottorista oli saatu kohdalleen ja polkimien paikat oli määritetty, voitiin aloittaa mallinnus. Tulipeltiin mallinnettiin ensin kiinnityspinnat polkimille, jotka ovat edempänä muuhun tulipeltiin nähden. Koska ne olivat eri tasossa muun tulipellin kanssa, piti niiden kohdalla miettiä tulipellin päästöä. Kun poljinpinnat oli saatu mallinnettua, siirryttiin mallintamaan sisälokasuojia. Sisälokasuojia varten tehtiin pyörän liikkeistä tilamalli pyörän kääntymiseen sekä sisään- ja ulosjoustoon vaadittavan tilan selvittämiseksi. Tilamalli tehtiin 45 asteen kääntökulmalla molempiin suuntiin sekä 55 mm sisään- ja ulosjoustolla. Tämän pohjalta tulipeltiin mallinnettiin sisälokasuojat. (Kuva 14.)

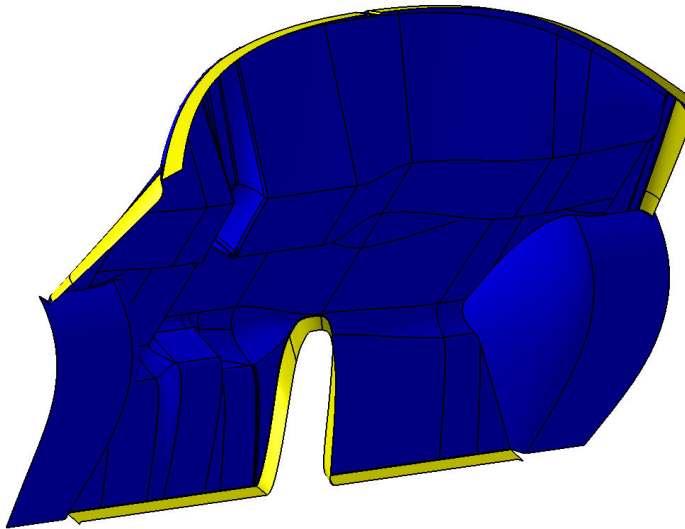


Kuva 14. Rengastilamalli tulipellin kanssa

Sisälokasuojien mallinnuksen jälkeen huomattiin rattiakselin menevän tulipelistä läpi, joten sille mallinnettiin lisää tilaa. Rattiakselia varten jouduttiin myös mallintamaan poljinpintojen alapuolelle taso hammastankoa varten, josta tulee läpi hammastangon ja rattiakselin yhdistävä kiinnike. Tulipellin keskelle alareunaan jouduttiin tekemään myös läpivienti pakoputkea varten, sillä se jouduttiin nostamaan lattiapalkkien vuoksi kulkemaan hieman ylempää moottorille. Kuvassa 13 tämä näkyy aukkona tulipellin alareunassa.

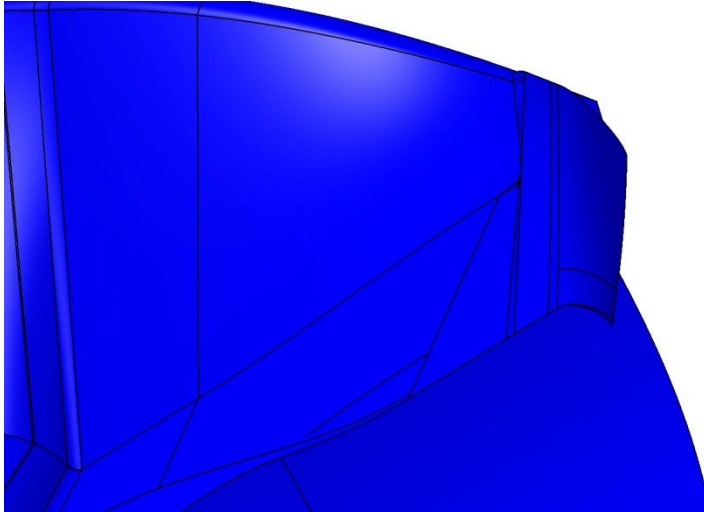
4.1.3 Tulipellin kiinnitys

Tulipelti kiinnitetään muilta osin ulkokylkeen paitsi sen alareuna, joka kiinnittyy lattiapaneeliin. Tulipellin alareunaan mallinnettiin tätä varten kiinnityslaippa (kuva 15). Kiinnitys ulkokylkeen tuli suunnitella hieman tarkemmin, sillä tulipeltiin mallinnettavat kiinnityspinnat piti saada päästäviksi. Jotta tulipelistä saatiin päästävä, tuotiin tulipellin yläreunan kiinnityspinta etukautta sille tarkoitettuun pintaan ulkokylkeen. Jos tulipellin pinta olisi tuotu kiinnityspintaan takakautta, olisi muodostunut muottiin lukitseva muoto. Kuvassa 15 on havaittavissa muita paneeleja varten mallinnetut erilliset kiinnityspinnat.



Kuva 15. Tulipellin kiinnityspintoja

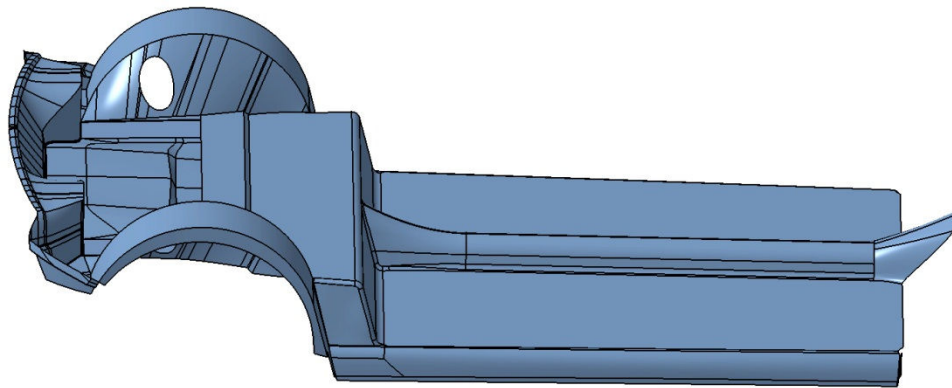
Sivuilta tulipelti kiinnitetään ulkokylkeen ja näihin kiinnityspintoihin tuli mallintaa reilu pyöristys eturungon vuoksi (kuva 16).



Kuva 16. Tulipellin reunan pyöristys

4.2 Lattiapaneeli

Lattiapaneeli toimii ennen kaikkea auton matkustamon lattiapintana. Sen muita funktioita on toimia kiinnityspintana lukuisille muille koripaneeleille sekä autoon liitettäville komponenteille. Lattiapaneeliin muun muassa kiinnitetään istuimet sekä paineilmajärjestelmän säiliö.



Kuva 17. Lattiapaneeli

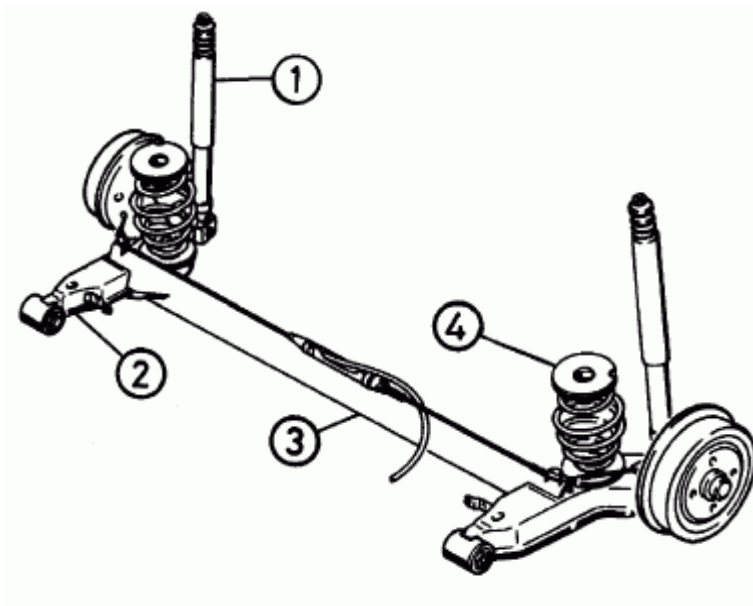
Lattiapaneelin haluttiin kattavan koko auton pohja, sillä näin paneelien lukumäärä saataisiin pysymään pienempänä. Vaikka lattiapaneeli on kokonsa puolesta suuri laminoitavaksi kappaleeksi, sen muotojen pysyessä melko yksinkertaisina ei tarvinnut kovin paljoa pohtia, miten siitä saadaan päästävä. Sen suunnitteluun vaikutti usean eri

komponentin sijainti, joille piti joko saada tilaa liikkumiselle tai kiinnityspinta lattiapaneeliin.

4.2.1 Lattiapaneelin suunnittelu ja mallinnus

Lattiapaneelia suunnitellessa piti ensin tietää matkustamon lattian korkeus maanpinnasta. Muotoilijat toimittivat mitat matkustamon lattiakorkeudesta sekä auton sisustan komponenttien sijainneista lattian suhteen. Näiden mittojen avulla kyettiin aloittamaan mallinnus. Matkustamon lattiakorkeus asetettiin 240 millimetriin, ja lattiapinnan korkeus säilyy samana takaistuimille asti. Takana lattiapinta nousee ennen pyöränkaaria ylemmäs, sillä takaistuimet haluttiin saada hieman korkeammalle kuin etuistuimet. Korottamalla lattiapintaa matkustamon takaosassa varmistettiin myös äänenvaimentimen sekä polttoainetankin sopiminen autoon. Normaalisti nämä komponentit sijaitsisivat suurilta osin auton takakontin alapuolella, mutta projekti-autoon tulevan pysäköintijärjestelmän komponentit vievät tämän tilan, joten tankille ja vaimentimelle piti keksiä korvaava sijainti. Lattiapinta jatkuu takaistuintien jälkeen takakontin pintana, jota hieman korotettiin lisää pysäköintijärjestelmän komponenttien vuoksi.

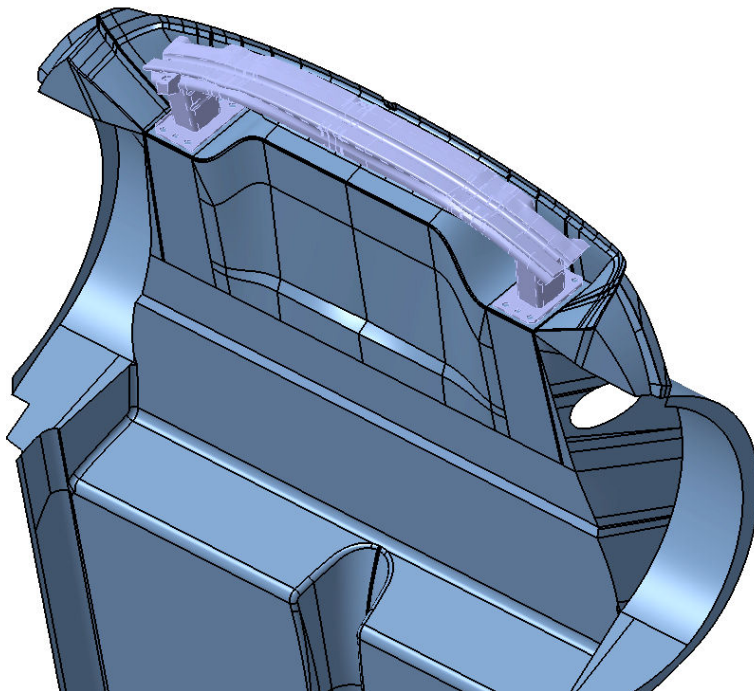
Lattiapaneelin keskellä kulkee niin sanottu kardaanitunneli, joka taka- tai nelivetoisessa autossa tarvitaan voiman saamiseksi takapyörille. Tämän auton ollessa etuvetoinen on tunnelin tarkoituksena antaa tilaa pakoputkelle, sillä lattiapaneelin alapuolelle suunniteltujen palkkien takia se ei mahdu kulkemaan ilman syvennystä. Lattiapaneelin toimiessa koko auton kattavana pohjalevynä piti siihen luonnollisesti mallintaa takalokasuojat. Takalokasuojien mallinnus oli yksinkertaisempaa kuin etulokasuojien, sillä niissä ei tarvitse ottaa huomioon pyörän kääntymistä. Takana kuitenkin piti ottaa huomioon se seikka, että takapyöräntuentana toimii yhdystukiakseli (kuva 18), jolloin pyörän jousaessa sisään se liikkuu myös hieman keulaan päin.



Kuva 18. Yhdystukiakseli

Lokasuojiin varattiin riittävästi tilaa pyörän joustoliikkeelle sekä korkeus- että korin pituusakselin suunnassa. Koska iskunvaimennin suunniteltiin menevän sisäkylkeen kiinni, piti lokasuojiin tehdä läpimenoireiät vaimentimia varten.

Auton peräpäähän asennetaan törmäyspalkki ja lattiapaneeliin piti mallintaa sille kiinnityspinta. Tavaratilan ollessa autossa melko pieni haluttiin sitä suurentaa mahdollisimman paljon. Tästä syystä lattiapaneelin takaosa myötäilee melko läheltä törmäyspalkkia jättäen sille kuitenkin jonkin verran tilaa sisään painumiselle mahdollisissa törmäystilanteissa. Kuvassa 19 näkyy lattiapaneelin muotoilu törmäyspalkin kohdalta, takaistuimien pinnan korotus sekä iskunvaimentimen läpivienti lokasuojassa.



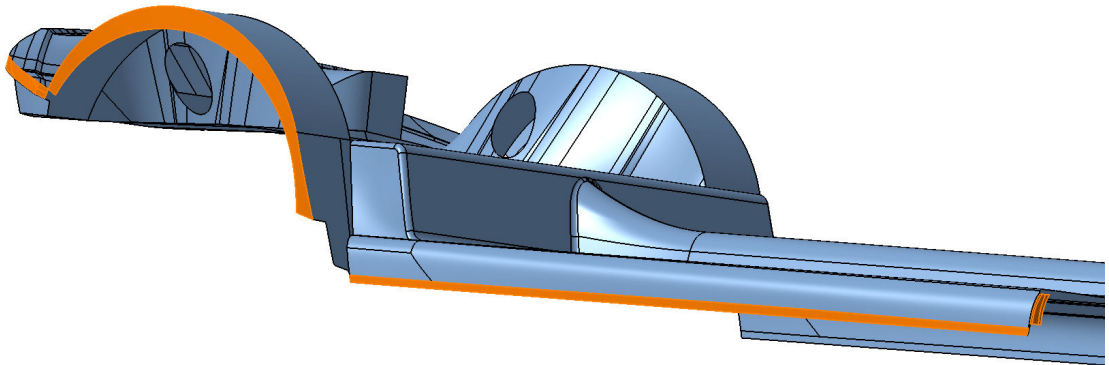
Kuva 19. Lattiapaneelin takaosan rakenne

4.2.2 Lattiapaneelin kiinnitys

Lattiapaneeli suunniteltiin kiinnitettäväksi muilta osin ulkokylkeen paitsi sen etureuna, joka kiinnitetään lattiapinnasta tulipeltiin sekä etukulmista etummaiseen lattiapalkkiin. Näiden lisäksi lattiapinta toimii kiinnityspintana sisäkyljen alaosalle. Koska ulkokyljen alahelma on korin alin kohta ja alempana kuin matkustamon lattiapinta, jouduttiin matkustamon lattiapinnan sivuille mallintamaan alaspäin suuntautuvat kiinnityslaipat (kuva 20). Yhdessä lattiapaneeli sekä jäljempänä läpikäytävät ulkokylki ja sisäkylki muodostavat korin jäykkyyden kannalta yhden tärkeimmistä palkeista, kynnyskotelon.

Takapyörien lokasuojiin mallinnettiin kiinnityslaipat, joista lattiapaneeli kiinnitetään ulkokyljen kylkiosaan. Koska kiinnitys tapahtuu ulkokyljen kylkiosaan, joka on pääosin maalauksen jälkeen auton lopullinen ulkopinta, käytetään pelkästään liimaa niittien sijasta. Jos käytettäisiin sekä niittejä että liimaa, niitit jäisivät näkyviin auton lopulliseen pintaan. Myöhemmin huomattiin, että lokasuojiin mallinnetut kiinnityspinnat lukitsevat lattiapaneelin valmistusvaiheessa muottiinsa, mutta tämä kuitenkin saadaan ratkaistua valmistusteknisellä ratkaisulla.

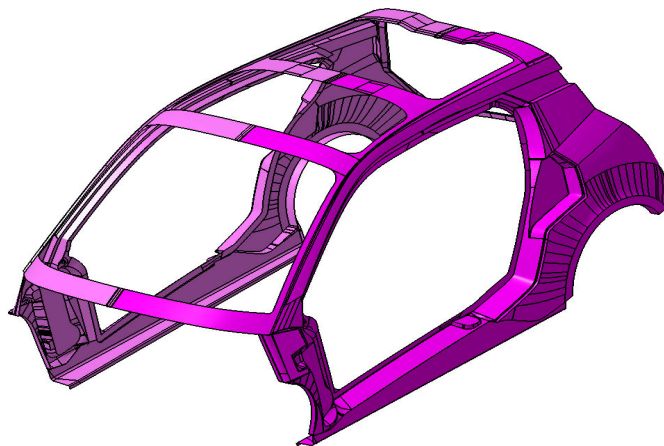
Lattiapaneelin etukulmiin mallinnettiin kiinnityslaipat, joilla se kiinnitetään etummaiseen lattiapalkkiin (kuva 20). Tällä saadaan lisää kiinnityspintaa etummaiselle palkille, joka korja jäykistävänä elementtinä ottaa kuormaa myös apurungolta. Apurunkoon kiinnittyvät tukivarret sekä moottorin pyörähdyksenvaimennin, joten kiinnityspinnan lisääminen tuo varmuuskerrointa lisää. Kuvassa 20 on nähtävissä osa lattiapaneelin ja ulkokyljen välisistä kiinnityspinnoista.



Kuva 20. Lattiapaneelin kiinnityspintoja

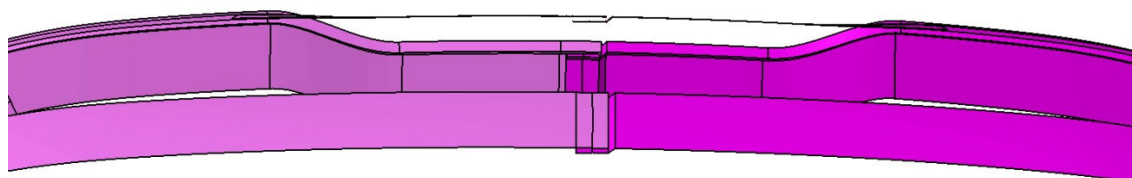
4.3 Ulkokyljet

Ulkokylkien päällimmäisenä tarkoituksena on toimia auton muodon antavana ulkokuorena. Tämän lisäksi ulkokylkien avulla muodostetaan korin kuormaa kantavia palkkeja, minkä lisäksi ne toimivat tiivistepintana auton luukuille ja ikkunoille sekä kiinnityspintana osalle auton komponenteista.



Kuva 21. Ulkokyljet yhdessä

Ulkokylkien muodostaessa auton ulkomuodon niiden pitää olla identtisiä toisiinsa nähden. Ne ovatkin sitä kaikilta muilta osin paitsi niitä yhdistävien tuuli- ja kattolasin palkkipintojen keskeltä sekä oikean ulkokyljen takaosasta, johon tulee polttoaineen täyttöluukku. Koska kyljet pitää jollain tapaa liittää toisiinsa, jouduttiin korin keskelle pituusakselin suuntaisesti tekemään kylkien kesken limiliitos. Tätä varten jouduttiin ulkokylkiä toisiinsa yhdistävistä pinnoista toinen viemään toisen pinnan alle (kuva 22). Koska kyljet ovat muuten identtiset, puhutaan jatkossa vain yhdestä kyljestä.



Kuva 22. Ulkokylkien limiliitos katossa.

Yhdessä ovien ja ikkunoiden kanssa ulkokylki muodostaa auton ulkokuoren. Ulkokyljen suunnittelun pohjana oli teollisten muotoilijoiden toimittama auton ulkomuodon malli. Auton ulkokuori haluttiin tehdä mahdollisimman yhtenäiseksi, koska sen ollessa suuri yksittäinen pinta, siihen ei haluta turhia liitoskohtia. Aikaisemmin ulkokuori on koostunut erillisestä kattopaneelista sekä auton sivun kattavasta kylkipaneelista. Tällä tavoin ulkokuoreen tulisi kuitenkin koko kyljen mittainen liitoskohta katto- ja

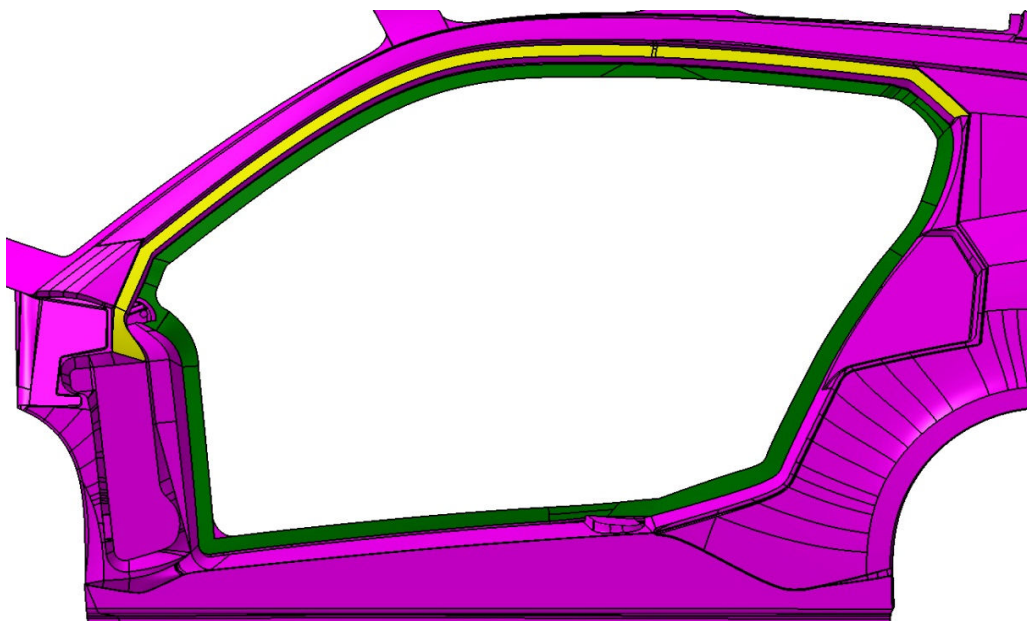
kylkipaneelin välille. Tätä haluttiin välttää, ja sen takia ulkokuori muodostuukin korin osalta vain kahdesta osasta, joiden liitoksen koko on huomattavasti pienempi. Ulkokylkien keskinäistä liitosta vahvistetaan kattopalkeilla, jotka käydään läpi jäljempänä tekstissä luvussa 4.4.3.

Ulkokyljen suunnitteluun vaikuttavia osa-alueita oli melko paljon, sillä siihen piti muun muassa suunnitella oviaukko, takaluukun aukko, tuuli- ja kattolasin liimapinnat, kiinnityspinta eturungolle sekä ovien saranoiden paikat. Yhdessä ulkokyljen suuren koon sekä suunnitteluun vaikuttavien osa-alueiden suuren lukumäärän vuoksi ulkokyljen suunnittelu ja mallintaminen oli ehkäpä haastavinta korin suunnittelu- ja mallinnusprosessissa.

4.3.1 Oviaukko

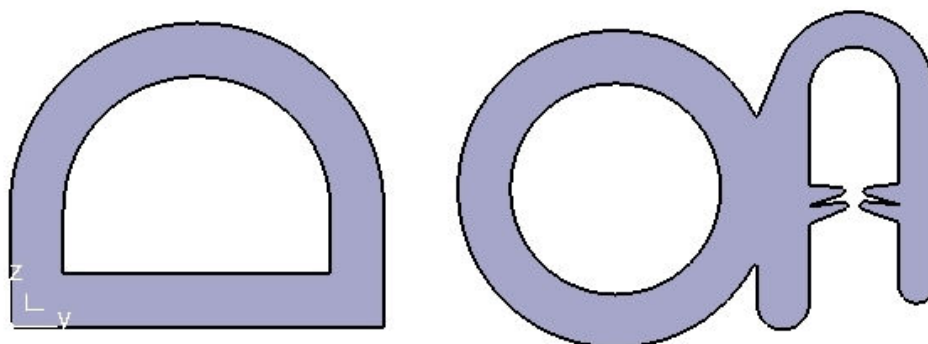
Projekti auton takaoviksi tulee niin sanotut kaappariovet, jolloin takaovet avautuvat käänteisesti etuoviin verrattuna. Takaoven saranat ovat siis normaaliin oveen verrattuna oven takapäädystä, ja ovi aukeaa keskeltä auton perään päin. Sen takia koriin ei tule ollenkaan B-pilaria vaan B-pilari on suunniteltu virtuaaliseksi pilariksi takaoveen. B-pilarin puuttuessa oviaukko on yksi suuri aukko auton kyljessä.

Oviaukon suunnittelussa lähdettiin liikkeelle määrittämällä kynnyskotelon haluttu paksuus. Kynnyskotelon paksuus piti määrittää, jotta tiedettiin, mille etäisyydelle auton ulkopinnasta oven alareunan tiivistepinta tuli mallintaa. Ovia varten mallinnettiin oviaukkoon osittain kaksi tiivistepintaa, joista sisempi tiivistepinta ympäröi koko oviaukon ja siihen kiinnitettävä tiiviste tulee oven sisäreunaa vasten. Ulompana oleva tiivistepinta kulkee oviaukon etuosasta katon kautta takaosaan, ja se tiivistää ovien yläreunat vähentäen tuulen suhinoita. (Kuva 23.)



Kuva 23. Oviaukko ja tiivistepinnat

Tiivisteistä toinen on liimattavaa mallia ja toinen on malliltaan huulitiiviste, jolloin sen kiinnitys tapahtuu upottamalla se levymäisen kappaleen reunan päälle (kuva 24). Kuvassa 23 liimattavan tiivisteeseen pinta on merkitty keltaisella ja vihreällä merkitty pintaan kiinnitetään huulitiiviste.



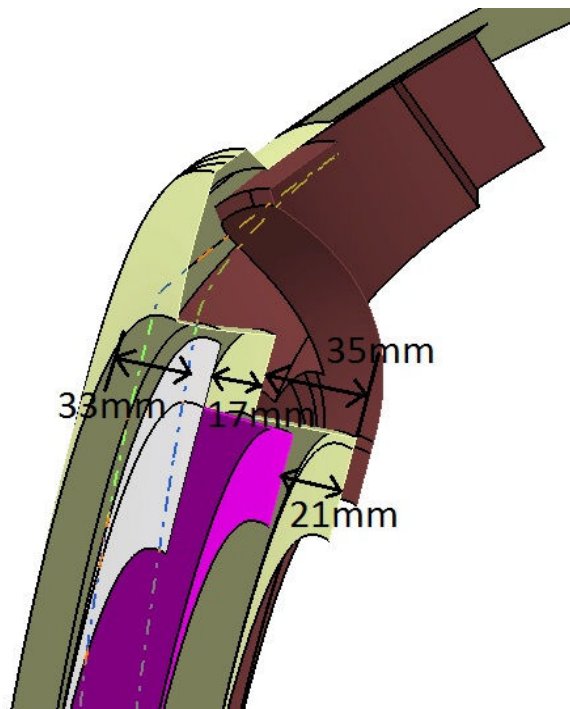
Kuva 24. Tiivisteprofiilit: vasemmalla liimatiiviste ja oikealla huulitiiviste

Ulkokylki kiinnitetään oviaukon reunoilta laippapinnalla sisäkylkeen ja tätä ulkokyljen laippapintaa sopivasti jatkamalla saadaan siitä samalla kiinnityslaippa oviaukon ympäri kiertävälle huulitiivisteelle. Laippapinnan etäisyys korin ulkopinnasta määräytyi sekä kynnykskotelon paksuuden että liimatiivisteeseen kiinnityspinnan mukaan. Liimattavalle

tiivisteelle mallinnettiin kiinnityspinta 33 millimetrin offsetilla auton ulkopinnasta matkustamoon päin (kuva 25). Kyseisen offset-mitan määrää seuraavat tekijät:

- lasin paksuus 5 mm
- lasin liimasauman paksuus 5 mm
- oven materiaalin paksuus liimauksen kohdalta 4 mm
- tiivisteprofiilin paksuus kokoon painuneena 17 mm
- lasi sijaitsee 2 mm sisempänä ulkopinnasta suhinoiden estämiseksi.

Huulitiivisteiden kiinnityspinta mallinnettiin oviaukon yläosassa 35 millimetriä liimatiivisteiden pinnasta sisemmäs. Mitta määräytyy kokoon painuneen tiivisteiden ja oven rungon paksuuden mukaan. Oven rungon paksuus on 31 millimetriä ja tiivisteiden paksuus 21 millimetriä, jolloin yhteen laskettu mitta on 52 millimetriä. Kun huomioidaan se seikka, että runko alkaa liimatiivisteiden tiivistyspinnasta ovesa, joka on 17 millimetrin etäisyydellä liimatiivisteiden kiinnityspinnasta, saadaan edellä mainittu 35 millimetrin offset-mitta. Kun huulitiivisteiden kiinnityspinta oli määritetty alaosaan kynnyskotelon paksuuden mukaan ja yläosa oli saatu mallinnettua, voitiin oviaukon etu- ja takaosan kiinnityspinnat mallintaa vain yhdistämällä ylä- ja alaosan pinnat toisiinsa. Kuvassa 25 näkyy liimatiivistettä vasten tuleva oven tiivistepinta valkoisella ja lilalla näkyy huulitiivistettä vasten tuleva oven sisäpinta. Tämän lisäksi kuvasta ilmenee oven tiivistepintojen ja niiden korissa sijaitsevien vastinpintojen etäisyydet toisistaan sekä ulomman ja sisemmän tiivistepinnan etäisyys toisistaan.



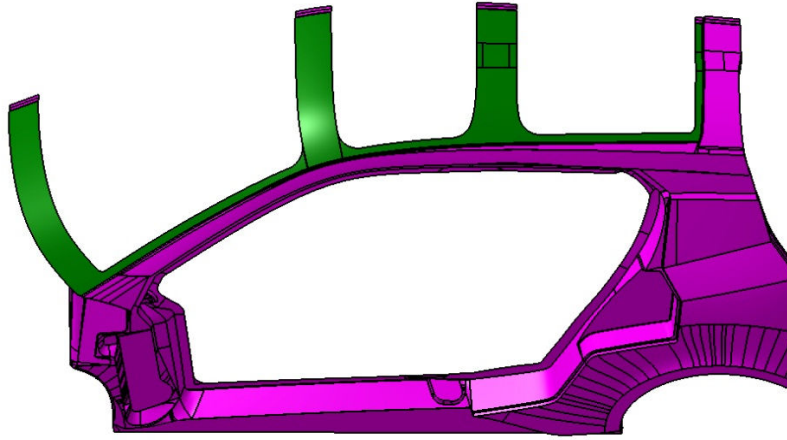
Kuva 25. Oviaukon yläosan ja oven tiivistepintojen mitat

Oviaukkoon tuli mallintaa myös kynnysskotelon keskelle takaoven lukolle kiinnityskohta. Kaappariovien takia takaovessa sijaitseva virtuaalinen B-pilari täytyy lukita ylä- ja alapäästään. Alapään lukitus tapahtuu kynnysskoteloon mallinnetun pinnan ja siihen sijoitettavan lukon avulla. Lukon kiinnityspinta näkyy kuvassa 23 kohoumana kynnysskotelon takaosassa.

4.3.2 Ikkunoiden liimapinnat

Ulkokyljet muodostavat myös korin kattorakenteen ulkopinnan, joten niiden muodostamiin pintoihin kiinnitetään tuulilasi sekä muovista valmistettava kattolasi. Lasien liimapinnat mallinnettiin ulkopintoihin nähden 10 millimetrin offsetilla. Kyseinen mitta määräytyy lasin paksuuden ja sen liimaamiseen käytettävän liimasauman paksuuden mukaan. Lasin paksuuden ollessa viisi millimetriä jää liimasauman paksuudelle niin ikään viisi millimetriä. Tuulilasin alareunan kiinnittämiseen varattiin sadan millimetrin kiinnityspinta sekä yhtä leveä pinta varattiin tuulilasin yläreunaan, johon kiinnitetään myös kattolasin etureuna. Kattolasin keskelle mallinnettiin niin ikään sadan millimetrin kiinnityspinta siitä syystä, että se määrittää samalla keskimmäisen

kattopalkin leveyden. Loput liimapinnat ovat 25 millimetriä leveitä. Tuulilasin ja kattolasin liimapinnat on havaittavissa kuvassa 26.



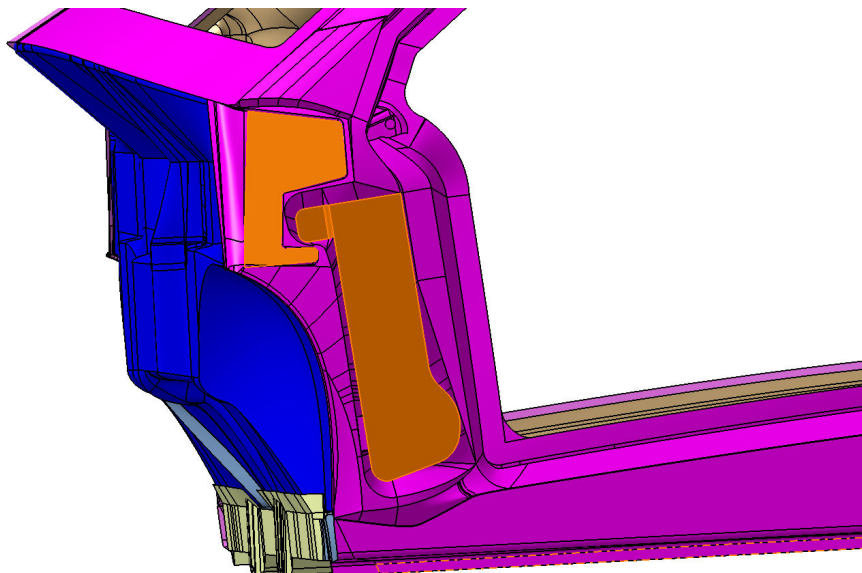
Kuva 26. Vihreällä merkitty ikkunoiden liimapinnat

4.3.3 Ovien saranoiden ja eturungon kiinnitys

Ulkokylki muodostaa yhdessä sisäkyljen kanssa korin A-pilarin, johon kiinnitetään etuoven sarana sekä osa eturungosta. Etuovessa ei ole perinteisiä saranoita vaan oven avaamisen ja sulkemisen hoitaa yksi melko kookas saranamekanismi. Sarana piti saada mahtumaan auton ulkomuotojen puitteissa A-pilariin, joten A-pilarin muodostavaa palkkia jouduttiin hieman ohentamaan. Saranan suuren koon takia pilaria jouduttiin kuitenkin leventämään pituusakselin suunnassa, mikä kompensoi palkin ohentamista sen jäykkyydessä. Tilantarpeen huomioimisen lisäksi tuli myös simuloida, miten ovi avautuu, jolla selvitetään oven liikerata ja mahdolliset osumat muuhun koriin. Näin sarana saadaan oikeaan asentoon ja ovi aukeaa ottamatta kiinni mihinkään. Saranalle mallinnettiin A-pilarin sivuun pinta, johon se kiinnitetään (kuva 27).

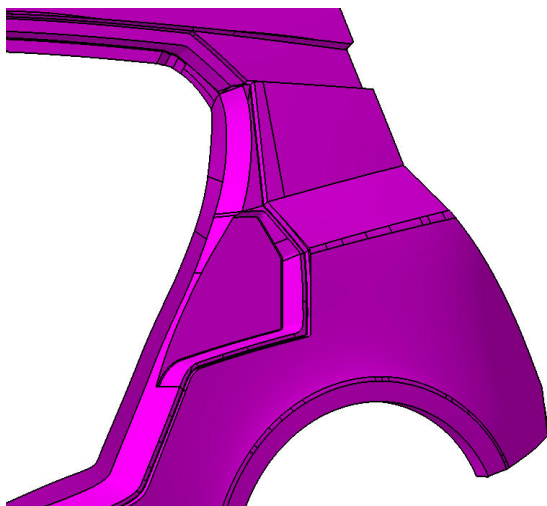
Eturunko haluttiin kiinnittää niin ikään A-pilariin, joten sille mallinnettiin siihen oma kiinnityspinta. Sen kiinnityspintaa rajoitti suuresti saranalle tehty paikka ja kiinnityspinta jouduttiinkin mallintamaan aivan tuulilasin alanurkkaan. Eturungon kiinnityspinnan mallinnuksessa piti saranan tavoin ottaa huomioon sen pysyminen auton ulkopinnan sisällä. Sekä etuoven saranan että eturungon kiinnityspinnat mallinnettiin siten, että yksikään kohta eturungosta tai saranasta ei tule viittä

millimetriä lähemmäs auton ulkopintaa. Tämä siitä syystä, että keulaosa autosta tehdään muovisilla kanteilla, joiden paksuus on viisi millimetriä. Nämä kanteet jättävät alleen eturungon sekä etuoven saranan. Kuvassa 27 on oranssilla värillä merkitty eturungon ja etuoven saranan kiinnityspinnat, joista ylempi pinta on rungolle ja alempi saranalle.



Kuva 27. Eturungon ja etuoven saranan kiinnityspinnat

Takaoven muodon takia sen aukeaminen osumatta ulkokylkeen oli yksi ongelmakohta, jonka kanssa jouduttiin tekemään paljon töitä. Ovi yritettiin ensin saada toimimaan simuloinnin avulla jo olemassa olevilla saranoilla, mutta oven muotoilun takia siinä ei onnistuttu. Takaovelle jouduttiin suunnittelemaan kokonaan oma sarana ja saranan kiinnitys tapahtuu sisäkylkeen. Kiinnityksen ollessa sisäkyljessä täytyy saranan silloin mennä ulkokyljen läpi kiinnittyäkseen oveen. Tästä syystä ulkokylkeen piti tehdä oviaukon takaosaan tilaa saranan läpiviennille ja oven aukeamiselle. (Kuva 28.)



Kuva 28. Takaoven ja sen saranan vaatima tila oviaukossa

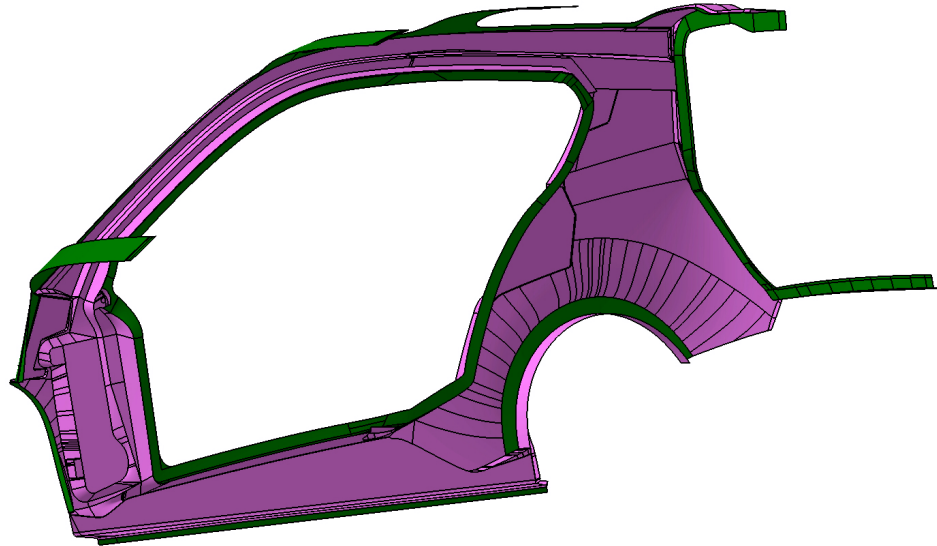
4.3.4 Takaluukun aukko

Ulkokylki toimii myös vastinpintana takaluukulle, jolloin siihen piti suunnitella tiivistepinnat takaluukku varten. Takaluukusta oli suunniteltu alustava malli, jonka mukaan tiivistepintoja lähdettiin suunnittelemaan. Luukussa käytetään samanlaista tiivistettä kuin oviaukon ympäri kulkeva tiiviste, jonka puristamaton paksuus on 22,6 mm. Riittävän tiiveyden saamiseksi haluttiin tiivisteeseen painuvan kasaan 1,6 millimetriä, jolloin takaluukun tiivistepinnan ja ulkokyljen vastinpinnan välissä tulee olla 21 millimetriä. Osa pinnoista voitiin ottaa suoraan edellä mainitun suuruisella offsetilla takaluukun pinnoista, mutta osa jouduttiin mallintamaan uudestaan takaluukun kaarevuuden takia. Korjausta vaatineet pinnat mallinnettiin kohtisuorempaan asentoon luukkuun verrattuna, koska sillä taataan parempi tiiveys. Koska ulkokylki kiinnittyy takaluukun aukon ympäriltä oviaukon tavoin sisäkylkeen, tulee sen kiinnityspintaa jatkaa noin 15 millimetriä, jotta tiiviste saadaan upotettua aukon ympärille.

4.3.5 Ulkokylkien kiinnitys

Ulkokylkien keskinäisen liitoksen lisäksi ne kiinnitetään tulipeltiin, lattiapaneeliin, sisäkylkiin sekä kattopalkkeihin. Tulipellin ja lattiapaneelin kiinnitys ulkokylkiin todettiin jo aiemmissa kappaleissa ja niitä varten mallinnettiin ulkokylkiin omat kiinnityspinnat. Tulipeltiä varten ulkokylkien etupäähän mallinnettiin tulipellin päälle kääntyvät kiinnityslaipat sekä tuulilasin liimapinnaksi mallinnettu pinta toimii samalla

kiinnityspintana tulipellin yläosalle. Lattiapaneelin ja ulkokylkien liitosta varten ulkokyljen helmaan mallinnettiin erillinen kiinnityspinta. Kuvassa 29 on vihreällä värillä merkitty valtaosa ulkokyljen kiinnityspinnoista.



Kuva 29. Ulkokyljen kiinnityspintoja

Ulkokylkeen sisäkylkeä varten mallinnetut kiinnityspinnat ovat monikäyttöisiä, sillä kiinnitysfunktion lisäksi ne toimivat joko korin luukkujen tiivistepintoina tai lasien liimapintoina. Lasien liimapinnat toimivat myös kiinnityspintana kattopalkkien muodostuksessa. Ulkokylkien kiinnittyessä toisiinsa auton keskeltä kapeilla limiliitoksilla, vahvistavat kyljestä kylkeen kulkevat kattopalkit merkittävästi ulkokylkien yhteen liitosta.

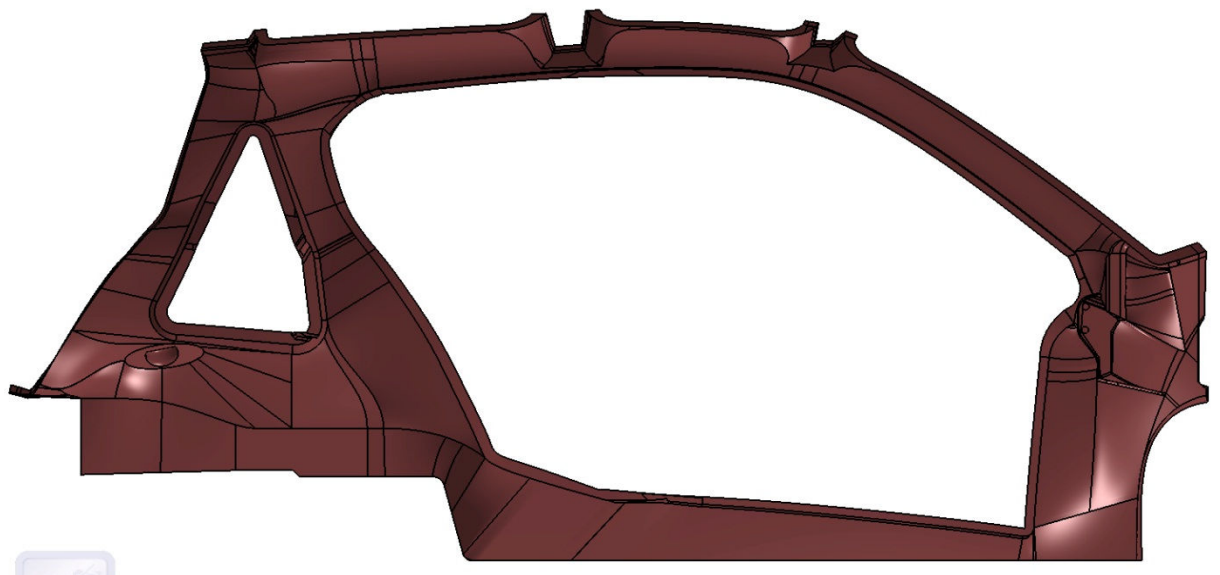
4.3.6 Muottipuoli ja päästö

Ulkokylkien toimiessa auton ulkopintana tulee näin ollen ulkopinnan olla myös muottipinta. Muottipinta tuli kokoajan pitää mielessä ulkokyljen päästävyiden kannalta ajateltuna, sillä ulkokylki oli yksittäisistä osista haastavin saada päästäväksi. Ulkokyljen muotitustekniikka mahdollistaa kyljen ja kattorakenteen valmistuksen yhdeksi paneeliksi. Jos muotti koostuisi yhdestä osasta, lukitsisi kattorakenne kappaleen muottiinsa. Muotti kuitenkin kootaan kahdesta toisistaan irtoavasta osasta, jolloin suunnittelu helpottui hieman päästön kannalta. Muotti jakaantuu kahtia kattokaaren ja

kylkiosan välillä, jolloin niiden päästön kannalta voidaan ajatella ne valmistettavan eri muoteilla. Kylkiosan päästön kannalta merkittävimpiä kohtia olivat oviaukko sekä kynnykskotelo, koska ne sisältävät paljon suorita pintoja. Esimerkiksi jos kynnykskotelon ylä- ja alapinta olisivat yhdensuuntaisia, voisi ulkokylki pahimmassa tapauksessa lukittua muottiinsa. Kun pinnat mallinnetaan toisiinsa nähden avautuvaksi eli v-muotoon, kynnykskotelosta tulee tällöin päästävä. Kattorakenteen muottiosalla valmistetaan myös takaluukun vastinpinnat sekä ne kylkiosaan yhdistävät pinnat. Takaluukun vastinpinnat ovat luonnollisesti sisempänä korissa kuin ulkokyljen takakulma, joten ne toivat oman haasteensa ulkokyljen päästön osalta.

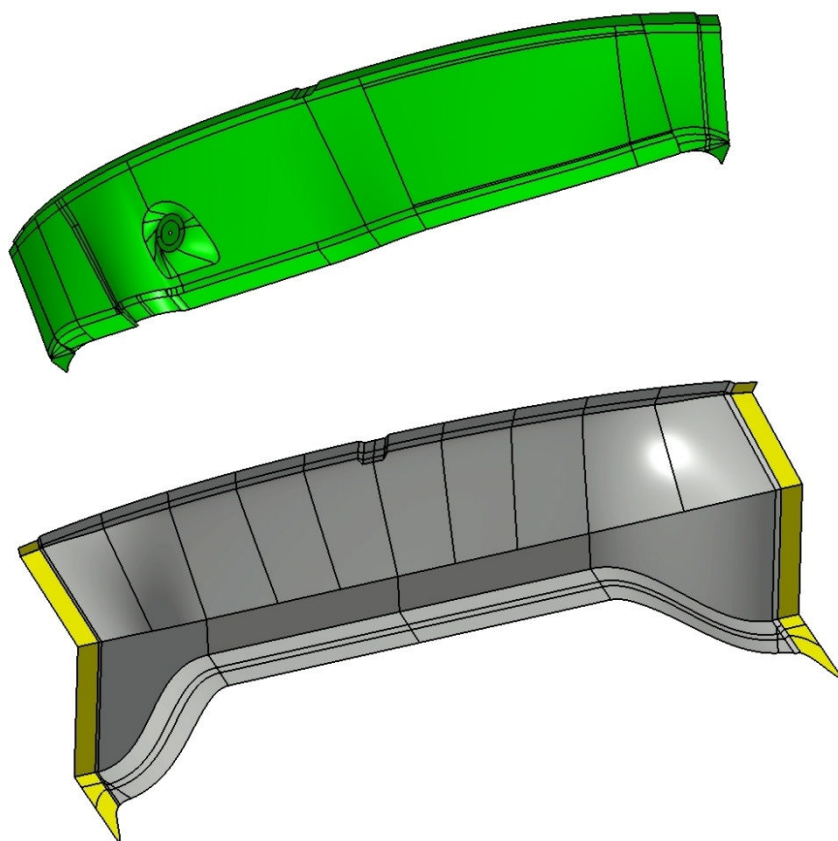
4.4 Sisäkyljet

Sisäkyljet toimivat matkustamon sisäpintoina yhdessä niitä yhdistävien kattopalkkien kanssa. Yhdessä ulkokylkien kanssa ne muodostavat myös valtaosan korin kantavista palkeista. Koska ulkokyljet ja lattiapaneeli oli jo mallinnettu, ne määräsivät, minkä näköiset sisäkyljistä tuli. Sisäkyljet osallistuvat olennaisesti myös kattorakenteen muodostamiseen kattopalkkien ja ulkokylkien kanssa. Näiden lisäksi siihen kiinnittyvät takauskunvaimentimet, kojelaudan runko sekä takaoven sarana ja lukko.



Kuva 30. Sisäkylki matkustamon puolelta

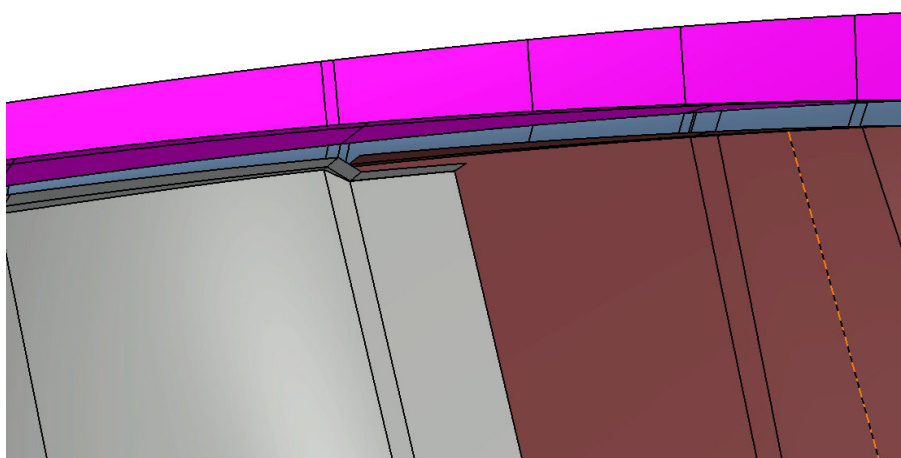
Sisäkyljet ovat kaikilta osin identtisiä, joten niistä ei tarvinnut mallintaa kuin vain toinen. Kattopalkkeja lukuun ottamatta sisäkyljet suunniteltiin aluksi vastaamaan ulkokylkiä niiltä osin, että ne yhdistettäisiin korin keskeltä limiliitoksella toisiinsa. Niiden muotoilun vuoksi ne olisivat olleet tällä tavoin kuitenkin vaikeampi irrottaa muoteistaan, joten etu- ja takapäässä kyljet katkaistiin sopivasta paikkaa läheltä korin kulmia ja sisäkylkiä yhdistämään mallinnettiin erilliset paneelit. Kuvassa 31 vihreä paneeli on etupaneeli ja harmaa takapaneeli. Keltaisella värillä on havaittavissa takapaneelin kiinnityspinnat sisäkylkeen.



Kuva 31. Sisäkylkiä yhdistävät paneelit

Sisäkyljet yhdistävä takapaneeli on täysin identtinen auton keskilinjan suhteen, mutta etupaneeliin jouduttiin mallintamaan kiinnityspaikka kojelaudan rungolle. Sekä etu- että takapaneelissa limiliitosta varten mallinnetut kiinnityspinnat mallinnettiin matkustamon puolelle. Tämä siitä syystä, että molemmat paneelit kiinnittyvät yläreunastaan ulkokylkeen ja niiden kiinnityskohta ulkokyljessä toimii edessä liimapintana tuulilasille ja takana tiivistepintana takaluukulle. Liima- ja tiivistepintojen tulee olla tasaiset, joten jos kiinnityspinta olisi mallinnettu matkustamosta ulospäin, olisi sisäkyljen ulkopuolisia

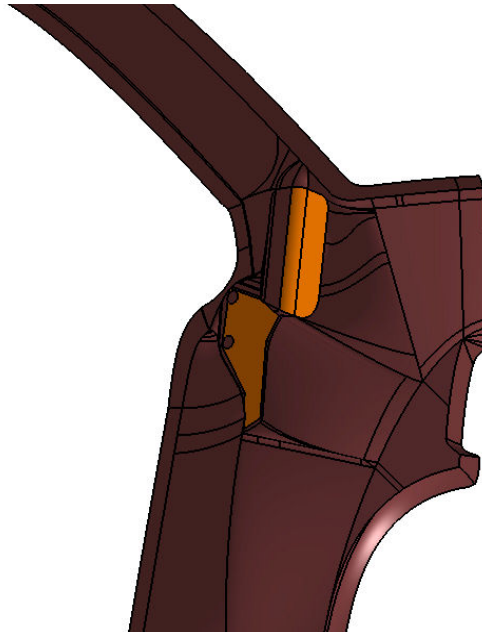
paneeleja täytynyt muokata niiltä osin tuomaan tilaa liitoskohdissa. Tämä tarkoittaa sitä, että tiiviste- ja liimapintoihin olisi täytynyt mallintaa kohoumat limiliitosta varten, mikä ei kuitenkaan ole mahdollista pintojen varsinaista tarkoituserään silmällä pitäen. Kiinnityspinnat olivat myös helpompi mallintaa matkustamon puolelle, sillä tällä tavoin muiden paneelien muokkaus jäi minimaaliseksi. Kuvassa 32 on nähtävissä ruskean värisen sisäkyljen ja harmaan takapaneelin liitos toisiinsa. Jos liitos olisi tehty toiselle puolelle sisäkylkeä, olisi tällöin jouduttu tekemään kohouma ulkokylkeen (lila) ja kohouma olisi tullut tällöin tiivistepintaan.



Kuva 32. Takapaneelin ja sisäkyljen liitos

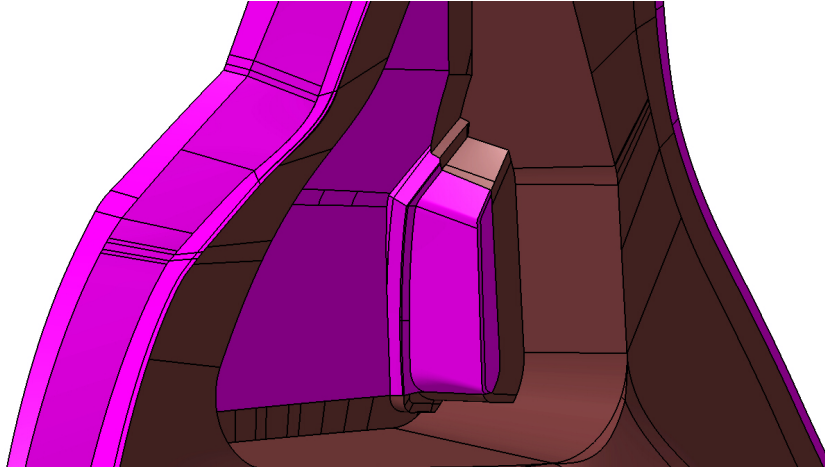
4.4.1 Komponenttien kiinnitys sisäkylkeen

Kojelaudan runko kiinnitetään sisäkyljen A-pilariin sekä sisäkylkiä yhdistävään etupaneeliin. Runkoa varten tuli mallintaa kyseisiin osiin kiinnityspinnat, ja ne mallinettiin kojelaudan rungosta tehdyn mallinnuksen perusteella. Kojelaudan runkoon kiinnittyy kojelaudan lisäksi myös rattiakseli, joten ratin sijainti käytännössä määrittää myös rungon sijainnin. Sijainnin selvittäminen tapahtui tilankäyttömallin avulla, jossa kokeiltiin eripituisten ihmisten kanssa penkkien säätöjen puitteissa ratille sopiva sijainti. Kun sijainti oli selvillä, voitiin rungosta tehty mallinnus sijoittaa Catiassa oikealle paikalle ja mallintaa sen avulla pinnat rungon kiinnitykselle. (Kuva 33.)



Kuva 33. Kojelaudan rungon kiinnitys A-pilarissa

Takaoven saranaa varten tuli ulkokylkeen mallintaa läpivientireikä ja sen seurauksena sisäkylkeen piti mallintaa syvennys läpivientiä varten. Saranalle mallinnettiin C-pilariin syvennys, josta se liittyy ulkokyljen läpi oveen. Saranan paikkaa mietittiin melko tarkkaan, sillä normaalisti henkilöautojen ovissa on kaksi saranaa, jotka jakavat kuorman. Kun ovea käytetään yhdellä saranalla, aiheutuu siihen enemmän vääntöä. Tästä syystä saranasta päätettiin suunnitella melko kookas, jotta kuormitus jakautuisi laajemmalle alueelle ja näin sen sijoitus korissa ei ole niin tarkka. Kuvassa 34 on takasaranan läpivientikohdassa sisäkylkeen mallinnettu syvennys ulkokyljen muotoja seuraten. Saranan läpivientireikää ei ole vielä tässä vaiheessa mallinnettu ulkokylkeen.



Kuva 34. Takasaranan läpivientikohta

Takaiskunvaimentimet suunniteltiin kiinnitettäviksi sisäkylkeen ja niiden paikka määritettiin yhdessä taka-akselistosta insinööryötänsä tekevän projektin jäsenen kanssa. Vaimentimille kiinnityspaikkaa mallintaessa huomattiin kuitenkin niiden alustavan asennon vaikeuttavan mallintamista, joten niitä kallistettiin enemmän taaksepäin. Tällä toimenpiteellä kiinnityspintaa saatiin hieman alemmas, mikä helpotti sisäkyljen päästöä. Iskunvaimentimen kiinnityspinta on nähtävissä D-pilarin juuressa kuvassa 37.

4.4.2 A-, C- ja D-pilari

Auton korin pystysuuntaiset palkit eli pilarit nimetään aakkosjärjestyksessä keulasta perään päin. Ulkokylkeä koskevassa luvussa 4.3.1 mainittiin jo, ettei korissa ole B-pilaria vaan se on takaovessa kiinni. Sisäkyljen muotoilulla oli suora vaikutus pilarien kokoon, joten ne käsitellään tässä luvussa.

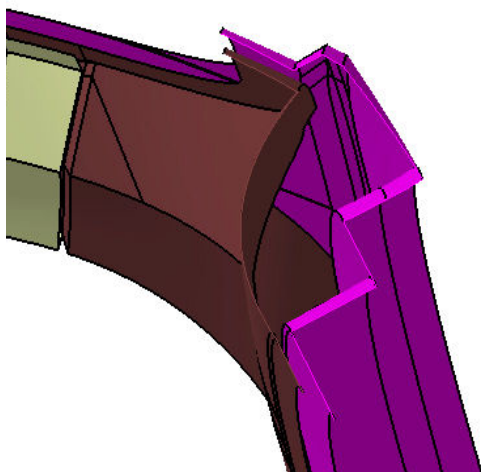
Benchmarking oli tärkeässä osassa pilarien ja muiden palkkien suunnittelussa, sillä kori oli suunniteltava aluksi joillain palkkien paksuudella ja tämän jälkeen suorittaa lujuuslaskenta sille. Jos lujuus ei olisi riittävä, olisi palkkeja muokattava. Teräksisissä auton koreissa pilarit eivät välttämättä muodostu suljetuista palkeista vaan muotoiluista teräslevyistä, joissa kompleksinen muoto tuo jäykkyyttä. Jäykkyyttä lisätäkseen voidaan kiinnittää päällekkäin useampi teräsrakenne. Kuvassa 35 on esimerkki auton B-pilarista, jonka sisempi harmaa osa ehkäisee valmistajan mukaan pilarin nurjahdusta. Projekti-auton kaikki palkit ja pilarit muodostavat suljetun

rakenteen, ja niiden poikkileikkauksen koossa haluttiin käyttää reilusti varmuuskerrointa, jotta välttyttäisiin ylimääräiseltä suunnittelutyöltä.



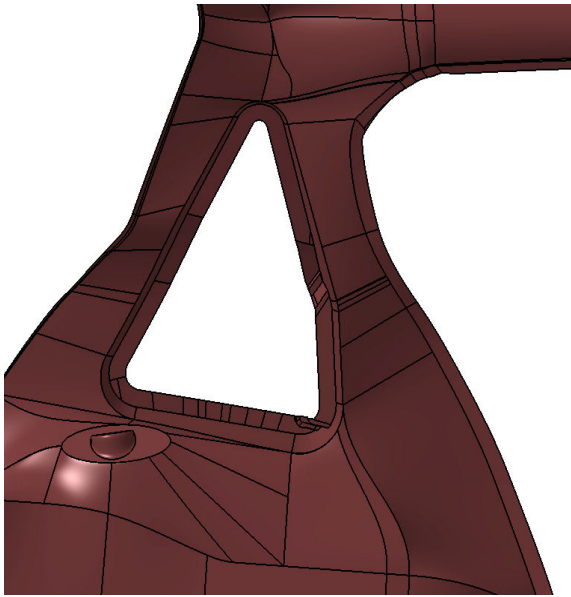
Kuva 35. B-pilari ja sen sisempi vahvikekappale (9)

A-pilariksi luetaan tuulilasin ja etusivuikkunan väliin muodostuva pilari. A-pilari sijaitsee kuljettajan näkökentässä, eikä se saa peittää liikaa kuljettajan näkyvyyttä, joten on olemassa tarkat säädökset, miten paljon se saa peittää näkyvyyttä. Tämä vaikutti olennaisesti A-pilarin suunnitteluun. A-pilarin suunnittelussa ulkokyljessä sijaitsevat oviaukko ja tuulilasin liimapinta määrittivät pilarin leveyden, ja sisäkyljen tehtäväksi jäi määrittää sen paksuus. Paksuutta saatiin lisää mallintamalla sisäkyljen osuus A-pilarista kaarevaksi. Kuvassa 36 näkyy A-pilarin poikkileikkaus, josta on havaittavissa A-pilarin kaarevuus sisäkyljen osalta.



Kuva 36. A-pilarin poikkileikkaus

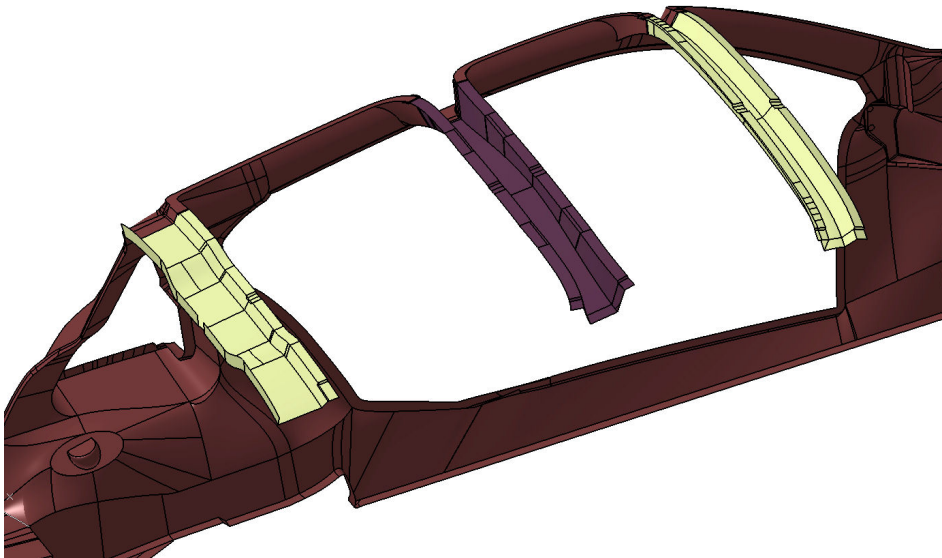
C- ja D-pilarit muodostuvat oviaukon takareunan ja takaluukun aukon väliselle alueelle. Tälle alueelle sisäkylkeen mallinnettiin kolmion muotoinen aukko, joka erottaa pilarit toisistaan ja jonka koolla vaikutettiin pilarien leveyteen (kuva 37). Sisäkylki kiinnittyy aukon ympäriltä ulkokylkeen, joten kolmion muodostavien seinämien syvyydellä oli suora vaikutus pilarien paksuuteen. C- ja D-pilarien paksuuteen vaikutti myös ulkokylkeen mallinnetun oviaukon syvyys sekä takaluukun aukon leveys.



Kuva 37. C- ja D-pilarit

4.4.3 Kattorakenne

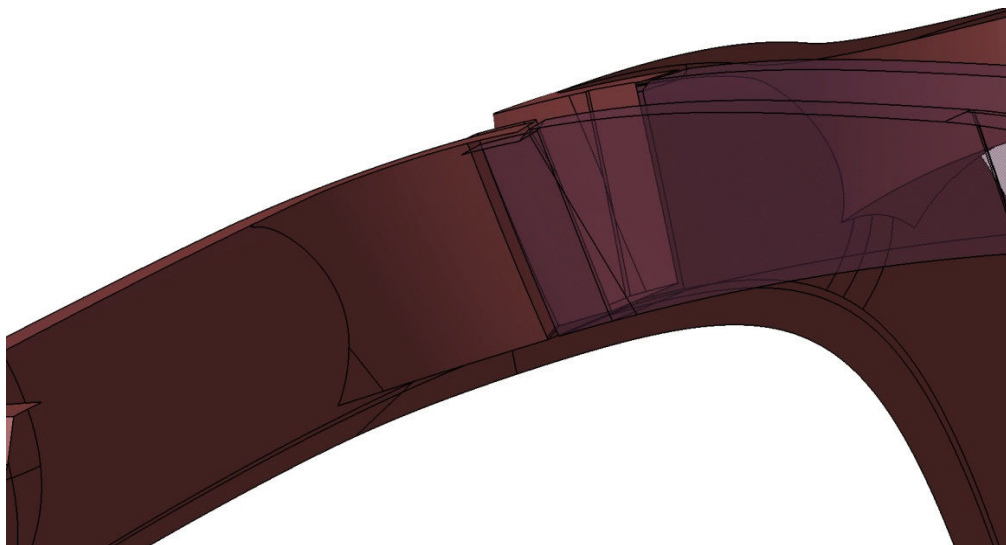
Kattorakenne muodostuu A-pilarien jatkona olevista kattokaarista sekä niihin kiinnittyvistä kattopalkkeista (kuva 38). Kattopalkit ovat erillisiä paneeleja, joiden ehdoilla sisäkylkeen tuli mallintaa niille liitoskohdat. Kattopalkkien sijaintiin vaikuttivat muotoilun lisäksi tuulilasin koko sekä takaoven virtuaalisen B-pilarin sijainti.



Kuva 38. Kattorakenne

4.4.3.1 Kattokaari

Kattokaari jatkuu suoraan A-pilarista, joten sitä jatkettiin samalla profiililla oviaukon ja kattolasin liimapintoja seuraten. Kattopalkkeja varten tuli sisäkyljen kattokaareen mallintaa pala kattopalkkeja, joiden tuli liittyä sulavasti kattokaareen. Teräviin kulmiin syntyy suuria rasituskeskittymiä, joten pyöreät ja sulavat muodot ehkäisevät niitä. Alun perin pohdittiin sisäkylkien kohdalla samanlaista ratkaisua kattopalkkien suhteen kuin ulkokyljessä. Ideana oli mallintaa sisäkylkiin palkin puolikkaat ja liittää sisäkyljet keskeltä yhteen ulkokylkien tavoin. Taaimmisen kattopalkin muodon vuoksi olisi syntynyt muotoinen lukitseva muoto, joten idea jouduttiin hylkäämään. Tämän lisäksi korin keskelle olisi muodostunut samaan kohtaan kaksi päällekkäistä liitosta. Erillisillä kattopalkkeilla liitosta ei muodostu korin keskilinjalle ja palkit tukevat ulkokylkien yhteenliitosta. Kuvassa 39 ilmenee kattokaaren ja kattopalkin liitos, jossa läpikuultava kattopalkki menee sisäkyljen sitä varten mallinnettujen pintojen päälle.

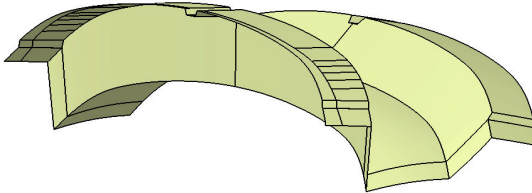


Kuva 39. Kattokaaren ja kattopalkin liitos

4.4.3.2 Kattopalkit

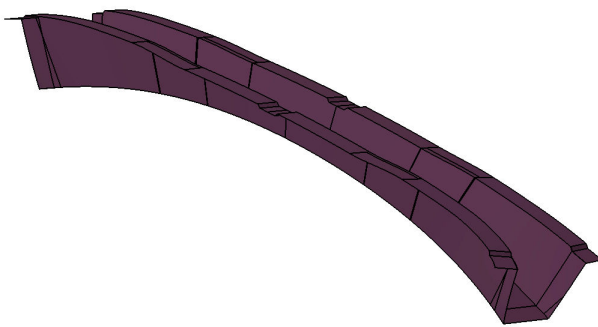
Kattopalkkien ensisijaisena tehtävänä on yhdistää kattokaaret toisiinsa ja toimia katon kuormaa kantavina elementteinä. Kattopalkkeja korissa on yhteensä kolme. Etummainen niistä määräytyy tuulilasin mukaan, jonka koon teolliset muotoilijat määrittivät yhteistyössä insinöörien kanssa. Tuulilasille ja kattolasille mallinnettiin

ulkokylkeen liimapinta niiden kiinnittämistä varten, ja tämä kiinnityspinta määräsi etummaisesta palkin leveyden. Varsinaisen palkin leveys ei ole sama kuin liimapinnan, sillä palkkiin pitää mallintaa kiinnityspinnat sen ulkokylkeen kiinnitystä varten. Etummaisesta palkista tehtiin muodoltaan hieman viisto, jotta näkyvyys eteen olisi mahdollisimman hyvä myös pitkällä kuljettajilla (kuva 40).



Kuva 40. Etummainen kattopalkki

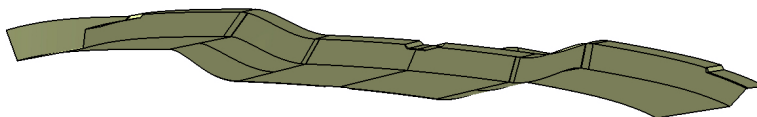
Keskimmäinen kattopalkki sijoitettiin siten, että se ottaa vastaan virtuaalisen B-pilarin yläosasta tulevat sivuttaiset voimat. Keskimmäinen kattopalkki ehkäisee kattokaaren mahdollista taipumaa sivutörmäystilanteissa. Sen kattokaarissa sijaitseviin kiinnityspaloihin tuli lisäksi mallintaa takaoven ylälukko, ja siitä syystä palkin alkupää on verrattain paksu muuhun palkkiin nähden. Keskimmäisen kattopalkin leveys määräytyi etummaisesta palkin tavoin ulkokyljessä sijaitsevan kattolasin liimapinnan leveyden mukaan.



Kuva 41. Keskimmäinen kattopalkki

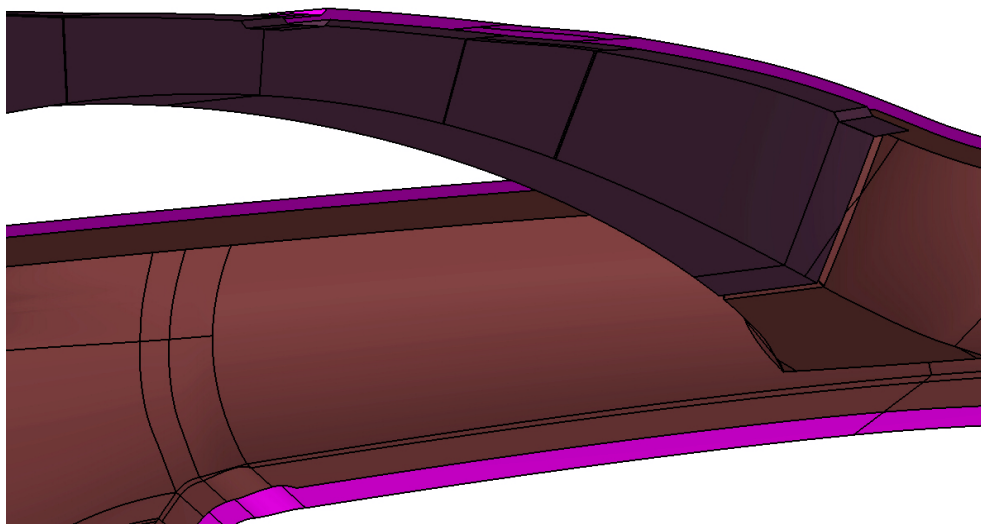
Taaimmainen kattopalkki alkaa siitä, mihin kattolasi päättyy ja loppuu takaluukun tiivistepintaan. Taaimmaisesta palkista voitiin tehdä matala, koska kattolasi loppuu reilusti ennen korin takaluukun tiivistepintaan ja palkin leveys on näin ollen kohtalaisen

suuri. Matalammalla palkilla on se etu, että takaluukun aukko saadaan suuremmaksi. Taaimmaiseen kattopalkkiin mallinnetaan vielä takaluukun saranoilte kiinnityspinnat, kunhan takaluukku ja sen saranat on suunniteltu.



Kuva 42. Taaimmainen kattopalkki

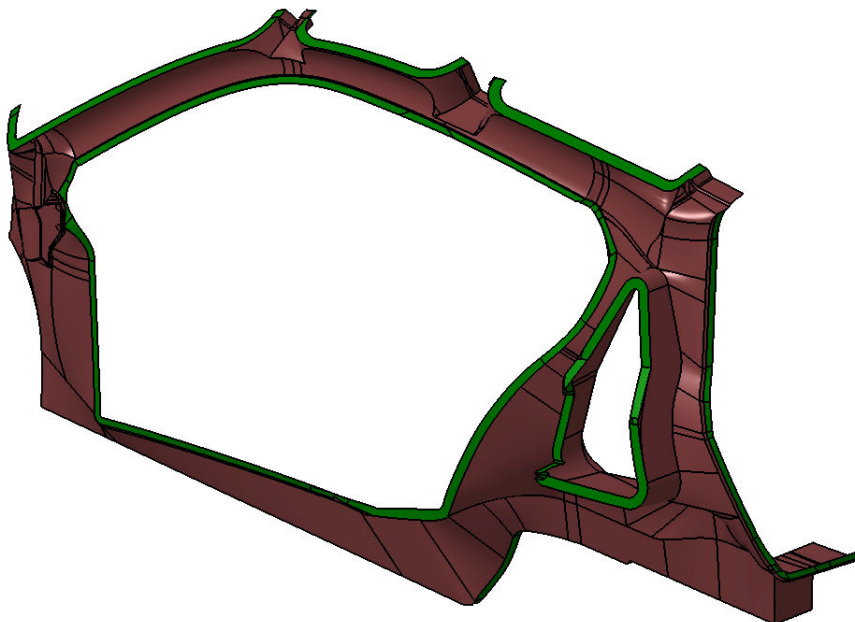
Kattopalkit kiinnitetään kaikki suurimmalta osaltaan ulkokylkiin ja tämän lisäksi päistään sisäkylkeen niitä varten mallinnettuihin kiinnityspaloihin. Koska ulkokyljet liitetään toisiinsa keskeltä limiliitoksella, tulee jokaiseen palkki mallintaa liitoksen kohdalle tilaa. Edeltävissä kattopalkkien kuvissa on havaittavissa jokaisen palkin keskellä lovi ulkokylkien limiliitosta varten. Kattopalkkien muottipintana toimivat palkin ulkopinta ja päästöä ajatellen jokaisen palkin pystyseinät on mallinnettu toisiinsa nähden hieman kulmaan. Kuvassa 43 on nähtävissä palkin kiinnitys ulko- ja sisäkylkeen.



Kuva 43. Kattopalkki ulko- ja sisäkylkeen kiinnitettynä

4.4.4 Kiinnitys ja muottipuoli

Sisäkylki kiinnitetään pääosin ulkokylkeen ja tämän lisäksi alaosaan lattiapaneeliin sekä etupyörän lokasuojan kohdalta tulipeltiin. Kuvassa 44 näkyy kaikki ulkokylkeä varten mallinnetut kiinnityspinnat vihreällä.



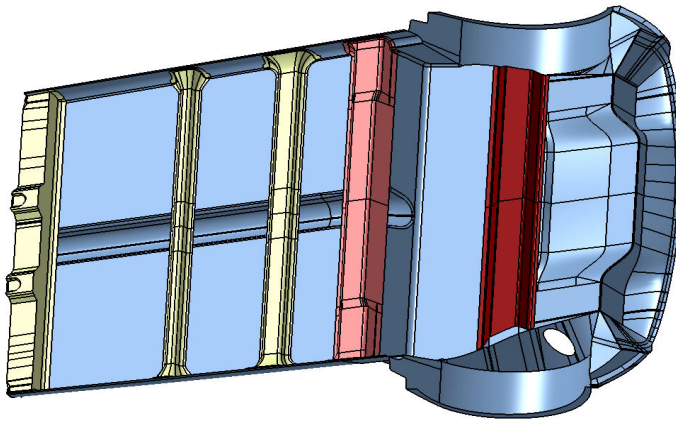
Kuva 44. Sisäkylki ulkopuolelta kuvattuna

Sisäkyljet kiinnittyvät toisiinsa niitä yhdistävien kattopalkkien ja etu- ja takapaneelin avulla. Kattopalkkien kiinnitys sisäkylkeen on havainnollistettu kuvassa 39. Sisäkyljen muottipuoli on matkustamon puolella tarkoittaen sitä, että materiaalin paksuus kasvaa korin ulkopintaa kohti. Sisäkyljen osalta merkittävimpiä paikkoja päästön kannalta olivat kattopalkkien kiinnityspalat kattokaarella sekä takaiskunvaimentimien kiinnityspintojen yhdistyminen muihin sisäkyljen pintoihin sisäkyljen taka-alanurkissa. Kun sisäkyljestä irrotettiin etu- ja takapaneeli irtonaisiksi osiksi, helpotti se huomattavasti sisäkyljen päästön kannalta.

4.5 Lattiapalkit

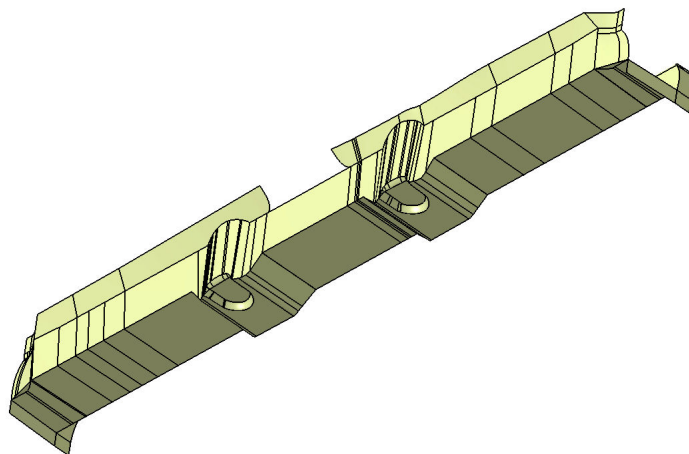
Lattiapalkkien ensisijaisena tarkoituksena on toimia koria jäykistävinä elementteinä sekä osaan niistä kiinnittyy auton komponentteja. Lattiapalkit toimivat myös korin kasausvaiheessa asemointia helpottavina kohdistuselementteinä. Yhteensä

lattiapalkkeja on kuusi, jotka yhtä lukuun ottamatta sijaitsevat kaikki lattiapinnan alapuolella. Auton lattiasta haluttiin mahdollisimman tasainen ja siitä syystä suurin osa palkeista kulkee lattiapinnan alapuolella. Kynnyskotelo on korin yksi suurimmista palkeista ja kriittinen osa korin jäykkyyden kannalta. Tästä syystä kynnyskoteloon kiinnittyy yhteensä neljä palkkia, jotka antavat sille jäykkyyttä ja vähentävät kynnyskotelon nurjahtamisvaaraa. Kuvassa 45 voi nähdä palkkien sijainnit lattiapaneelin suhteen.



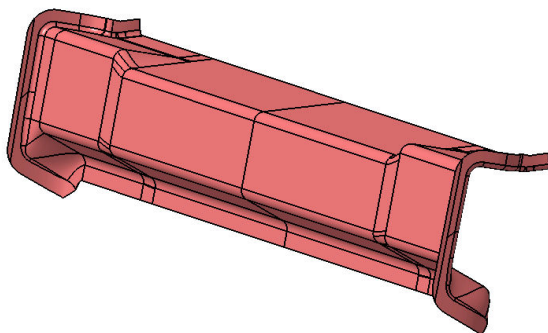
Kuva 45. Lattiapalkkien sijainnit

Lattiapalkeista kolme toimivat kiinnityspintana autoon tuleville komponenteille. Näitä palkkeja ovat keulasta päin lueteltuna ensimmäinen, neljäs ja viides palkki. Ensimmäiseen palkkiin mallinnettiin kiinnityspaikat auton apurunkoa varten. Apurungon kiinnikkeet sijoittuvat lattiapintaan nähden melko matalalle ja etummaisena palkin kiinnittyessä lattiapintaan ei siitä haluttu tehdä kauttaaltaan niin paksua, jotta sen alareuna olisi kiinnikkeiden tasalla. Tästä syystä kiinnikkeiden kohdalta palkin paksuutta kasvatettiin alaspäin. Kuvassa 46 on nähtävissä etummainen lattiapalkki sekä siihen mallinnetut kiinnityspaikat apurunkoa varten.



Kuva 46. Etummainen lattiapalkki

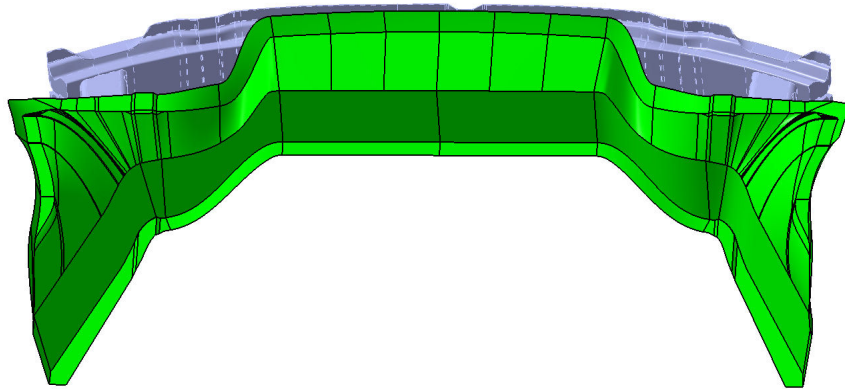
Neljäs ja viides palkki toimivat taka-akselin kiinnityspintoina, joista neljänteen palkkiin kiinnittyy taka-akseli ja viidenteen taka-akselin ilmajouset. Lattiapalkeista viides palkki on ainoa, jolla ei ole funktiota korja jäykistävänä elementtinä vaan se toimii puhtaasti vain kiinnityspintana takajousille. Kuvassa 47 on neljäs lattiapalkki, johon mallinnetut taka-akselin kiinnityspaikat näkyvät kuvasta katsottuna palkin yläpuolella kohoumina sen molemmilla laidoilla. Takajousien palkki näkyy kirkkaanpunaisena kuvassa 45.



Kuva 47. Neljäs lattiapalkki

Ainoa lattiapaneelin päälle sijoittuva palkki on takatörmäyspalkin lattiapalkki. Palkin tarkoituksena on ottaa vastaan mahdolliset voimat, jotka aiheutuvat peräänajotilanteessa. Palkin päätyosat ovat korin pituusakselin suhteen huomattavasti paksummat kuin muualla palkissa. Tämä siitä syystä, että törmäyspalkki kiinnittyy näille kohdille ja peräänajotilanteessa voimat suuntautuvat auton pituusakselin suuntaisesti.

Palkin ollessa paksumpi tässä suunnassa voi se ottaa vastaan suurempia voimia törmäyspalkilta. Palkin muu osa pyrittiin pitämään niin kapeana kuin mahdollista, jotta tavaratilan koko ei kutistuisi riittämättömiin. Kuvassa 48 on nähtävissä osa takatörmäyspalkkia ja sitä varten mallinnettu lattiapalkki.



Kuva 48. Takatörmäyspalkin lattiapalkki

Kiinnitys ja muottipuoli

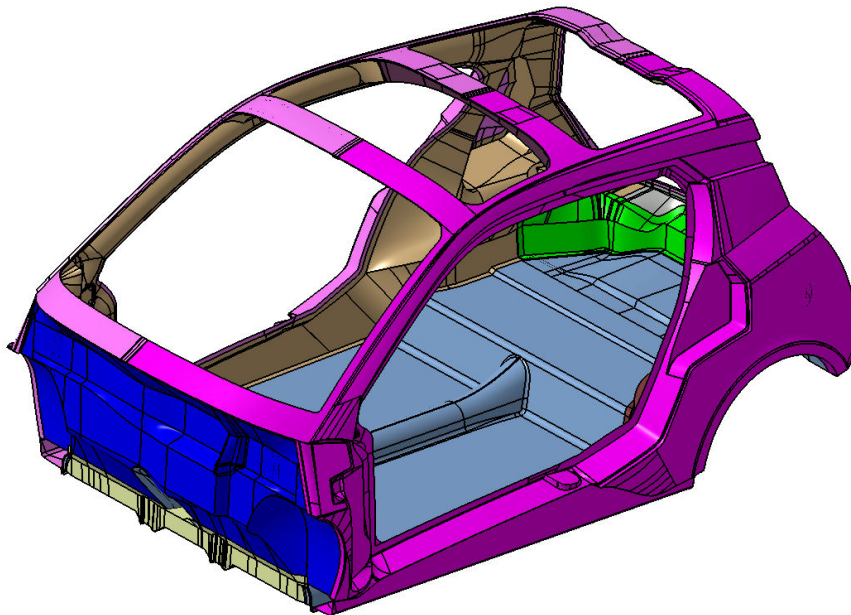
Valtaosa lattiapalkeista kiinnittyy pelkästään lattiapaneeliin. Poikkeuksena on ensimmäinen ja viimeinen palkki, joista ensimmäinen kiinnittyy lattiapaneelin lisäksi tulipeltiin ja viimeinen kiinnittyy pelkästään sisäkylkeen. Lattiapalkeissa muotti tulee niiden ulkopinnalle ja kattopalkkien tavoin palkkien pystyseinät on päästöä ajatellen mallinnettu kulmaan toisiinsa nähden.

5 Koripaneelien kokoamisjärjestys ja offset-mitat

Korin suunnittelun yhtenä lähtökohtana oli saada kokoamisesta mahdollisimman helppo. Helpolla kokoamisella tarkoitetaan ensisijaisesti paneelien vaivatonta asemointia toistensa suhteen. Asemoinnista puhuttaessa tarkoitetaan paneelien asentamista oikeaan asentoon ja paikkaan.

5.1 Kokoamisjärjestys

Korin kokoaminen aloitetaan lattiapaneelin alapuolisista lattiapalkeista, jotka asetetaan niitä varten rakennetun jigin päälle. Jigillä tarkoitetaan rakennelmaa, jossa on jokaiselle lattiapalkille oma tarkalleen oikeaan asentoon ja paikkaan tehty kiinnityspaikka. Kun lattiapalkit on kiinnitetty jigiiin, voidaan lattiapaneeli kohdistaa niiden avulla oikeaan paikkaan. Lattiapaneelin jälkeen on sisäkylkien kasausvuoro yhdessä niitä yhdistävien etu- ja takapaneelien sekä kattopalkkien kanssa. Tulipelti kiinnitetään tämän jälkeen lattiapaneeliin ja sisäkylkiin, minkä jälkeen ulkokyljillä suljetaan kori yhtenäiseksi rakenteeksi. Takatörmäyspalkin eteen tuleva lattiapalkki voidaan kiinnittää joko aivan loppuksi tai sisäkylkien kiinnittämisen jälkeen. Kuvassa 49 on nähtävissä koripaneelit koottuna valmiiksi koriksi.



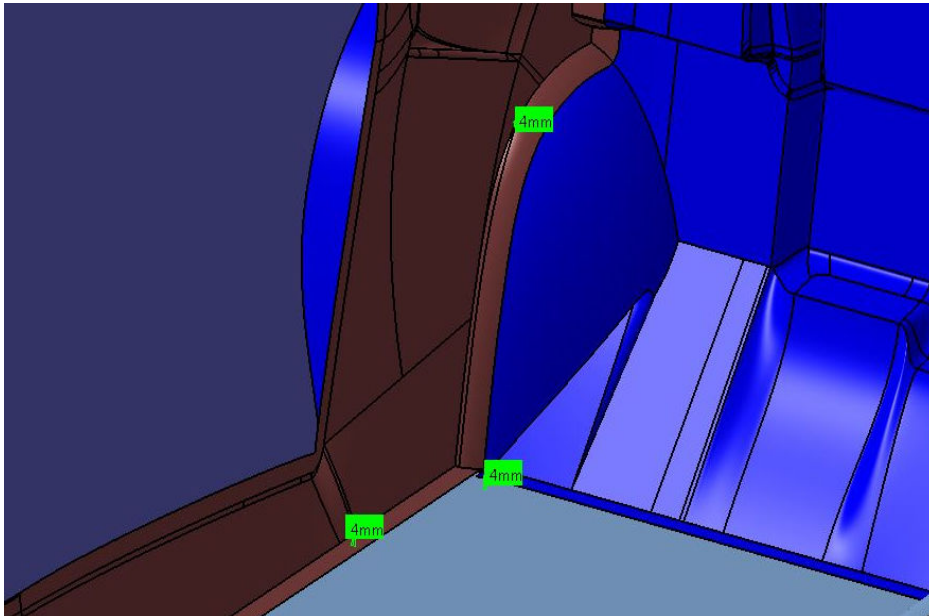
Kuva 49. Kori koottuna

5.2 Offset-mitat

Paneelien kiinnityspintojen väliset offset-mitat vaihtelevat sitä mukaan, mille puolelle muotti tulee paneeleissa ja mille puolelle jokin toinen paneeli kiinnitetään toista paneelia.

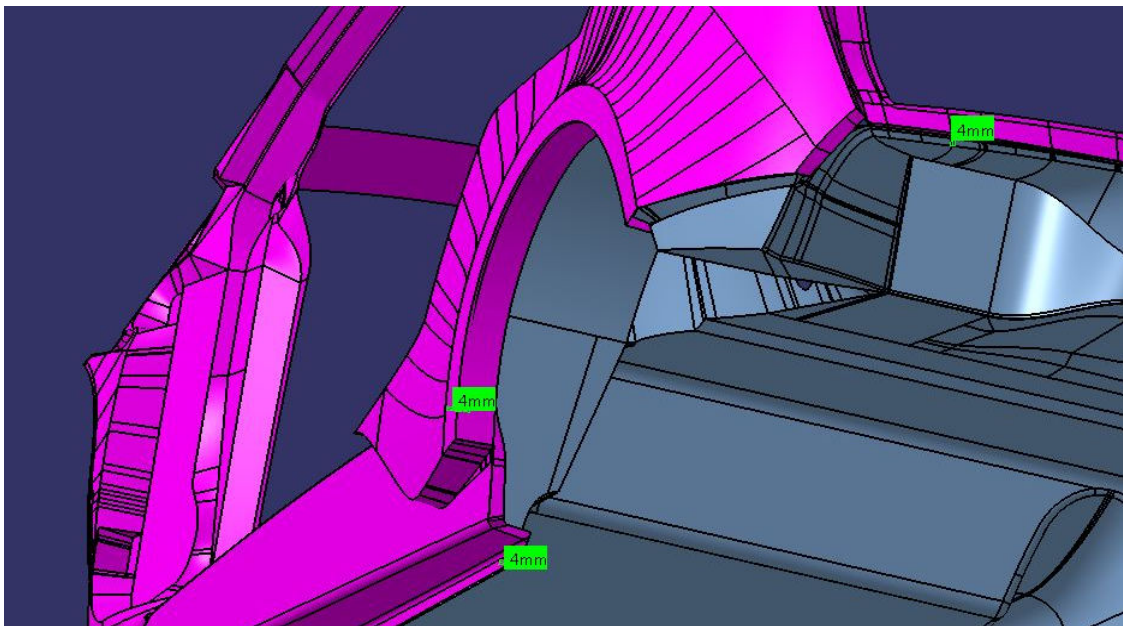
Lattiapaneeliin kiinnittyy lähes kaikki koripaneelit lukuun ottamatta sisäkylkiä yhdistävät kattopalkit, etu- ja takapaneelit sekä sisäkyljen takaosaan kiinnittyvä takatörmäyspalkin lattiapalkki. Lattiapaneelin alapuolisia lattiapalkkeja lukuun ottamatta offset-mitta muihin paneeleihin on neljä millimetriä:

- Lattiapaneelin, tulipellin ja sisäkyljen muottipinnat ovat kaikilla matkustamon puolella. Koska yhteen liitettävien paneelien materiaalin paksuus kasvaa toisistaan poispäin, tulee kiinnityspintojen väliin varata tilaa yhden laminaatin ja liimasauman paksuuden verran. Tällöin offset on neljä millimetriä. (Kuva 50.)



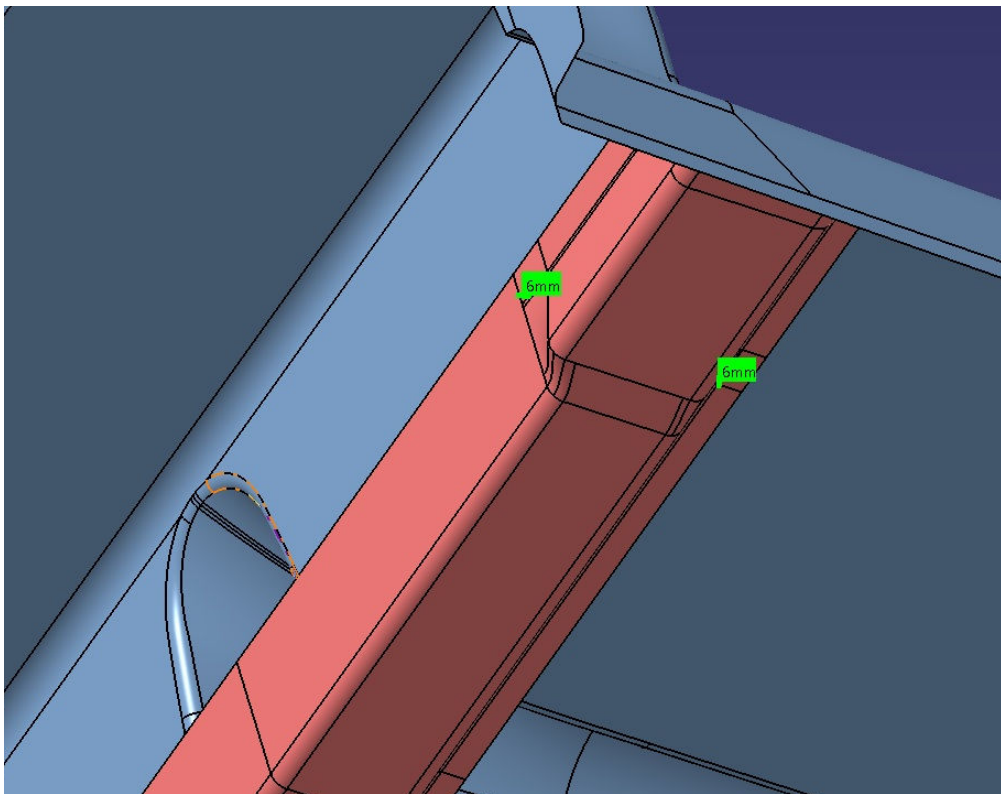
Kuva 50. Lattiapaneelin, tulipellin ja sisäkyljen offset-mittat

- Ulkokyljen muottipinta on ulkopinnan puolella, jolloin materiaalin paksuus kasvaa matkustamoon päin. Lattiapaneelin kiinnityspintojen materiaalin paksuus kasvaa ulkokyljestä poispäin, joten tällöin vaaditaan neljän millimetrin offset. (Kuva 51.)



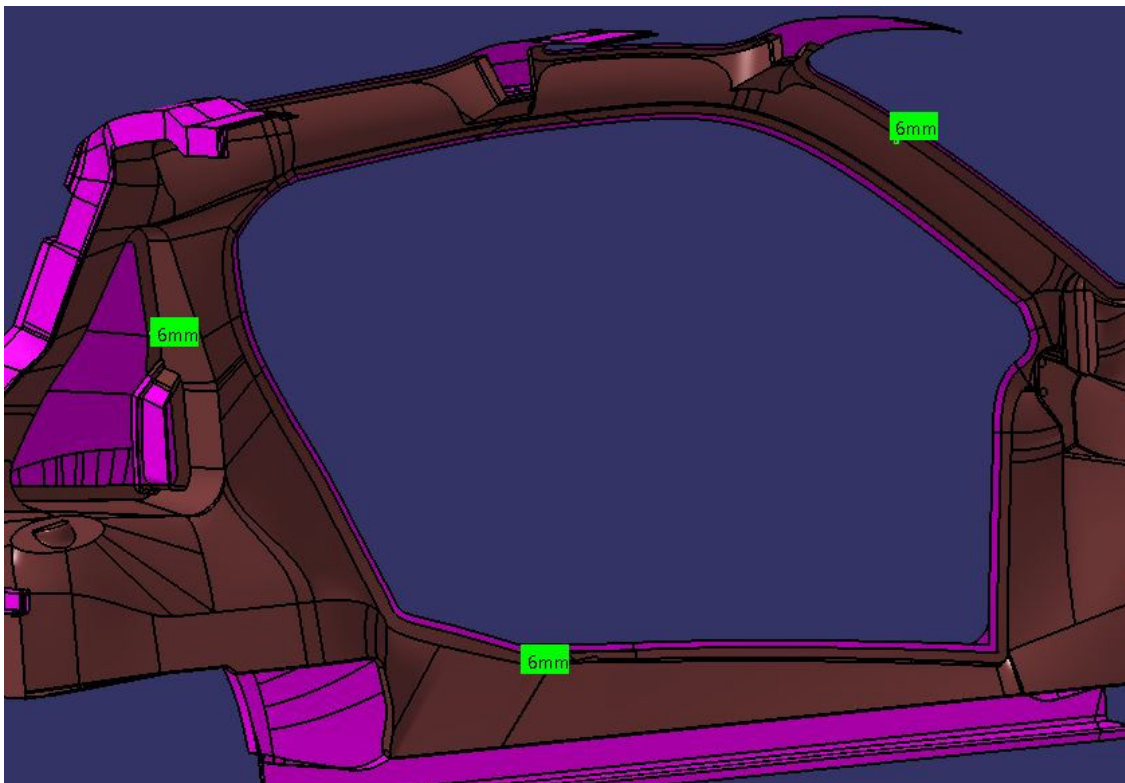
Kuva 51. Ulkokyljen ja lattiapaneelin offset

Lattiapaneelin ja lattiapalkkien offset mitta on kuusi millimetriä, koska materiaalin paksuus kasvaa toisiaan kohti. Näin on varattava tilaa kahdelle laminaatin paksuudelle ja niiden liimasaumalle. (Kuva 52.)



Kuva 52. Lattiapalkin ja lattiapaneelin offset-mitta

Ulkokyljen ja siihen kiinnittyvien paneelien offset-mitta on lattiapaneelia lukuun ottamatta kuusi millimetriä. Ulkokyljen muottipinnan ollessa ulkopinnan puolella ja siihen kiinnittyvien kattopalkkien, tulipellin sekä sisäkyljen muottipinnat ovat kaikilla matkustamon puolella. Tällöin niiden materiaalin paksuus kasvaa kohti ulkokylkeä ja offsetin on oltava kuusi millimetriä. (Kuva 53.) Ulkokylkien liitoksessa toisiinsa offset on neljä millimetriä, sillä molempien muottipinta on ulkopinta ja tällöin liitoskohdissa päällekkäin menevien pintojen paksuus kasvaa samaan suuntaan (kuva 54).



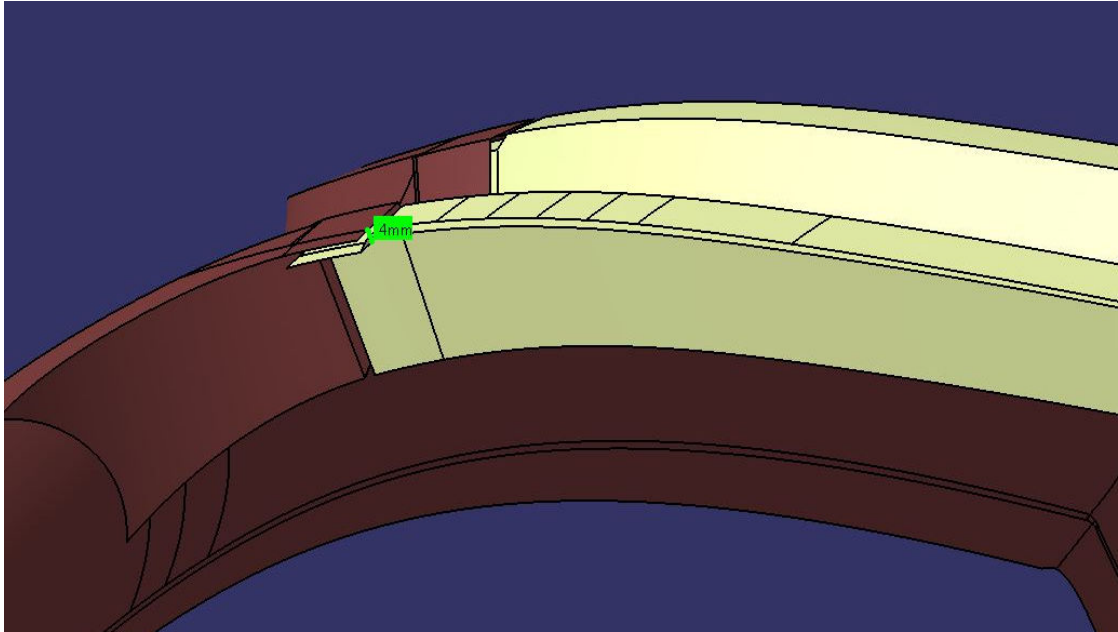
Kuva 53. Sisäkyljen ja ulkokyljen offset



Kuva 54. Ulkokyljen ja tulipellin offset sekä ulkokylkien keskinäisen liitoksen offset

Sisäkyljen osalta läpikäymättä jääneiden koripaneelien offsetit ovat neljä millimetriä. Näitä ovat sisäkyljen yhdistävät kattopalkit sekä etu- ja takapaneelit, takatörmäyspalkin lattiapalkki sekä tulipelti. Kaikkien paneelien muottipinta on matkustamon puolella,

joten liitoskohdissa paksuus kasvaa samaan suuntaan ja tilaa tarvitaan vain yhden laminaatin paksuudelle sekä liimamassalle.



Kuva 55. Kattopalkin ja sisäkyljen offset

6 Materiaalikoeket

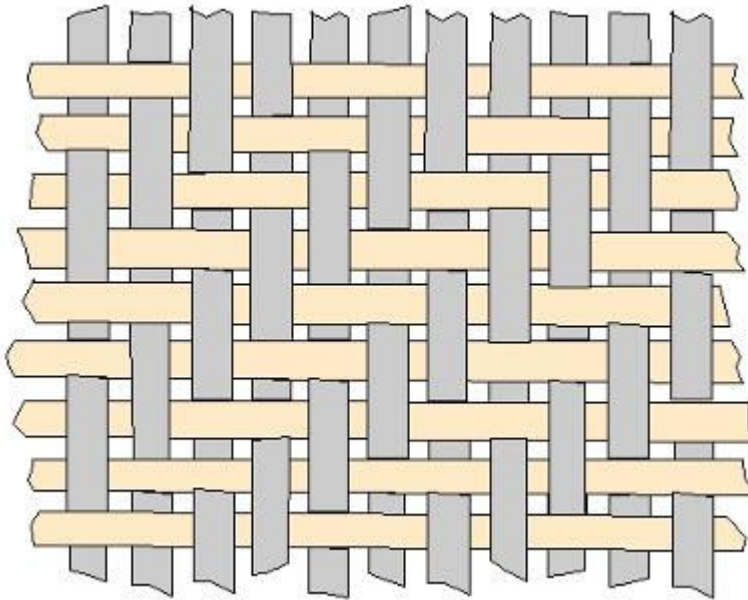
Materiaalikoeket suoritettiin hiilikuitu- ja selluloosakuitulaminaatista tehdyille koesauvoille. Kyseiset materiaalit tulevat toimimaan korin rakennusmateriaaleina ja kokeilla pyrittiin selvittämään projektissa käytettävän valmistustekniikan puitteissa saavutettavat lujuusominaisuudet. Koesauvoja rikottiin sekä vetokokeella että taivutuskokeella ja kokeet suoritettiin standardien ISO 527 ja ISO 14125 mukaisesti

6.1 Materiaalit

6.1.1 Hiilikuitupreg

Hiilikuitupregistä puhuttaessa tarkoitetaan puolivalmistetta, joka koostuu hiilikuitumatosta ja siihen esikyllästetystä muovista eli hartsista. Tällöin hartsia ei täydy itse lisätä ja tuote on helpompi valmistaa. Materiaalikoekissa käytetty hiilikuitupreg

koostuu kuiduista, jotka on punottu toimikaskudokselle. Tämä tarkoittaa sitä, että vähintään yksi loimilanka risteilee säännöllisesti vähintään kahden kudelangon yli ja ali. Kuvassa 56 on nähtävissä toimikaskudoksen kuitujen järjestyminen. Kuvassa loimilangat on eroteltu vaalealla ja kudelangat harmaalla värillä.



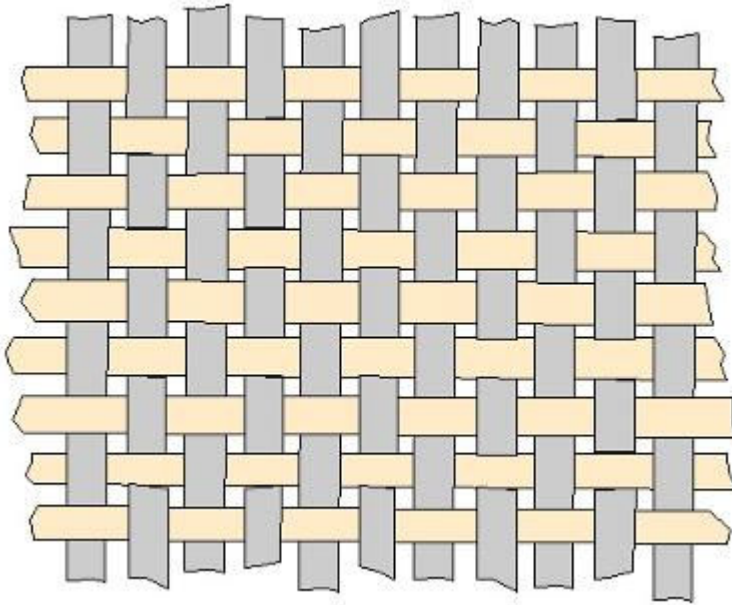
Kuva 56. Toimikaskudos (10)

Hiilikuituprepregin valmistajan ilmoittamat lujuusominaisuudet ovat seuraavat:

- murtolujuus 735,6 MPa
- kimmomoduuli 66,3 GPa
- venymä 3%
- taivutuslujuus 1171 MPa
- taivutusmoduuli 68,3 GPa.

6.1.2 Selluloosakuitukomposiitti

Selluloosakuitukomposiitti koostuu päällekkäin ladotuista selluloosakuiduista sekä niihin imeytetystä hartsista. Hartsi imeytetään alipaineinjektioilla, ja kyseinen valmistustapa käydään tarkemmin läpi jäljempänä tekstissä luvuissa 6.3.2 ja 6.3.4. Selluloosakuidut ovat punottu palttinakudokseksi, joka tarkoittaa sitä, että loimi- ja kudelangat menevät vuorotellen toistensa yli ja ali (kuva 57).



Kuva 57. Palttinakudos (10)

Valmistaja ilmoittaa selluloosakomposiitille seuraavia lujuusominaisuuksia:

- murtolujuus 140 MPa
- kimmomoduuli 12 GPa
- venymä 3,4 %
- taivutuslujuus 205 MPa
- taivutusmoduuli 10,5 GPa.

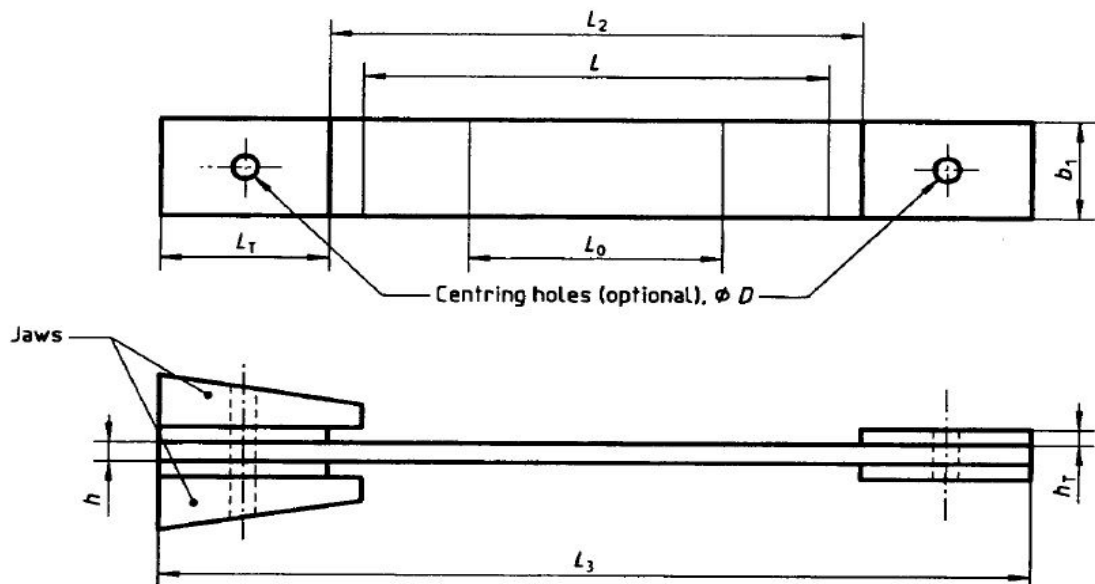
6.2 Koesauvat

Veto- ja taivutuskokeisiin vaaditaan kumpaankin omanlaisensa koesauvat. Vetokokeisiin standardi ISO-527-4 määrittää kolme eri koesauvaa, joista suoritettaviin kokeisiin kelpaa kaksi. Näiden kahden välillä ei ole muuta eroa kuin toisessa käytetään vetokoneen leukojen kiinnityskohdassa lasikuidusta valmistettuja vahvikkeita. Vetokokeessa käytettävien koesauvojen mitat olivat seuraavat:

- pituus 250 millimetriä
- leveys 25 millimetriä
- materiaalin paksuus 2 millimetriä

- lasikuituvahvikkeen leveys 50 millimetriä ja paksuus noin yksi millimetri (kuva 58).

Lasikuituvahvikkeet eivät ole välttämättömät, mutta niillä voidaan eliminoida laminaatin repeytyminen leukojen kiinnityskohdasta. Tästä syystä kokeisiin valittiin lasikuituvahvikkeiset sauvat ja samaa sauvatyyppeä käytettiin sekä hiilikuitukomposiitilla ja selluloosakuitukomposiitilla. Standardissa määritellään tarvittavan vähintään viisi koesauvaa luotettavien tulosten saavuttamiseksi. Useammalla koesauvalla eliminoidaan laadunvaihtelusta sekä itse vetokokeesta aiheutuvat eroavaisuudet, ja lopullinen tulos on keskiarvo suoritetuista vetokokeista.



Kuva 58. Vetosauvaa havainnollistava kuva (11)

Taivutuskokeiden koesauvat eroavat suuresti vetokokeessa käytetyistä ja ne ovat erilaiset myös hiilikuidulle ja selluloosakuidulle. Koesauvojen koko määräytyy käytetyn materiaalin sekä laminaatin kerrosten ominaisuuksien mukaan. Taivutuskokeissa olisi pitänyt käyttää erilaisia sauvoja kuin mitä oikeasti käytettiin, sillä sekä hiilikuitu- että selluloosakuitulaminaatit koostuvat kudoksetuksista ja niille on määritelty omanlaisensa koesauva. Suurimpana ongelmana oli sauvojen paksuus, sillä olisi pitänyt käyttää neljä millimetriä paksuja sauvoja, mutta molempia materiaaleja oli sen verran vähäinen määrä, että laminaateista tehtiin vain kaksi millimetriä paksuja.

Laminaattien paksuuden johdosta jouduttiin käyttämään eri koesauvoja kuin standardi määrittelee. Kokeissa käytettiin sauvoja, jotka on tarkoitettu sellaisille laminaateille, jotka koostuvat joko yhdensuuntaiskerroksista tai suunnatuista yhdensuuntaiskerroksista. Käytetyt koesauvat määriteltiin materiaalien ominaisuuksien mukaan. Standardissa koesauvat määriteltiin suhdeluvulla Ef1/G13, jossa Ef1 on kuivan kuidun kimmomoduuli sekä G13 on laminaatin kerrostenvälinen liukumoduuli. Selluloosakuidulle kyseistä liukumoduulia ei ollut saatavilla, joten sille käytettiin lasikuidun liukumoduulia. Kun kuivan selluloosakuidun kimmokerroin on 35 GPa ja lasikuidun liukumoduuli 3 GPa saadaan suhdeluvuksi tällöin noin 11,7. Suhdeluvun ollessa välillä 5–15 käytetään sauva, joka on 60 mm pitkä, 15 mm leveä ja 2 mm paksu. Koska selluloosakuidun liukumoduuli ei ollut tiedossa, ei voida olla täysin varmoja oikean sauvan käytöstä. Jos esimerkiksi liukumoduuli olisikin 2 GPa, tulisi tällöin käyttää sauva, jonka materiaalin suhdeluku ylittää 15. Hiilikuitua varten voitaisiin myös laskea kyseinen suhdeluku, mutta se ei ole tarpeen, sillä standardissa hiilikuitu mainitaan sellaisen sauvan materiaalina, jonka suhdeluku on yli 15. Hiilikuitusauvat ovat 100 mm pitkiä, 15 mm leveitä ja 2 mm paksuja.

6.3 Selluloosakuitukoesauvojen valmistaminen

Koesauvojen valmistusprosessit eroavat suuresti toisistaan riippuen siitä, kummasta materiaalista on kyse. Hiilikuitupreprestistä tehdyt koesauvat ovat huomattavasti vaivattomampia tehdä kuin selluloosakuidusta tehdyt. Standardit määrittelevät tarkasti, millaiset koesauvojen pitää olla, ja ne on pyritty valmistamaan standardien mukaisesti. Koesauvoja varten valmistettiin laminaatit edellä mainituista materiaaleista ja näistä laminaateista sauvat koneistettiin oikean kokoisiksi. Seuraavissa luvuissa käydään läpi laminaattien valmistusprosessi.

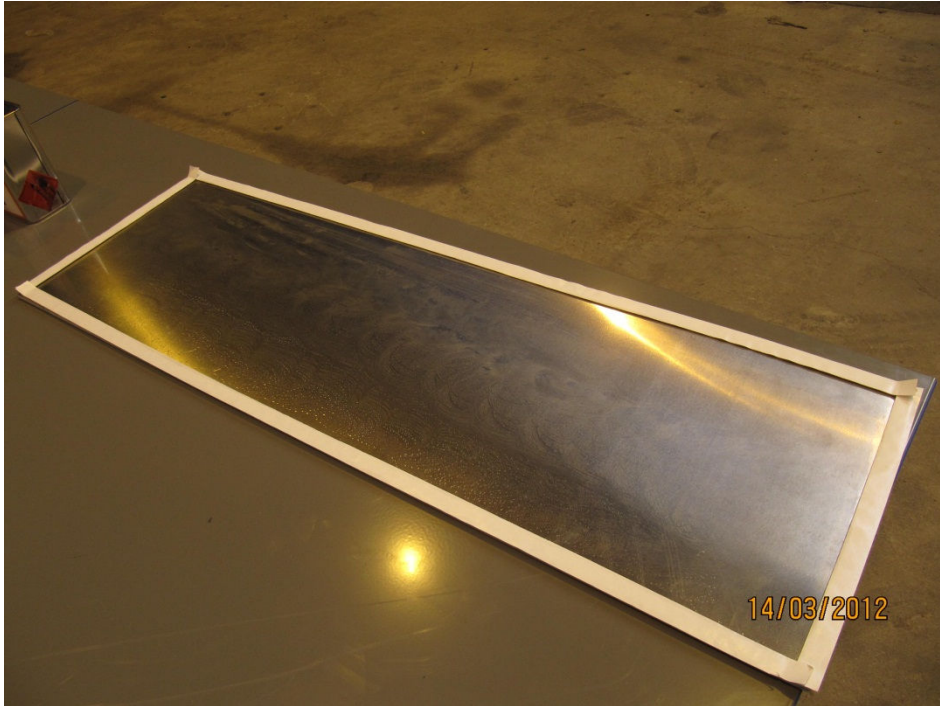
6.3.1 Muottilevyjen valmistus

Laminaatit valmistetaan muottilevyjen avulla, joiden materiaalina käytettiin kuusi millimetriä paksua alumiinilevyä. Alumiinilevystä leikattiin tarvittavan kokoiset palat muotteja varten. Materiaalin paksuudella pyritään välttämään alipaineen aiheuttamaa levyn taipumista valmistusprosessin aikana. Muottilevyjen leikkuun jälkeen ne piti puhdistaa asetonilla, jotta muottiin siveltävä irrotusaine tarttuisi parhaalla mahdollisella tavalla. Levyt puhdistettiin asetonilla kastetuilla huovan palasilla, joita otettiin uusia

käyttöön sitä mukaan kun ne likaantuivat. Huovilla pyyhittiin niin pitkään ennen kuin niihin ei enää tarttunut likaa pinnasta. Tässä välissä tuli muottilevyjen reunat ympäröidä tiivistenauhalla, jolla muotin päälle kiinnitetään säkityskalvo (kuva 59). Säkityskalvon tehtävänä on alipainepumpun avulla luoda muottiin alipaine laminaatin valmistamiseksi. Tiivistenauha piti kiinnittää tässä vaiheessa muottiin, sillä seuraava vaihe olisi irrotusaineen levitys muotin pintaan ja tämän jälkeen se ei enää kiinnittyisi kunnolla muottiin. Irrotusaineen tarkoituksena on mahdollistaa valmiin laminaatin irtoaminen muotista. Sitä levitettiin muottien pintaan seuraavasti:

- Kastetaan puhdas huovan pala irrotusaineella.
- Sivellään huovalla muottia reunalta reunalle siten, että jo kostea kohtaa huovalla pyyhitään mahdollisimman vähän. Irrotusainetta ei saa olla liikaa, sillä muuten se ei kuivu kunnolla.
- Irrotusaineen levityksen jälkeen annetaan pinnan kuivua noin 10 sekuntia. Sen jälkeen pinnasta pyyhitään liika irrotusaine puhtaalla huovalla pyörivin liikkein vain kevyesti painaen. Liiallisella painamisella irrotusainetta imeytyy huopaan liikaa ja käsittelystä ei tule hyvä.
- Tämän jälkeen annetaan pinnan kuivua vähintään 12 minuuttia, mutta tässä insinööriyössä kuivumisaikana oli 15 minuuttia. Kuivumisen jälkeen voidaan pinta käsitellä uudelleen ja käsittely toistetaan kolme kertaa. Muotin käytön jälkeen olisi hyvä käsitellä se kerran irrotusaineella hyvän irtoavuuden varmistamiseksi seuraavalla kerralla.
- Muottien käsittelyssä tärkeää on muistaa joka välissä käyttää puhdasta huopaa. Irrotusaineen levitys sekä ylimääräisen irrotusaineen poisto suoritetaan molemmat puhtaalla huovalla.

Kuvassa 59 on muottilevy, jonka reunoille on kiinnitetty tiivistenauhaa säkitystä varten. Kuvasta on tarkkaan katsottuna nähtävissä pyörremäiset jäljet irrotusaineen levityksestä.



Kuva 59. Muottilevy

6.3.2 Selluloosakuitulaminaatti

Selluloosakuitulaminaatin valmistuksessa käytetään alipaineinjektiomenetelmää sen toimintavarmuuden, nopeuden ja toistettavuuden takia. Alipaineinjektiomenetelmä perustuu nimensä mukaisesti alipaineen käyttöön hartsin levittämisessä ja se vaatii, että injektoidut lujitteet ovat tiiviisti pakattuna muotin kanssa. Injektoidut lujitteet tulevat muotin päälle, ja ne suljetaan tiivistä nauhan avulla tiivisti säkityskalvon ja muotin väliin. Muotin sisälle asennetaan toiseen päähän imuletku ja toiseen päähän syöttöletku. Imuletku kiinnitetään alipainepumppuun ja syöttöletku upotetaan hartsiin, jota imetään alipaineen avulla muotin sisälle. Koko prosessi käydään tarkemmin läpi jäljempänä tässä kappaleessa.

Laminaattia varten tuli valmistaa muottilevy edellisen kappaleen kuvailemalla tavalla. Muottilevyn valmistelujen jälkeen alettiin leikata selluloosakuitumatosta oikeankokoisia paloja laminaatin kerroksia varten (kuva 60). Kerrosten lukumäärä määrittää laminaatin paksuuden, ja halutessa tietyn paksuista laminaattia tulee tietää kuitumaton paksuus. Selluloosakuitumaton paksuus on 0,2 millimetriä, ja standardien mukaan tuli valmistaa minimissään kaksi millimetriä paksuja koesauvoja. Näin ollen tuli leikata kymmenen

kappaletta selluloosakuitumaton paloja riittävän paksuuden saavuttamiseksi. Palat tuli leikata mahdollisimman samankokoisiksi ja -muotoisiksi, jotta niiden asettaminen päällekkäin sama kuitusuunta säilyttäen helpottuisi (kuva 61). Jos kerrosten kuitusuunta vaihtelee paljon keskenään, voi se vaikuttaa kokeiden tuloksiin.



Kuva 60. Selluloosakuitumattoa

Koska laminaatista tehtiin suorakaiteen muotoinen, oli palat melko helppo leikata ja suoraan leikkaamista helpotti vetämällä matosta leikkauskohdasta yksi maton poikki kulkeva kuitu pois. Kuidun puuttuminen näkyy selvänä viivana maton poikki, ja sitä pitkin oli helppo leikata suoria paloja matosta. Palan leikkauksen jälkeen sitä piti käsitellä varoen, sillä ne voivat venyä ja kuitusuunta muuttua nostettaessa niitä varomattomasti. Hyvä tapa nostella kuitupaloja on ensin rullata ne löysälle rullalle, nostaa rullana ja rullata auki haluttuun paikkaan.



Kuva 61. Selluloosakuitupaloja

Laminaatin valmistuksessa tarvitaan selluloosakuidun lisäksi myös karhennuskangasta, injektointiverkkoa sekä säkityskalvoa. Kokoamisjärjestys muottilevyn päälle on seuraavanlainen:

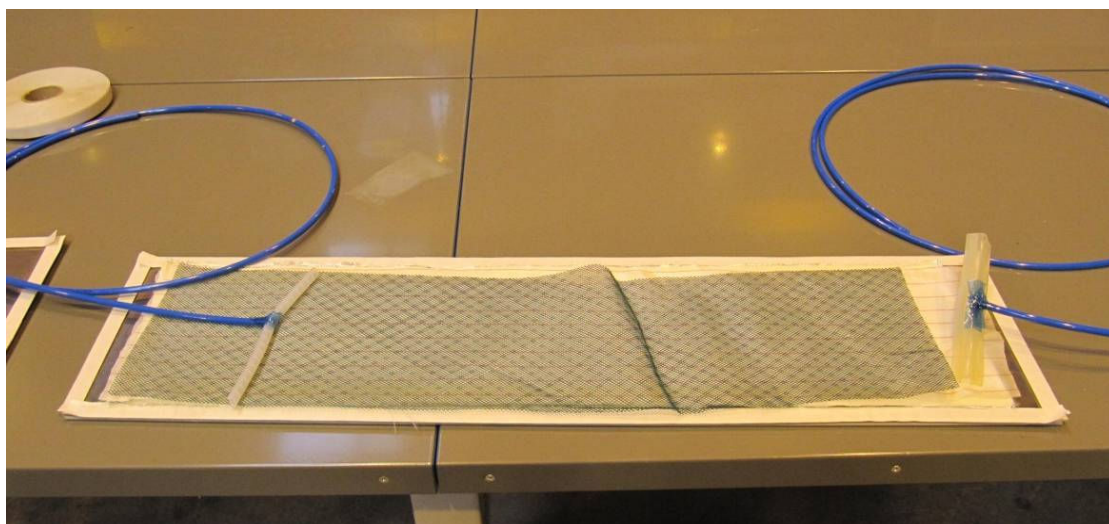
- karhennuskangas
- lujitekuidut
- karhennuskangas
- injektointiverkko.

Karhennuskangasta tarvitaan laminaatin pinnan karhentamiseksi, jotta siihen voidaan myöhemmin liimata jäljempänä tekstissä läpikäytävät vahvikepalat. Vahvikepalat tulevat laminaatin kummallekin puolelle, joten karhennuskangasta tarvitaan laminaatin ylä- ja alapinnalla. Pällimmäiseksi tulee injektointiverkko, jonka funktiona on johtaa injektoitavaa hartsia kaikkialle lujitekuituihin. Injektointiverkosta pitää tehdä hieman lyhyempi kuin lujitekuiduista, sillä hartsin kulkiessa verkkoa pitkin lujitteisiin varmistetaan sen lyhyeksi jättämisellä se, että hartsia imeytyy myös imuletkun päästä lujitteisiin eikä kulkeudu vain verkkoa pitkin pois imuletkuun.

Selluloosakuidut keräävät itseensä kosteutta, joka pitää poistaa ennen laminaatin valmistusta. Kosteus poistetaan paistamalla kuituja vähintään kahden tunnin ajan 75 asteessa (°C). Kuidut kuitenkin jätettiin yön yli kuivumaan ja seuraavana aamuna ne aseteltiin muottiin. Kuitujen kosteuspitoisuuden selvitykseksi leikattiin ylimääräinen kuitupala, joka punnittiin ennen ja jälkeen kuivauksen. Kosteusprosentin lisäksi saatiin

selville myös selluloosan neliöpaino, kun tiedettiin punnitun palan koko. Selluloosakuidun neliöpainoksi saatiin $163,9 \text{ g/mm}^2$ ja kosteusprosentti massaprosenttina oli 5,5 %.

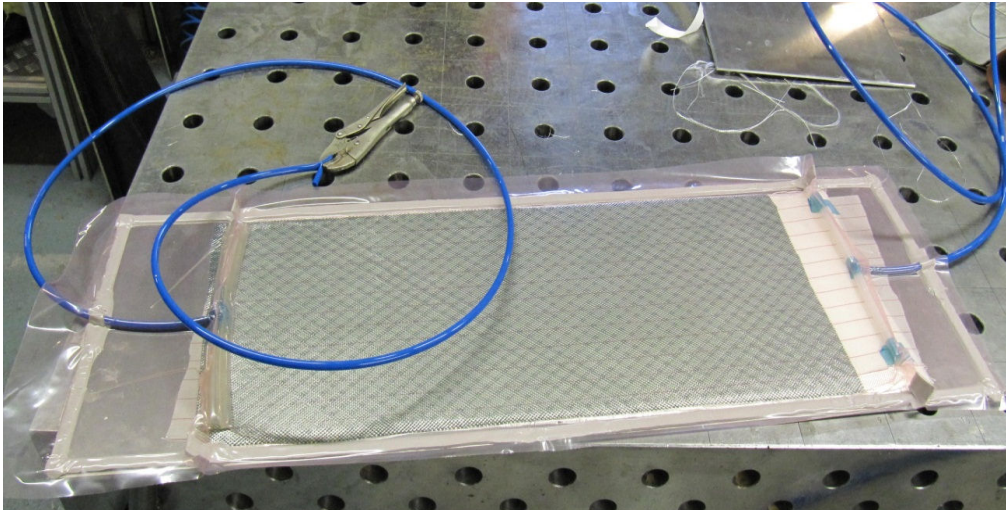
Lujitekuitujen asettelu muottiin pitää suorittaa mahdollisimman tarkasti, jotta eri kerrosten kuitusuunnat eivät eroaisi merkittävästi toisistaan. Kerrokset voivat helposti lähteä liikkeelle, joten työtä helpottamiseksi voidaan kerrosten väliin suihkuttaa sprayliimaa. Selluloosakuitulaminaattia valmistettaessa ei koettu tarpeelliseksi käyttää liimaa, sillä niiden suorakulmainen muoto helpotti niiden asettelemista oikeassa asennossa toistensa päälle. Kun karhennuskankaat, lujitekuidut ja verkkomuovi olivat ladottu oikeassa järjestyksessä päällekkäin, tuli injektointia varten leikata imu- ja syöttöletkut imu- ja syöttöjalkoineen. Kuvassa 62 on vasemmalla imuletku ja oikealla syöttöletku.



Kuva 62. Muotti valmiina säkitettäväksi

Säkityskalvolla lujitekuidut sekä muut vaadittavat välineet suljetaan tiiviisti muotin kanssa. Säkityskalvon asettelussa täytyy olla tarkkana, jotta se saadaan tiiviisti muottiin kiinni. Sen asettelussa täytyy ottaa huomioon muutamia erityispiirteitä, joita aiheuttavat imu- ja syöttöletkut. Ensinnäkin letkujen läpivienti muotin päistä tulee varmistaa letkun alapuolelta kahdella kerroksella tiivistenauhaa sekä yläpuolelta tiivistää yhdellä tiivistenauhan palalla. Näiden lisäksi tulee imu- ja syöttöjalkalle tehdä tilaa säkkiin, jotta säkityskalvo ei kiristä niiden kohdalta alipaineen aikana. Säkityskalvo taitetaan kaksinkerroin pieneltä matkalta molemmin puolin jalkojen kohdalta. Näiden

seikkojen lisäksi tulee olla tarkkana, että säkityskalvon ja tiivistenauhan välissä ei ole irtonaisia kuituja, koska tällöin muotti voi alkaa vuotamaan alipaineen aikana. Kuvassa 63 näkyy letkujen läpiviennit sekä kaksinkerroin taitettu säkki imu- ja syöttöjalan kohdalta.



Kuva 63. Selluloosakuitujen alipaineistus.

Säkityskalvon ollessa tiiviisti kiinni muotissa voidaan muotti alipaineistaa ja todeta muotin tiiveys. Selluloosakuitujen imiessä kosteutta täytyy niitä säilyttää alipaineessa siihen saakka, että hartsi injektoidaan. Muotti alipaineistetaan alipainepumpulla ja letkut tukitaan lukkopihdeillä puristaen.

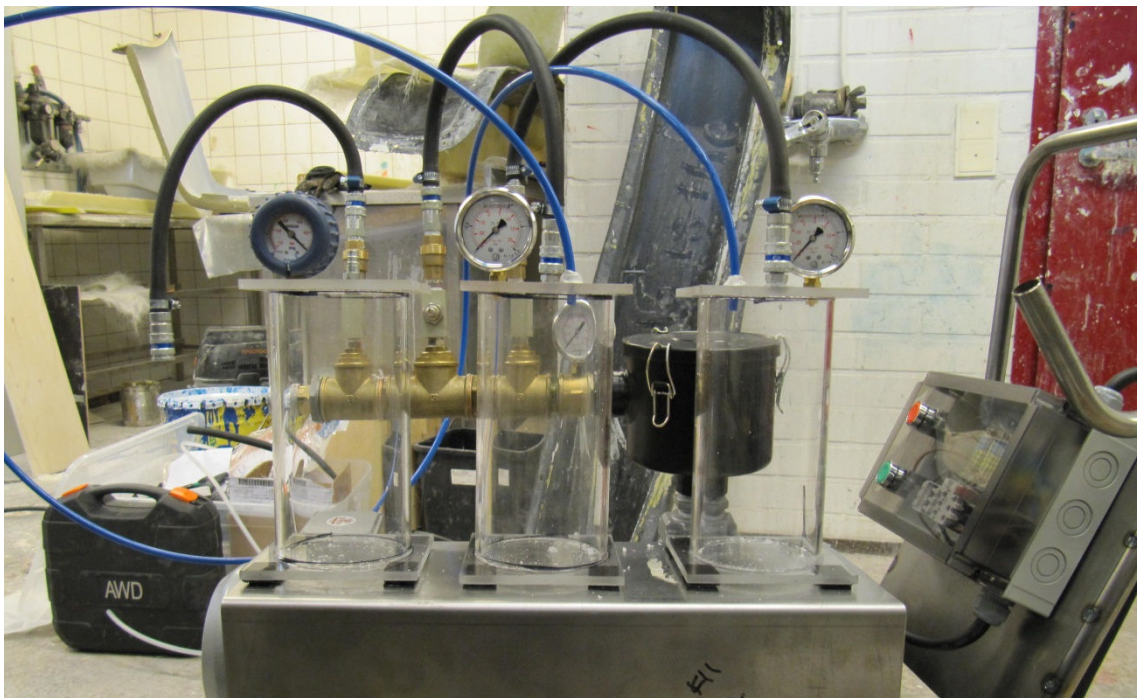
6.3.3 Lasikuitulaminaatti

Koesauvoja varten tuli valmistaa myös lasikuitulaminaattia, josta valmistetaan vahvekepalat vetokoetta varten. Selluloosakuitulaminaattiin tuli liimata kaksi 50 millimetriä leveää lasikuitulaminaattia 150 millimetrin etäisyydelle toisistaan laminaatin molemmin puolin. Näin ollen tarvittiin neljä kappaletta 50 millimetriä leveitä lasikuitulaminaatteja. Ne leikattiin niitä varten valmistetusta lasikuitulaminaattilevystä, joka valmistettiin käytännössä samoin kuin selluloosakuitulaminaatti. Eroavaisuuksia on kuitujen leikkaustavassa ja kerrosten lukumäärässä, minkä lisäksi lasikuitua ei tarvitse kuivattaa uunissa. Lasikuitulaminaatin kuitusuunnan pitää olla 45°:n kulmassa selluloosakuitulaminaattiin verrattuna. Koska lasikuitumaton kuitusuunta on kuitenkin 0°, ei sitä voida leikata yhtä helposti kuin selluloosakuitua. Lasikuitupalat tulee leikata

45°:n kulmassa maton kuitusuuntaan nähden, mikä tarkoittaa käytännössä sitä, että jokaisen palan ääriviivat tuli piirtää itse lasikuitumattoon ja leikata palat niitä pitkin. Vahvikepalojen paksuuden tuli olla 1–3 millimetriä, ja lasikuitumatton paksuuden ollessa noin 0,25 millimetriä tuli kerroksia leikata vähintään neljä kappaletta. Kerroksia leikattiin kuitenkin yhteensä viisi ja tällä haluttiin varmistaa laminaatin olevan varmasti tarpeeksi paksua.

6.3.4 Injektointi

Injektointi suoritettiin sekä selluloosa- että lasikuitulaminaatilla samalla tavalla. Injektointiin käytettiin alipainepumppua, joka pystyy imemään kolmella eri letkulla ja tämä mahdollisti samanaikaisen injektoinnin molemmille laminaateille (kuva 64). Koska injektoinnissa käytettiin molemmilla samaa hartsia, voitiin kummankin laminaatin syöttöletku laittaa yhteen hartsia sisältävään ämpäriin.

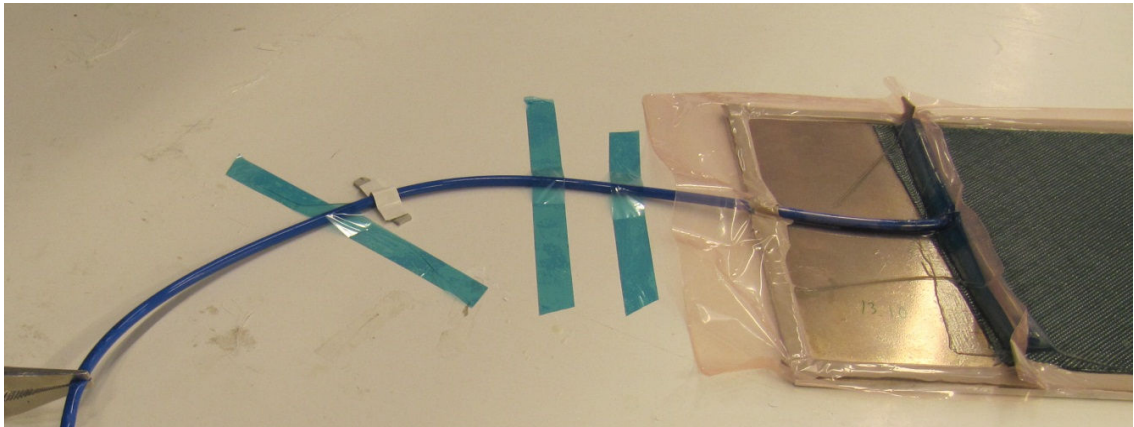


Kuva 64. Alipainepumppu, jossa kolme erillistä imupuolta

Ennen injektointia tuli laminaatit valmistella sitä varten:

- Kiinnitetään imuletkut tiiviisti pumppuun.

- Imetään alipaine muotteihin ja varmistetaan, etteivät muotit vuoda ilmaa.
- Varmistetaan imu- ja syöttöletkut kiinni pöytään teipillä ja tiivistenauhalla. Ilman sitä letkut voivat liikkua liikaa ja aiheuttaa vuodon letkun läpiviennin kohdalle. (Kuva 65.)
- Syöttöletkut kiinnitetään hartsiämpäriin ja ämpäri sijoitetaan hieman alemmalle tasolle kuin laminaatit.
- Mitataan muottien lämpötila: 21 °C.

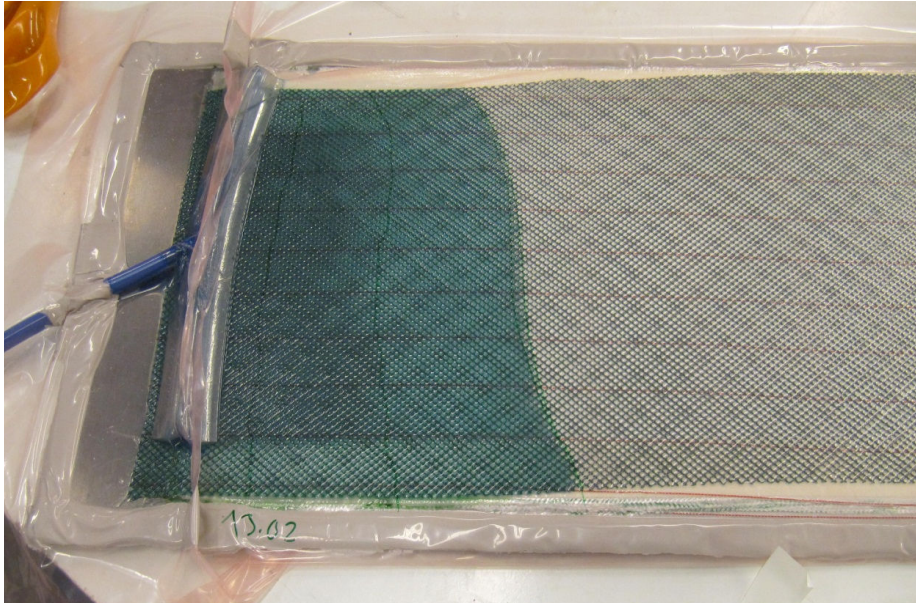


Kuva 65. Syöttöletkun varmistaminen pöytään teipin ja tiivistenauhan avulla

Kun laminaatit on valmisteltu, voidaan sekoittaa injektoitava hartsi. Hartsina käytettiin epoksihartsia ja sen määrä laskettiin molemmille materiaaleille lasikuidulle todetuilla arvoilla. Lasikuidut imevät hartsia noin 350g/m^2 . Kun tiedetään kummankin laminaatin kerrosten lukumäärä ja yhden kerroksen ala, voidaan laskea tarvittavan hartsin määrä. Lasikuitujen kokonaisala on noin yhden neliömetrin suuruinen ja selluloosakuitujen 2,5 neliometriä. Tulokset pyöristettiin ylöspäin, jotta hartsia sekoitettaisiin varmasti tarpeeksi. Hartsin määrässä tuli ottaa myös huomioon karhennuskankaisiin, verkkomuoviin sekä imu- ja syöttöletkuihin jäävän hartsin määrä. Kokemus on osoittanut hyväksi arvioksi 700 grammaa hartsia yhtä neliometriä kohden. Tässä tapauksessa alasta puhuttaessa tarkoitetaan laminaatin pinta-alaa eikä kerrosten muodostamaa yhteispinta-alaa. Yhteensä lasi- ja selluloosakuitulaminaattien pinta-ala on noin $0,4\text{ m}^2$ ja kokonaisuudessaan hartsia laskettiin tarvittavan noin 1,5 kilogrammaa molempien injektointiin. Tämä osoittautui kuitenkin myöhempänä liian suureksi määräksi, sillä hartsia sekoitettiin kahdessa erässä yhteensä noin 1,2 kilogrammaa ja siitäkin jäi reilusti jäljelle.

Epoksihartsi koostuu itse hartsista sekä sen kovettumisreaktion aikaan saavasta kovetteesta. Niiden sekoitussuhde on tarkka, jotta hartsi kovettuu oikein. Jos seossuhde ei ole oikein, jää joko hartsia tai kovetetta reagoimatta kovettuneeseen epoksiin huonontaan sen lujuusominaisuuksia (1, s. 47). Kun hartsia ja kovetetta on oikea määrä sekoitusämpärissä, sekoitetaan niitä kahden minuutin ajan porakoneeseen liitetyn sekoitusterän avulla. Sekoituksen jälkeen hartsi voidaan kaataa injektointia varten letkut sisältävään hartsinämpäriin ja injektointi voidaan aloittaa. Hartsia ei voida sekoittaa kovin suurta määrää kerralla, koska kovetusreaktio alkaa välittömästi hartsin ja kovetteen kesken. Tietyn ajan kuluttua hartsin viskositeetti kasvaa rajusti eikä sitä voida enää injektoida. Tätä aikaa kutsutaan pot life -ajaksi, ja käytetylle hartsille se oli 105 minuuttia 25 °C:n lämpötilassa (liite 1). Hartsin lämpötila mitattiin injektoinnin alussa, jolloin se oli 19 °C, ja sitä seurattiin koko injektoinnin ajan.

Varsinaisen injektoinnin alussa merkittiin ensin muotin pintaan aloitusaika, jonka jälkeen hartsia alettiin injektoida muotin sisälle. Aloitusajasta voidaan varmistua, että pot life -aika ei ylity. Hartsia imettiin muottiin vähän kerrallaan ja syöttö katkottiin puristamalla syöttöletku umpeen lukkopihdeillä. Syöttöä piti katkoa, jotta hartsi imeytyy kunnolla kuituihin eikä vain kulkeudu injektointiverkkoa pitkin suoraan imuletkulle. Syöttö katkaistiin alussa kahdeksi minuutiksi kerrallaan ja silloisen hartsirintaman sijainti piirrettiin tussilla muotin pintaan (kuva 66). Tällä tavoin voidaan seurata hartsin imeytymisnopeutta kuituihin ja tiedetään, pitääkö hartsille antaa enemmän aikaa imeytyä. Kuvassa 66 näkyy tussilla piirrettyjä viivoja, missä hartsirintama on ollut, sekä keskimmäisen viivan vasemmalla puolella näkyy tummempaa aluetta, jossa hartsi on jo imeytynyt kuituihin.



Kuva 66. Hartsirintaman merkintää tussilla

Lasikuitulaminaatille riitti hyvin kahden minuutin imeytymisaika, mutta koska selluloosakuitulaminaatin paksuus oli lähes kaksinkertainen lasikuituun verrattuna, tuli hartsille antaa enemmän aikaa imeytyä kuituihin. Kuitujen kastumista seurattiin koko ajan, ja lasikuidut kastuivat sen verran nopeasti, että syötön katkoaikaa voitiin lyhentää.

Hartsin alhainen lämpötila lisäsi sen viskositeettia, mikä näkyi injektoinnin loppupuoliskolla. Syöttöletkua ei käytännössä tarvinnut juuri puristaa umpeen hartsin kulkiessa niin hitaasti laminaattia pitkin. Kun laminaattien kuidut olivat kastuneet kauttaaltaan, merkittiin lopetusaika sekä suljettiin syöttöletkut lukkopihdeillä ja muotit jätettiin alipaineeseen 16 tunnin ajaksi.

6.3.5 Kovetus

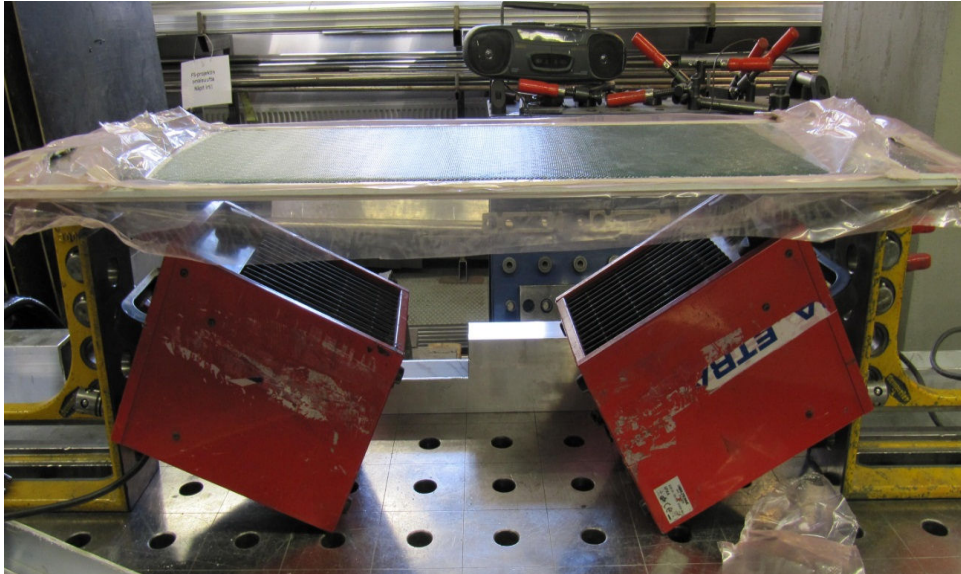
Lasi- ja selluloosakuitujen hartsina käytettiin samaa hartsia, joten molempien kovetusprosessi oli samanlainen. Kovetusprosessiin tarvittavat tiedot on käyty läpi hartsin teknisessä tiedotteessa (liite 1). Injektoinnin jälkeen laminaatit jätettiin alipaineeseen kovettumaan 16 tunniksi, ja sen jälkeen niille piti suorittaa vielä jälkikovatusta. Jälkikovatusta tapahtuu lämmittämällä laminaatit eri lämpötiloihin ja

pitämällä niitä korotetussa lämpötilassa tietty aika. Injektoinnissa käytetyille hartsille jälkikövetus tapahtuu seuraavasti:

- vähintään 2 tuntia 45 °C
- 2 tuntia 60 °C
- 2 tuntia 80 °C
- 2 tuntia 100 °C
- 3 tuntia 130 °C.

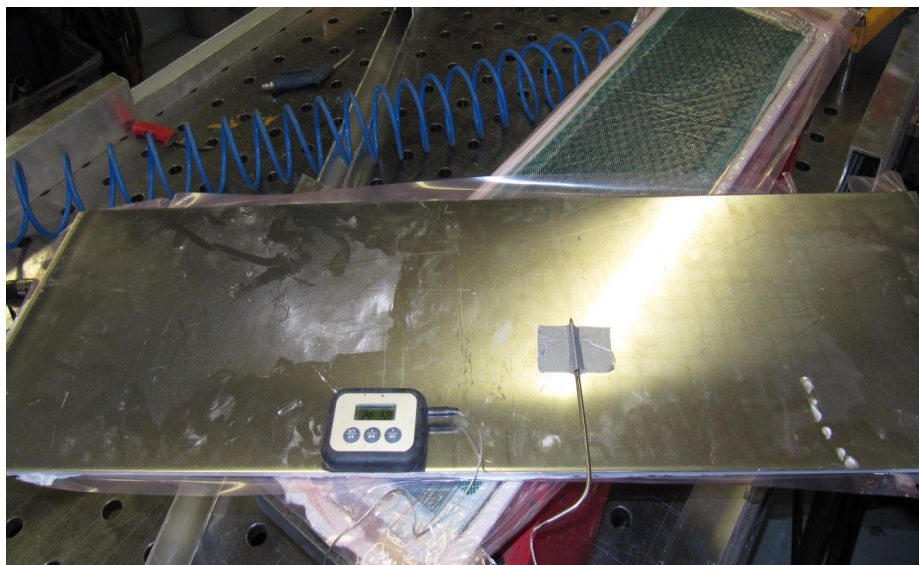
Lämpötilaa ei saanut nostaa välittömästi korkeammaksi, vaan joka portaan välissä tuli noudattaa 30 °C/tunti lämpötilan nostovauhtia. Eri kovetuslämpötilojen välissä tuli siis lämpötilan nostomäärästä riippuen nostaa lämpötila 30–60 minuutissa seuraavaan kovetuslämpötilaan.

Jälkikövetus tapahtuu normaalisti uunin avulla, mutta Metropolia Ammattikorkeakoulun omistama uuni oli liian pieni laminaattien kovettamiseen muotteineen. Selluloosakuitulaminaatti mahtuisi ilman muottia uuniin, ja lasikuitulaminaatti oli ylipitkä verrattuna selluloosakuitulaminaattiin, joten sitä voitaisiin lyhentää uuniin mahdollistamiseksi. Kovetus huoneenlämmössä ei kuitenkaan anna riittävää kovuutta, jotta laminaatit voitaisiin irrottaa muoteistaan, vaan ensimmäinen jälkikövetusporras jouduttiin suorittamaan laminaateille muotteineen. Koska ne eivät mahtuneet sellaisinaan uuniin, jouduttiin ensimmäistä kovetuslämpötilaa varten keksimään jokin muu ratkaisu. Ratkaisu muodostui kahdesta rakennuspuhaltimesta, jotka asetettiin vastakkain puhaltamaan yläviistoon niiden yläpuolelle asetettuihin muotteihin. Laminaatit asetettiin niiden yläpuolelle päällekkäin ja päällimmäiseksi asetettiin vielä yksi alumiinilevy, jotta lämpö jakautuisi tasaisesti laminaateissa. Kuvassa 67 näkyy puhaltimien asettelu ja laminaattien sijainti niihin nähden.



Kuva 67. Jälkikovetus rakennuspuhaltimien avulla

Alimmaisena oli lasikuitulaminaatti ja keskimmäisenä luonnonkuitulaminaatti, jonka alumiinisen muottilevyn alapuolelle kiinnitettiin lämpömittari ilmaisemaan muotin lämpötilaa (kuva 68). Muotin lämpötila on kutakuinkin sama kuin itse sen päällä olevan laminaatin.



Kuva 68. Lämpömittarin sijoitus selluloosakuitulaminaatin muottiin

Ensimmäisen kovetuslämpötilan jälkeen voitiin laminaatit irrottaa muoteistaan ja suorittaa loput jälkikovetukset normaalisti uunissa.

6.3.6 Koesauvojen leikkaus

Koesauvoja varten selluloosakuitulaminaatista leikattiin erilliset palat taivutuskokeen sauvoja sekä vetokokeen sauvoja varten. Vetokoetta varten leikattuun palaan liimattiin lasikuitulaminaatista leikatut poskilaminaatit Spabond 340LV - kaksikomponenttiepoksiliimalla. (Kuva 69.)



Kuva 69. Selluloosakuitulaminaatti ja siitä leikattu vetosauva

Selluloosakuidusta leikattiin sekä taivutus- että vetokoetta varten kumpaankin 12 koesauvaa.

6.4 Hiilikuitukoesauvojen valmistaminen

Hiilikuitukoesauvat valmistettiin hiilikuitupregistä, jota projektilla oli koesauvojen valmistushetkellä vain kaksi pientä koepalaa. Koepalojen koko oli 400 mm x 400 mm, ja yhden palan paksuus oli 0,25 millimetriä. Jotta saataisiin kokeisiin tarvittavat kaksi millimetriä paksut koepalat, tulee kerroksia olla kahdeksan. Näin ollen kumpikin koepala piti leikata neljään yhtä suureen osaan. Tästä seuraa se, että laminaatista tuli vain 200 mm x 200 mm:n suuruinen, jolloin siitä ei saatu standardia vastaavia vetosauvoja.

6.4.1 Laminaatin valmistaminen

Hiilikuitulaminaattia varten valmisteltiin muottilevy samoin tavoin kuin selluloosa- ja lasikuitulaminaateille. Hiilikuidusta valmistetut koesauvat ovat huomattavasti vaivattomampia valmistaa, koska hartsi on jo valmiiksi imeytetty kuituihin. Riittää vain, että haluttuun kokoon leikatut samankokoiset prepreg-palat asetetaan tarkasti toistensa päälle. Jokaisen kerroksen välissä jo päällekkäin asetettuja kerroksia painettiin teflon-lastalla ja näin saadaan ylimääräinen ilma pois kerrosten välistä. Kerroksia aseteltiin päällekkäin aiemmin mainitun mukaisesti kahdeksan kappaletta. Hiilikuitukerrosten päälle asetetaan reikämuovi ja päällimmäiseksi imuhuopa. Reikämuovin tehtävänä on toimia irrotuskalvona imuhuovan ja kuitujen välillä sekä päästää ilmaa pois laminaatista. Ilman reikäkalvoa prepregiin imeytetty hartsi imeytyisi liiaksi imuhuopaan, joten sen tehtävänä on myös osaltaan pidätellä hartsia. Imuhuovan tehtävänä on imeä ylimääräinen hartsi pois laminaatista sekä johtaa ilmaa pois. Kun kaikki tarvittavat materiaalit oli ladottu päällekkäin, voitiin ne sulkea muottilevyyn säkityskalvolla ja imeä alipaineeseen.

6.4.2 Kovetus

Hiilikuituprepregin kovetus on myös huomattavasti vaivattomampaa kuin injektoinnissa käytetyllä hartsilla. Prepregille riittää puolen tunnin kovetus 120 °C:ssa, mutta kokonaiskovetusaika on yhteensä kaksi tuntia ja 20 minuuttia. Tämä siitä syystä, että aluksi lämpötila nostetaan huoneenlämmöstä (20 °C) 80 °C:seen nopeudella 1 °C/minuutti. Tämän jälkeen lämpötila pidetään 80 °C:ssa puoli tuntia, minkä jälkeen lämpötila nostetaan 120 °C:seen nopeudella 2 °C/minuutti.

6.4.3 Koesauvojen leikkaus

Hiilikuituisia koesauvoja varten suoritettiin samat toimenpiteet kuin selluloosakuidusta leikatuille. Hiilikuitulaminaatti leikattiin niin ikään kahteen osaan, joista vetokokeisiin tarkoitettuun palaan liimattiin poskilaminaatit (kuva 70).



Kuva 70. Hiilikuitulaminaatti lasikuituvahvikkeinen.

Koska Hiilikuitua oli vain pieni koe-erä, ei siitä saatu valmistettua kuin viisi vetosauvaa ja kaksi taivutussauvaa.

6.5 Vetokoe

Vetokokeella saadaan selvitettyä materiaalin ominaisuuksista murtolujuus, venymä sekä kimmokerroin. Vetokokeessa koekappale kiinnitetään molemmista päistä vetoleukoihin, joilla kappale vedetään rikki. Ennen vetokoetta kaikki koekappaleet numeroitiin ja mitattiin niiden paksuus sekä leveys useasta eri kohdasta. Mittaustulokset kirjattiin ja niistä laskettiin jokaisen koekappaleen keskimääräinen leveys ja paksuus. Jos kokeiden tuloksista löytyy suuria eroavaisuuksia, voidaan ensimmäisenä verrata koekappaleiden fyysisiä mittoja ja mahdollisia eroavaisuuksia niissä.

6.5.1 Selluloosakuitu

Selluloosakuidusta valmistettujen vetosauvojen koetulokset ovat nähtävissä taulukossa 1.

Taulukko 1. Vetokokeen tulokset

Koesauvan nro	E [GPa]	Rm [MPa]	Venymä [%]	Paksuus [mm]	Leveys [mm]
1	4,07	165,63	5,22	2,11	24,55
2	4,05	157,85	5,03	2,09	25,15
3	3,97	165,99	5,40	2,14	24,23
4	4,15	171,97	5,36	2,14	24,75
5	4,18	170,01	5,27	2,15	24,40
6	4,08	154,14	4,44	2,08	24,73
7	4,15	185,86	6,29	2,16	24,68
8	4,17	176,91	5,47	2,10	25,10
9	4,25	160,75	4,44	2,08	25,55
10	3,91	163,35	5,59	2,10	24,98
11	3,95	165,66	5,63	2,11	23,68
12	4,29	181,66	5,76	2,11	25,55
Keskiarvo	4,10	168,32	5,33	2,11	24,78

Taulukon yksiköistä E on kimmomoduuli ja Rm murtolujuus. Eri sauvilla mitatut kimmomoduulit vastaavat kohtalaisen hyvin toisiaan, mutta murtolujuuksissa ja venymissä on havaittavissa selviä eroavaisuuksia. Sauvassa numero 6 oli sen leikkauksesta aiheutunut keskelle sauvaa lovi, jonka kohdalta sauva katkesi, ja se selittää selvästi alhaisemmat murtolujuuden ja venymän arvot. Syytä vaihteleviin arvoihin voi myös etsiä koesauvojen mitoista ja tutkia, eroavatko ne suuresti toisistaan. Taulukosta 1 kuitenkin on havaittavissa, että mittojen eroista ei voida päätellä mitään merkittävää vaikutusta. Esimerkiksi sauvat 9 ja 12 ovat yhtä leveät ja lähestulkoon yhtä paksut ja niiden murtolujuudessa on siitä huolimatta melkein 20 megapascalin ero. Erot voivat johtua käytetystä selluloosakuitumatosta, sillä tavarantoimittajan toimittama koerulla oli taitettu keskeltä kaksin kerroin, jolloin kuitumaton kudonta oli

kärsinyt taitoksen kohdalla. Osa sauvoista voi olla tehty taitoksen kohdalla olleesta kuitumatosta ja siten vääristää koetuloksia.

Verrattaessa tuloksia valmistajan ilmoittamiin lukemiin eroavat ne niistäkin melko radikaalisti. Kimmokertoimen tulisi olla 12 GPa, kun se keskimäärin kokeiden perusteella on 4,1 GPa. Murtolujuus on kokeiden perusteella keskimäärin 168,3 MPa, joka puolestaan on suurempi kuin valmistajan ilmoittama 140 MPa. Venymää verrattaessa valmistajan ilmoittama 3,4 prosentin venymä on pienempi kuin kokeiden perusteella saatu keskimääräinen 5,3 %. Kimmokertoimen merkittävästi pienempää arvoa valmistajan ilmoittamaan verrattuna voidaan osaltaan perustella venymän suuremmalla arvolla, sillä kimmokerroin lasketaan jakamalla kappaleen jännitys venymällä. Itse venymän suurempaa arvoa on vaikea selittää, sillä koekappaleissa ei havaittu vetoleukojen liukumiseen viittaavia jälkiä. Vetokokeessa saadut arvot määräytyvät kuitenkin hyvin pitkälti kuitujen ominaisuuksista, jotka ovat tunnetusti parhaat kuitusuunnassa. Koe suoritetaan vetämällä kappaletta rikki kuitujen suuntaisesti, joten kuitujen ollessa mahdollisesti vetosuuntaan verrattuna kulmassa voi se vaikuttaa merkittävästi kokeen tuloksiin. Yhtenä syynä voisi olla myös laminaatin kuitupitoisuus, joka kertoo, kuinka paljon laminaatin tilavuudesta tai massasta on kuitua hartsiin verrattuna. Kuitupitoisuus on kuitenkin kokeisiin valmistetuilla sauvoilla keskimäärin noin 52 tilavuus-%, joka on suurempi kuin valmistajan ilmoittama 45 tilavuus-%. Näin ollen alempi kuitupitoisuuskaan ei voi olla syynä. Yhtenä todennäköisimpänä syynä valmistajan ilmoittamien arvojen ja koetulosten eroihin voi olla poskilaminaattien liimaus, joka itsessään voi joustaa. Liima kovetettiin huoneenlämmössä, ja varmempi kovettuminen oltaisiin saatu aikaan, jos liima olisi kovetettu korotetussa huoneenlämmössä. Vetokoneesta saadut tulokset ja kuvaajat ilmenevät liitteessä 2.

6.5.2 Hiilikuitu

Hiilikuidusta tehtyjen sauvojen vetokokeet epäonnistuivat pahasti. Hiilikuidun lujuuden vuoksi sitä ei voinut vetää rikki samalla koneella kuin selluloosakuitua vaan sen vetokokeisiin piti käyttää vanhempaa ja huomattavasti epätarkempaa vetokonetta. Kokeista saatiin käytännössä ainoana käyttökelpoisena informaationa ulos hiilikuitusauvojen murtolujuus. Vetosauvoista kaksi viimeistä lähti liukumaan leukojen

välistä ja niiden kokeet epäonnistuivat täysin. Jälkeenpäin huomattiin myös kolmen muun sauvan liukuneen jonkin verran eikä niiden kokeista saaduista kuvaajista käytännössä saada laskettua oikeaa kimmokerrointa lainkaan. Taulukossa 2 on nähtävissä kolmen ensimmäisen sauvan murtolujuudet sekä kuvaajien perusteella lasketut venymät.

Taulukko 2. Vetokokeen tulokset

Koesauvan nro	Rm [MPa]	Leveys [mm]	Paksuus [mm]	Venymä %
1	608,5	24,57	2,11	6,32 %
2	608,7	24,83	2,04	5,58 %
3	622,6	24,63	2,07	7,26 %

Kolmen rikki vedetyn kappaleen murtolujuudet ovat melko lähellä toisiaan, ja ottaen huomioon käytetyn vetokoneen epätarkkuuden eivät ne kovin suuresti eroa valmistajan ilmoittamasta 735,6 megapascalista. Valmistajan ilmoittamat arvot on todettu eri standardeilla kuin joita tässä insinööriyössä käytettiin, joten se voi selittää osaltaan tuloksien eroavaisuutta. Vetosauvoja tutkittaessa voidaan havaita kuitujen suuntautuvan hieman viistosti vetosuuntaan nähden, mikä voi myös osaltaan selittää pienempää arvoa. Kokeiden perusteilla saaduista kuvaajista on turha laskea kimmokerrointa, koska kappaleet ovat jonkin verran liukuneet leuoissa. Valmistajan mukaan venymän pitäisi olla 3 %, kun se kokeiden perusteella on keskimäärin 6,4 % murtumakohdassa. Liitteessä 3 on toisen ja kolmannen vetosauvan vetokoneen antamat tulokset.

6.6 Taivutuskoe

Taivutuskokeella saadaan selville, kuinka paljon materiaali kestää taivutusta ennen murtumistaan. Taivutuskoe suoritetaan 3 pisteen taivutuksena, joka tarkoittaa sitä, että koekappale asetetaan päistään kahden tuen päälle ja keskeltä kappaletta painetaan painimella kappale tukia vasten poikki. Taivutuskokeen standardissa tukien ja painimen pyöristyssäteet oli määritelty materiaalin paksuuden mukaan. Koesauvojen materiaalin paksuuden ollessa kaksi millimetriä tulee tukien pyöristyssäteiden olla kaksi

millimetriä ja painimen viisi millimetriä. Koulun valikoimista ei kuitenkaan löytynyt vastaavia vaan kokeet suoritettiin 1,5 millimetrin säteen omaavilla tuilla sekä kolmen millimetrin säteen omaavalla painimella. Myös taivutuskokeiden koekappaleet numeroitiin ja niiden leveys ja paksuus mitattiin.

6.6.1 Selluloosakuitu

Selluloosakuidusta valmistettujen koekappaleiden taivutuskokeiden tulokset ovat nähtävissä taulukossa 3.

Taulukko 3. Taivutuskokeen tulokset

Koesauvan nro	Er [GPa]	Fmax [MPa]	Paksuus [mm]	Leveys [mm]
1	8,55	192,40	2,045	14,9
2	9,24	215,96	2,09	14,95
3	8,98	214,07	2,045	14,75
4	8,10	185,65	2,06	14,5
5	8,05	179,37	2,055	14,7
6	9,07	197,05	2,07	15,7
7	9,00	202,14	2,095	14,5
8	9,03	218,18	2,08	14,95
9	8,65	207,91	2,11	14,55
10	8,28	201,03	2,04	14,7
11	8,43	188,50	2,06	14,8
12	8,50	199,17	2,06	14,85
Keskiarvo	8,66	200,12	2,07	14,82

Taulukon lyhenteistä Er on taivutusmoduuli ja Fmax murtolujuus. Taivutusmoduulin arvot eri sauvoilla ovat keskenään melko lähellä toisiaan, eivätkä ne eroa kovinkaan suuresti valmistajan ilmoittamasta 10,5 gigapascalin arvosta. Murtolujuuden arvot ovat muutamaa poikkeusta lukuun ottamatta melko lähellä toisiaan. Niiden 200,12 megapascalin keskiarvokaan ei juuri eroa valmistajan ilmoittamasta 205 megapascalista. Tulosten poikkeavuus valmistajan ilmoittamista arvoista voi selittyä erilaisten koekappaleiden käytöllä sekä standardista poikkeavien tukien ja painimen

käytöllä. Koesauvojen keskinäiset erot voivat johtua samoista syistä kuin vetokappaleilla, sillä molempiin kokeisiin koesauvat valmistettiin samasta laminaatista. Liitteessä 4 on nähtävissä taivutuskokeista saadut tulokset.

6.6.2 Hiilikuitu

Taivutuskoetta varten hiilikuidusta ei saatu sen vähyydestä johtuen valmistettua kuin vain kaksi koekappaletta. Koekappaleiden vähyydestä johtuen tulokset eivät ole täysin luotettavia. Taulukossa 4 on nähtävissä kokeiden tulokset.

Taulukko 4. Taivutuskokeen tulokset

Koesauvan nro	Er [GPa]	Fmax [MPa]	Paksuus [mm]	Leveys [mm]
1	45,40	715,90	2,10	14,80
2	49,83	757,50	2,09	15,87

Kokeiden perusteella saadut taivutusmoduulin ja murtolujuuden arvot eroavat melko paljon sauvojen kesken. Kun verrataan koesauvojen fyysisiä mittoja, voidaan havaita suuremman taivutusmoduulin ja lujuuden omaavan sauvan olevan yli millin leveämpi. Taivutuskoneen ohjelmistoon syötettiin arvot sauvan poikkipinta-alasta ja samaa arvoa käytettiin kaikille sauvoille. Murtolujuus on laskettu $30,75 \text{ mm}^2$:n poikkipinta-alalla ja kun sen avulla lasketaan murtuman aiheuttaneen voiman suuruus voidaan voiman avulla puolestaan laskea tarkka murtolujuus kummallekin kappaleelle. Näin laskettuna saadaan ensimmäisen sauvan murtolujuudeksi noin 708 MPa ja toisen noin 704 MPa. Kimmokertoimelle ei voida suorittaa samanlaista laskua, mutta murtolujuuksien ollessa lähestulkoon samat voidaan olettaa kimmokertoimien olevan myös todellisuudessa lähempänä toisiaan.

Kokeiden tulokset eroavat valmistajan antamista arvoista melko radikaalisti. Kokeiden perusteella saatu taivutusmoduulin keskimääräinen arvo on noin 47 GPa, joka on merkittävästi pienempi kuin valmistajan ilmoittama 68,3 GPa. Myös murtolujuus on huomattavan paljon pienempi: se on todellisilla sauvan mitoilla laskettuna keskimäärin 706 MPa ja valmistaja on ilmoittanut sen arvoksi 1171 MPa. Valmistaja on suorittanut taivutuskokeet eri standardin mukaisesti, sekä sauvojen mitat ovat eri kuin käytetyssä

standardissa määritellään. Hiilikuidun kokeisiin käytettiin samaa konetta kuin selluloosakuidun kokeisiin, joten näin ollen käytettiin myös standardista poikkeavia tukia sekä paininta. Laskettaessa murtolujuuksia koesauvojen todellisilla poikkipinta-aloilla saatiin murtuman aiheuttavaksi voimaksi heikommalla sauvalla yli 22 000 newtonia. Käytetyn koneen maksimikäyttövoima on 12 000 newtonia, joten tulokset ovat voineet myös vääristyä koneen osien antaessa periksi.

7 Yhteenveto

7.1 Komposiittikori

Komposiittikorin suunnittelu- ja mallinnusprosessi jouduttiin tekemään melko kiireellisellä aikataululla, sillä korin suunnittelua ei voitu aloittaa ennen auton lopullisen ulkomuodon valmistumista. Auton ulkomuodon valmistuminen viivästyi usealla viikolla, mikä taas aiheutti aikataulupaineita korin suunnittelussa. Kori oli saatava laskentavalmiiksi vajaassa kahdessa kuukaudessa, sillä Aalto-yliopistosta saapuneen diplomityöntekijän oli tällöin määrä aloittaa korin rakennemitoitus. Kiireellisestä aikataulusta huolimatta suunnittelussa onnistuttiin hyvin ja saavutettiin haluttuja asioita.

Koripaneelien määrän vähentämisessä onnistuttiin hyvin, sillä esimerkiksi ERAan verrattuna paneelien määrä väheni yhdeksällä. Paneelien määrää tässä korissa nostavat erilliset katto- ja lattiapalkit sekä sisäkylkiä keulasta ja perästä yhdistävät paneelit. Jotta paneelien määrä saataisiin vielä alhaisemmaksi, tulisi lattiapaneelin alapuoliset lattiapalkit jotenkin integroida lattiapaneeliin ja sisäkyljet suunnitella siten, että ne muodostavat kokonaisuudessaan matkustamon sisäpinnat muutamaa poikkeusta lukuun ottamatta. Tällöin ei olisi erillisiä kattopalkkeja eikä sisäkylkiä yhdistäviä paneeleja keulassa ja perässä. Jos näissä toimenpiteissä onnistuttaisiin, laskisi koripaneelien määrä kymmenellä. Jotta kuitenkin lattiapaneeliin integroidut palkit muodostaisivat suljetun palkkirakenteen, ne tulisi sulkea jollain paneelilla tai paneeleilla. Kattopalkkien integroiminen sisäkylkiin vaatisi yhteistyötä auton muotoilijoiden kanssa, sillä auton katon ulkomuoto vaikuttaa ratkaisevasti siihen, saako sisäkylkiä päästäviksi kattopalkit niihin integroituina. Myös tavoitteena ollut liitoskohtien

sijaintien parantaminen onnistui. Tässä työssä koripaneelien liitoskohdat saatiin sijoitettua siten, että itse liitoksiin ei kohdistu suurimpia rasituksia.

Tätä insinööriäkirjoitettaessa korin lujuuslaskelmat saatiin hyvälle mallille, ja niistä selvisi rakenteen suunnittelun onnistuneen hyvin. Korin rakenteisiin ei jouduttu tekemään mitään muutoksia, joten kaikki palkkirakenteet onnistuttiin suunnittelemaan riittävän jäykiksi. Suunnitteluprosessi ja siihen vaikuttavat seikat pyrittiin käymään tässä insinööriäkirjoituksessa mahdollisimman hyvin läpi. Korin suunnittelu suoritettiin käytännössä katsoen pelkästään Catialla mallintaen, ja on erittäin vaikeaa selittää itse mallinnusprosessi siten, että jokainen voisi niin halutessaan mallintaa korin uudelleen. Lähtökohtaisesti pitäisi olla vahva mallinnustausta sekä tietämystä autotekniikasta. Tässä työssä on pyritty kuvaamaan ne seikat, jotka ovat olennaisesti vaikuttaneet koripaneelien muotoon. Suunnitteluprosessin dokumentoinnissa onnistuttiin ainakin siinä määrin, että tämä insinööriäkirjoitus varmasti auttaa hahmottamaan, mitä asioita tulee ottaa huomioon korin suunnittelussa.

7.1.1 Ongelmakohdat

Korin suunnittelun yksi ongelmakohdista oli edellä mainittu kiireinen aikataulu. Tämän insinööriäkirjoituksen kirjoittamisen aikana on osa projektin jäsenistä tehnyt korjauksia koripaneelisiin, koska niiden mallinnushetkellä ei ollut tiedossa kaikkia yksityiskohtia eikä kiireellisyyden vuoksi yksinkertaisesti ollut huomattu virheitä. Mitään karkeita virheitä korissa ei kuitenkaan ollut, ja tyypillisesti virheissä oli kyse koripaneelien päästävyydessä. Auton ulkomuodon valmistumisen viivästyminen aiheutti myös sen, että muut projektinjäsenet olivat ehtineet jo suunnitella pitkälle oman osa-alueensa. Kun jotain on suunniteltu lähes valmiiksi, on sitä työlästä lähteä muuttamaan, ja näin ollen korin suunnittelussa joutui tekemään joissakin kohdissa hieman ylimääräistä työtä sovittaakseen kaiken yhteen. Ylimääräistä työtä joutui tekemään myös auton muotoilun vuoksi, sillä teolliset muotoilijat muuttivat usein jotain kohtaa ulkomuodosta ja muutos piti toteuttaa myös ulkokyljen koripaneelissa. Mallinnuksen kannalta ongelmana oli Mainassembly-kokoonpanotiedoston raskaus, sillä sen avaamiseen meni todella pitkään ja sen pyörittäminen Catian ruudulla samalla mallintaen oli melko raskasta. Mainassembly-osa jätettiin välillä kokonaan pois, jolloin auton komponenttien paikkaa ja kokoa ei ollut näkyvillä. Tästä aiheutui osa virheistä, jotka huomattiin siinä

vaiheessa, kun korin osatiedosto avattiin jälleen yhdessä Mainassembly-kokoonpanotiedoston kanssa.

7.2 Materiaalikoheet

Materiaalikoekiden yhtenä tarkoituksena oli dokumentoida varsinkin selluloosakuitulaminaatin valmistusprosessi niin tarkasti, että se voidaan toistaa lähestulkoon samanlaisena. Dokumentoinnissa onnistuttiin hyvin, ja tässä insinööriyössä prosessi kuvataan alusta loppuun niin yksityiskohtaisesti kuin järkevää on. Hiilikuidun osalta valmistusprosessi on hyvin yksinkertainen, joten sitä ei ole painotettu tässä työssä kovinkaan paljoa.

Kokeiden tulokset olivat melkoinen pettymys, sillä ne herättivät enemmän kysymyksiä kuin antoivat vastauksia. Selluloosalla suoritettavat kokeet voitiin kuitenkin suorittaa tarkalla laitteistolla, joten kokeiden tuloksien pitäisi olla melko luotettavia. Tulokset kuitenkin vaihtelevat niin suuresti valmistajan ilmoittamista arvoista, joten rakennemitoituksessa pitää pohtia, millä selluloosakuidun arvoilla lujuuslaskelmat tehdään. Vetokokeet voitaisiin suorittaa uudelleen, mutta tällöin tulisi tehdä sauvoja ilman poskilaminaattia sekä poskilaminaatin kanssa. Näin voidaan vertailla, ovatko tässä insinööriyössä saadut tulokset vääristyneet poskilaminaattien liiman johdosta. Toisena vaihtoehtona on kiinnittää sauvan venyvälle osalle oma venymämittari, jolla saataisiin eliminoitua sekä liimasta aiheutuva jousto että mahdollinen vetoleukojen luistaminen. Vetokokeisiin valmistettavat sauvat tulisi myös valmistaa sellaisesta kuitumatosta, joka ei ole ollut taittuneena. Tällöin käytetty kuitumatto olisi tasalaatuista eikä sauvojen välillä esiintyisi taitoksesta aiheutuvia mahdollisia eroavaisuuksia. Selluloosakuidun taivutuskokeet kuitenkin onnistuivat hyvin. Niistä saatiin likipitään samoja arvoja kuin valmistaja on ilmoittanut, joten taipumaominaisuuksien puolesta materiaali on erittäin lähellä sitä,, mitä valmistaja on ilmoittanut.

Hiilikuidun kohdalla todettiin jo vetokokeiden epäonnistuneen. Jotta kokeet voitaisiin uusina onnistuneesti, olisi laitteiston oltava parempi. Tällöin saataisiin luotettavaa tietoa koesauvojen venymästä käytetyn voiman suhteen. Hiilikuidun vetokokeiden onnistumiseksi voitaisiin myös tehdä samat toimenpiteet kuin selluloosakuidulle.

Eritoten venymämittari olisi ollut erinomainen lisä suoritetuissa kokeissa, koska vetokoneesta ei saatu luotettavaa venymän arvoa ulos. Hiilikuitua olisi pitänyt olla myös suurempi määrä, jotta vetosauvoista olisi saatu oikean mittaiset ja niitä olisi saatu suurempi määrä. Taivutuskokeiden arvot eivät nekään vastanneet valmistajan ilmoittamia, mutta tähän saattoi vaikuttaa käytetyn koneen suurimman sallitun voiman pienuus.

Materiaalikoekiden pääpaino oli selluloosakuitulaminaatin ominaisuuksien selvittämisessä, sillä se on korimateriaalina uusi ja sen valmistusprosessi on huomattavasti monimutkaisempi ja virhealttiimpi kuin hiilikuidulla. Osien valmistus hiilikuitupreprestistä on huomattavasti helpompaa kuin selluloosakuidusta. Hiilikuidun helppo valmistaminen mahdollistaa tasalaatuisemman materiaalin valmistamisen helpommin, mikä puolestaan helpottaa materiaalin ominaisuuksien saamista lähemmäs valmistajan ilmoittamista. Koska selluloosakuitulaminaatin valmistusprosessi on monimutkaisempi ja vaikeammin toistettavissa, on tärkeämpää tietää, mihin tuloksiin käytetyllä valmistustekniikalla päästään. Tästä syystä hiilikuitusauvojen kokeiden epäonnistuminen ei ole niin kriittistä kuin selluloosakuidusta valmistettujen.

Lähteet

- 1 Saarela, Olli, Airasmaa, Ilkka, Kokko, Juha, Skrifvars, Mikael & Komppa, Veikko. 2003. Komposiittirakenteet. Helsinki: Muoviyhdistys ry.
- 2 Monaghan, Matt. 2010. Mazda2 drops weight to deliver driving dynamics. Verkkodokumentti. <<http://www.sae.org/mags/aei/DESGN/8599>>. 19.7.2010. Luettu 12.12.2011.
- 3 Santamala, Harri. 2010. Developing a composite racecar monocoque. Master's thesis. Aalto University.
- 4 Tiainen, Vesa. 2008. CityCabin itsekantavan hiilikuitukorin valmistus. Insinööriö. Helsingin ammattikorkeakoulu Stadia.
- 5 Karhunen, Jouko, Lassila, Veikko, Pyy, Seppo, Ranta, Aarno, Räsänen, Satu, Saikkonen, Matti & Suosara, Eero. Lujuusoppi. 1995. Espoo: Otatieto.
- 6 Vuorinen, Antti. 2005. Lujuuslaskennan kehittäminen Kvaener Power Oy:n pesuriperheen suunnittelussa. Tutkintotyö. Tampereen Ammattikorkeakoulu.
- 7 Toshimiro, Miki. Torsion type collapse with torsional buckling of beam or column member. 1996. Verkkodokumentti. Daido Institute of Technology. <<http://www.daido-it.ac.jp/~doboku/miki/pic/bc-fait.jpg>>. 20.5.1996. Luettu 20.1.2012.
- 8 Ultimate car for the core market. 2011. Verkkodokumentti. Cartype Inc. <http://www.cartype.com/pages/4355/mclaren_mp4-12c__2011>. Luettu 10.12.2011.

- 9 Reference B-pillar in DP-W 600. Verkkodokumentti. ThyssenKrupp AG.
<http://incar.thyssenkrupp.com/4_01_020_BS01_Referenz.html?lang=en>. Luettu 26.2.2012.
- 10 Weaving styles. 2007. Verkkodokumentti. Fibermax composites.
<http://www.fibermaxcomposites.com/shop/index_files/weavingstylesandpatterns.html>. Luettu 20.3.2012.
- 11 SFS-EN ISO 527-4. Plastics. 1997. Determination of tensile properties. Part 4: Test conditions for isotropic and orthotropic fibre-reinforced plastic composites. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto.

Injektointihartsin työohje



EPOLAM 2035 Resin EPOLAM 2025 Hardener

EPOXY LAMINATING SYSTEM BY INFUSION
T_g 130°C

APPLICATIONS

EPOLAM 2035 resin / 2025 hardener allows the production of composite moulds and structures by infusion methods.

PROPERTIES

- High thermal resistance
- Good chemical resistance
- High thickness laminates

PHYSICAL PROPERTIES				
		RESIN EPOLAM 2035	HARDENER EPOLAM 2025	MIXING
Mixing ratio by weight		100	27	
Aspect		liquid	liquid	liquid
Colour		light amber	blue	blue
Viscosity at 25°C (mPa.s)	BROOKFIELD LVT	1,300	18	400
Density at 25°C	ISO 1675 : 1985	1.15	0.92	-
Density at 23°C of the cured product	ISO 2781 : 1996	-	-	1.12
Pot life (500 g) at 25°C (min)	Gel Timer TECAM			105

MECHANICAL AND THERMAL PROPERTIES AT 23°C (1) (2)			
Glass transition temperature (tg)	ISO 11359 : 2002	°C	130
Flexural modulus	ISO 178 :2001	MPa	2,800
Flexural strength	ISO 178 :2001	MPa	108
Tensile modulus	ISO 527 :1993	MPa	3,100
Tensile strength	ISO 527 :1993	MPa	72
Elongation at break	ISO 527 :1993	%	4
Hardness	ISO 868 :2003	Shore D15	83
Coefficient of thermal expansion (CTE) (+30°C to +110°C)	ISO 11359 : 1999	10 ⁻⁶ K ⁻¹	62

(1) Average values obtained on standard specimens / Hardening 16 hrs at 120°C
(2) These values have been determined on the pure resin (without reinforcement)

PRECAUTIONS

Normal health and safety precautions should be observed when handling these products :

- ensure good ventilation
- wear gloves and safety glasses

For further information, please consult the product safety data sheet.



EPOLAM 2035 Resin EPOLAM 2025 Hardener

EPOXY LAMINATING SYSTEM BY INFUSION
T_g 130 °C

PROCESSING

After mixing according to the indicated ratio impregnate the reinforcement according to the infusion process. Hardening takes place 16 hours at room temperature.

Place a thermo-couple between the laminate and the pattern at 50 mm of the border. Bring the whole set laminate + pattern at 45 °C. Hold the temperature for at least 2 hours. Bring the laminate down to room temperature at 20 °C/hr prior to demoulding.

Postcure to the following schedule with a temperature gradient of 30 °C/hr:

- 2 hours at 60 °C
- 2 hours at 80 °C
- 2 hours at 100 °C
- 3 hours at 120 °C
- let cool at maximum rate of 30 °C/hr

For any further information concerning the Resin Infusion Method and peripheral products provided by Axson, please contact our Technical Support Department.

REMARKS

Laminates thickness must not be over 12 mm.

STORAGE

Use within 24 months of the manufacturing date. Expiry date indicated on the packaging.

PACKAGING

EPOLAM 2035 RESIN	EPOLAM 2025 HARDENER
1 x 5.2 kg	1 x 1.4 kg
1 x 20.8 kg	1 x 5.6 kg

GUARANTEE

The information of our technical data sheet are based on our present knowledge and the result of tests conducted under precise conditions. It is the responsibility of the user to determine the suitability of AXSON products, under their own conditions before commencing with the proposed application. AXSON refuse any guarantee about the compatibility of a product with any particular application. AXSON disclaim all responsibility for damage from any incident which results from the use of these products. The guarantee conditions are regulated by our general sale conditions.

Selluloosakuidun vetokoe

Zwick / Roell

Standard report

18.04.2012

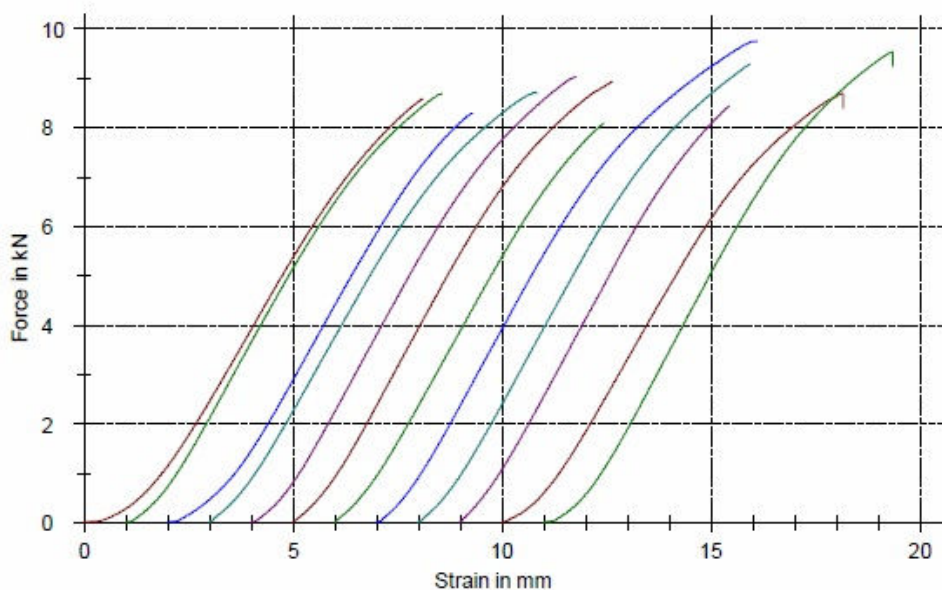
Parameter table:

Customer	: Metropolia	Load cell	: 10 kN
Tester	: Tino Tuominen	Extensometer	: -
Test standard	: ISO-527-4	Specimen grips:	
Material	: Selluloosakuitu	Machine data	: Control SN: 150869
Specimen ID	: 10, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 11, 12		: Crosshead SN: 150869
			: Force SN: 150870 10 kN

Results:

Nr	L0 mm	EMod kN/mm ²	Rp x N/mm ²	ReH N/mm ²	Rm N/mm ²	ε-F max %	ε-Break %
1	145,00	3,91	146,98	-	163,35	5,59	5,59
2	145,00	4,07	143,63	-	165,63	5,22	5,22
3	145,00	4,05	148,21	-	157,82	5,02	5,03
4	145,00	3,97	142,09	-	165,99	5,38	5,40
5	145,00	4,15	145,62	-	171,97	5,36	5,36
6	145,00	4,18	144,57	-	170,01	5,27	5,27
7	145,00	4,08	144,55	-	154,14	4,44	4,44
8	145,00	4,15	145,11	-	185,86	6,27	6,29
9	145,00	4,17	147,10	-	176,91	5,47	5,47
10	145,00	4,25	148,18	-	160,75	4,44	4,44
11	145,00	3,95	141,23	-	165,66	5,62	5,63
12	145,00	4,29	151,05	-	181,66	5,76	5,76

Series graph:



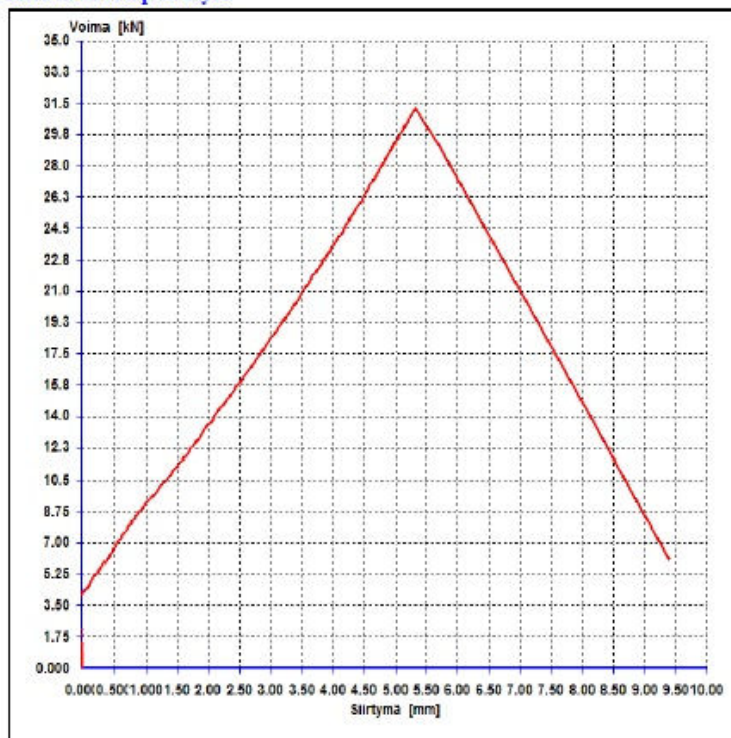
Hiilikuidun vetokoe

a	2,05	mm	Koepituus	Lc	0,00	mm		
b	25,00	mm	Murtovenymä alkumittapituus	Lo	0,00	mm		
D	18,00	mm	loppumittapituus	Lu	0,00	mm		
d	12,00	mm	Venymäanturi alkumittapituus	Le	0,00	mm		
Pinta-ala	So	51,25	mm ²	Koekappaleen loppuhalkaisia	Du	0,00		mm
Koestusnopeus		50,00	N/s					

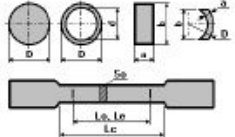
Lopputulokset

Suurin voima	Fm	31,194	kN	Kimmokerroin	E	0	N/mm ²
Lujuus	Rm	608,7	N/mm ²	Korrelaatio		0,00	
Alempi myötöraja	ReL	0,0	N/mm ²	Venymisraja	Rp	0,00 %	0,0
Ylempi myötöraja	ReH	0,0	N/mm ²	Venymisraja	Rp	0,00 %	0,0
Muokkauslujit exp	n	0,00		Venymisraja	Rp	0,00 %	0,0
				Koeaika		70,4	s
				Murtovenymä	A	0,0	%
				Murtokurouna	Z	0,0	%

Kokeen mittauspistekäyrä



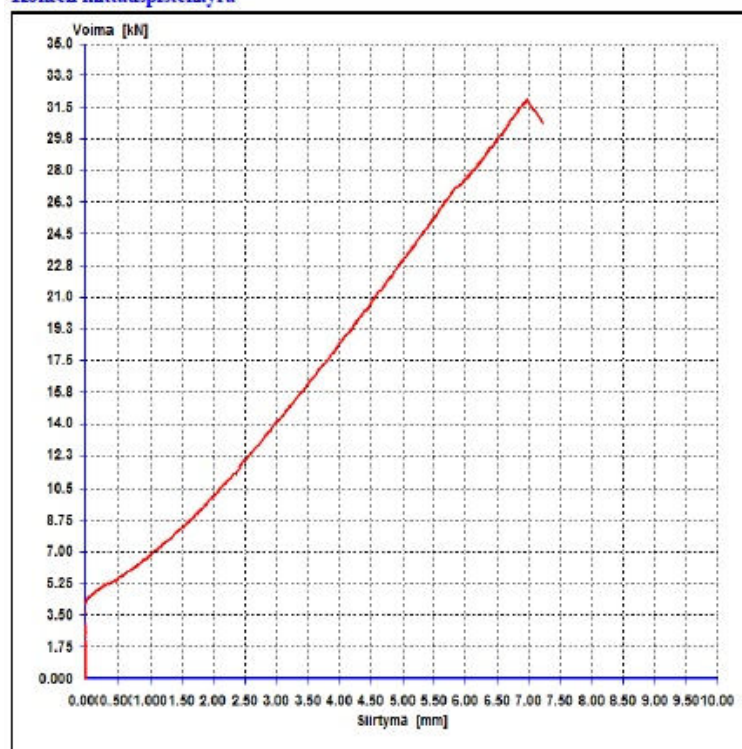
a	2,05	mm	Koepituus	Lc	0,00	mm
b	25,00	mm	Murtovenymä alkumittapituus	Lo	0,00	mm
D	18,00	mm	loppumittapituus	Lu	0,00	mm
d	12,00	mm	Venymäanturi alkumittapituus	Le	0,00	mm
Pinta-ala	So	51,25	mm ²	Koekappaleen loppuhalkaisia	Du	0,00
Koestusnopeus		50,00	N/s			



Lopputulokset

Suurin voima	Fm	31,909	kN	Kimmokerroin	E	0	N/mm ²
Lujuus	Rm	622,6	N/mm ²	Korrelaatio		0,00	
Alempi nyötöraja	ReL	0,0	N/mm ²	Venymisraja	Rp	0,00 %	0,0
Ylempi nyötöraja	ReH	0,0	N/mm ²	Venymisraja	Rp	0,00 %	0,0
Muokkauslujit. exp	n	0,00		Venymisraja	Rp	0,00 %	0,0
				Koeaika		94,6	s
				Murtovenymä	A	0,0	%
				Murtokouruma	Z	0,0	%

Kokeen mittauspistekäyrä



Selluloosakuidun taivutuskoee

Zwick / Roell

Standard report

18.04.2012

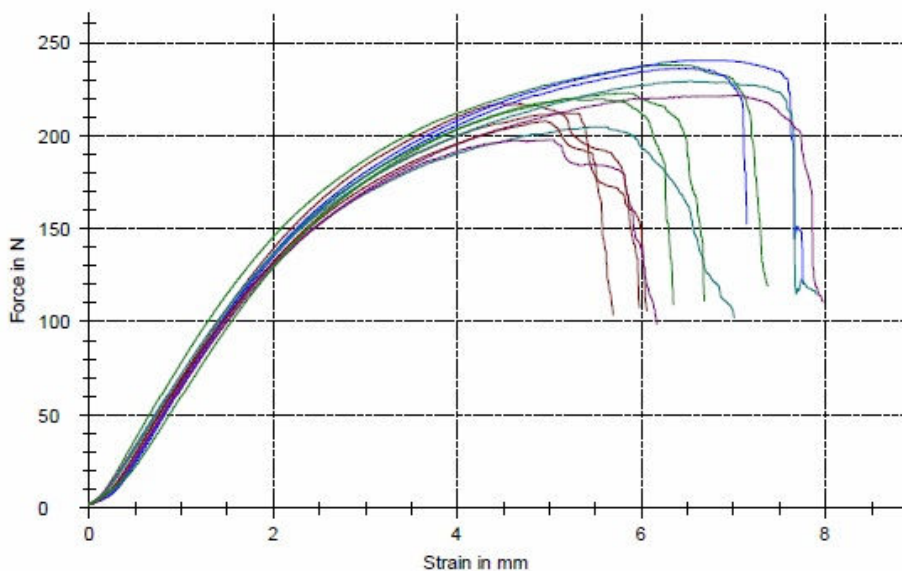
Parameter table:

Customer : Metropolia
 Tester : Tino Tuominen
 Test standard : ISO-14125
 Material : Selluloosakuit
 Load cell : 10kN
 Extensometer : -
 Specimen grips: nose: d=6,0mm, supports: d=3,0mm
 Machine data : Control SN: 150869
 Crosshead SN: 150869
 Force SN: 150870 10 kN

Results:

Nr	A mm ²	EMod kN/mm ²	Fmax N/mm ²	FBreak N/mm ²	e-F max %	e-Break %
1	31,5	8,55	192,40	96,18	4,02	4,77
2	31,5	9,24	215,96	107,96	5,06	5,81
3	31,5	8,98	214,07	138,56	5,05	5,62
4	31,5	8,10	185,65	92,80	4,40	5,52
5	31,5	8,05	179,37	89,64	3,97	4,86
6	31,5	9,07	197,05	97,61	3,53	4,71
7	31,5	9,00	202,14	101,01	4,61	5,26
8	31,5	9,03	218,18	108,83	5,12	6,11
9	31,5	8,65	207,91	103,95	5,14	6,23
10	31,5	8,28	201,03	100,48	5,54	6,28
11	31,5	8,43	188,50	94,05	3,90	4,48
12	31,5	8,50	199,17	99,23	4,11	5,00

Series graph:



Hiilikuidun taivutuskoee

Zwick / Roell

Standard report

18.04.2012

Parameter table:

Customer : Metropolia
 Tester : Tino Tuominen
 Test standard : ISO-14125
 Material : Hiilikuitu
 Load cell : 10kN
 Extensometer : -
 Specimen grips: nose: d=6,0mm, supports: d=3,0mm
 Machine data : Control SN: 150869
 Crosshead SN: 150869
 Force SN: 150870 10 kN

Results:

Nr	A mm ²	EMod kN/mm ²	Fmax N/mm ²	FBreak N/mm ²	ε-F max %	ε-Break %
1	30,75	45,40	715,90	715,90	1,66	1,66
2	30,75	49,83	757,50	756,01	1,59	1,59

Series graph:

