



Sähkökuorma-auton akuston koteloinnin suunnittelu

Alexi Takkunen

OPINNÄYTETYÖ
Huhtikuu 2021

Kone- ja tuotantotekniikka
Tuotekehitys

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Kone- ja tuotantotekniikka
Tuotekehitys

TAKKUNEN, ALEKSI
Sähkökuorma-auton akuston koteloinnin suunnittelu

Opinnäytetyö 38 sivua, joista liitteitä 2 sivua
Huhtikuu 2021

Opinnäytetyön tarkoituksena oli suunnitella kotelointi sähkökuorma-auton akustolle. Työ tehtiin Tampereen ammattikorkeakoululle. Työ on osa Helsingin kaupungin, Liikelaitos Staran ja Forum Virium Helsinki Oy:n koordinoimaa Stara eRetrofit -hanketta, jonka kanssa yhteistyössä myös Tampereen ammattikorkeakoulu toimii. Hankkeen tarkoituksena oli muuntaa käytetty dieselkäyttöinen kuorma-auto sähkökäyttöiseksi. Työssä suunniteltiin sähkökuorma-auton akustolle jäähdytetty kotelointi sekä kiinnitystuennat.

Tavoitteena suunnittelulle oli ensin hahmotella ja sitten mallintaa koteloinnille ja kiinnitystuennoille valmis kokoonpano. Tarkoituksena oli toteuttaa valmis suunnitelma materiaalivalintoineen ja lujuustarkasteluineen. Opinnäytetyön mallinnukseen ja lujuustarkasteluun käytettiin SolidWorks 3D CAD -suunnitteluohjelmistoa.

Opinnäytetyön lopputuloksena saatiin toteutuskelpoinen suunnitelma sähkökuorma-auton akuston koteloinnista ja kiinnityksestä materiaalivalintoineen ja lujuustarkasteluineen. Koska opinnäytetyön aihe ei sisältänyt toteutusta, opinnäytetyön jälkeen työ jatkuu koteloinnin ja kiinnitystuentojen toteutuksella.

Asiasanat: suunnittelu, kotelointi, akusto, sähkökuorma-auto

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Degree Programme in Mechanical engineering
Product Development

TAKKUNEN, ALEKSI:
Designing a battery pack housing for an Electric Truck

Bachelor's thesis 38 pages, appendices 2 pages
April 2021

The purpose of this thesis was to design a housing for the battery pack of an electric truck. The thesis was done for Tampere University of Applied Sciences. The thesis is a part of a project conducted by the city of Helsinki, Stara public utility and Forum Virium Helsinki Oy control and Tampere University of Applied Sciences also collaborates with this project. The purpose of this project was to convert an old diesel-powered truck into an electric one. A cooled housing and mounting brackets for the electric truck battery pack were designed during the thesis.

The goal for this planning was to first sketch and then 3D-model the battery pack housing and the mounting brackets for the final assembly. The purpose was to carry out a ready-made plan with material choices and a strength analysis. Solid-Works 3D design software was used for the 3D-modeling and a strength analysing during this thesis.

The result of the thesis was a feasible plan for the battery pack housing and mounting brackets for the electric truck with material choices and a strength analysis. As the topic of the thesis did not include execution, the work after the thesis continues with carrying out the housing and the mounting supports.

Key words: design, housing, battery pack, electric truck

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	6
2	PERUSTEET SUUNNITTELULLE	7
	2.1 Stara eRetrofit	7
	2.2 Suunnittelun raja-arvot, tavoitteet ja lainsäädäntö.....	8
	2.2.1 Raja-arvot ja tavoitteet.....	8
	2.2.2 Lainsäädäntö	9
3	KOTELOINNIN SUUNNITTELU.....	12
	3.1 Koteloinnissa käytettävien vaihtoehtoisten materiaalien valinta ...	12
	3.2 Kotelointi ja jäähdytys	13
	3.2.1 Muovinen kotelointi ja jäähdytys	14
	3.2.2 Alumiininen kotelointi ja jäähdytys	14
	3.2.3 Koteloinnin materiaalin lopullinen valinta.....	16
	3.3 Akusto	16
	3.4 Koteloinnin kiinnitys.....	17
	3.5 CAD-mallinnus	19
	3.5.1 Alumiinisen koteloinnin CAD-mallinnus	19
	3.5.2 Kiinnityksen ja kiinnityskokoonpanon CAD-mallinnus.....	22
4	LUJUUSTARKASTELU	27
	4.1 Lujuuslaskennan teoria	27
	4.1.1 Pulttiliitokset	28
	4.2 Simulointi	30
	4.3 Valmistusmenetelmä.....	32
5	TULOKSET JA POHDINTA	33
	5.1 Tulokset	33
	5.2 Pohdinta.....	34
	LÄHTEET.....	35
	LIITTEET	37
	Liite 1. Neliöpalkin maksimi taipuman laskenta.....	37
	Liite 2. Neliöpalkin mitoitus (Kontino 2019).....	38

LYHENTEET JA TERMIT

CAD	Computer Aided Design, suomeksi tietokoneavustei- nen suunnittelu
F	Laskutoimituksissa käytettävä voiman tunnus
g	Putoamiskiihtyvyyden tunnus, taulukkoarvo $9,81 \text{ m/s}^2$
m	Massan tunnus
N	Newton, voiman yksikkö, 1 kN on 1000 N
FEA	Finite Element Analysis, suomeksi elementtimenetel- mällä suoritettu laskenta

1 JOHDANTO

Helsingin kaupunki on aloittanut Hiilineutraali Helsinki 2035 -ohjelman, jonka tavoitteena on saada laskettua Helsingin aiheuttamia päästöjä vuoteen 2035 mennessä. Isoa osaa tässä ohjelmassa pelaa myös raskaan kaluston kulkuneuvot, kuten kuorma-autot. Sähkökäyttöisten paketti- ja kuorma-autojen valmistus on vielä hyvin rajallista, ja tästä syystä on ryhdytty tutkimaan muutoksen nopeuttamista muuntamalla nykyistä kalustoa sähkökäyttöiseksi. (Helsingin kaupunki 2020.)

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli suunnitella jäähdytetty kotelointi sähkökuorma-auton akustolle. Opinnäytetyön aikana tutkittiin erilaisia vaihtoehtoja koteloinnin toteuttamiselle, joista valittiin tähän käyttötarkoitukseen parhaiten soveltuva vaihtoehto. Työ sisälsi jäähdytetyn koteloinnin sekä kiinnitysten suunnittelun, materiaalivalintojen tekemisen ja rakenteen lujuustarkastelun. Työ ei sisältänyt fyysistä toteutusta. Opinnäytetyö tehtiin yhteistyössä Helsingin kaupungin, Liikelaitos Staran ja Forum Virium Helsinki Oy:n johtaman Stara eRetrofit -hankkeen kanssa, jossa Tampereen ammattikorkeakoulu on myös mukana yhteistyössä.

2 PERUSTEET SUUNNITTELULLE

Tehtävälle työlle on asetettava hankkeen tai suunnitelman kannalta tarkat tavoitteet. Nämä tavoitteet tulee olla suunnittelijalla hyvin tiedossa, koska epäselvät tavoitteet joihin työn avulla ollaan pyrkimässä voivat johtaa siihen, että työstä saatu lopputulos on hankkeen kannalta merkityksetön ja käytetyt resurssit ovat menneet hukkaan. Tässä luvussa perehdytään suunnittelun tavoitteisiin, raja-arvoihin, lainsäädäntöön, sekä hankkeeseen, jolle tämä työ on tehty.

2.1 Stara eRetrofit

Stara eRetrofit on hanke, jonka toteuttajana ovat Helsingin kaupunki, Liikelaitos Stara ja Forum Virium Helsinki Oy. Hankkeen tavoitteena on selvittää mahdolliset vaikutukset Staran operatiiviselle toiminnalle ajoneuvokaluston sähköistämisen myötä, selvittää mahdolliset keinot, jotka nopeuttavat ajoneuvokaluston vaihtamista sähköiseksi, sekä tutkia syntyviä kokonaiskustannuksia raskaan ajoneuvon sähköistämisen elinkaaren aikana. (Helsingin kaupunki 2020.)

The logo for STARA is displayed in a bold, blue, sans-serif font. The letters are thick and closely spaced, with a modern, industrial feel.

KUVA 1. Staran logo (STT Viestintäpalvelut Oy 2021)

Hankkeessa hyödynnetään Staran kuorma-autoa, joka on ollut käytössä noin seitsemän vuotta. Kuorma-auto on varusteltu perinteisillä työlaiteilla. Kuorma-auton käyttövoima vaihdetaan dieselistä sähköön. (Helsingin kaupunki 2020.)

Hankkeen toteutus on aloitettu kesällä 2019 ja sen suunniteltu kestoaika on keväeseen 2021. Hankkeelle on myönnetty Helsingin kaupungin innovaatorahas-

ton rahoitus, jonka määrä on 368 500 €. Hankkeessa on mukana aiemmin mainittujen tahojen lisäksi myös Tampereen ammattikorkeakoulu, Teknologian Tutkimuskeskus VTT Oy ja Helsingin kaupungin liikennelaitos HKL. (Helsingin kaupunki 2020.)

2.2 Suunnittelun raja-arvot, tavoitteet ja lainsäädäntö

Kun toteutetaan erilaisia hankkeita tai suunnitelmia, niille yleensä asetetaan tiettyjä raja-arvoja ja tavoitteita liittyen esimerkiksi budjetointiin, mitoitukseen tai muihin hankkeen kannalta tärkeisiin arvoihin. Hankkeen tai suunnitelman kannalta voi myös olla tärkeää tarkastella sitä koskevaa lainsäädäntöä, että myös sen puitteissa hanke on mahdollista toteuttaa.

2.2.1 Raja-arvot ja tavoitteet

Suunnittelulle asetettiin raja-arvoja liittyen koteloinnin mitoitukseen, kiinnitykseen ja jäähdytykseen liittyen. Koteloinnin tulisi sopia kuorma-autossa sille osoitetulle paikalle. Akut tuottavat lämpöä latautuessaan ja niillä on omat raja-arvonsa sille, missä lämpötilassa niitä pystytään lataamaan. Tästä syystä koteloointiin tulisi suunnitella jäähdytys, jotta akkujen lataaminen lämpimissäkin olosuhteissa olisi mahdollista. Tavoitteena oli myös suunnitella kotelointi niin, että se olisi mahdollista aukaista paikallaan ilman, että koko paketti pitäisi purkaa kuorma-autosta irti. Koteloinnin suunnittelussa tulisi ottaa huomioon myös se, että akusto mahtuisi apulaitteineen koteloinnin sisään ja, että akusto olisi mahdollisimman helppo myös poistaa koteloinnista yksi moduuli kerrallaan. Kotelointi tulisi olla kiinnitettynä kuorma-autoon siten, että välimatka koteloinnin, sekä maan välillä olisi riittävä. Akusto ei saa vaurioitua kuorma-auton ajaessa esimerkiksi jyrkkään mäkeen tai isoon kuoppaan.

Suunnitteluun kuuluu oleellisena osana myös koteloinnin kiinnitys kuorma-autoon. Kotelointi kiinnitetään kiinnitystukien avulla kuorma-auton runkoon sille varatulle paikalle etu- ja takarenkaiden väliin kuvassa kaksi näkyvälle paikalle. Runkoon tulee kiinnitystukien avulla kiinni kaksi koteloitua akustoa, toinen kuljettajan puolelle ja toinen apukuljettajan puolelle.

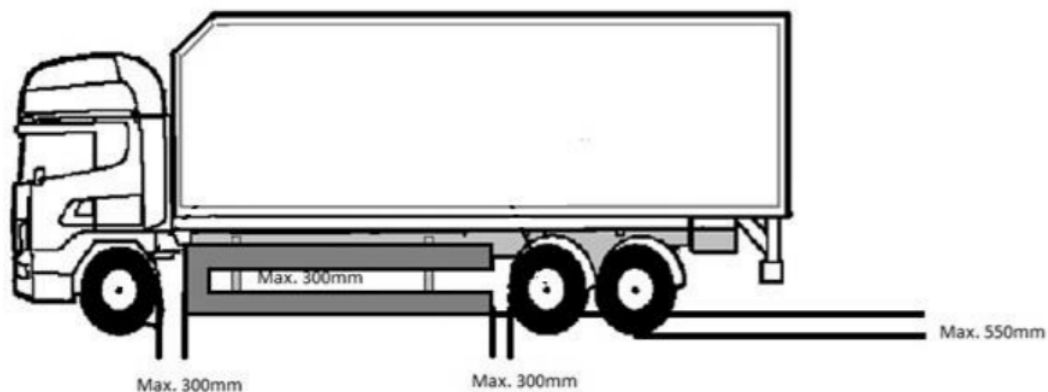


KUVA 2. Koteloinnin sijoituspaikka kuljettajan puolella

2.2.2 Lainsäädäntö

Kotelointi tullaan kiinnittämään kiinnitystukien avulla kuorma-auton runkoon etu- ja takarenkaiden väliin. Tästä syystä koteloinnin suunnittelussa tulee ottaa huomioon ajoneuvolaissa määritelty sivusuoja, kuten kuvasta kolme pystytään tarkastelemaan.

5.2.1 Sivusuojien mitoitus kuorma-autossa



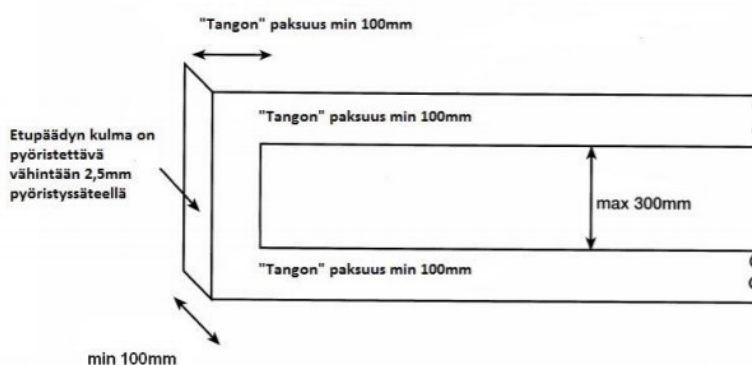
KUVA 3. Sivusuojien mitoitus kuorma-autossa (Trafi liikenteen turvallisuusvirasto 2017, 6)

Ajoneuvoille on olemassa erilaisia ajoneuvoluokkia, jotka määräytyvät ajoneuvolain mukaisesti. Tätä kyseistä lakia täytyy myös soveltaa silloin, kun suunnitellaan sivusuojaa kuorma-autoon. Suora lainaus ajoneuvolain 2 luvun § 10:

N2- ja N3-luokan ajoneuvo (kuorma-auto) on ensisijaisesti tavaran kuljettamiseen suunniteltu ja rakennettu auto, jonka luokittelumassa on suurempi kuin 3,5 tonnia; N2-luokan ajoneuvon luokittelumassa on enintään 12 tonnia ja N3-luokan ajoneuvon yli 12 tonnia. (Ajoneuvolaki 1090/2002.)

Staran tälle hankkeelle osoittaman kuorma-auton luokittelumassa on 26 tonnia, eli kyseisen lainsäädännön mukaan se on N3-luokkaan kuuluva ajoneuvo. Tarkempi ajoneuvolain mukainen rakenne N3-luokkaan kuuluvan ajoneuvon sivusuojalle näkyy kuvassa neljä.

5.2.3 Sivusuojan rakenne N3- ja O4-luokan ajoneuvoissa



KUVA 4. Sivusuojan rakenne N3-luokan ajoneuvossa (Trafi liikenteen turvallisuusvirasto 2017, 6)

Koteloinnin sijoituksessa on myös tärkeää huomioida kokoonpanon maata lähimpänä oleva osa, eli tässä tapauksessa kiinnitystuet. Mitään tarkkaa mitta kuorma-auton maavarakalle ei ole laissa määrätty, vaan ajoneuvolain 4 luvun § 25 mukaan voidaan pitää ”pyörillä varustetussa ajoneuvossa riittävä maavara” (Ajoneuvolaki 1090/2002).

3 KOTELOINNIN SUUNNITTELU

Suunnittelussa etsittiin asetettujen raja-arvojen, tavoitteiden ja loogisen ajattelun kannalta tähän parhaiten soveltuvaa vaihtoehtoa koteloinnin toteuttamiselle. Stara eRetrofit -hankkeen sähkökuorma-auton yksi arvokkaimmista osakokonaisuuksista on sen akusto, ja tämä on myös syytä ottaa huomioon koteloinnin suunnittelussa.

3.1 Koteloinnissa käytettävien vaihtoehtoisten materiaalien valinta

Koteloinnin toteutuksen kannalta materiaalin valinta on oleellisessa roolissa. Tässä tapauksessa koteloinnin käyttötarkoitus ja lopullinen sijoitus autossa vaikuttavat materiaalin lopulliseen valintaan. Valintaan vaikuttaa myös korroosionkestävyys, muokattavuus, paino, materiaalin hinta ja jäädytystä ajatellen sen lämmönjohtamiskyky. Tarkoituksena on siis valita materiaali, joka on käytettynä mahdollisimman tehokas, turvallinen sekä taloudellinen.

Käyttötarkoituksena koteloinnilla on suojata sen sisällä olevaa akustoa. Kotelointi tulee olemaan kiinnitettynä kuorma-auton runkoon eturenkaiden taakse siten, että osa renkaista lentävästä vedestä, suolan, hiekan ja kivien sekoituksesta lentää suoraan kotelointia kohti. Tästä syystä koteloinnissa käytettävän materiaalin on kestävä sekä kiveniskuja, että myös korroosiota. Materiaalin on oltava muokattavissa haluttuun muotoon ja sen on kestävä lämpötilavaihteluita.

Näiden jo mainittujen vaatimusten avulla voidaan miettiä eri materiaalivaihtoehtoja. Kun mietitään vaihtoehtoja käytettävälle materiaalille, niin voidaan reflektoida autoissa yleisesti käytettäviin materiaaleihin. Autoissa yleisesti käytettyjä materiaaleja ovat muovi, alumiini, teräs, titaani ja kupari. Titaani on tähän käyttötarkoitukseen liian kallis materiaali, eli se suljetaan pois vaihtoehdoista. Kuparia käytetään autoissa johdotuksissa ja elektroniikassa, eli se ei sovellu tähän käyttötarkoitukseen. Suljetaan kupari myös pois vaihtoehdoista. (Mayco International. 2019.) Vaihtoehdoista jäljelle jäävät muovi, alumiini ja teräs. Nämä ovat kaikki potentiaalisia vaihtoehtoja ja siksi vaativat vielä hieman tarkempaa tarkastelua.

Ensimmäisenä materiaalivaihtoehtona oli muovi. Muovin etuja ovat, että se on materiaalina kevyt, korroosion- ja kemikaalienkestävä, sillä on hyvä mekaaninen lujuus ja sitä on helppo muotoilla esimerkiksi koneistamalla. Muoveja on käytetty enemmän lämmöneristeenä kuin -johtimena, eli sen haittoja jäähdytystä ajatellen on sen huono lämmönjohtamiskyky. (American Chemistry Council 2010.)

Toisena materiaalivaihtoehtona oli alumiini. Alumiinin etuja ovat, että se on myös materiaalina kevyt, korroosionkestävä, sillä on hyvä muokattavuus, hyvä lämmönjohtamiskyky ja seostettuna tai muokkauslujitettuna sillä on myös hyvä lujuus. Alumiinin haittoja on, että sen käyttämisestä aiheutuvat kustannukset ovat kalliimmat, kuin muovilla. (Carlholt 2015, 2.)

Kolmantena materiaalivaihtoehtona oli teräs. Teräksen etuja ovat, että se on sekä halpa, että kestävä materiaali ja sillä on hyvä muokattavuus. Teräksen haittana on sen korkea ominaispaino. (Väisänen 2007, 28.) Myös sen lämmönjohtamiskyky on huonompi, kuin esimerkiksi alumiinilla (Peda.net n.d.). Teräksen pinta ei itsessään kestä hyvin korroosiota, mutta se on mahdollista käsitellä sitä kestäväksi (Väisänen 2007, 28).

Tarkemman tarkastelun jälkeen voidaan teräs sulkea pois lopullisista vaihtoehdoista korkean ominaispainonsa takia. Viimeisiksi vaihtoehdoiksi jäävät muovi ja alumiini. Molemmat ovat erittäin potentiaalisia valintoja koteloinnissa käytettäväksi materiaaliksi.

3.2 Kotelointi ja jäähdytys

Luvun 3.1 materiaalin valintojen jälkeen kotelon toteutukselle tehtiin kaksi eri suunnitelmaa. Ensimmäinen vaihtoehto oli, että kotelointi toteutettaisiin muovista. Toinen vaihtoehto oli, että kotelointi toteutettaisiin alumiinista. Lopulliseen valintaan vaikuttaa myös vahvasti koteloinnin kokoonpanon muotoilun yksinkertaisuus, kustannukset ja paino. Koska koteloinnin kiinnitystuet tulevat olemaan terästä, on esimerkiksi alumiinisen koteloinnin ja teräksisten kiinnitystukien vä-

lissä tapahtuvat sähkökemialliset reaktiot otettava huomioon. Jäähdytyksen toteutus tapahtuisi eri tavalla alumiinisella ja muovisella, johtuen kyseisten materiaalien lämmönjohtavuudesta. Lopullinen valinta käytettäväksi materiaaliksi tehdään luvussa 3.2.3.

3.2.1 Muovinen kotelointi ja jäähdytys

Ensimmäinen vaihtoehto koteloinnissa käytettävälle materiaalille oli kuitulujitettu muovi, joka täytti aiemmassa tarkastelussa tärkeimmät käytettävälle materiaalille asetetut vaatimukset. Muovin käytöstä löytyy sekä hyviä, että huonoja puolia. Kuten jo aiemmin mainittiin huono puoli muovin käytöstä koteloinnin materiaalina, on sen huono lämmönjohtavuus. Mutta muovilla on myös paljon etuja, jotka tukevat sen käyttömahdollisuutta. Näitä etuja ovat esimerkiksi sen korroosion- ja kemikaalienkestävyys, hyvä muokattavuus ja hyvä mekaaninen lujuus. (American Chemistry Council 2010.) Tässä tapauksessa käytettäisiin E-lasillista lasikuitua. E-lasillisen lasikuidun tiheys on $2,54 \text{ g/cm}^3$, joka on hieman matalampi kuin alumiinilla. (Airasmaa, I., Kokko, J., Komppa, V., Saarela, O. & Skrifvars, M. 2019.)

Muovin huonon lämmönjohtavuuden takia koteloinnin jäähdytystä ei voida toteuttaa johtamalla. Koteloinnin jäähdytys voidaan toteuttaa kierrättämällä ulkoa tulevaa suodatettua ilmaa koteloinnin sisällä. Viileä ilma tulisi sisään koteloinnin etuosan yläreunassa sijaitsevasta reiästä ja jäähtynyt ilma poistuisi koteloinnin takaosan alareunassa olevasta reiästä. Ilman kuitenkin tulisi olla niin puhdasta kuin mahdollista, koska koteloinnin sisällä oleva akusto halutaan pitää puhtaana. Lika ja pöly akkujen päällä toimisi eristeenä, jonka takia esimerkiksi ylikuumentamisen riski kasvaisi. Ilmansuodattimet tulisi huoltaa ja koteloinnin sisusta tarkastaa puhdistuksen varalta tasaisin väliajoin, mikä lisäisi ylläpitokustannuksia tulevaisuudessa.

3.2.2 Alumiininen kotelointi ja jäähdytys

Toinen vaihtoehto koteloinnissa käytettävälle materiaalille oli alumiini, joka myös täytti aiemmassa tarkastelussa tärkeimmät käytettävälle materiaalille asetetut vaatimukset. Myös alumiinisesta vaihtoehdosta löytyy hyviä ja huonoja

puolia. Huonoin puolina alumiinin käytöstä koteloinnin materiaalina on esimerkiksi toteutukselle tulevat korkeammat kustannuskulut verrattuna muoviseen kotelointiin, matala kimmokerroin 70 GPa, heikko kulumiskestävyys, korkea lämpölaajenemiskerroin, sen huonot väsymisenkesto -ominaisuudet ja muovia hie-
man korkeampi ominaispano $2,7 \text{ g/cm}^3$ (Carlholt 2015, 2–3).

Alumiinilla on myös paljon etuja, mitkä puolestaan tukevat sen käyttömahdollisuutta koteloinnin materiaalina. Hyviä puolia alumiinin käytöstä koteloinnin materiaalina on esimerkiksi korroosionkestävyys, hitsattavuus, hyvä muokattavuus, hyvä iskulujuus ja jäähdytyksen kannalta hyvä lämmönjohtavuuskyky (Carlholt 2015, 2).

Kun liitetään kahta tai useampaa eri metallia yhteen, niin näiden metallien väliin syntyy sähkökemiallinen jännitesarja. Kun kahden tai useamman metallin väliin syntyy sähkökemiallinen jännitesarja, niin epäjalompi metalli luovuttaa elektroneja jalommalle metallille. Alumiinisen koteloinnin ja teräksisten kiinnitystuki palkkien väliin syntyy sähkökemiallinen jännitesarja, jolloin alumiini epäjalompana metallina luovuttaa elektroneja ja alkaa hapettumaan. Teräs jalompana metallina vastaanottaa elektroneja ja vastavuoroisesti pelkistyy. (Peda.net. n.d.) Koska kiinnitystuissa käytettävä teräs on jalompaa ja toimii hapettimena alumiinille, niin kiinnitystuet kestävät ruostumista pitempään, kuin kotelointi. Tämä tarkoittaa sitä, että alumiinia voidaan käyttää koteloinnin materiaalina. Sähkökemiallisen jännitesarjan syntymiseltä voidaan myös välttyä oikeanlaisen pintakäsittelyn, kuten esimerkiksi maalaamisen avulla.

Koska akusto halutaan eristää ulkoilmalta siten, ettei se keräisi ylimääräistä pölyä ja likaa, olisi alumiiniselle koteloinnille jäähdytyksen toteuttaminen helpompaa verrattuna muoviseen kotelointiin. Jäähdytys pystyttäisiin toteuttamaan alumiinin hyvän lämmönjohtavuuden avulla niin, että lämpö johdettaisiin akuston puolelta väliseinän takana olevaan erilliseen kanavaan jäähdytyslementtien avulla. Kanavaan tulisi viileää ilmaa kanavan etuosasta ylhäältä ja lämmin ilma poistuisi kanavan takaosasta alhaalta.

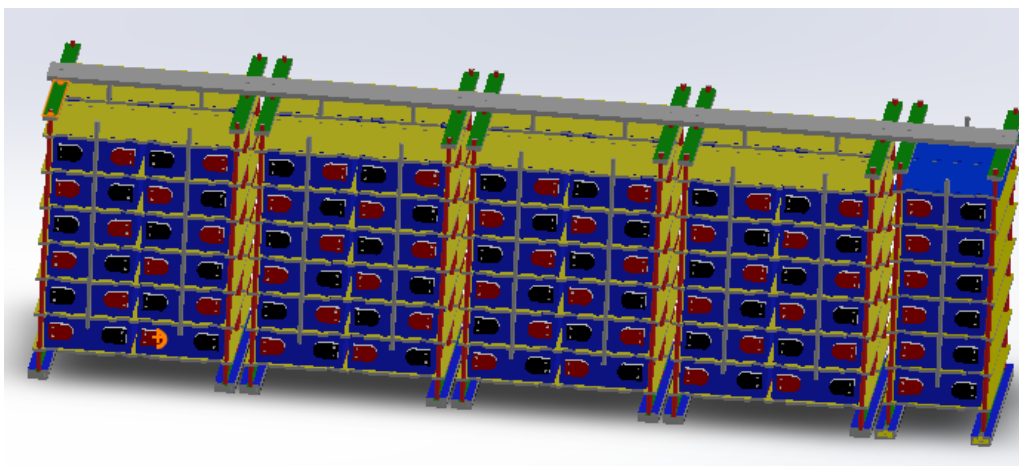
3.2.3 Koteloinnin materiaalin lopullinen valinta

Kun tiedetään annetut raja-arvot, tavoitteet, materiaalivaihtoehdot sekä materiaalivaihtoehtojen käyttöön liittyvät hyvät ja huonot puolet, niin voidaan tehdä lopullinen valinta käytettävästä materiaalista. Kun mietitään koteloinnin jäähdytyksen toteutusta, jotta saataisiin kaikki lika ja pöly pidettyä koteloinnin ulkopuolella on se järkevin toteuttaa johtumalla. Tästä syystä valitaan koteloinnissa käytettäväksi materiaaliksi alumiini.

3.3 Akusto

Kun suunnitellaan kuorma-autoa, jonka käyttövoimana toimii sähkö, on akusto isossa roolissa. Akusto tuo paljon painoa kuorma-autolle. Mitä isompi on akusto, sitä enemmän on energiaa liikkumista varten, mutta myös vastaavasti tarvitaan enemmän energiaa liikkumista varten, koska painoa tulee lisää. Akusto on suunniteltava siten, että sähköenergia riittää, ja siten, ettei akusto kuitenkaan painaisi liikaa.

Akustoja tulee yhteensä kaksi, ja ne tulevat kuorma-auton runkoon kiinnitettyjen kotelointien sisälle, toinen kuljettajan puolelle ja toinen apukuljettajan puolelle. Yhdessä akustossa on yhteensä 9 moduulia ja yhdessä moduulissa on 12kpl akkua, eli akkuja tulee yhteensä 108kpl yhteen akustoon. Kaiken kaikkiaan akkuja kahteen akustoon tulee yhteensä 216kpl. Yksi akku painaa $(5,35 \pm 0,2)$ kg, eli yhteensä kahdesta akustosta tulee painoa $(1155,6 \pm 43,2)$ kg. Yhden akuston paino on siis $(577,8 \pm 21,6)$ kg. (Lithium System 2021.)



KUVA 5. Havainnollistava CAD-mallinnus akustosta (Mikael Salokangas 2021)

3.4 Koteloinnin kiinnitys

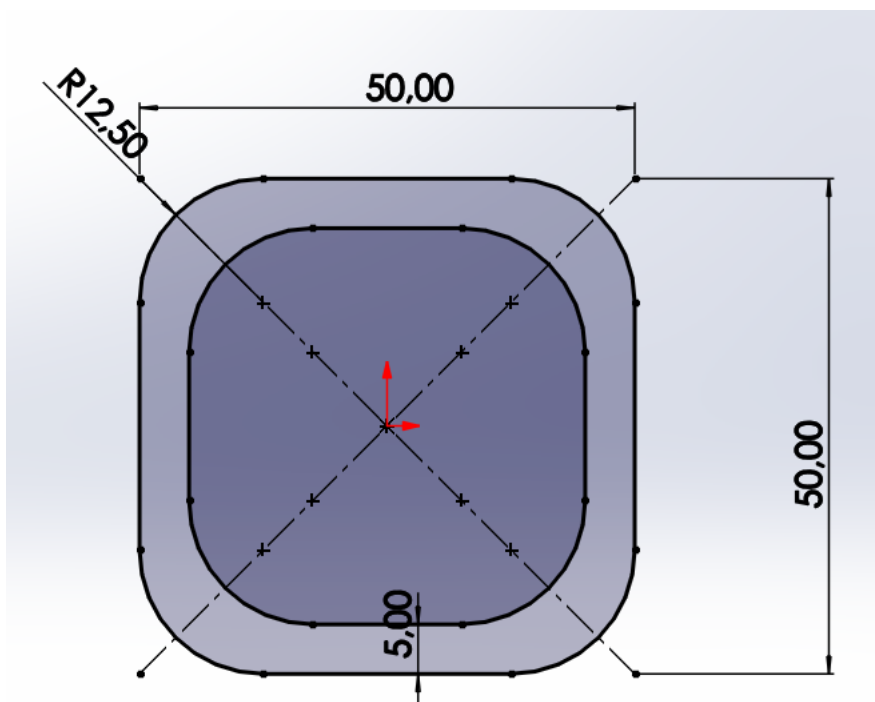
Koteloituja akustoja tulee olemaan kaksi kappaletta ja ne kiinnitetään kiinnitystukien avulla kuorma-auton runkoon. Kiinnityskohdat ovat kuorma-auton etu- ja takarenkaiden välissä, toinen kuljettajan puolella ja toinen apukuljettajan puolella. Koteloinnin kiinnitystukien palkkeina käytetään 50x50x5 neliöputkea. Neliöputki on 50 mm korkea, 50 mm leveä ja sen seinämäpaksuus on 5 mm, kuvan viisi mukaisesti. Pyöritykset tulevat Kontinon varastoluettelon mukaan,

$$R = 2,5 * t \quad (1)$$

kun seinämävahvuus t on yli 4 mm. Eli pyöritykset saadaan laskettua kaavan yksi

$$R = 2,5 * 5 \text{ mm} = 12,5 \text{ mm} \quad (2)$$

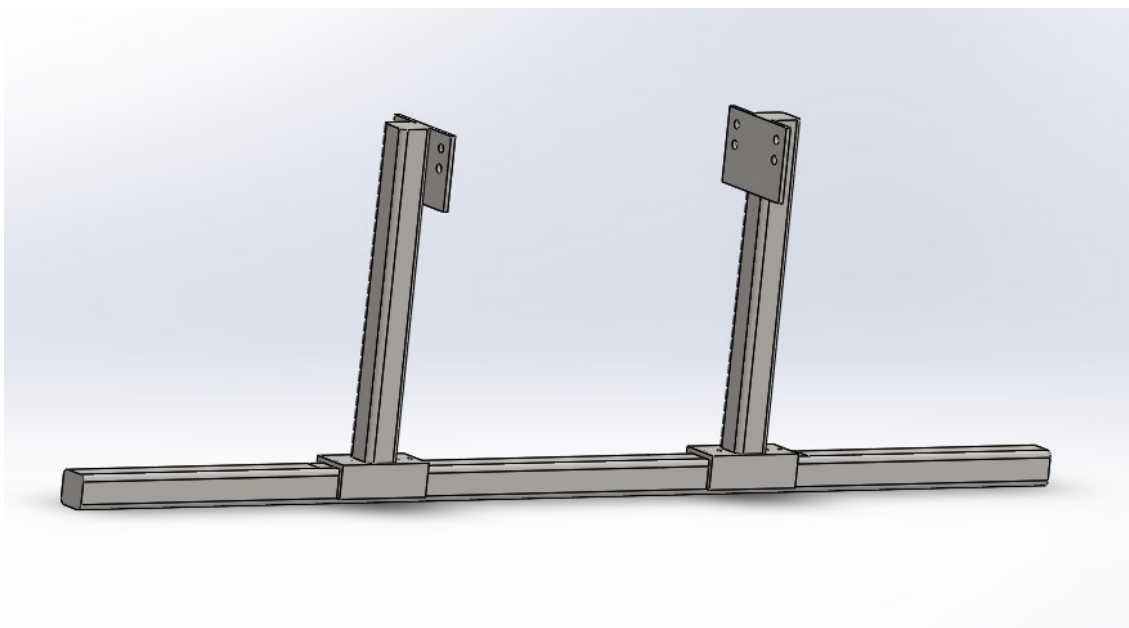
mukaisesti. (Kontino 2019, 42.)



KUVA 5. Neliöputken mitoitus

Liitteessä kaksi olevan Kontinon varastoluettelon mukaisesti teräslajiltaan S355J2H 50x50x5 neliöputkipalkki on EN 10219-1 ainestandardin kylmämuovattu rakenneputki, jonka myötölujuus on 355 N/mm^2 (Kontino 2019, 42; SFS-EN 10219-1 2006).

Kiinnitystukia tulee olemaan yhteensä viisi kappaletta, ja yhdessä kiinnitystuenassa on kaksi palkkia pystyasennossa kiinnitettynä yhteen vaaka-asennossa olevaan palkkiin pulttiliitoksilla kuvan seitsemän mukaisesti. Kiinnitystuki kiinnitetään kuorma-auton runkoon pystyasennossa olevien palkkien yläpäästä myös pulttiliitoksilla. Pulttiliitoksien avulla saadaan kokoonpanosta helpommin kasattava ja purettava. Yhdessä kiinnitystuen alapäänliitoksessa käytetään neljää M8x100 kokoista 8.8 lujuusluokan DIN 931 pulttia, neljää M8 kokoista 10.9 lujuusluokan DIN 985 lukitusmutteria ja kahdeksaa M8 kokoista DIN 125A aluslaattaa. Yhdessä kiinnitystuen yläpäänliitoksessa käytetään neljää M16x60 kokoista 8.8 lujuusluokan DIN 931 pulttia, neljää M16 kokoista 10.9 lujuusluokan DIN 985 lukitusmutteria ja kahdeksaa M16 kokoista DIN 125A aluslaattaa. (Ruuvikeskus 2021; IKH n.d.) Pulttiliitosten kestävyys tarkastelu on käyty läpi kohdassa 4.1.1.



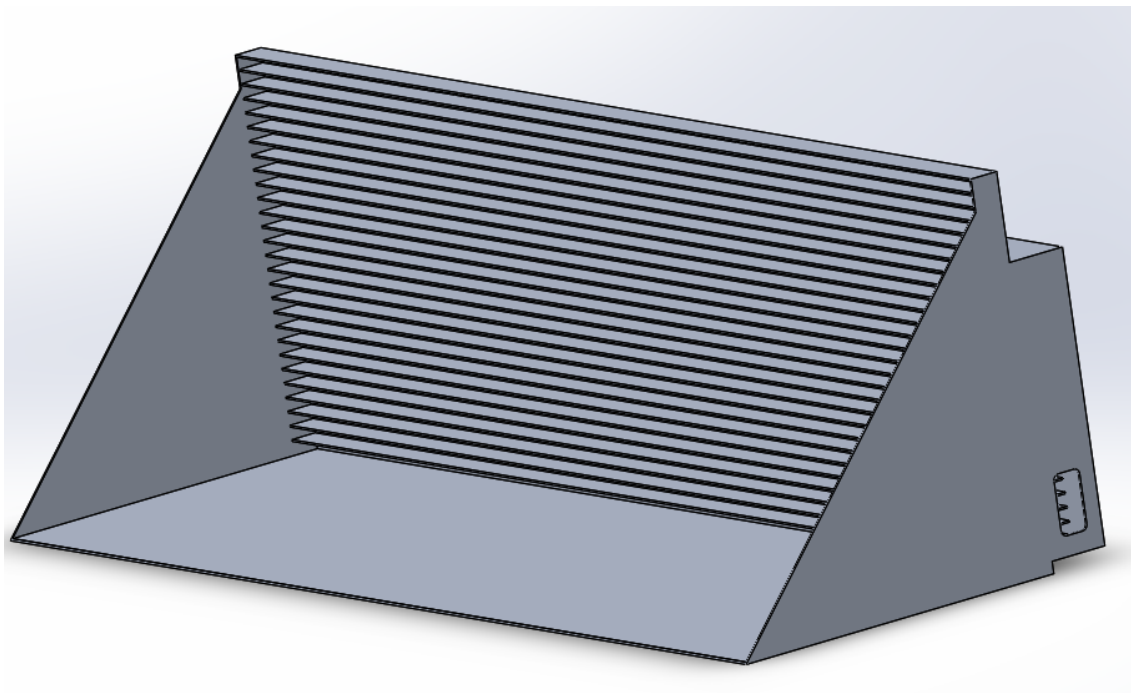
KUVA 7. Yhtä kiinnitystukea havainnollistava CAD-mallinnus

3.5 CAD-mallinnus

Kotelointien mallinnuksessa käytettiin SolidWorks 3D-suunnitteluohjelmistoa. Ohjelmiston avulla mallinnettiin alumiiniset koteloinnit, kiinnitystuennat ja näiden kokoonpano. Mallinnuksen perustana käytettiin aiemmin asetettuja raja-arvoja.

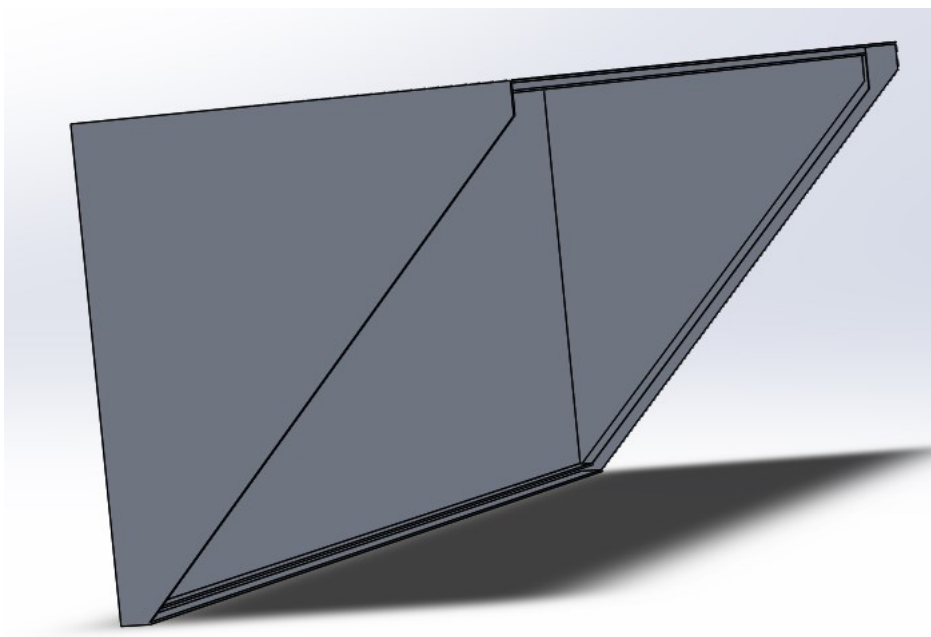
3.5.1 Alumiinisen koteloinnin CAD-mallinnus

Alumiininen kotelointi mallinnettiin kahdessa osassa. Ensin mallinnettiin pohja ja tämän jälkeen mallinnettiin kansi. Pohjaosuuteen kuului koteloinnin jäähdytyskanava, pohjataso sekä akuston ja jäähdytyskanavan välinen väliseinä. Pohjaan mallinnettiin tila akustolle, jäähdytyskanavalle ja näiden väliselle seinälle mallinnettiin jäähdytyselementit. Jäähdytyselementit ovat 45 mm leveitä ja 3 mm paksuja paloja alumiinista. Palat ovat hitsattuna molemmin puolin kanavan ja akuston väliselle seinälle 20 mm välein, kuvan kahdeksan mukaisesti. Koteloinnin pohja on 3 mm paksua anodisoitua EN AW-5005A alumiinilevyä (Al-Men Oy, n.d).



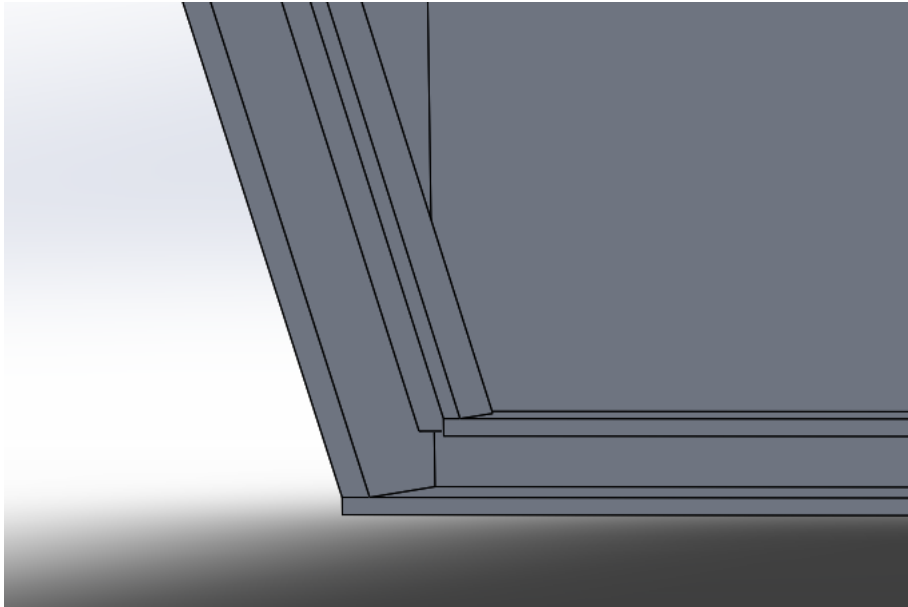
KUVA 8. Pohjaosuuden CAD-mallinnus jäähdytyslementteineen

Kansiosuuteen kuului koteloinnin katto ja ulkoseinä. Kansi ja pohja lukitaan toisiinsa salpalukkojen avulla, joiden avulla koteloinnista saadaan tiivis. Kansi on 3 mm paksua alumiinista EN-AW 5754 turkkilevyä five bar kuviointilla (Al-Men Oy, n.d). Kuviointi tuo kansiosuuteen lisää jäykkyyttä, mikä estää värisemisen ajon aikana.



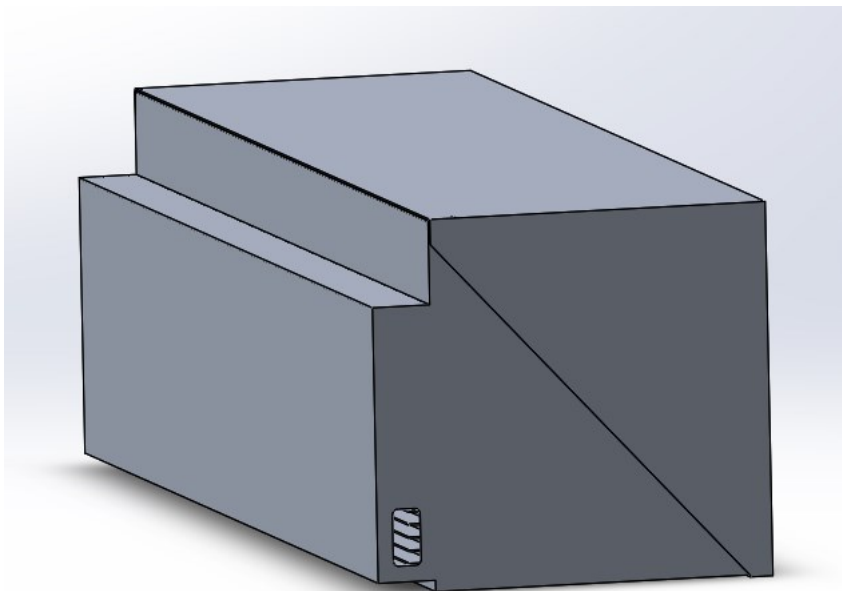
KUVA 9. Kansiosuuden CAD-mallinnus

Koska koteloinnin tulee olla tiivis, mallinnettiin kansiosuuteen urat tiivisteille kuvan kymmenen mukaisesti. Koska tiivisteuran leveys on 10 mm, niin voidaan kansi- ja pohjaosuuden välissä käyttää korkeintaan 10 mm leveää tiivistenauhaa, kuten esimerkiksi 10x10 EPDM solukuminauhaa (Etra Oy, 2021). Tiivistenauhalla on hyvä olla myös korkeutta riittävän tiivistyksen takaamiseksi.



KUVA 10. Kansiosuudessa oleva ura tiivisteelle

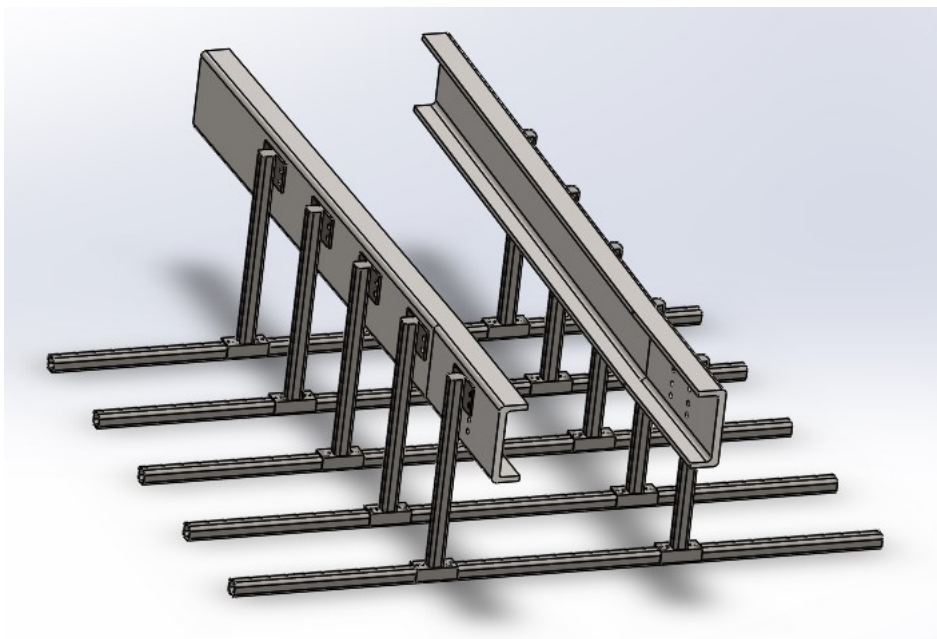
Mallinnetun koteloinnin ulkoa mitattu kokonaisleveys on 708 mm, kokonaispituus on 1990 mm ja kokonaiskorkeus on 656 mm. Koteloinnin jäähdytiskanavan ulkoa mitattu korkeus on 483 mm, leveys 103 mm ja pituus 1990 mm. Jäähdytiskanava on sijoitettu 20 mm ylöspäin koteloinnin pohjasta kiinnitystukien liitosten takia.



KUVA 11. Alumiinisen koteloinnin kokoonpano

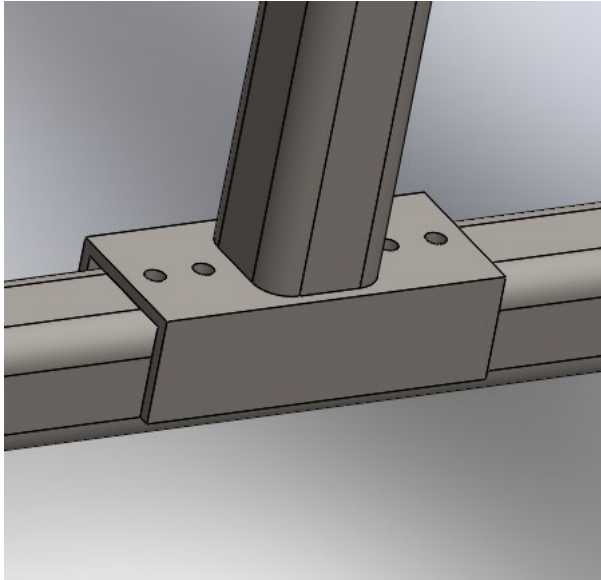
3.5.2 Kiinnityksen ja kiinnityskokoonpanon CAD-mallinnus

Kiinnitystuet kiinnitettiin kuorma-auton runkoon noin 400 mm välein kuvan 12 mukaisesti. Kuvassa on viiden kiinnitystuen lisäksi mallinnettuna hankkeessa käytettävän kuorma-auton runko havainnollistamisen helpottamiseksi varten.



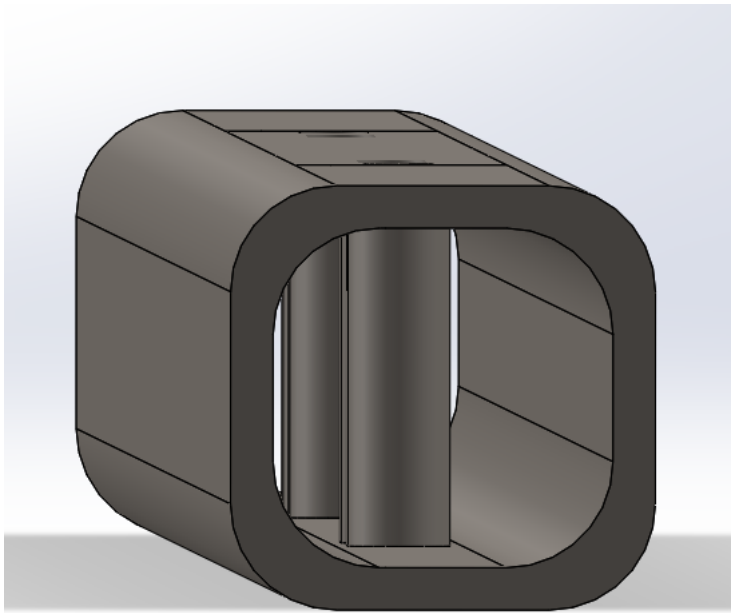
KUVA 12. CAD-mallinnetut kiinnitystuet kiinni kuorma-auton rungossa

Kiinnitystuen pystypalkin alapää on kiinni alapalkissa neljällä M8 kokoisella pulttiliitoksella. Pystypalkin alapään kiinnike on U:n muotoinen kuvan 13 mukaisesti, jotta sen keskittäminen alapalkkiin olisi helpompaa. Kiinnike on 5 mm paksu, 140 mm leveä ja 42,5 mm korkea molemmilta puolilta.



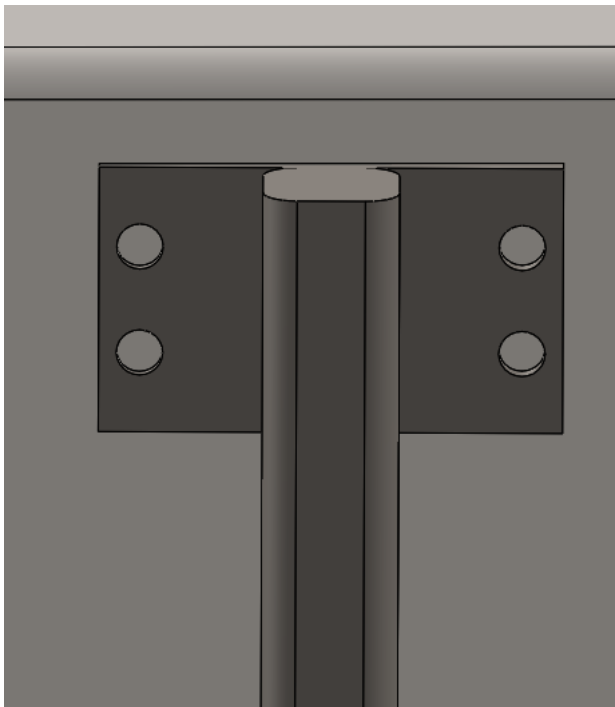
KUVA 13. Alapään pulttiliitoksen CAD-mallinnus

Lujuuden takaamiseksi lisättiin pysty- ja alapalkin pulttiliitoksien kohdalle 2 mm paksut holkit kuvan 14 mukaisesti. Nämä holkit takaavat sen, että kun pultteja kiristetään, niin palkki ei puristu kasaan. Holkeille porataan alapuolelta sopiva reikä ja työnnetään sisään vastaamaan palkin sisäpuolen yläseinämää. Holkki jää palkin pohjapinnan kanssa samalle tasolle. Reiän ympärille laitetaan iso aluslevy ja pultti kiristetään paikalleen.



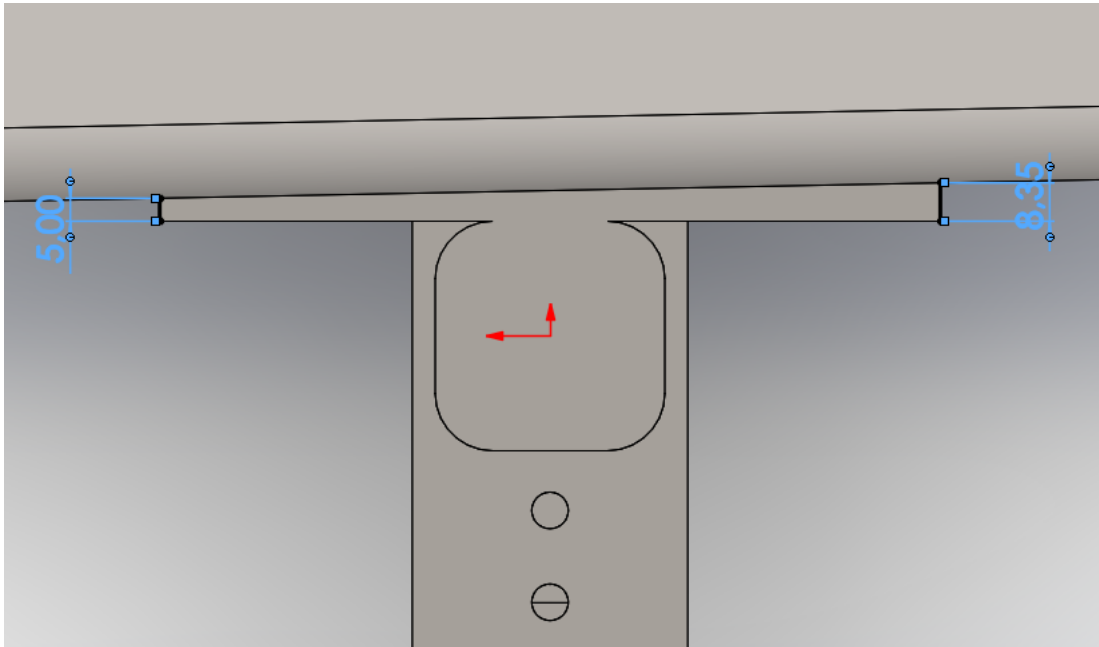
KUVA 14. Holkit alapalkin sisällä

Kiinnitystuen pystypalkin yläpää on kiinni kuorma-auton rungossa neljällä M16 kokoisella pulttiliitoksella. Yläpään kiinnityslaippa on 170 mm leveä ja 100 mm korkea.



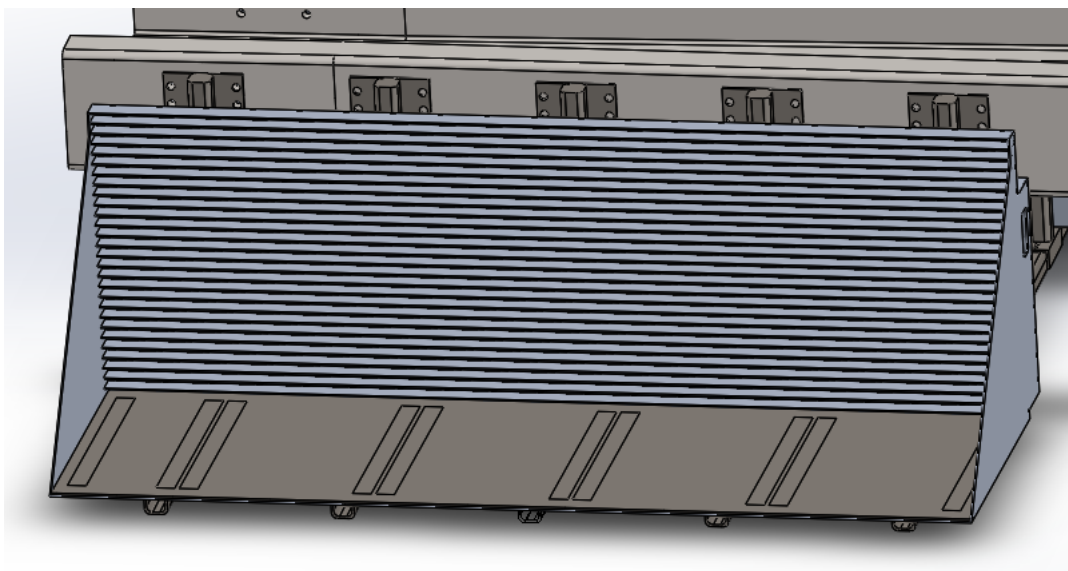
KUVA 15. Yläpään pulttiliitoksen CAD-mallinnus

Kuorma-auton runko avautuu takapästä etupäähän mentäessä noin 1,13 astetta. Tämä täytyy huomioida kiinnityksessä, tarkemmin ottaen kiinnitystukien yläpäiden laipoissa. Laippa on muotoiltava kuvan 16 mukaisesti, eli toiselta reunalta paksummaksi kuin toiselta, jotta palkit saataisiin kokoonpanossa suoraan.



KUVA 16. Kiinnitystuen yläpään laipan mitoitus

Akuston tukijalkojen ja koteloinnin kiinnitystukien osuttaminen kohdalleen on haastavaa kuorma-auton rungossa olevien kiinnitysreikien takia. Tästä syystä täytyy koteloinnin pohjalle lisätä kiinnitystä varten pohjalevy. Pohjalevyn ansiosta akusto ja koteloinnin kiinnitystuet voidaan kiinnittää pulttiliitoksilla omista rei'istä kotelointiin. Levy on 5 mm paksu 1974 mm pitkä ja 594 mm leveä S355J2G3 ainestandardin EN 10025 t kuumavalssattua rakenneterästä (BGroup, n.d).



KUVA 17. CAD-mallinnettu pohjalevy koteloinnin sisällä

Lopullisessa kokoonpanossa kotelointi asetetaan kiinnitystukien päälle keskitetysti siten, että koteloinnin takaseinä vastaa kiinnitystukien pystypalkkia vasten kuvan 18 mukaisesti. Näin saadaan akuston ja koteloinnin tuoma paino jaettua tasaisesti kiinnitystuille.

4 LUJUUSTARKASTELU

Koteloinnin kiinnitystuissa käytettyihin palkkeihin ja niiden liitoskohtiin kohdistuu erilaisia voimia kuorma-auton ollessa sekä paikallaan, että ajossa. Lujuustarkastelun tarkoituksena on tutkia näiden suunniteltujen rakenteiden ja materiaali- valintojen kestävyyttä, selvittää pulttiliitoksiin ja palkkeihin vaikuttavat voimat, sekä tarvittaessa tehdä muutoksia valintoihin.

4.1 Lujuuslaskennan teoria

Tavoitteena lujuuslaskennassa on varmistaa rakenteen kestävyys. Akustot kiinnitetään viiden kiinnitystuen päälle ja yksi akusto painaa $(577,8 \pm 21,6)$ kg. Kun halutaan varmistaa kestävyys, mennään painavimman mahdollisuuden mukaan. Yhden akuston painoksi voidaan arvioida 599,4 kg. SolidWorks-ohjelmiston mukaan yksi mallinnettu alumiininen kotelointi painaa 118,40 kg, sekä teräksinen pohjalevy koteloinnin sisällä painaa 46,15 kg. Kun kotelointia, akustoja ja pohjalevyjä on kaikkia kaksi, niin kokonaismassa saadaan laskettua kaavan kolme

$$m_{\text{kok}} = 2 * (599,4 \text{ kg} + 118,40 \text{ kg} + 46,15 \text{ kg}) = 1499,26 \text{ kg} \quad (3)$$

mukaisesti. Kuorma-auton ollessa paikallaan vaikuttaa kiinnitystukiin alaspäin putoamiskiihtyvyyttä g , jonka taulukkoarvo on $9,81 \text{ m/s}^2$. Alaspäin vaikuttava voima F saadaan laskettua, kun tiedetään kokonaismassa ja putoamiskiihtyvyyttä kaavan

$$F = m_{\text{kok}} * g \quad (4)$$

mukaisesti. Sijoittamalla lukuarvot muuttujien tilalle saadaan yhtälön ratkaisuksi,

$$F = 1499,26 \text{ kg} * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 14707,7406 \text{ N} \quad (5)$$

eli alaspäin vaikuttavan voiman suuruus on pyöristettynä 14,71 kN. (Mäkelä, M., Soininen, L., Tuomola, S. & Öistämö, J. 2018, 91.) Yhdelle puolelle vaikuttavan voiman suuruus on puolet tästä, eli 7,36 kN.

Kun otetaan huomioon käyttökohde, niin voidaan todeta, että kiinnitystukiin ja pulttiliitoksiin vaikuttavat voimat eivät ole pelkästään staattisia, kuten yllä olevat laskutoimitukset. Koska kiinnitystukiin vaikuttavat voimat ovat dynaamisia, on simuloinnissa varmuus saatava vähintään kaksinkertaiseksi kestävyuden takaa-
miseksi.

4.1.1 Pulttiliitokset

Kiinnitystuissa olevat pulttiliitokset tuli mitoittaa kestävänsä dynaamista rasi-
tusta. Pulttiliitoksia oli kiinnitystuen pystypalkin sekä ylä-, että alapäässä. Koska kuorma-auton runkoon ei haluttu porata lisää reikiä, niin määräyty pystypalkin yläpäähän pulttien koko kuorma-auton rungossa valmiina olevien reikien mukaan. Koska kiinnitystukia suunniteltiin yhteensä viisi kappaletta, niin kohdan 4.1 las-
kentojen mukaan kohdistuu yhteen kiinnitystukeen 1,472 kN kokoinen voima.

Kun tiedetään kiinnitystukeen vaikuttava voima, voidaan määrittää pulttiliitok-
sissa käytettävien pulttien koko kuvan 18 avulla. Pystypalkin yläpäässä oli yh-
teensä neljä pulttia, eli 1,472 kN voima jakautuu niille tasaisesti. Kun jaetaan
yhteen kiinnitystukeen vaikuttava voima näille neljälle pultille, niin saadaan yh-
teen pulttiin vaikuttavan voiman suuruus, mikä oli 368 N.

Yläpäähän pulstin kierteen koko voitiin määrittää, kun yhteen pulttiin vaikuttava
voima oli tiedossa. Valitaan kuvan 18 taulukosta yksi pykälä suurempi voima,
kuin mitä yhteen pulttiin vaikuttaa, eli 400 N. Koska yläpäähän pulttiin vaikuttava
voima on leikkauskuormitusta, niin siirrytään taulukossa neljä pykälää suurem-
paan lukuun, eli 2500 N. Koska pulstin kiristys tapahtuu käsin tai paineilmatyöka-
lulla, niin siirrytään taulukossa vielä kaksi pykälää suurempaan lukuun, eli 6300
N. Tarkoituksena on käyttää 8.8 lujuusluokan pultteja. Yläpäähän pulttiliitoksessa
käytetään rungossa olevien reikien takia M16 kokoista pultteja, jotka taulukon
mukaan voidaan todeta riittäviksi. (Lee, Y-L., Barkey, M. E. & Kang, H-T. 2012,
471–472.)

Alapään pultin kierteen koko voitiin määrittellä samalla tavalla, kun yhteen pulttiin vaikuttava voima oli tiedossa. Valitaan taas kuvan 18 taulukosta yksi pykälä suurempi voima, kuin mitä pulttiin vaikuttaa, eli 400 N. Koska alapään pulttiin vaikuttaa dynaamista ja epäkeskeistä vetokuormitusta, niin siirrytään kaksi pykälää suurempaan lukuun, eli 1000 N. Koska pultin kiristys tapahtuu käsin tai paineilmatyökälulla, niin siirrytään taulukossa vielä kaksi pykälää suurempaan lukuun, eli 2500 N. Tarkoituksena on käyttää 8.8 lujuusluokan pultteja. Valitaan alapään pulttiliitoksissa käytettäväksi M8 koon pultteja, jotka voidaan taulukon mukaan todeta riittäviksi. (Lee, Y-L., Barkey, M. E. & Kang, H-T. 2012, 471–472.)

Table 12.8: Estimate of Bolt Diameter

Force (N)	Nominal Diameter (mm)		
	Strength Grade		
	12.9	10.9	8.8
250			
400			
630			
1000	3	3	3
1600	3	3	3
2500	3	3	4
4000	4	4	5
6300	4	5	6
10,000	5	6	8
16,000	6	8	8
25,000	8	10	12
40,000	10	12	14
63,000	12	14	16
100,000	16	18	20
160,000	20	22	24
250,000	24	27	30
400,000	30	33	36
630,000	36	39	

Source: Adapted from VDI 2230, published by Beuth Verlag GmbH, Berlin (2003).

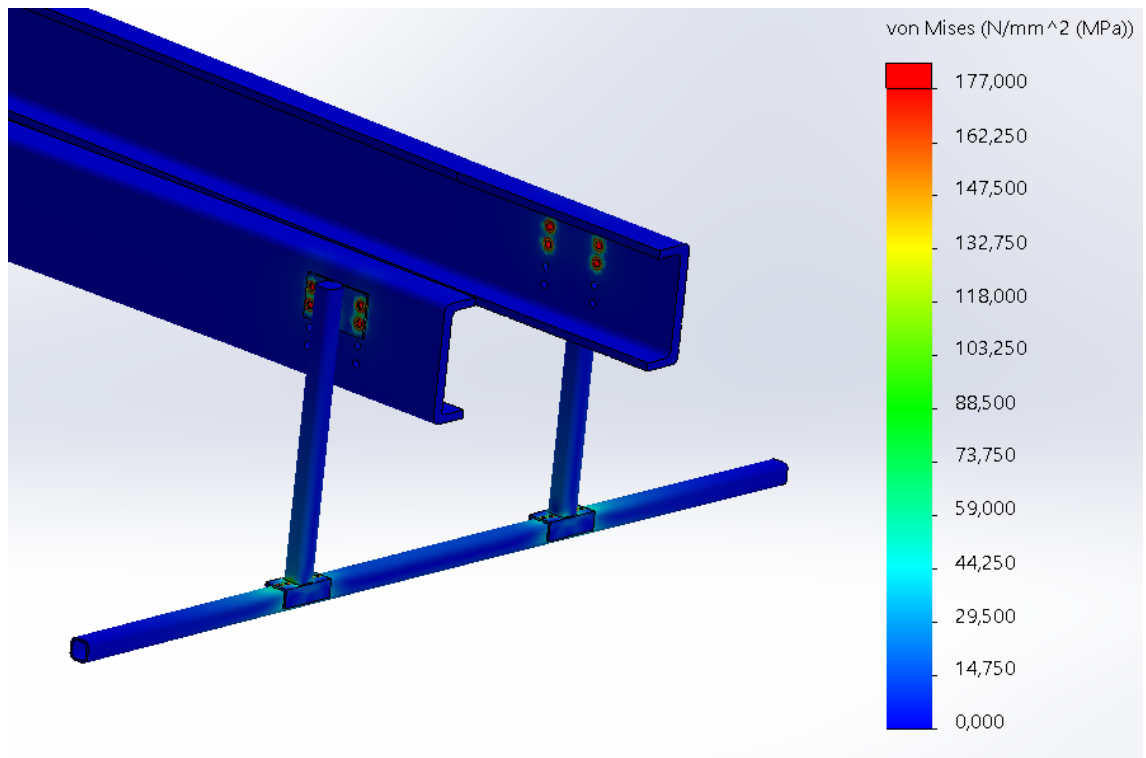
KUVA 18. Pulttien kierteiden halkaisijan määrittystaulukko (Lee, Y-L., Barkey, M. E. & Kang, H-T 2012)

4.2 Simulointi

Rakenteiden simulointi tehtiin SolidWorks-ohjelmiston simulation-työkalun avulla. Simulation-työkalu käyttää FEA-laskentaa, eli Finite Element Analysis-menetelmää, joka tarkoittaa suomennettuna elementtimenetelmällä suoritettua laskentaa. Tämän avulla voidaan arvioida tietokoneella mallinnettujen CAD-osien kestävyyttä reaali maailmassa. (SolidWorks 2019, 1.)

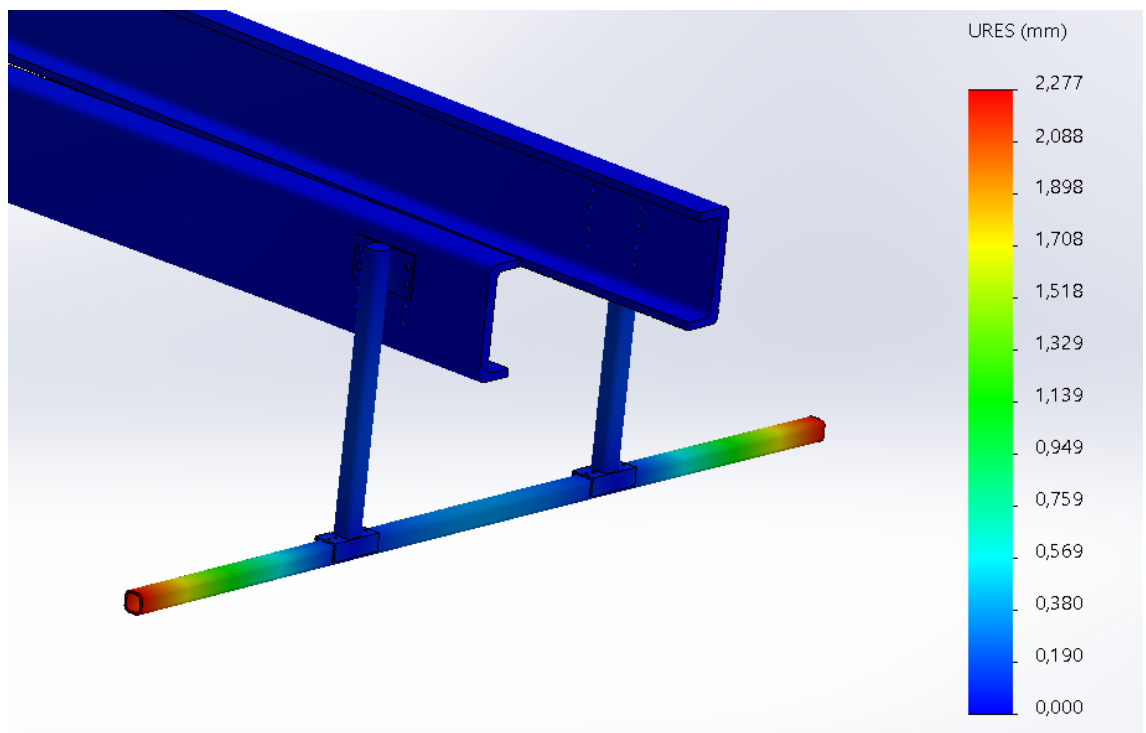
Simulaatiossa kuorma-auton runko oli kiinnitetty toisesta päästä kiinteästi ja toisesta päästä nivelellisesti. Alapalkkia kuormitettiin 1600 N voimalla molemmilta puolilta runkoa 605 mm matkalta. Pystypalkin yläpää oli kiinni rungossa neljällä M16 kokoisella pulttiliitoksella ja alapää oli kiinni alapalkissa neljällä M8 kokoisella pulttiliitoksella. Pystypalkin ylä- ja alapään liitoksien välissä vaikuttaa 0,1 kitka. M16 kokoisille pulttiliitoksille asetettiin aksiaaliseksi esikivistysvoimaksi 121700 N, ja M8 kokoisille pulttiliitoksille asetettiin aksiaaliseksi esikivistysvoimaksi 2800 N (Lee, Y-L., Barkey, M. E. & Kang, H-T. 2012, 488).

Suurimmat kuormitukset kiinnitystuissa olivat rungon ja pystypalkin, sekä pystypalkin ja alapalkin liitoskohdissa. Simulaatiossa suurimmat rasitukset tulivat pultteille asetetuista esikivistysvoimista, jotka voidaan tässä tarkastelussa jättää huomioimatta. Suurin vaikuttava jännitys kiinnitystuissa on kuvan 19 mukaisesti noin 50–88 N/mm² väliltä. Koska kiinnitystuissa käytettävän teräksen myötölujuus on 355 N/mm², niin voidaan todeta, että rakenteen varmuus on noin nelinkertainen.



KUVA 19. Kiinnitystuen von Mises-jännitykset 1600 N per puoli kuormituksella

Suurimmat taipumat rakenteessa tulivat alapalkin molempiin päihin. Alapalkki taipui simulaatiossa molemmista päistä 2,277 mm.



KUVA 20. Kiinnitystuen taipumat 1600 N per puoli kuormituksella

4.3 Valmistusmenetelmä

Koteloinnin ja kiinnityksen valmistuksessa tulee käyttää perinteisiä valmistusmenetelmiä. Koteloinnissa käytettävä alumiini ostetaan valmiiksi mittoihin leikatuihin paloihin. Leikkausmenetelmänä voidaan käyttää esimerkiksi abrasiivi vesi-leikkausta, joka perustuu veden ja hiekan hiovaan voimaan. Tämän avulla vettä ja abrasiivihiekkaa keskitetään noin 4000 bar paineella 0,9 mm alueelle. (Turun Water Cut Oy n.d.) Tiiviin ja kestävä koteloinnin takaamiseksi paras vaihtoehto on liittää leikatut alumiinilevyt toisiinsa hitsaamalla.

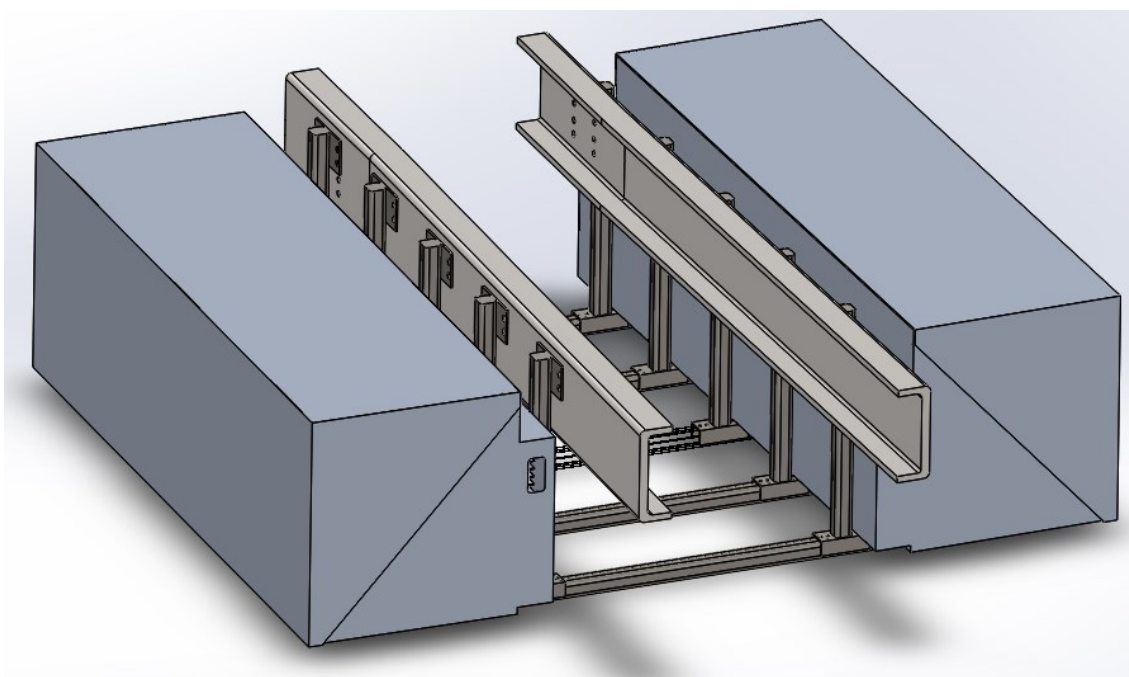
Kiinnitystuissa käytettävää neliöputkea voidaan ostaa joko 6 metriä tai 12 metriä pitkinä putkina. Neliöputkista leikataan sopivan mittaisiksi esimerkiksi kulmahiomakoneella käyttäen katkaisulaikkaa. Pystypalkkien ylä- ja alapäähän hitsataan kiinnityslaput pulttiliitoksia varten. Neliöputkien päihin hitsataan paikkalappu, jotta reiät saadaan umpeen.

Koteloinnissa käytetään pintakäsittelyltään anodisoitua alumiinia. Kiinnitystuet voidaan ruiskumaalata, jotta pinnasta tulee siisti sekä kulutusta ja korroosiota kestävä.

5 TULOKSET JA POHDINTA

5.1 Tulokset

Suunnittelun lopputulokseksi saatiin kuvan 21 mukainen kokoonpano. Akustot on sijoitettu tasaisesti molemmille puolille runkoa omiin kotelointeihinsa kuorma-auton tasapainon säilyttämiseksi. Yhtä toteutettua kotelointia kohden lisätään yhteensä neljä kappaletta salpalukkoja kannen kiinnitystä varten. Salpalukkoja kiinnitetään kaksi koteloinnin molempiin päätyihin. Jokainen salpalukko tulee olla erikseen lukittavissa riippulukolla.



KUVA 21. Lopullisen kokoonpanon CAD-mallinnus, keskellä mallinnettu kuorma-auton runko

Kuten luvussa 4.2 läpikäydyssä simulointi prosessissa saatiin kiinnitystukien von Mises jännityksille lopputulos 50–88 N/mm² väliltä kuvan 19 mukaisesti. Varmuus rakenteessa on moninkertainen, koska kiinnitystukien materiaalien myötölujuus on 355 N/mm². Taipumia kiinnitystukien alapalkkien päissä oli 2,277 mm kuvan 20 mukaisesti. Liitteen yksi laskelmien mukaisesti alapalkki kestää taivutusta 196,25 mm.

5.2 Pohdinta

Tarkoituksena tällä opinnäytetyöllä oli tuottaa suunnitelma sähkökuorma-auton akuston koteloinnille. Opinnäytetyöhön kuului jäähdytetyn koteloinnin ja kiinnityksen suunnittelu, käytettävien materiaalien valinta, sekä lujuustarkastelun tekeminen. Koska koteloinnin toteutus ei kuulunut osaksi opinnäytetyötä, niin opinnäytetyön jälkeen työ jatkuu fyysisellä toteutuksella.

Prosessi aloitettiin sopimalla alustavia raja-arvoja opinnäytetyölle. Raja-arvot oli aluksi suuntaa antavia, mutta työn edetessä niitä muuteltiin ja alettiin lyömään lukkoon. Toivomuksena oli, että koteloinnista tulisi avattava, mutta tiivis ja jäähdytetty.

Koteloinnin muotoiluun oli erilaisia vaihtoehtoja. Tässä tapauksessa parhaaksi vaihtoehdoksi valikoitui koteloinnissa käytetty muotoilu, jonka avulla kotelointia avatessa poistuu siitä samalla etuseinä ja kansi. Kyseisen muotoilun ansiosta myös akuston takaosaan, sekä ohjauslaitteistoon pääsee helposti käsiksi.

Koteloinnin jäähdyttäminen toteutettiin johtamalla jäähdytyslementtien avulla akuston puolelta jäähdytyskanavaan koteloinnin taakse. Johtamalla tapahtuvan jäähdytyksen avulla ei akuston puolelle pääse tuuletuksen takia kertymään pölyä.

Opinnäytetyö eteni suunnitellusti. Raporttia kirjoitettiin aina sen jälkeen, kun pohjatyöt, kuten CAD-mallinnukset ja lujuustarkastelut etenivät. Ennalta arvaamattomia ongelmia kohdattiin lujuustarkasteluissa, joista selvittiin opettajan antaman tukiopetuksen avulla. Tarkkojen mitoituskuvien tuottaminen ei kuulunut osaksi opinnäytetyötä, koska muutokset mitoituksissa ovat todennäköisiä, kun fyysinen toteutus aloitetaan.

LÄHTEET

Helsingin kaupunki. 2020. Stara eRetrofit. <https://www.hel.fi/helsinki/fi/kaupunki-ja-hallinto/strategia-ja-talous/innovaatorahasto/hankkeet/stara+eretrofit>

Trafi liikenteen turvallisuusvirasto. 2017. Alleajosujoaohje. PDF. Luettu 1.2.2021 <https://www.traficom.fi/sites/default/files/media/file/Alleajosujoaohje.pdf>

Ajoneuvolaki 1090/2002. Luettu 2.2.2021 <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2002/20021090#L2>

Lithium System. 2021. LFP 277AH NEW!. Luettu 2.2.2021. <https://www.lithiumstorage.eu/Joomla/index.php/en/produkte-lithium-storage/lithium-batterien-etc-series/lfp277-etc.html>

Mayco International. 2019. What Are Cars Made Of? 10 Of The Top Materials Used In Auto Manufacturing. Blogi. Julkaistu 18.7.2019. Luettu 15.1.2021. <https://maycointernational.com/blog/what-are-cars-made-of/>

Carlholt, E. 2015. Alumiiniseokset. Höök, T. (suom.) Tampere: ValuAtlas. https://www.valuatlas.fi/sites/default/files/docs/metals_aluminum_FI.pdf

Peda.net. n.d. Lämmönjohtavuuksia. Luettu 15.1.2021 <https://peda.net/joensuu/yli%C3%A4koulut/pielisjoen-koulu/oppiaineet/fysiikka-ja-kemia/7-luokat/7e/efysiikka-8/taulukot/>

Väisänen, P. 2007. Teräs. Perustietoa arkkitehtiopiskelijalle. Espoo: TKK Arkkitehtiosasto rakennusoppi 2007. http://www.terasrakenneyhdistys.fi/document/1/40/66e53a5/Teras_web.pdf

American Chemistry Council. 2010. life cycle of a plastic product. Luettu 20.1.2021 https://web.archive.org/web/20100317004747/http://www.american-chemistry.com/s_plastics/doc.asp?CID=1571&DID=5972

Airasmaa, I., Kokko, J., Komppa, V., Saarela, O. & Skrifvars, M. 2019. 3.4 LUJITEKUIDUT. Luettu 29.3.2021 <https://www.lujitemuovi.fi/raaka-aineet/3-4-lujitekuidut/>

Peda.net. n.d. Sähkökemiallinen jännitesarja. Luettu 2.2.2021 <https://peda.net/kaustinen/keskuskoulu7-9/oppiaineet2/kemia/marjo-luoma/materiaaliarkisto/12-metallit/sj>

Kontino. 2019. Varastoluettelo. PDF. Luettu 26.1.2021. <https://kontino.fi/wp-content/uploads/2019/05/Kontino-varastoluettelo-2019.pdf>

SFS-EN 10219–1. 2006. Kylmämuovatut hitsatut seostamattomista teräksistä ja hienoraeteräksistä valmistetut rakenneputket. Osa 1: Tekniset toimitusehdot. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto SFS. Luettu 2.2.2021. Vaatii käyttöoikeuden. <https://sales.sfs.fi/fi/index/tuotteet/SFS/CEN/ID2/1/3526.html.stx>

IKH. n.d. PULTTI M8X100 8.8 DIN931 100KPL (4,26KG/PKT). Luettu 31.3.2021. <https://www.ikh.fi/fi/pultti-m8x100-8-8-din931-100kpl--4-26kg-pkt--pkp08100>

IKH. n.d. MUTTERI M8 10.9 DIN985 SINKITTY NYLOC. Luettu 2.3.2021 <https://www.ikh.fi/fi/mutteri-m8-10-9-din985-sinkitty-nyloc-pml08-10>

IKH. n.d. ALUSLAATTA M8 DIN125 A2 20KPL DIN125. Luettu 2.3.2021. <https://www.ikh.fi/fi/aluslaatta-m8-din125-a2-20kpl-din125-ip238>

IKH. n.d. PULTTI M16X60 8.8 DIN931 50KPL (6,07KG/PKT). Luettu 31.3.2021. <https://www.ikh.fi/fi/pultti-m16x60-8-8-din931-50kpl--6-07kg-pkt--pkp16060>

IKH. n.d. MUTTERI M16 10.9 DIN985 SINKITTY NYLOC. Luettu 2.3.2021. <https://www.ikh.fi/fi/mutteri-m16-10-9-din985-sinkitty-nyloc-pml16-10>

IKH. n.d. ALUSLAATTA M16 DIN125A. Luettu 2.3.2021. <https://www.ikh.fi/fi/aluslaatta-m16-din125a-lpa16000>

Etra Oy. 2021. Solukuminauha EPDM 10x10 liimalla. Luettu 5.2.2021. <https://www.etra.fi/fi/solukuminauha-epdm-10x10-liimalla-10520001561>

Al-Men Oy. n.d. Alumiinilevy 3 mm - anodisoitu LV. Luettu 5.2.2021 <https://kauppa.al-men.fi/product/132/alumiinilevy-3-mm---anodisoitu-lv>

Al-Men Oy. n.d. Alumiini turkkilevy 3,0 mm (five bar -kuvio). Luettu 22.3.2021. <https://kauppa.al-men.fi/product/207/alumiini-turkkilevy-30-mm-five-bar--kuvio>

BGroup. n.d. Teräslevyt. Luettu 4.3.2021. <http://www.bgroup.lt/fi/sub-fi/raw-material-4/plates-4/>

Mäkelä, M., Soininen, L., Tuomola, S. & Öistämö, J. 2018. Tekniikan Kaavasto. Matematiikan, fysiikan, kemian ja lujuusopin peruskaavoja sekä SI-järjestelmä. 18. painos. Tampere: Tammertekniikka.

Lee, Y-L., Barkey, M. E. & Kang, H-T. 2012. Metal Fatigue Analysis Handbook. Practical Problem-Solving Techniques for Computer-Aided Engineering. Oxford: Butterworth-Heinemann.

SolidWorks. 2019. SolidWorks Simulation. Luettu 29.1.2021. <https://www.solidworks.com/sites/default/files/2019-07/3DS-2020-DataSheet-Simulation.pdf>

Turun Water Cut Oy. n.d. Vesileikkaus. Luettu 22.3.2021. <https://watercut.fi/vesileikkaus/>

LIITTEET

Liite 1. Neliöpalkin maksimi taipuman laskenta

15 maalis 2021 17.00.48 - neliöpalkki Iujari.sm

Oppari Iujari

50x50x5 Neliöpalkki, Kontino varastoluettelo

$$E := 210 \text{ GPa} \quad m_{levy} := 46,15 \text{ kg} \quad m_{kotelolo} := 104,08 \text{ kg}$$

$$g := 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \quad m_{akut} := 599,4 \text{ kg} \quad l := 2200 \text{ mm}$$

$$F_1 := m_{akut} \cdot g = 5880,114 \text{ N}$$

$$F_2 := m_{kotelolo} \cdot g = 1021,0248 \text{ N} \quad m_{kok} := (m_{kotelolo} + m_{levy} + m_{akut}) \cdot 2 = 1499,26 \text{ kg}$$

$$F_3 := m_{levy} \cdot g = 452,7315 \text{ N}$$

$$F_{puolet} := F_1 + F_2 + F_3 = 7353,8703 \text{ N}$$

$$F_{tukipalkki} := \frac{F_{puolet}}{5} = 1470,7741 \text{ N}$$

$$m_l := \frac{m_{akut}}{5} = 119,88 \text{ kg}$$

$$F_{kok} := F_{puolet} \cdot 2 = 14707,7406 \text{ N}$$

$$R_{eH} := 355 \text{ MPa}$$

$$I_{vjm} := 47,5 \text{ cm}^4$$

vjm = vääntöjäyhyys momentti

$$R_m := 430 \text{ MPa}$$

$$I_{jm} := 27 \text{ cm}^4$$

jm = jäyhyysmomentti

$$y_{max} := \frac{F_{kok} \cdot l^3}{8 \cdot E \cdot I_{vjm}} = 196,2507 \text{ mm}$$

$$y_{max} := \frac{F_{kok} \cdot l^3}{8 \cdot E \cdot I_{jm}} = 345,2558 \text{ mm}$$

Lähde kaavalle:

Mäkelä, M., Soininen, L., Tuomola, S. & Öistämö, J. 2018. Tekniikan Kaavasto. Matematiikan, fysiikan, kemian ja lujuusopin peruskaavoja sekä SI-järjestelmä. 18. painos. Tampere: Tammertekniikka.

Liite 2. Neliöpalkin mitoitus (Kontino 2019)

Neliön muotoiset putkipalkit							
Arvot laskettu käyttäen nimellimittoja ja pyöristyksiä R=2,0xt kun t<4mm / R=2,5tx kun t>4mm							
Koko mm	Paino kg/m	Poikkipinta- ala cm ²	Jäyhyys- momentti cm ⁴	Jäyhyys- säde cm	Taivutus- vastus cm ³	Plastinen taivutus- vastus cm ³	Vääntö- jäyhyys mo- mentti cm ⁴
25 x 25 x 3	1,89	2,41	1,84	0,87	1,47	1,91	3,33
30 x 30 x 3	2,36	3,01	3,5	1,08	2,34	2,96	6,15
40 x 40 x 2	2,31	2,94	6,94	1,54	3,47	4,13	11,3
40 x 40 x 3	3,3	4,21	9,32	1,49	4,66	5,72	15,8
40 x 40 x 4	4,2	5,35	11,1	1,44	5,54	7,01	19,4
50 x 50 x 2	2,93	3,74	14,1	1,95	5,66	6,66	22,6
50 x 50 x 3	4,25	5,41	19,5	1,9	7,79	9,39	32,1
50 x 50 x 4	5,45	6,95	23,7	1,85	9,49	11,7	40,4
50 x 50 x 5	6,56	8,36	27	1,8	10,8	13,7	47,5
60 x 60 x 3	5,19	6,61	35,1	2,31	11,7	14	57,1
60 x 60 x 4	6,71	8,55	43,6	2,26	14,5	17,6	72,6
60 x 60 x 5	8,13	10,4	50,5	2,21	16,8	20,9	86,4
70 x 70 x 3	6,13	7,87	57,5	2,71	16,4	19,4	92,4
70 x 70 x 4	7,97	10,1	72,1	2,67	20,6	24,8	119
70 x 70 x 5	9,7	12,4	84,6	2,62	24,2	29,6	142
80 x 80 x 3	7,07	9	87,8	3,12	22	25,8	140
80 x 80 x 4	9,22	11,7	111	3,07	27,8	33,01	180
80 x 80 x 5	11,3	14,4	131	3,03	32,9	39,7	218
80 x 80 x 6	13,2	16,8	149	2,98	37,3	45,8	252
90 x 90 x 3	8,01	10,2	127	3,53	28,3	33	201
90 x 90 x 4	10,5	13,3	162	3,48	36	42,6	261
90 x 90 x 5	12,8	16,4	193	3,43	42,9	51,4	316
90 x 90 x 6	15,1	19,2	220	3,39	49	59,5	368
100 x 100 x 3	8,96	11,4	177	3,94	35,4	41,2	279
100 x 100 x 4	11,7	14,9	226	3,89	45,3	53,3	632
100 x 100 x 5	14,4	18,4	271	3,84	54,2	64,6	441
100 x 100 x 6	17	21,6	311	3,79	62,3	75,1	514
100 x 100 x 8	21,4	27,2	366	3,67	73,2	91,1	645
100 x 100 x 10	25,6	32,6	411	3,55	82,2	105	750
120 x 120 x 3	10,8	13,8	312	4,76	52,1	60,2	488
120 x 120 x 4	14,3	18,1	402	4,71	67	78,3	637
120 x 120 x 5	17,6	22,4	485	4,66	80,9	95,4	778
120 x 120 x 6	20,8	26,4	562	4,61	93,7	112	913
120 x 120 x 8	26,4	33,6	677	4,49	113	138	1163
120 x 120 x 10	31,8	40,6	777	4,38	129	162	1376
140 x 140 x 5	20,7	26,4	791	5,48	113	132	1256
140 x 140 x 6	25,4	31,2	920	5,43	131	155	1479
140 x 140 x 8	31,4	40	1127	5,3	161	194	1901
140 x 140 x 10	38,1	48,6	1312	5,2	187	230	2274
150 x 150 x 4	18	22,9	808	5,93	108	125	1265
150 x 150 x 5	22,3	28,4	982	5,89	131	153	1554
150 x 150 x 6	26,4	33,6	1146	5,84	153	180	1833
150 x 150 x 8	34	43,2	1412	5,71	188	226	2364

Putki-
palkit,
puiket