Tampereen ammattikorkeakoulu

Sähköistetyn kuorma-auton moottorin liittäminen alkuperäiseen vaihteistoon

Riku Keskinen

OPINNÄYTETYÖ
Syyskuu 2021

Konetekniikka
Lentokonetekniikka

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Konetekniikka
Lentokonetekniikka

KESKINEN, RIKU:
Sähköistetyn kuorma-auton moottorin liittäminen alkuperäiseen vaihteistoon

Opinnäytetyö 32 sivua, joista liitteitä 4 sivua
Syyskuu 2021

Akkuteknologian kehitys sekä eri maiden tiukentuneet päästötavoitteet ovat nostaneet sähköajoneuvojen suosiota huomattavasti viimeisen kymmenen vuoden aikana. Raskaiden ajoneuvojen sähköistyminen ei ole kuitenkaan edennyt samalla tavalla kuin henkilöautoilla.

Opinnäytetyö tehtiin osana Helsingin kaupungin rakentamispalveluliikelaitos Staran eRetrofit-hanketta, jossa yksi Staran kuorma-autoista muutetaan täysin sähkökäyttöiseksi. Projektin tavoitteena on selvittää Staran ajoneuvokaluston sähköistämisen mahdollisuudet. Opinnäytetyön tavoitteena oli suunnitella, miten kuorma-auton alkuperäinen vaihteisto ja uusi sähkömoottori saadaan liitettyä toisiinsa. Liittämistä varten täytyi suunnitella adapteri vaihteiston ja moottorin runkojen välille sekä moottorin akselin ja vaihteiston turbiinin välille.

Staran kuorma-auto oli tuotu Pirkkalaan muutostöitä varten. Aluksi vaihteistosta ja sen kiinnikkeestä otettiin kaikki tärkeimmät mitat, minkä jälkeen niiden pohjalta aloitettiin suunnittelu. Sähkömoottorin mitat saatiin valmistajan piirustuksista. Pääasiallisena suunnittelutyökaluna käytettiin SolidWorks 3D CAD -suunnitteluohjelmistoa, mutta lujuuslaskuja tehtiin myös käsin laskemalla.

Tuloksena saatiin valmis suunnitelma vaihteiston ja sähkömoottorin liittämiseen, mihin kuuluu liitokseen tarvittavien osien 3D-mallit, piirustukset sekä materiaalivalinnat. Osien valmistusmenetelmää ei ollut määritelty ennakkoon, mutta suunnittelu tehtiin CNC-koneistusta silmällä pitäen. Lopullinen menetelmä jää työn tilaajan päätettäväksi. Suunnitelma mahdollistaa eRetrofit-hankkeen etenemisen.

Asiasanat: sähköajoneuvot, konvertointi, suunnittelu

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Degree Programme in Mechanical Engineering
Aircraft Engineering

KESKINEN, RIKU:
Joining the Motor of an Electrified Truck to the Original Transmission

Bachelor's thesis 32 pages, appendices 4 pages
September 2021

The advancements in battery technology as well as the increasing need to reduce greenhouse emissions have made electric vehicles significantly more popular during the last ten years. However, the electrification of heavy-duty vehicles has not been as swift as with passenger cars.

This thesis was done as a part of the eRetrofit project of Helsinki City Construction Services, Stara. In the project one of the diesel-powered trucks of Stara is converted to run completely on electricity. The goal of the project was to investigate the possibilities of electrifying the truck fleet of Stara. The goal of the thesis was to design a method for joining the original transmission of the truck to the new electric motor. The connection required an adapter between the bodies of the transmission and the motor, and another one between the motor's axle and the turbine of the transmission.

Stara's truck was brought to Pirkkala for the conversion. The work started by taking all the necessary measurements from the transmission and its mounting bracket. The electric motor's measurements were found from the manufacturer's technical drawings. The design work was then begun based on these measurements. The primary design tool was the SolidWorks 3D CAD software but some of the calculations were also done by hand.

The result is a completed design for joining the transmission and the electric motor, which includes 3D models, technical drawings and material selections for the designed parts. The manufacturing method was not specified in advance, but the parts were designed with CNC machining in mind. The final choice of the manufacturing method was left to the client. The resulted design will allow the advancement of the eRetrofit project.

Key words: electric vehicles, conversion, design

SISÄLLYS

1 JOHDANTO 6
2 LIIKELAITOS STARA 7
3 AJONEUVOJEN SÄHKÖISTÄMINEN 8
3.1 Nykytilanne 8
3.2 Muutostyöt 8
3.3 Hyödyt ja haitat 10
4 SUUNNITTELU 11
4.1 Lähtökohdat ja tavoite 11
4.2 Mitoitus ja mallinnus 14
4.2.1 SAE adapteri 17
4.2.2 Voimalinjan adapteri 19
4.3 Kokoonpano 25
5 POHDINTA 27
LÄHTEET 28
LIITTEET 29
Liite 1. SAE adapterin tekninen piirustus 29
Liite 2. Levyosan tekninen piirustus 30
Liite 3. Sovitteen tekninen piirustus 31
Liite 4. Voimalinjan adapterin tekninen piirustus 32

LYHENTEET JA TERMIT

CAD	Computer Aided Design
CAN	Controller Area Network
DIN	Deutsches Institut für Normung
SAE	Society of Automotive Engineers

1 JOHDANTO

Tämä opinnäytetyö tehtiin osana Helsingin kaupungin rakentamispalveluliikelaitos Staran eRetrofit-hanketta, jossa Tampereen ammattikorkeakoulu on yhteistyökumppanina. eRetrofit on Staran monivuotinen hanke, jonka tarkoituksena on selvittää Staran nykyisen ajoneuvokaluston sähköistämisen mahdollisuudet. Projektissa yksi Staran kuorma-autoista muutetaan sähkökäyttöiseksi, jonka jälkeen se otetaan päivittäiseen käyttöön datan keräämistä varten. Data analysoidaan ja sen, sekä kuljettajien kokemusten, pohjalta tehdään lopullinen arvio sähköistämisen mahdollisuuksista. Hanke on alkanut syyskuussa 2019 ja mukana sitä toteuttamassa ovat Staran ja TAMKin lisäksi Forum Virium Helsinki sekä Teknologian tutkimuskeskus VTT. Hankkeen kokonaisbudjetti on 368 500 euroa ja sen rahoittaa Helsingin kaupungin innovaatiorahasto (Forum Virium Helsinki 2020).

Tämän opinnäytetyön osuus hankkeessa oli suunnitella, miten sähköistettävän kuorma-auton alkuperäinen vaihteisto saadaan liitettyä uuteen sähkömoottoriin. Suunnittelutyö oli pääosin itsenäistä 3D-mallintamista sekä lujuuslaskemista, jonka lisäksi suunnittelun kannalta olennaisia mittauksia käytiin tekemässä paikan päällä. Toimivan suunnitelman aikaansaaminen on olennainen osa koko hankkeen etenemistä, koska se mahdollistaa osaltaan etenemisen datankeräysvaiheeseen. Suunnittelun lisäksi opinnäytetyössä perehdytään yleisellä tasolla polttomoottoriautojen täyssähkökonvertointiin kuluttajan näkökannalta.

2 LIIKELAITOS STARA

Helsingin kaupungin rakentamispalveluliikelaitos Stara on monialainen kaupungin rakentamiseen, hoitoon ja logistiikkaan erikoistuva Helsingin kaupungin oma palveluntuottaja. Vaikka Stara-nimeä alettiin käyttää vasta vuonna 2010, on sen juuret jo 1800-luvun lopusta. Vuonna 1878 perustettu kaupungin rakennuskonttori tuotti silloinkin samankaltaisia palveluita kuin Stara nykyäänkin. Ajan saatossa organisaatio on kokenut monta nimenvaihdosta ja toimintaa on kehitetty kustannustehokkaammaksi (Staran historia 2020; Liikelaitos Stara 2021). Kuvasta 1 nähdään tarkemmin Staran moninaiset osaamisalueet.

KUVA 1. Staran palvelut havainnollistettuna (Helsingin kaupunki 2020)

3 AJONEUVOJEN SÄHKÖISTÄMINEN

3.1 Nykytilanne

Erilaiset sähkövoimalla toimivat ajoneuvot ovat yleistyneet räjähdysmäisesti viimeisen kymmenen vuoden aikana. Erityisesti erilaiset henkilökuljettimet, kuten sähköpotkulaudat, sekä sähköautot ovat kasvattaneet suosiotaan. Kasvuun on osaksi syynä akkuteknologian kehittyminen, sekä eri maiden uudet päästötavoitteet, joihin pyritään muun muassa alentamalla sähköautojen verotusta. Sähköautojen valmistuskustannukset ovat kuitenkin vielä merkittävästi korkeammat kuin polttomoottoriautoilla, joten monella kuluttajalla ei ole varaa ostaa sähköautoa. Tällä hetkellä sähköauton hinnasta noin yksi kolmasosa menee akkuun, mutta akkuteknologian kehittyessä ja tuotantomäärien kasvaessa hintaero sähkö- ja polttomoottoriautojen välillä arvioidaan olevan enää noin 20 % vuoteen 2030 mennessä (Jokela, 2021).

Uuden sähköauton ostamisen sijasta myös vanhoja polttomoottoriautoja voidaan muuttaa sähkökäyttöisiksi. Sähkömuunnokset ovat suosittuja erityisesti klassikkoautoharrastajien keskuudessa. Muunnostyö on kuitenkin ammattitaitoa ja tietoa vaativa prosessi, joten sen tekeminen itse voi olla hankalaa tai jopa vaarallista akuston suuren jännitteen vuoksi. Tämän takia muunnostyöt kannattaa teettää ammattilaisilla. Esimerkiksi suomalainen vuonna 2016 perustettu Muuntuva Oy on erikoistunut sähköautomuunnoksien tekemiseen. Raskaiden ajoneuvojen sähkökonversiot ovat harvinaisempia, mutta Kehittämisyhtiö Keulink aikoo perustaa Keuruulle dieselkuorma-autojen konversioihin erikoistuneen tehtaan vuoden 2021 syksyn aikana (Järveläinen, 2021).

3.2 Muutostyöt

Joillekin automalleille myydään valmiita konversiopaketteja, joihin kuuluu kaikki tarvittavat komponentit. Muutoin komponentit täytyy valita ja ostaa erillisinä. Komponenttien valinnassa tulee ottaa huomioon erityisesti tavoiteltava suorituskyky, komponenttien yhteensopivuus, sekä akustolle käytettävissä oleva tila.

Mitä tahansa autoa ei välttämättä kannata muuttaa sähkökäyttöiseksi. Parhaiten muutokseen sopii manuaalivaihteinen auto. Vaihteisto jätetään yleensä ensimmäiselle tai toiselle vaihteelle, koska sähkömoottorin vääntö ei ole samalla tavalla riippuvainen moottorin kierrosnopeudesta kuin polttomoottori. Työn aluksi autosta poistetaan polttomoottori ja kaikki siihen sekä polttoainejärjestelmään liittyvät komponentit. Jäähdytin voidaan tarvittaessa jättää paikalleen, jos sitä tarvitaan uusien komponenttien jäähdyttämiseen. Sähkömoottorin tuentaan ja vaihteiston liittämiseen täytyy mahdollisesti valmistaa osat itse, ellei kyseiselle automallille ja sähkömoottorille ole valmiita osia myynnissä. Moottorin lisäksi autoon tarvitsee asentaa moottorinohjain, joka säädetään valitun sähkömoottorin suorituskykyarvojen mukaan. Sähkökonversioissa akusto asennetaan yleensä auton takakonttiin. Riippuen valitun akuston koosta, matkatavaroille käytettävissä oleva tila voi pienentyä huomattavasti. Akuston latauspistoke sijoitetaan yleensä vanhan polttoainetankin korkin paikalle. Auton alkuperäinen sähköjärjestelmä täytyy liittää ja konfiguroida uuden järjestelmän CAN-väylään. Lopuksi kojelautaan asennetaan mittari akuston varauksen tarkkailemiseksi ja kaasupoljin kytketään säätelemään moottorin akustosta saamaa virtaa. (Parker, n.d.)

Ajoneuvon sähköistämisen kustannukset voivat vaihdella suuresti komponenteista riippuen. Pienemmän auton sähköistäminen on halvempaa, koska sen liikuttamiseen tarvitaan vähemmän voimaa ja energiaa. Tällöin autoon riittää pieni moottori ja akusto. Moottorin tehon kasvaessa myös tarvittava sähkövirta kasvaa, jolloin jokaisen voimalinjan komponentin täytyy kestää suurempi sähkövirta. Esimerkiksi sähkökonversiokomponentteja myyvällä EV Europe nettikaupalla halvin täysi konversiopaketti Smart Fortwo autolle maksaa noin 13 000 euroa. Tähän on vielä lisättävä muutostöistä aiheutuvat kustannukset. Mikäli toimintamatkaa halutaan kasvattaa suuremmalla akustolla, hinta voi kasvaa vielä usealla tuhannella eurolla.

3.3 Hyödyt ja haitat

Muuttamalla vanha polttomoottoriauto sähkökäyttöiseksi, sen elinkaari voi pidentyä huomattavasti, kunhan auton alusta ja kori ovat muuten kunnossa. Muunnetuissa autoissa akusto vie tilaa matkatavaroilta, mutta muuten sähköautoksi muutettuihin polttomoottoriautoihin pätee lähes samat hyödyt ja haitat kuin valmiisiin sähköautoihin.

Sähköauton voimalinja on mekaanisesti erittäin yksinkertainen verrattuna polttomoottoriin, joten teoriassa sähköautoa ei tarvitse huoltaa yhtä usein. Britanniassa tehdyn What Car -lehden kyselytutkimuksen sekä If vakuutusyhtiön tekemän Norjan hinaustietojen vertailun mukaan sähköautot ovat kuitenkin luotettavuudeltaan huonompia kuin bensiiniautot, mutta parempia kuin dieselautot. Vikojen luonne kuitenkin vaihtelee voimanlähteen mukaan. Polttomoottoriautoissa viat olivat yleensä mekaanisia, kun taas sähköautoissa viat olivat tietotekniikkaan liittyviä. Sähköautojen korjaaminen osoittautui myös kaikista kalleimmaksi. Akuston korkean jännitteen vuoksi useimmat korjaustyöt vaativat sähköalan koulutusta, mikä rajoittaa autoilijan sekä tiepalvelun tekemiä korjauksia. (Kainulainen 2021; Päivän Lehti 2021).

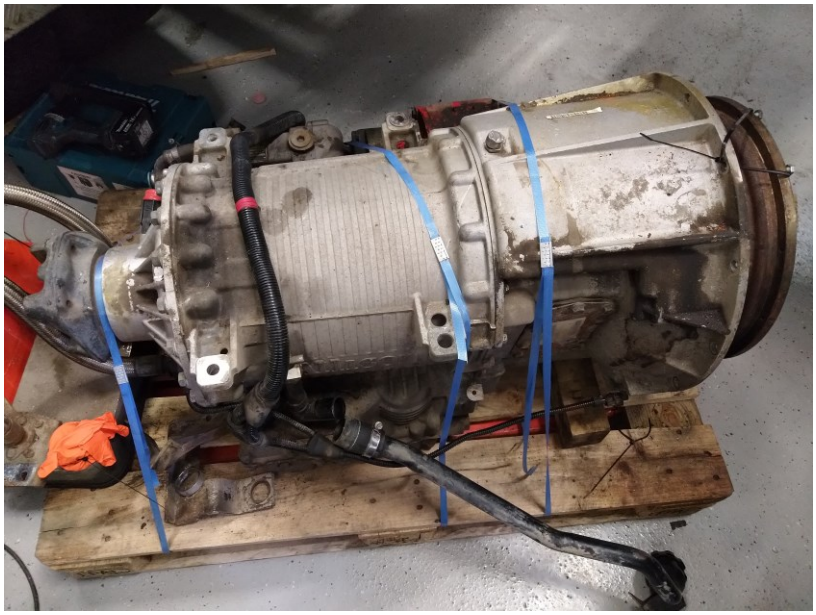
Sähköauton akuston maksimaalinen varaus pienenee vähitellen lataussyklien määrän kasvaessa, joten akuston vaihto saattaa olla edessä jossakin vaiheessa. Yleisesti sähköautojen akut kuitenkin kestävät 10–20 vuotta, joten parhaimmillaan pelkkä akku kestää jo yhtä kauan kuin polttomoottoriauton elinkaari (Renault Group 2021).

4 SUUNNITTELU

4.1 Lähtökohdat ja tavoite

Staran sähkökäyttöiseksi muutettava kuorma-auto on vuoden 2012 Scania P 320 6x2 pyöräkonfiguraatiolla (kuva 2). Alkuperäisenä voimanlähteenä on ollut 9-litrainen DC9 37 -dieselmoottori, joka tuottaa 320 hevosvoimaa. Auton kokonaispaino alkuperäisessä kunnossa on 29 000 kg. Autossa on Allison 3200-sarjan vaihteisto, jossa on 6 vaihdetta sekä peruutusvaihde (kuva 3).

KUVA 2. Staran Scania P 320 (Ruska Tapiovaara, Forum Virium Helsinki 2020)

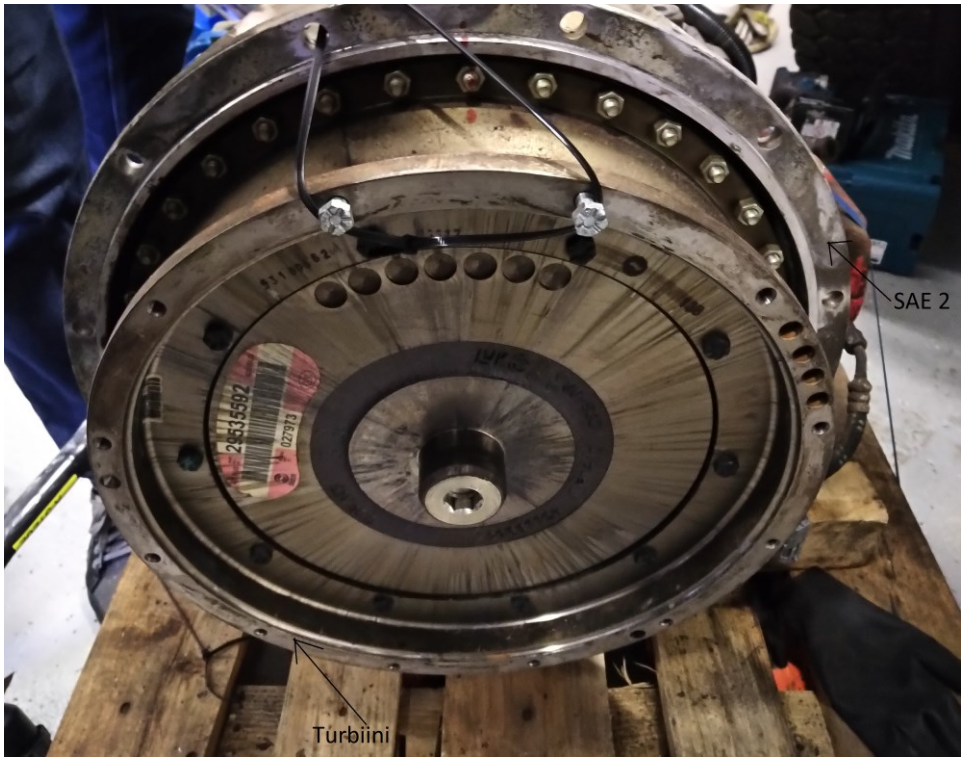


KUVA 3. Allison 3200 vaihteisto

Suunnittelun tavoitteena oli luoda toimiva ratkaisu vaihteiston ja sähkömoottorin liittämiseksi toisiinsa. Liitos koostuu kahdesta eri osiosta: runkojen liittämisestä, sekä moottorin akselin liittämisestä vaihteiston turbiiniin.

Staran kuorma-auto oli tuotu Pirkkalaan, josta oli vuokrattu talli muutostöiden tekemistä varten. Kuorma-auton moottori oli irrotettu jo aiemmin Staran toimesta. Tarkoituksena oli käyttää vaihteiston alkuperäistä kiinnityskehää (kuva 4), joka kiinnittyy SAE J617 -standardin mukaisesti vaihteiston etupäähän sekä kuorma-auton runkoon vaimennettujen kannakkeiden päälle. SAE J617 -standardissa on määritelty tärkeimmät mitat erikokoisille vauhtipyörien koteloille ja vaihteiston kotelon laippaliitoksille. Allison 3200 vaihteiston laippaliitos on kokoa SAE 2 (kuva 5).

KUVA 4. Vaihteiston kiinnityskehä



KUVA 5. Vaihteiston etupää

Kiinnityskehän etupuolella on SAE 1 koon kiinnitys moottoria varten. Kuorma-auton sähkömoottoriksi valikoitui Visedo PowerDRUM XSe 1600 T660 (kuva 6).

Se painaa 215 kg ja pystyy tuottamaan hetkellisesti 1800 Nm väännön. Sähkömoottorissa on SAE 3 koon kiinnitys, joten vaihteiston ja moottorin runkojen liittämiseen tarvittiin SAE 1 – SAE 3 -adapteri. Yritimme etsiä valmista adapteria internetistä, mutta mistään ei löytynyt sopivaa, joten se täytyi suunnitella ja valmistaa itse. Moottorin akselin ja vaihteiston turbiinin liittämiseenkään ei ollut valmista ratkaisua saatavilla, joten siihenkin tuli suunnitella adapteri. SAE 1 – SAE 3 -adapterin täytyi olla riittävän syvä, jotta vaihteiston turbiini ja voimalinjan adapteri mahtuisi sen sisälle.

KUVA 6. Visedo PowerDRUM XSe (Visedo Oy)

4.2 Mitoitus ja mallinnus

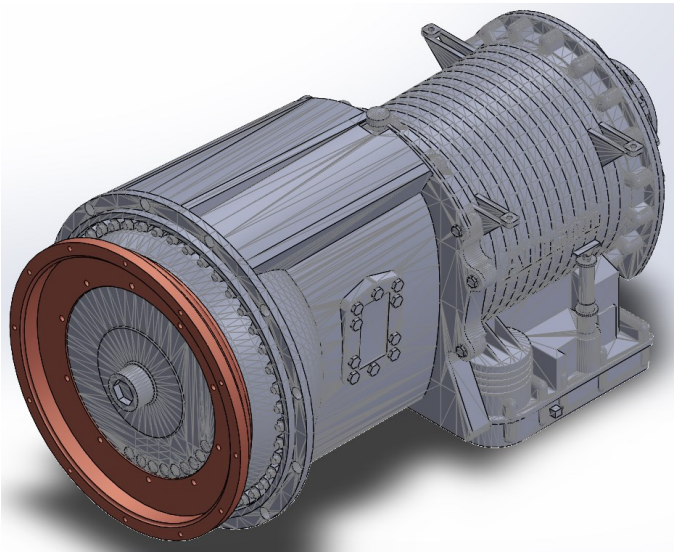
Suunnittelu alkoi ottamalla kaikki oleelliset mitat vaihteistosta sekä vaihteiston kiinnikkeestä. Mittaamiseen käytettiin työntö- ja rullamittaa. SAE-adapteria varten täytyi mitata kiinnityskehän etupään etäisyys turbiinin päästä ja turbiinin leveys. Loput tarvittavat mitat löytyivät SAE J617 -standardista ja sähkömoottorin piirustuksista.

Voimalinjan adapteria varten täytyi mitata turbiinin kiinnikkeiden reikien etäisyys ja vaihteiston keskellä olevan nupin halkaisija. Nuppi tulee hieman edemmäksi, kuin turbiini, joten sille täytyi jättää tilaa adapterin keskelle. Kiinnikkeiden reikien

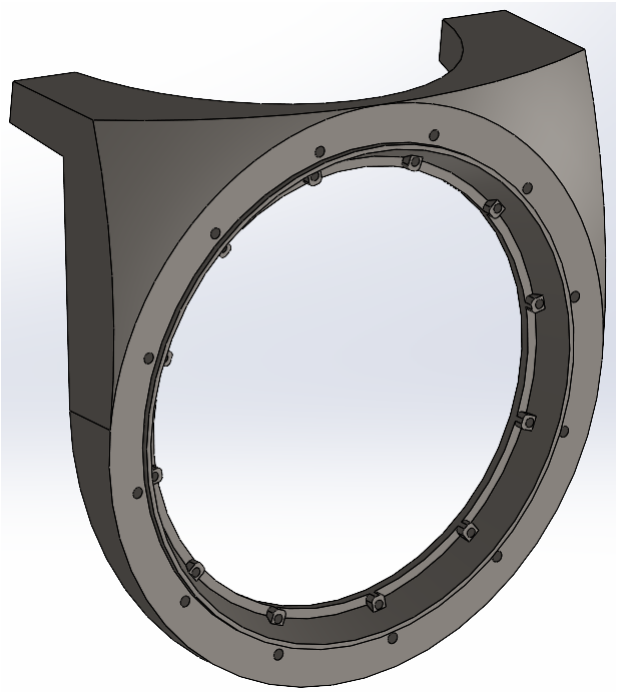
etäisyyden mittaus osoittautui haasteelliseksi. Etäisyys oli liian suuri työntömitalle, ja rullamitan tarkkuus ei ole riittävä tarkan mitan saamiseksi. Internetistäkään ei löytynyt vaihteiston mittoja. Täytyi siis varautua siihen, että osa jouduttaisiin valmistamaan uudelleen korjatuilla mitoilla. Päädyimme mittaamaan turbiinin halkaisijan rullamitalla ja vähensimme siitä työntömitalla mitattuna kiinnikkeen reiän reunan etäisyyden turbiinin ulkoreunasta sekä puolet reiän halkaisijasta.

Sähkömoottorin akselissa on DIN 5480 -standardin mukainen hammastus, joten adapterin keskiössä tulee olla sitä vastaava hammastus. Hammastuksen mitat löytyivät sähkömoottorin piirustuksista.

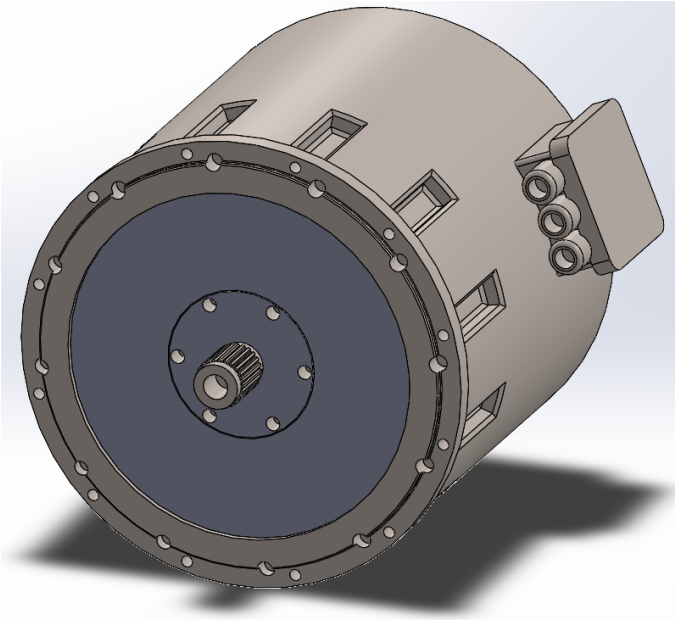
Osat mallinnettiin käyttäen SolidWorks 3D CAD -suunnitteluohjelmistoa. Kokonaisuuden havainnollistamiseksi hain internetistä Allison 3200 -vaihteiston 3D-mallin (kuva 7), ja mallinsin pääpiirteisesti vaihteiston kiinnityskehän (kuva 8). Vaihteiston malli löytyi GrabCAD.com:sta, joka on Stratasysin ylläpitämä sivusto, jossa käyttäjät voivat jakaa itse tekemiään 3D-malleja. Vaihteiston mallin kaikki mitat eivät olleet samat kuin oikeassa vaihteistossa, esimerkiksi vaihteiston SAE 2 laippa oli väärän kokoinen, ja siitä puuttui myös turbiinin kiinnityskehä. Mallia ei myöskään voinut muokata, koska se oli STL-tiedostomuodossa. Mallinsin turbiinin kiinnityskehän niin, että turbiinin etuosan etäisyys vaihteiston laipasta oli sama, kuin oikeassa vaihteistossa. Näin kaikki suunnittelun kannalta oleelliset mitat olivat kokoonpanossa oikein. Lisäksi tein vielä sähkömoottorista 3D-mallin, jotta saisin koko kokoonpanon havainnollistettua (kuva 9).



KUVA 7. Allison 3200 -vaihteiston 3D-malli



KUVA 8. Vaihteiston kiinnityskehän 3D-malli



KUVA 9. Visedo PowerDRUM XSe 3D-malli

Varsinaisen suunnittelun aloitin miettimällä ja hahmottelemalla erilaisia ratkaisuja molemmille osille. Lopulta päädyin molempien osien kannalta kahteen eri ratkaisuun, joista vielä myöhemmin sain karsittua mielestäni parhaat vaihtoehdot.

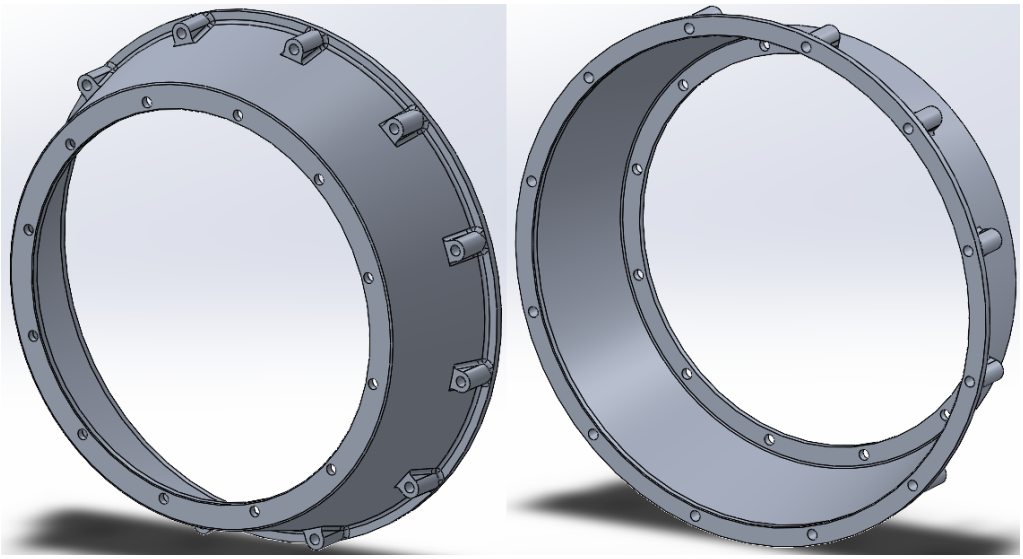
4.2.1 SAE adapteri

Ensin tuli määrittää adapterin syvyys. Etäisyys vaihteiston kiinnityskehyksestä turbiinin kehyksen etuosaan oli työntömitalla mitattuna 57,2 mm. Tähän täytyy lisätä sähkömoottorin akselin pään etäisyys sähkömoottorin kiinnityslaipasta, joka oli piirustuksista katsottuna 69,4 mm, sekä muutama millimetri vaihteiston keskustan nupille. Päädyin syvyyden kannalta lukemaan 133 mm, jolloin nupille jäisi tilaa 6,4 mm.

SAE J617 -standardin mukaisesti adapterin vaihteiston puoleinen, SAE 1 koon laippa tuli olla sisähalkaisijaltaan 511 mm ja kiinnitys tapahtuu 12 pultilla. Vastakkaisten pulttien reikien keskipisteiden etäisyys tuli olla 530 mm. Moottorin puoleinen, SAE 3 koon laippa tuli olla sisähalkaisijaltaan 410 mm ja vastakkaisten pulttien reikien keskipisteiden etäisyys 429 mm. Myös SAE 3 koon laippa kiinnitetään 12 pultilla.

Koska adapteri todennäköisimmin valmistettaisiin CNC-jyrsimellä ja se on suhteellisen suuri, päätin suunnitella sen alumiinista, koska sitä on helpompi koneistaa kuin esimerkiksi terästä. Adapteriin ei myöskään kohdistu suuria voimia, joten teräksen paremmille lujuusominaisuuksille ei ollut tarvetta. Eri alumiiniseokset voivat vaihdella ominaisuuksiltaan hyvin suuresti, joten myös tarkka seos täytyi valita. Päädyin 6061 alumiiniin, joka onkin yksi yleisimmistä alumiiniseoksista. 6061 alumiini on hyvä yleisseos moneen eri käyttötarkoitukseen sen suhteellisen hyvän kestävyyden, muokattavuuden ja korroosionkeston ansiosta (Cavallo, n.d.).

Hahmotellessani adapteria, määritin materiaalin paksuudeksi 10 mm. Suunnittelin osan kuitenkin niin, että paksuutta voisi helposti vaihtaa suunnitteluohjelmistossa, kun adapterin lopullinen muoto oli päätetty ja tarvittava materiaalipaksuus määritetty lujuusanalyyseillä. Lopullinen adapteri on muodoltaan rengasmainen, joka kapenee tasaisesti SAE 1 koon laipasta SAE 3 koon laippaan (kuva 10). SAE 1 laipan pultit asennetaan adapterin ulkopuolelle, kun taas SAE 3 laipan pultit täytyy asentaa adapterin sisäpuolelle. SAE 1 puolen pulteille täytyi tehdä korokkeet adapterin kylkeen, koska pulttien kannat olisivat muuten osuneet adapterin kylkeen.

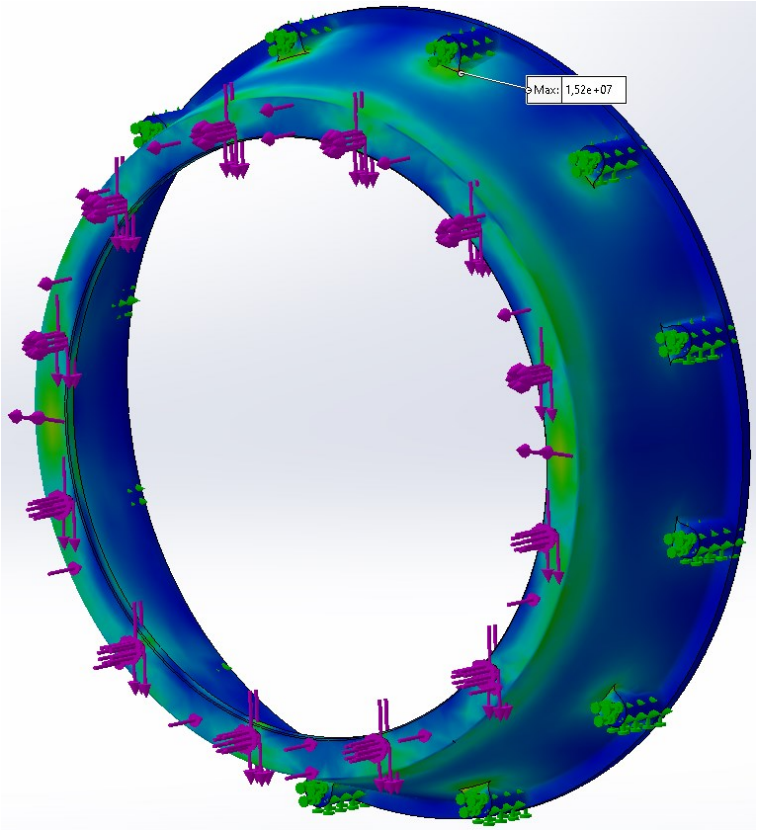


KUVA 10. SAE adapteri edestä ja takaa

Adapterin lujuusanalyyseissä täytyy ottaa huomioon, että siihen kohdistuvat voimat eivät ole staattisia ja aina yhtä suuria. Erilaiset pomput ja kuopat tiessä voivat aiheuttaa suuriakin kiihtyvyyksiä ajoneuvon rungon eri osiin, jolloin kuormitus kasvaa moninkertaiseksi staattiseen tilanteeseen verrattuna. Mitoitin adapterin niin, että siihen kohdistuu maksimissaan viiden G-voiman kiihtyvyys, eikä sähkömoottorin toisen puolen runkotukea oteta huomioon. Sähkömoottori painaa 215 kg ja kun oletetaan, että sen painopiste sijaitsee sen rungon puolivälissä, kohdistuu adapteriin viiden G:n kiihtyvyydellä noin 10 550 N leikkausvoima ja 2 260 Nm vääntömomentti.

6061 alumiinin lujuusominaisuudet vaihtelevat paljon riippuen siitä, miten se on jälkikäsitelty. Heikoimmillaan 6061 alumiinin myötöraja on noin 55 MPa, jonka myös Solidworks antaa kyseiselle materiaalille. Lämpökäsittelyllä myötörajaa voidaan nostaa jopa 241 MPa asti, mutta käytetään tässä tapauksessa alempaa 55 MPa myötörajaa (Ferguson perforating, n.d.).

Tavoittelin adapterin varmuusluvuksi vähintään arvoa 3. 10 mm materiaalivahvuus oli turhan järeä, joten muutin vahvuudeksi 8 mm. Tällöin Solidworks lujuusanalyysillä saadaan adapterin varmuuskertoimeksi 3,6. Suurin jännitys, joka on noin 15 MPa, syntyy hyvin pienelle alueelle SAE 1 puolen pulttien ylempien korokkeiden yläreunaan (kuva 11). SAE adapterin piirustus on liitteessä 1.



KUVA 11. SAE adapterin lujuusanalyysi

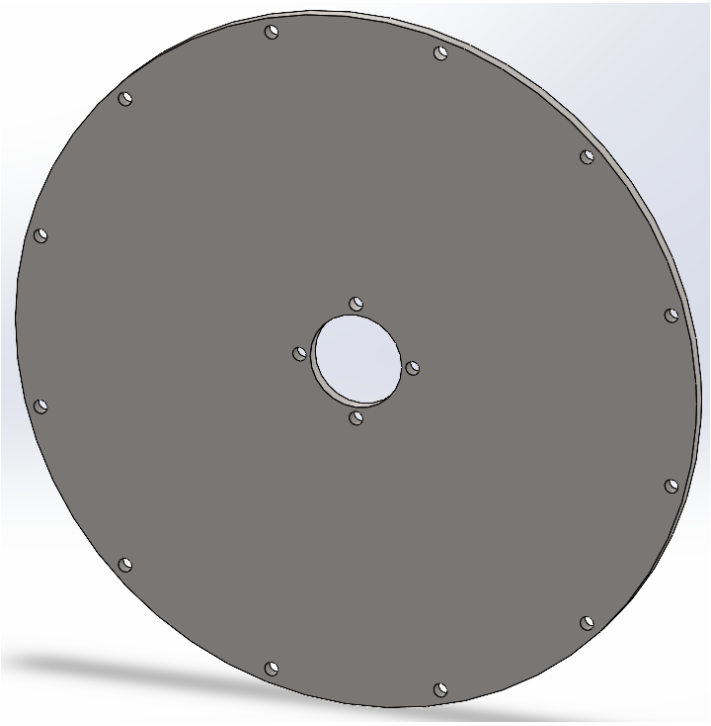
4.2.2 Voimalinjan adapteri

Vaihteiston turbiinin ja sähkömoottorin akselin väliin tuleva adapteri olisi yksinkertaisimmillaan levy, jonka keskellä on sovite moottorin akselille. Levyn keskelle täytyi jättää tyhjä tila vaihteiston keskellä olevalle nupille, koska se tuli edemmäksi kuin turbiinin kehä, johon adapterin levyn ulkoreunat kiinnitetään. Sähkömoottorin akselissa oli DIN 5480 -standardin mukainen W50 x 2 x 24 x 8f hammastus, joten sovitteessa täytyi olla sitä vastaava N50 x 2 x 24 x 9F hammastus.

Valmistettavuuden helpottamiseksi päätin suunnitella adapterin kahdessa osassa, levy ja hammastettu sovite, jotka myöhemmin hitsattaisiin yhteen. Mittausongelmien vuoksi adapterin levyosa saatettaisiin joutua valmistamaan uudelleen, joten adapterin valmistus kahdessa osassa oli siltäkin kannalta järkevää. Sovitteen hammastus täytyisi koneistaa siihen erikoistuneessa yrityksessä, jolloin yhdessä osassa valmistettu adapteri menisi täysin hukkaan, jos levyn mitat olisivatkin väärät. Kun levy ja sovite valmistetaan erikseen, voidaan levyosaa sovittaa vaihteiston turbiiniin yksinään, ja osan yksinkertaisuuden vuoksi mittojen

korjaaminen ja uuden osan valmistus on sekä helppoa, että myös halpaa. Adapterin pienen koon, siihen kohdistuvien suurten voimien ja hitsattavuuden vuoksi valitsin materiaaliksi S355 rakenneteräksen.

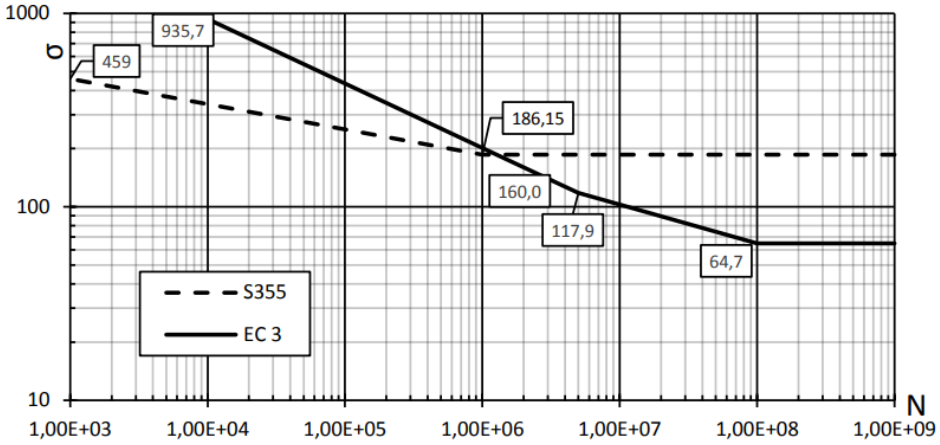
Levyosa kiinnitetään reunoistaan 12 pultilla turbiinin kehään. Tällöin levyn täytyy olla halkaisijaltaan turbiinin kehän kokoinen eli 410 mm. Pultit ovat kokoa M8, joten niiden reikien koot ovat 8 mm. Vastakkaisten pulttien reikien keskipisteiden etäisyyden mittaus oli hankalaa. Tarkin tulos saatiin, kun turbiinin halkaisijasta vähennettiin molemmin puolin reiän reunan etäisyys turbiinin kehän reunasta, sekä molemmin puolin puolet pultin reiän halkaisijasta. Näin päädyttiin arvoon 393 mm. Levyn keskellä on halkaisijaltaan 55 mm reikä vaihteiston nuppia varten. Sen ympärillä on neljä halkaisijaltaan 8 mm reikää sovitteen kohdistamista varten. Levyn paksuudeksi määräytyi 8 mm, jolloin varmistetaan, että levy ei missään tapauksessa lommahda. Solidworks lommahdussimulaation mukaan lommahduksen varmuuskerroin 8 mm paksuudella on yli 100. Kuvassa 12 nähdään valmis levyosa. Levyosan piirustus on liitteessä 2.



KUVA 12. Adapterin levyosa

Sovitteen suunnittelu alkoi muodon hahmottelulla. Yksinkertaistettuna sovite on putkimainen lyhyt osa, jonka sisäpinnassa on hammastus moottorin akselia varten. Lisäksi sovitteen toisessa päässä täytyi olla levyosan kohdistusreikiin sopivat

tapit. Osan syvyydeksi määräytyi 60 mm, jolloin moottorin hammastus kytkeytyy koko matkaltaan sovitteen hammastukseen. Sovitteen hammastuksen päähän jää vielä tilaa pienelle viisteytykselle, joka helpottaa asennusta. Moottorin sovitteeseen kohdistama voima on vaihtelevaa, jolloin mitoituksessa täytyy ottaa huomioon metallin väsyminen. Kuviossa 1 esitetyn S-N-käyrän mukaan S355 teräksen vaihtolujuus σ_w on 186,15 MPa. Vaihtolujuutta pienemmillä jännityksillä materiaali kestää äärettömän monta sykliä, eli toisin sanoen se ei väsy.



KUVIO 1. S355 teräksen S-N-käyrä (Keränen 2017)

Käyrän arvot pätevät kuitenkin vain veto- ja puristusjännitykseen, kun taas sovitteeseen kohdistuva jännitys on leikkausjännitystä. Standardin SFS 3200 mukaan sallittu leikkausjännitys τ_{sall} saadaan selville kaavalla (1).

$$\tau_{\text{sall}} = 0{,}6 \cdot \sigma_{\text{sall}}, \tag{1}$$

jossa σ_{sall} on sallittu jännitys.

Sijoittamalla vaihtolujuus σ_w sallitun jännityksen σ_{sall} paikalle, saadaan sallituksi leikkausjännitykseksi

$$\tau_{\text{sall}} = 0{,}6 \cdot 186{,}15 \text{ MPa} = 111{,}69 \text{ MPa}.$$

Seuraavaksi täytyy määrittää sovitteelle sellainen ulkohalkaisija, että jännitys ei nouse sallitun leikkausjännityksen yli. Sisähalkaisija määräytyy sovitteeseen tu-

levan hammastuksen mukaan. Sovitteen N50 x 2 x 24 x 9F hammastuksen sisähalkaisija on 50 mm. Jotta jännitys ei varmuudella koskaan nouse yli sallitun rajan, täytyy osalle myös määrittää varmuuskerroin. Tässä tapauksessa käytetään varmuuskerrointa 3. Osa siis kestää 3 kertaa niin suuren rasituksen, kuin mitä siihen on suunniteltu kohdistuvan, ennen kuin se alkaa väsyä. Varmuuskerrottu leikkausjännitys τ_k saadaan laskettua kaavalla (2).

$$\tau_k = \frac{\tau_{sall}}{k}, \tag{2}$$

jossa k on varmuuskerroin.

Sijoittamalla sallittu leikkausjännitys ja varmuuskerroin kaavaan (2), saadaan varmuuskerrotuksi leikkausjännitykseksi

$$\tau_\mathrm{k} = \frac{111{,}69\ \mathrm{MPa}}{3} = 37{,}23\ \mathrm{MPa}.$$

Seuraavaksi lasketaan osalle tarvittava vääntövastus. Vääntövastus W_v saadaan laskettua kaavalla (3).

$$W_\mathrm{v} = \frac{T}{\tau_\mathrm{k}}, \tag{3}$$

jossa T on moottorin suurin vääntömomentti.

Sijoittamalla arvot kaavaan (3), saadaan vääntövastukseksi

$$W_\mathrm{v} = \frac{1800\ \mathrm{Nm}}{37{,}23\ \mathrm{MPa}} = 48348\ \mathrm{mm}^3.$$

Lopuksi ratkaistaan ympyrärenkaan vääntövastuksen kaavasta (4) tarvittava ulkohalkaisija *D*.

$$W_\mathrm{v} = \frac{\pi(D^4 - d^4)}{16D}, \tag{4}$$

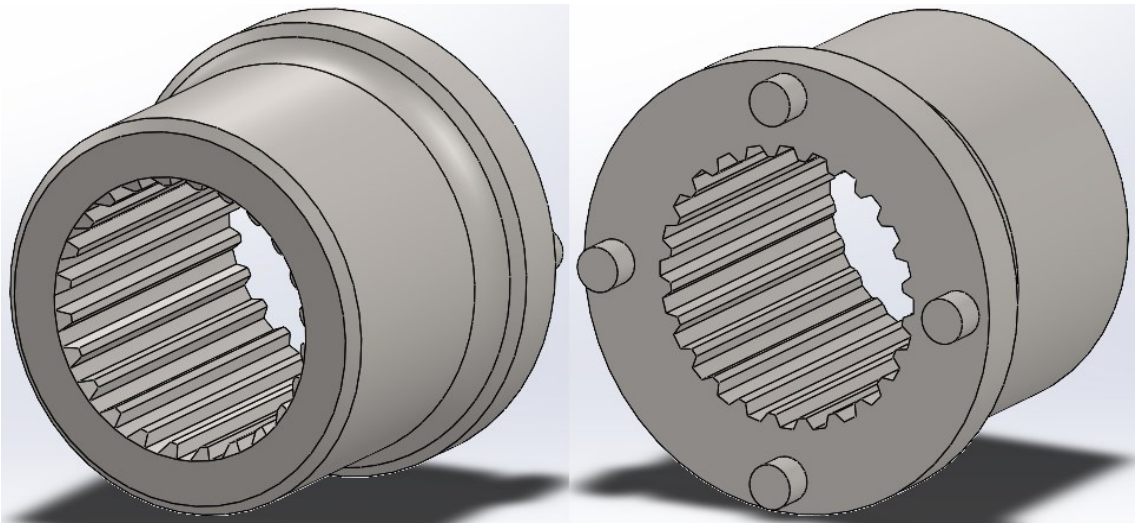
jossa d on sisähalkaisija.

Sijoitetaan tunnetut arvot kaavaan (4)

$$48348\ \mathrm{mm}^3 = \frac{\pi(D^4 - (50\ \mathrm{mm})^4)}{16D},$$

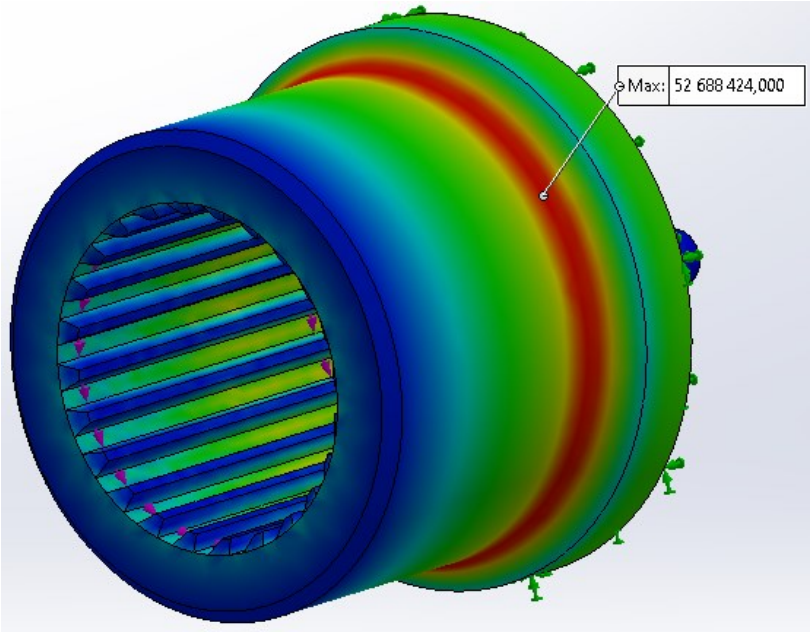
ja ratkaistaan yhtälöstä ulkohalkaisija D, jolloin tulokseksi saadaan 69,53 mm. Pyöristetään tulos vielä ylöspäin lähimpään kokonaislukuun, jolloin sovitteen ulkohalkaisijaksi saadaan 70 mm.

Sovitteen alareunaan laitetaan vielä 80 mm levennys, jotta siihen mahtuu levyosan kohdistusreikiä vastaavat tapit. Levennyksen korkeus on 10 mm, jolloin siihen jää riittävästi tilaa hitsaussaumalle. Kuvassa 13 nähdään valmis sovite. Sovitteen piirustus on liitteessä 3.



KUVA 13. Sovite edestä ja takaa

Suoritin myös Solidworks-ohjelmalla lujuussimulaation, mistä nähdään sovitteen kuormitukset joka kohdassa (kuva 14). Simulaatiosta käy ilmi, että sovitteen levennyksen alkuun muodostuu noin 53 MPa jännityshuippu. Tälläkin jännityksellä varmuuskerroin on vielä yli 2, joten materiaalin väsymisen vaaraa ei ole.



KUVA 14. Solidworks lujuussimulaatio

Vaikka kohdistustapit kantavatkin osan kuormasta, mitoitetaan hitsausliitos siten, että liitos itsessään on riittävän vahva kantamaan koko kuorman. Hitsauksessa käytettävä lisäaine on useimmiten lujempaa kuin perusmateriaali, joten mitoituksessa käytetään jo aiemmin määriteltyä S355 teräksen varmuuskerrottua sallittua leikkausjännitystä τ_k. Hitsaussauman koko saadaan laskettua kaavalla (5).

$$a = \frac{2{,}83 \cdot T}{\tau_\mathrm{k} \cdot D^2 \cdot \pi}, \tag{5}$$

jossa *a* on hitsaussauman a-mitta.

Syötetään arvot kaavaan (5), jolloin hitsaussauman a-mitaksi saadaan

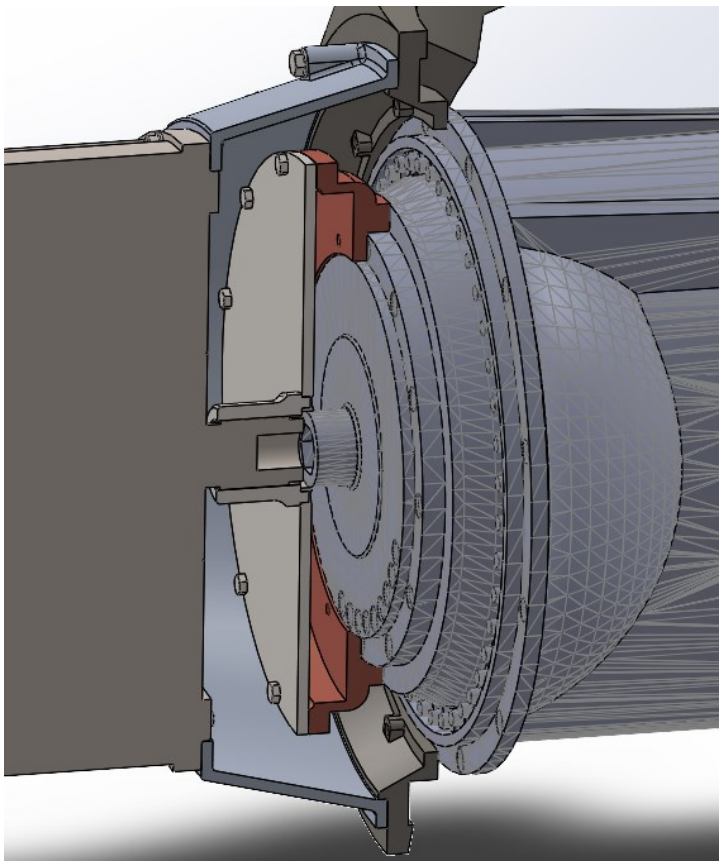
$$a = \frac{2{,}83 \cdot 1800\ \mathrm{N}}{37{,}23\ \mathrm{MPa} \cdot (80\ \mathrm{mm})^2 \cdot \pi} = 6{,}8\ \mathrm{mm}.$$

Pyöristetään tulos vielä ylöspäin lähimpään kokonaislukuun, jolloin mitaksi tulee 7 mm. Kuvassa 15 nähdään valmis voimalinjan adapterin kokoonpano. Kokoonpanon piirustus on liitteessä 4.

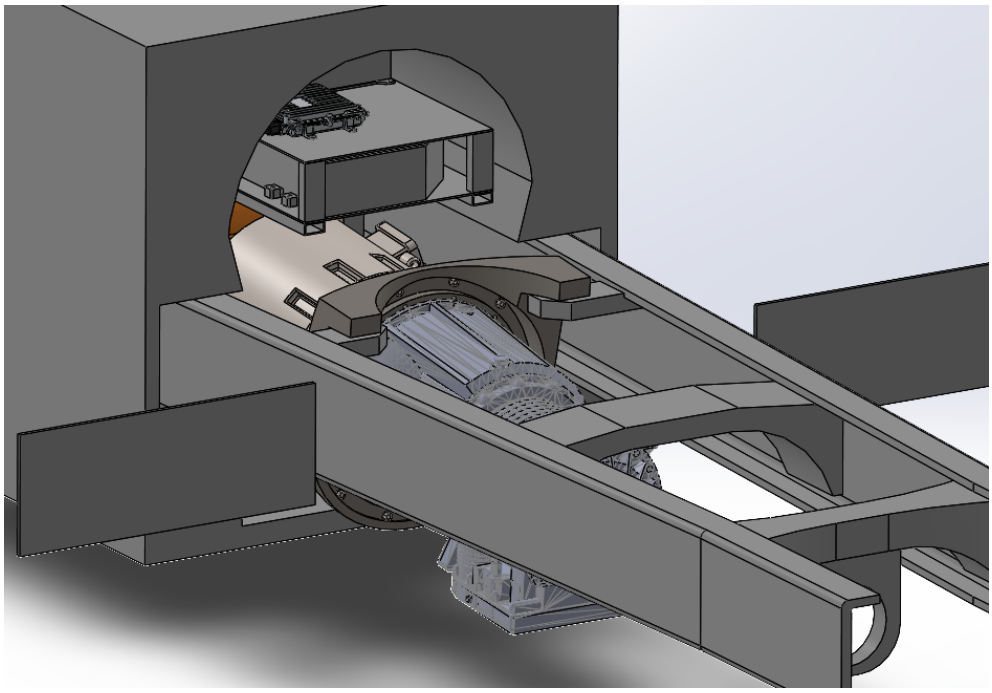
KUVA 15. Voimalinjan adapterin kokoonpano

4.3 Kokoonpano

Kun kaikki mallinnetut osat laitetaan samaan kokoonpanoon, nähdään miten ne asettuvat toisiinsa nähden (kuva 16). Osia yhteen liittäessä on varmistettava, että voimalinjan adapteri on täysin keskellä vaihteiston turbiinia. Sähkömoottorin valmistaja sallii maksimissaan 0,1 mm siirtymän akselin keskilinjaan nähden. Kokoonpano on suoritettava niin, että ensin liitetään vaihteiston kiinnityskehä sekä voimalinjan adapteri vaihteistoon. SAE adapteri liitetään sähkömoottoriin, jonka jälkeen kokonaisuudet voidaan yhdistää. Kuvasta 17 nähdään, miten kokoonpano asettuu kuorma-auton runkoon.



KUVA 16. Leikkaus kokoonpanosta



KUVA 17. Kokoonpano asennettuna kuorma-auton runkoon

5 POHDINTA

Opinnäytetyön tavoitteena oli suunnitella ratkaisu kuorma-auton vaihteiston ja sähkömoottorin liittämiseen. Mielestäni lopputulos vastaa hyvin työn tavoitteita teoreettiselta näkökannalta. Suunnitelmaa ei pystytty työn tekemisen aikana vielä toteuttamaan, joten sen toimivuus käytännössä jää vielä nähtäväksi. Suurimmat uhat ovat mittavirheet ja asennus. Etenkin vaihteiston turbiinin ruuvireikien etäisyyden mittaus toisistaan osoittautui hankalaksi. Täten kannattaa ehdottomasti koeasentaa valmis levyosa turbiiniin ennen kuin se hitsataan yhteen sovitteen kanssa. Asennuksessa suurin vaikeus tulee todennäköisesti voimalinjan adapterin kohdistamisessa turbiinin keskelle, koska ruuvien rei'issä on aina jonkin verran pelivaraa ja sähkömoottorin valmistaja sallii vain 0,1 mm siirtymän akselin liitoksessa.

Polttomoottoriautojen muuttaminen täyssähköisiksi ei ainakaan vielä ole kovin yleistä, mutta tulevaisuudessa päästötavoitteiden kiristyessä entisestään ne saattavat vielä yleistyä. Tällä hetkellä en näe vanhan käyttöauton sähköistämisessä hirvesti järkeä, koska komponenteista ja asennustyöstä aiheutuvat kustannukset lähestyvät jo halvimpien uusien sähköautojen hintoja. Hintojen voidaan kuitenkin olettaa tippuvan, jos täyssähkömuunnokset yleistyvät. Lisäksi auton runko kuluu ajan mittaan, jolloin sähköiseksi muunnettu vanha auto ei välttämättä kestä yhtä kauaa kuin uusi sähköauto. Klassikkoauton muuttaminen harrastusmielessä sen sijaan vaikuttaa jo nyt järkevältä. Klassikkoautojen moottoreihin ei välttämättä löydy yhtä helposti varaosia kuin uudempiin autoihin, jolloin voimanlähteen vaihto saattaa olla väistämättä edessä. Klassikkoautoista myös yleisesti pidetään parempaa huolta ajokilometreihin nähden, kuin tavallisista käyttöautoista, joten rungon voi olettaa kestävän paljon pidempään. Riippuu siis autosta ja käyttötarkoituksesta kuinka järkevää muunnoksen tekeminen on. Staran hankkeessa muunnoksen tekeminen tuntuu järkevältä vaihtoehdolta, koska kuorma-autot ovat muutenkin paljon kalliimpia kuin henkilöautot, ja jos sähköistämistä ei nähdä järkeväksi, voidaan kuorma-auton dieselmoottori asentaa takaisin

LÄHTEET

Cavallo, C. n.d. All about 6061 aluminum (properties, strength and uses). Thomas. Luettu 20.7.2021. https://www.thomasnet.com/articles/metals-metal-products/6061-aluminum/

Ferguson Perforating. n.d. 6061 aluminium alloy. Luettu 26.8.2021. https://www.fergusonperf.com/the-perforating-process/material-information/specialized-aluminum/6061-aluminium-alloy/

Helsingin kaupunki. 2020. Staran historia. Julkaistu 20.4.2020. Luettu 11.6.2021. https://www.hel.fi/stara/fi/staran-esittely/Historia/

Helsingin kaupunki. 2021. Liikelaitos Stara. Julkaistu 3.5.2021. Luettu 11.6.2021. https://www.hel.fi/stara/fi/staran-esittely/

Jokela, M. 2021. Arvio: pieni uusi sähköauto vuonna 2030 maksaa 3 000–5 000 euroa bensiiniautoa enemmän. Moottori. Julkaistu 16.2.2021. Luettu 29.8.2021. https://moottori.fi/liikenne/jutut/arvio-pieni-uusi-sahkoauto-vuonna-2030-maksaa-3-000-5-000-euroa-bensiiniautoa-enemman/

Järveläinen, V. 2021. Suomessa ryhdytään muuttamaan dieselkuormureita sähköisiksi – lue tämä, ennen kuin tuomitset. MTV Uutiset. Julkaistu 28.5.2021. Luettu 29.8.2021. https://www.mtvuutiset.fi/artikkeli/suomessa-ryhdytaan-muuttamaan-dieselkuormureita-sahkoisiksi-lue-tama-ennen-kuin-tuomitset/8154416

Kainulainen, J. 2021. Sähköautojen maine horjui luotettavuustutkimuksessa – Korjaamokäyntejä kertyi paljon, korjausajat venyivät ja lasku oli kova. Julkaistu 17.6.2021. Luettu 12.9.2021. https://www.kauppalehti.fi/uutiset/sahkoautojen-maine-horjui-luotettavuustutkimuksessa-korjaamokaynteja-kertyi-paljon-korjausajat-venyivat-ja-lasku-oli-kova/0720fa13-0e32-491a-b284-4e96348f99da

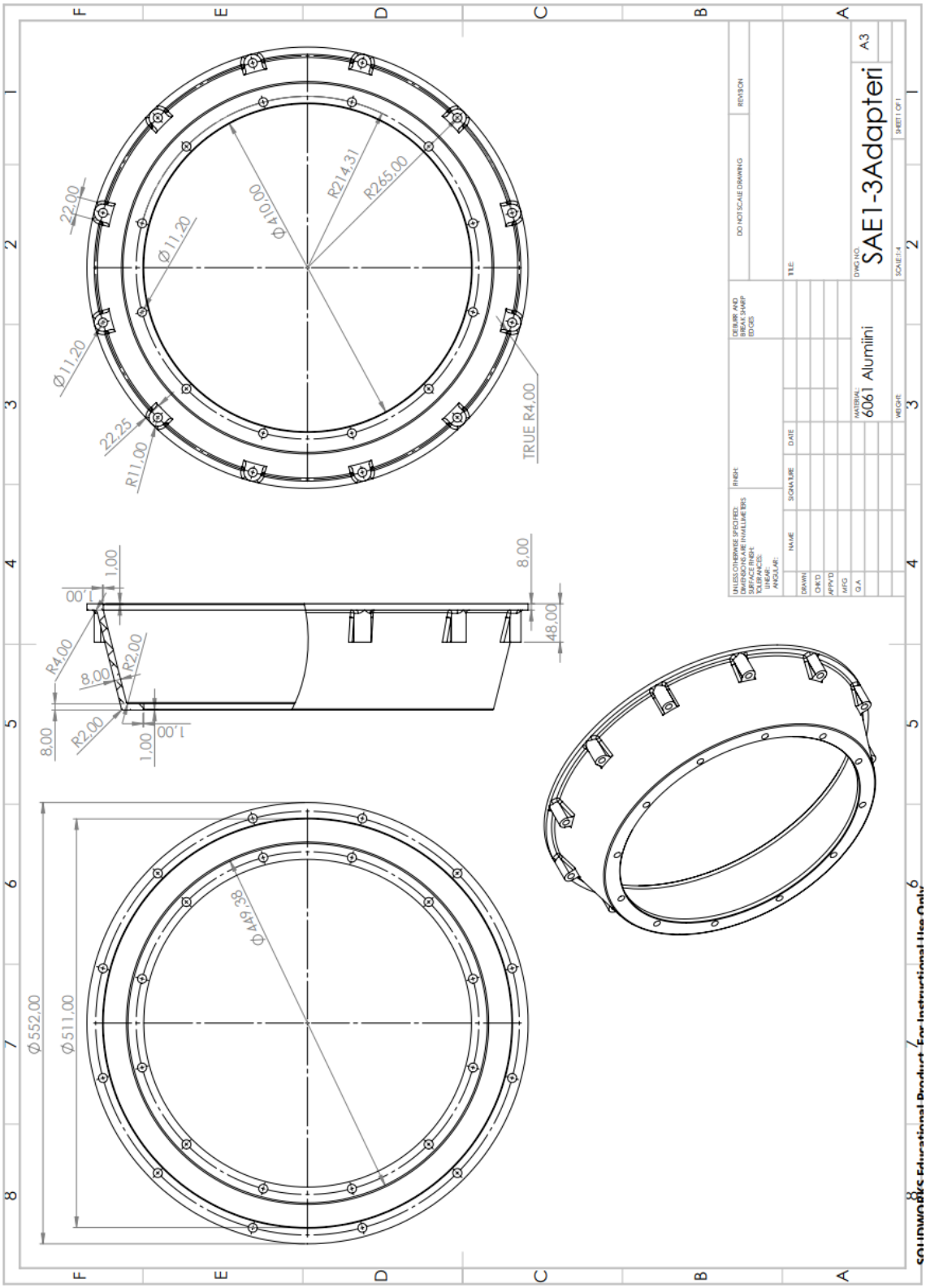
Parker, B. n.d. Converting your car to electric. Voltage. Luettu 29.8.2021. https://www.onvoltage.com/articles/how-to-convert-a-classic-car-to-an-electric-vehicle

Päivän Lehti. 2021. Onko sähköauto luotettava talvella? – Selvitys vertaili, kuinka usein sähköauto jättää tien päälle. Julkaistu 28.1.2021. Luettu 12.9.2021. https://www.paivanlehti.fi/onko-sahkoauto-luotettava-talvella-selvitys-vertaili-kuinka-usein-sahkoauto-jattaa-tien-paalle/

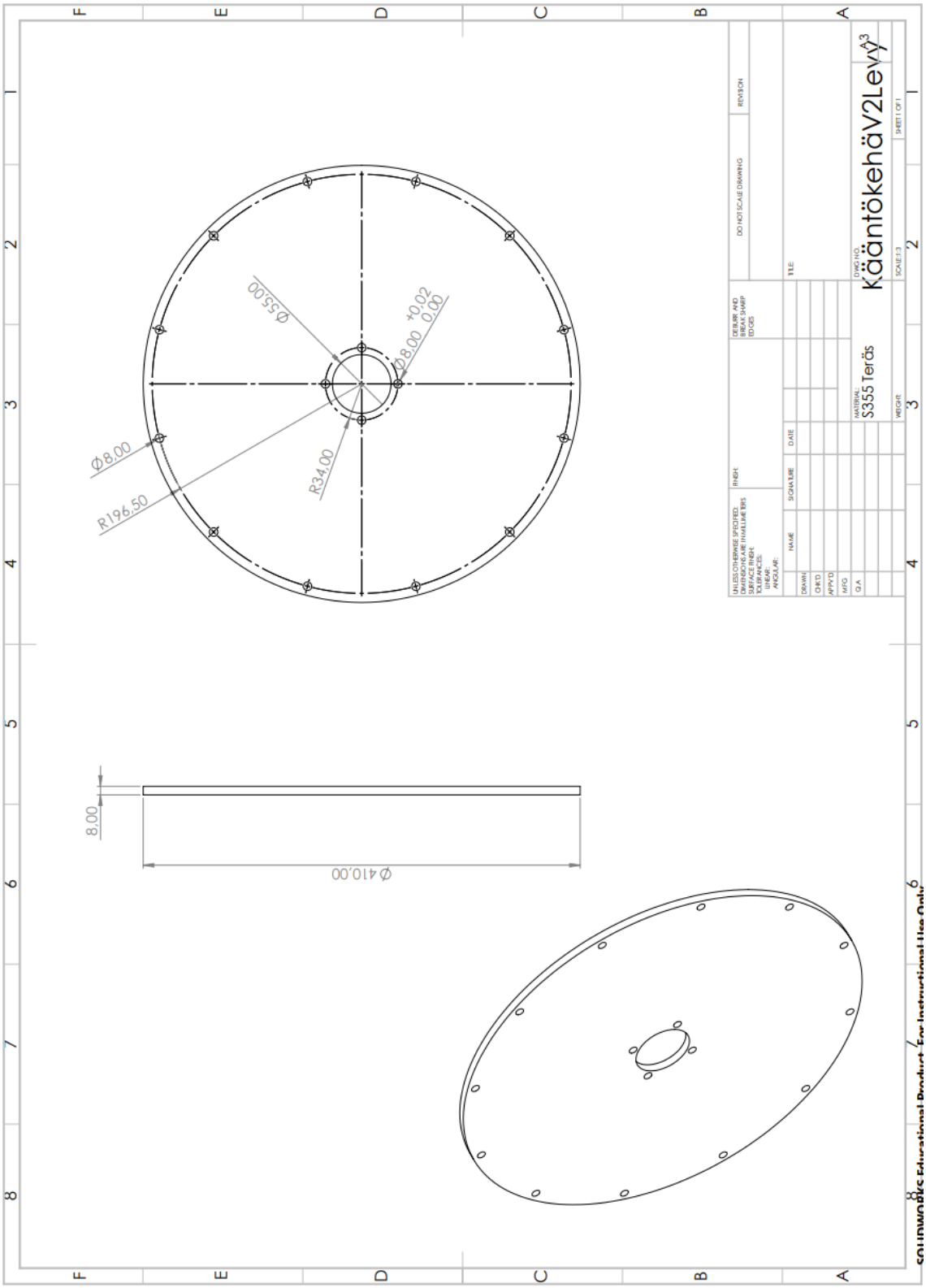
Renault Group. 2021. What is the lifespan of an electric car battery? Julkaistu 11.3.2021. Luettu 12.9.2021. https://www.renaultgroup.com/en/news-on-air/news/what-is-the-lifespan-of-an-electric-car-battery/

LIITTEET

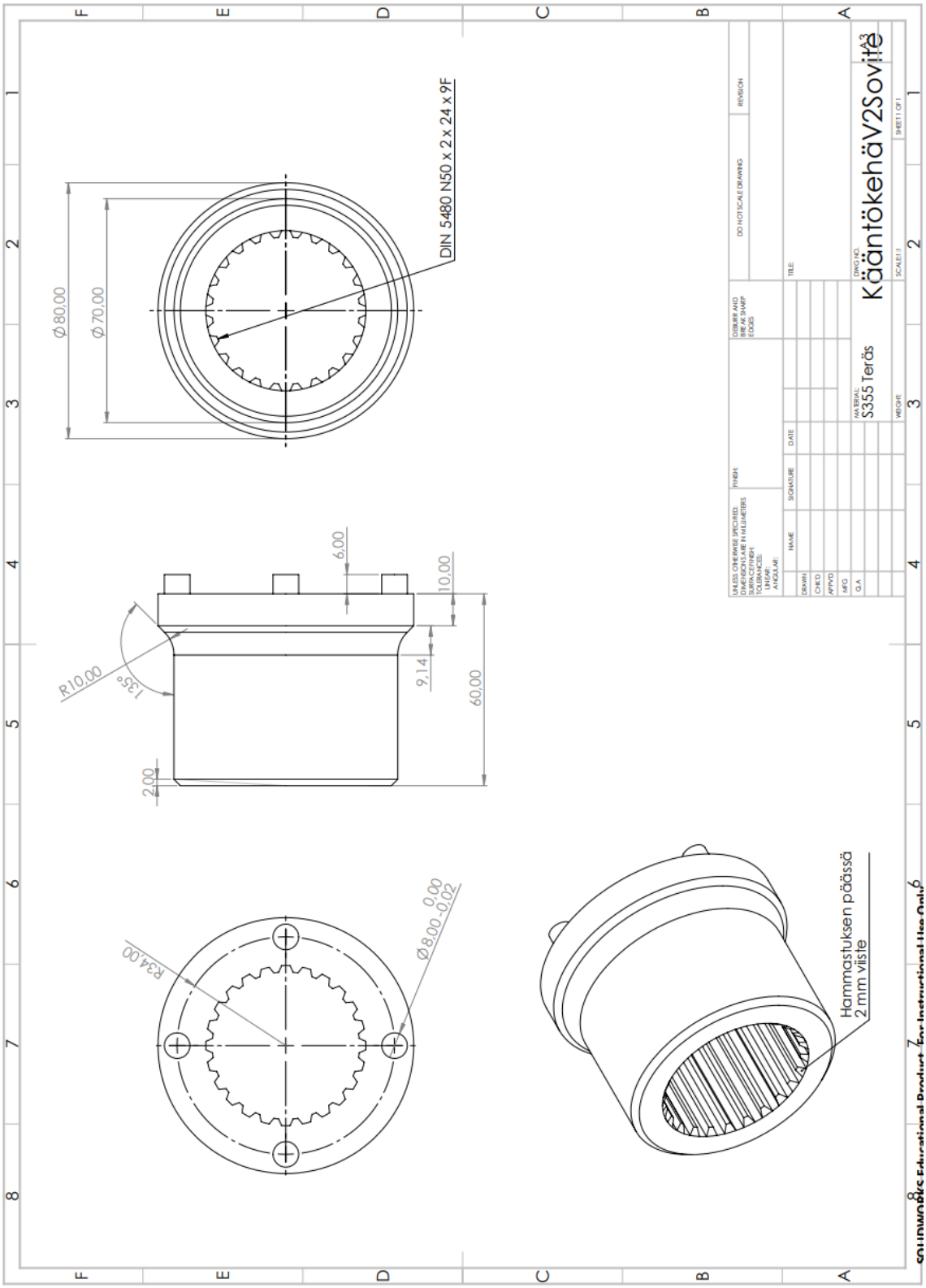
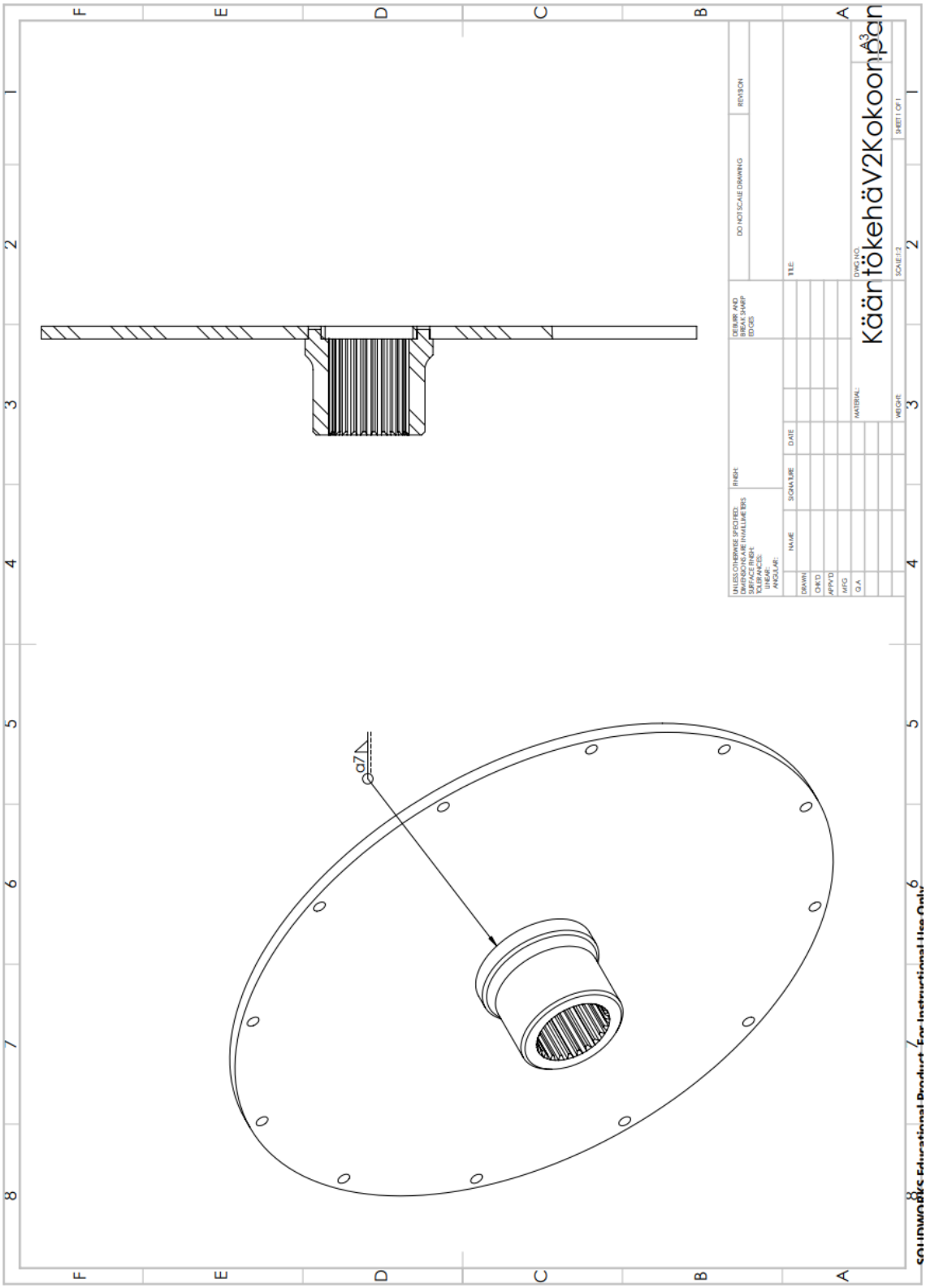
Liite 1. SAE adapterin tekninen piirustus



Liite 2. Levyosan tekninen piirustus



Liite 3. Sovitteen tekninen piirustus



Liite 4. Voimalinjan adapterin tekninen piirustus