Pyry Koivistoinen

Formula Student -kilpa-auton invertterien kevennys

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Ajoneuvotekniikka

Insinöörityö

21.4.2022

Tiivistelmä

Tekijä:	Pyry Koivistoinen
Otsikko:	Formula Student -kilpa-auton invertterien kevennys
Sivumäärä:	27 sivua
Aika:	21.4.2022
Tutkinto:	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma:	Ajoneuvotekniikka
Ammatillinen pääaine:	Autosähkötekniikka
Ohjaajat:	Lehtori Sanna Heikkinen

Insinöörityö toteutettiin Metropolia Ammattikorkeakoulun Metropolia Motorsport -projektille. Insinöörityön tavoitteena oli vähentää vuoden 2021 auton painoa keventämällä invertereitä mahdollisimman paljon, mutta siten, että auto pysyy sääntöjen mukaisena, turvallisena ja helppona huoltaa. Tärkeimmät suunnitellut komponentit olivat invertteripino ja jäähdytyssiili. Insinöörityön kirjallisen osuuden tavoitteena oli selventää suunnittelupäätöksiä sekä toimia suunnittelupohjana tuleville invertterilaatikoille.

Työ toteutettiin projektiluontoisena yhteistyössä Metropolia Motorsportin kanssa. Suunnittelu aloitettiin tarkastamalla säännöt ja määrittämällä projektiin liittyvät rajoitteet. Tämän jälkeen tehtiin alustavat mallinnukset tarvittavista osista ja valmistettiin ne. Mallinnukseen käytettiin Catia V5 -ohjelmaa ja koneistukseen Siemens NX CAM -ohjelmaa. Valmistuksen jälkeen osien toimivuus ja yhteensopivuus tarkastettiin sekä puutteet ja epäkohdat huomioitiin. Työn tuloksena saatiin aikaan toimiva invertteripino ja jäähdytyssiili.

Avainsanat: Formula Student, invertteri, kevennys

Abstract

Author:	Pyry Koivistoinen
Title:	Reducing inverter weight in a Formula Student -car
Number of Pages:	27 pages
Date:	21 April 2022
Degree:	Bachelor of Engineering
Degree Programme:	Automotive Engineering
Professional Major:	Automotive Electronics Engineering
Supervisors:	Sanna Heikkinen, Lecturer

This thesis was carried out for the Metropolia Motorsport project of Metropolia University of Applied Sciences. The aim of the thesis was reducing the weight from the inverters of the 2021 car as much as possible, still keeping the car rule compliant, safe to operate and easy to maintain. The most important components that were designed in the project were the inverter stack and the heat sink. The aim of the written portion of the thesis was to clarify the design decisions, thus, give a starting point for improved inverter box designs in the future.

The project was carried out in co-operation with Metropolia Motorsport. The design work was started by checking the rules and determining the constraints concerning the project. After that, initial models were carried out and manufactured. Catia V5 was used for modeling and Siemens NX Cam for machining. After manufacturing the parts, their functionality and compatibility were tested, and imperfections and defects were noted. The result of the project was a working inverter stack and a heat sink.

Keywords: Formula Student, inverter, reducing weight

Sisällys

Lyhenteet

1 Johdanto 1

2 Suunnittelu 2

2.1 Auton ja laitteiston esittely 2
2.2 Projektin tavoite ja työn edistyminen 4
2.3 Säännöt ja turvallisuus 5
2.4 Helppokäyttöisyys 6
2.5 Invertteripino 7
2.6 Jäähdytyssiili 9
2.6.1 Suunnittelu 10
2.6.2 Rajoitteet 11
2.6.3 Koneistuksen rajoitteet 12
2.6.4 Tiivistys ja ruuvit 14
2.6.5 Kevennys 16

3 Valmistus 16

3.1 Koneistus 16
3.2 3D-tulostus 18
3.3 Laserleikkaus, lämpökäsittely ja taitto 19
3.4 Ilmenneitä ongelmia 19
3.4.1 Jäähdytyssiilin koeponnistus 19
3.4.2 Invertteripinon väliholkit 21

4 Yhteenveto 22

4.1 Tavoitteet ja niiden onnistuminen 22
4.2 Jäähdytyssiili 22
4.3 Invertteripino 25
4.4 Huomioita ja kehityksen kohteita 26

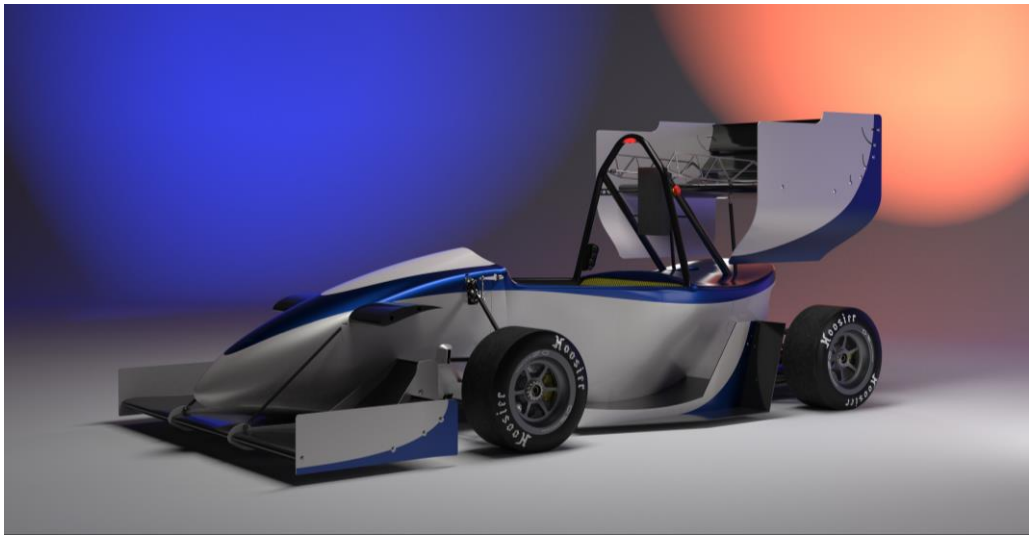
Lähteet 27

Lyhenteet

FS:	Formula Student -kilpailu.
HPF021:	Metropolia Motorsportin uusin sähköinen Formula Student -auto.
FEM:	Finite Element Method, elementtimenetelmä.
FEA:	Finite Element Analysis, elementtimenetelmällä suoritettu laskenta.
CAM:	Computer Aided Manufacturing, tietokoneavusteinen valmistus.
CNC:	Computer Numerical Control, numeerinen ohjaus.
PLA:	Polylatic Acid, polylaktidi.

1 Johdanto

Insinöörityö toteutettiin Metropolia Ammattikorkeakoulun Metropolia Motorsport -projektille. Insinöörityön tarkoituksena oli pudottaa Metropolia Motorsportin kuvan 1 HPF021-auton painoa keventämällä invertereitä mahdollisimman paljon silti pitäen auto sääntömääräisenä, turvallisena ja helppona huoltaa. Insinöörityön kirjallisen osuuden tavoitteena on selventää suunnittelupäätöksiä sekä toimia suunnittelupohjana tuleville invertterilaatikoille.



Kuva 1. HPF021 renderöitynä katteineen.

Formula Student (FS) on maailmanlaajuinen korkeakouluopiskelijoiden insinöörisuunnittelukilpailu, jonka tarkoituksena on valmistaa joko sähköinen tai polttomoottorikäyttöinen kilpa-auto. Kilpailut koostuvat staattisista ja dynaamisista osuuksista, ja voittajaksi selviää eniten pisteitä saanut tiimi. Staattisissa osuuksissa arvioidaan ajoneuvon suunnittelua, valmistusta sekä tiimin markkinointitaitoja. Dynaamiset osuudet sisältävät erilaisia ajosuoritteita, kuten kiihdytys ja autocross.

Metropolia Motorsport on ainoastaan korkeakouluopiskelijoista koostuva projekti, joka on jatkunut vuodesta 2000. Tiimissä on tällä hetkellä noin 40 jäsentä,

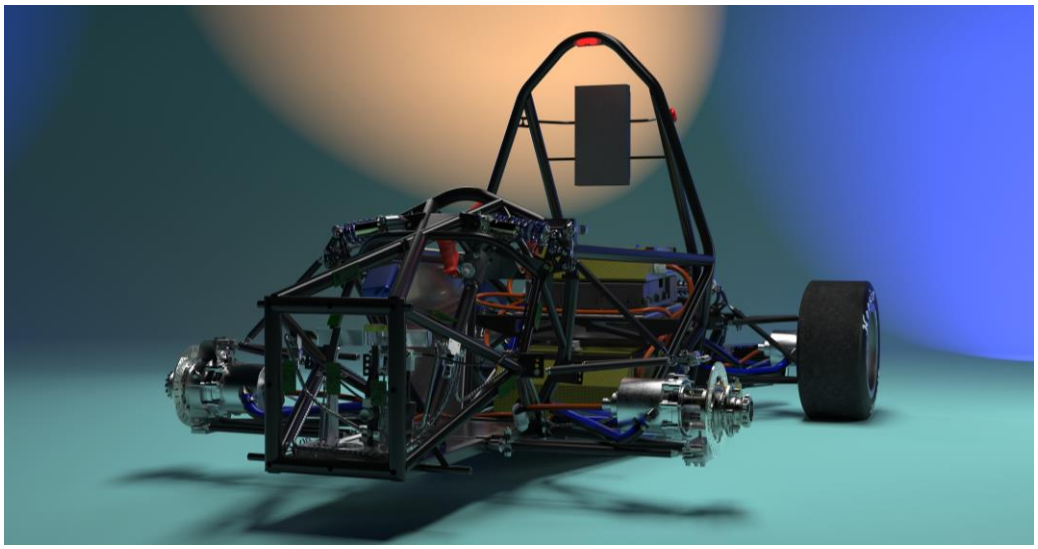
joille jokaiselle kuuluu oma vastuualue. Tiimiin kuuluminen on vapaaehtoista, ja töitä tehdään koulun ohella.

2 Suunnittelu

Koko projekti sisälsi invertterilaatikon, telineen, invertteripinon, jäähdytyssiilin sekä muita näitä yhdistäviä osia. Tässä insinöörityössä keskitytään ainoastaan invertteripinoon ja jäähdytyssiiliin sekä niihin liittyviin osiin.

2.1 Auton ja laitteiston esittely

HPF021 on Metropolia Motorsportin uusin sähköinen FS-auto. Auton renderöinti on nähtävissä kuvassa 2. Se on Metropolia Motorsportin ensimmäinen auto, joka käyttää voimansiirtona neljää pyörän navalle sijoitettua sähkömoottoria. Auton suunnittelu aloitettiin jo syksyllä 2019, mutta viime vuosien pandemian takia autolla ei ole vielä päästy osallistumaan yhteenkään kilpailuun.



Kuva 2. HPF021 renderöitynä ilman katteita.

Autoa päästiin koeajamaan ensi kertaa kesällä 2021 (kuva 3), jonka jälkeen sitä on testattu ahkerasti radalla. Autosta on karsittu pois testauksen aikana ilmenneitä ongelmia, jotta se olisi kilpailukykyinen ja luotettava tulevia kisoja varten.

Jos pandemiatilanne sallii, autolla osallistutaan kesällä 2022 kisoihin Sveitsissä, Saksassa ja Tšekissä.

Kuva 3. HPF021 kesältä 2021.

HPF021 käyttää kahta Lenze DCU 60/60 invertteriä pyörittämään neljää napamoottoria. Invertterit on asennettu auton takaosaan kuljettajan selän taakse. Moottorit ovat kiinni olka-akseleissa liitettyinä vaihteistoon ja sitä kautta renkaaseen. Taulukkoon 1 on listattu joitakin keskeisiä invertterin ja moottorin tietoja.

Taulukko 1. Moottorin ja invertterin tietoja.

Nimi	Lenze DCU 60/60		Nimi	Fischer TI085
Käyttöjännite	600 V		Vääntö	24,6 Nm
Jatkuva virta	58 A		Jatkuva virta	51 A
Maksimi RPM	20 000		Maksimi RPM	20 000
Moottorin ohjaus	2 kpl		Jatkuva teho	31 kW
Kytkentätaajuus	16 kHz		Paino	2,8 kg

2.2 Projektin tavoite ja työn edistyminen

Projektin tavoitteena oli poistaa autosta mahdollisimman paljon painoa säilyttäen sen toiminnallisuus sekä turvallisuus. Painon pudottaminen parantaa auton kiihtyvyyttä ja se voi vaikuttaa painopisteen alentumiseen. Nämä molemmat voivat olla eduksi kilpailussa.

Aluksi sovittiin Metropolia Motorsportin silloisen sähköpäällikön kanssa projektin tavoitteet mitä haluttiin saavuttaa, ja tehtiin alustava suunnitelma. Tämän jälkeen mallinnettiin suunnitellut projektin sisältämät komponentit. Mallinnuksen jälkeen valmistettiin kaikki tarvittava ja huomioitiin puutteet ja epäkohdat. Lopuksi käytiin läpi mitä saavutettiin, miten kokonaisuus toimii ja mitä parannettavaa oli.

Uudet osat suunniteltiin yhteensopiviksi HPF021-formulan kanssa, jotta voitaisiin välttää ylimääräistä työtä auton muokkaamisessa. Muutos suunnittelussa koski jäähdytysletkuja, johtosarjaa, moottorin johtojen paikoitusta sekä kiinnitystä auton runkoon. Invertterien painot mitattiin ja tämän pohjalta tehtiin arvio,

että painoa olisi mahdollista pudottaa noin puoleen alkuperäisestä, mikä asetettiin tavoitteeksi. Mallinnuksessa käytettiin Catia V5 ja Siemens NX -ohjelmia. CAM-ohjelma tehtiin Siemens NX CAM -ohjelmalla.

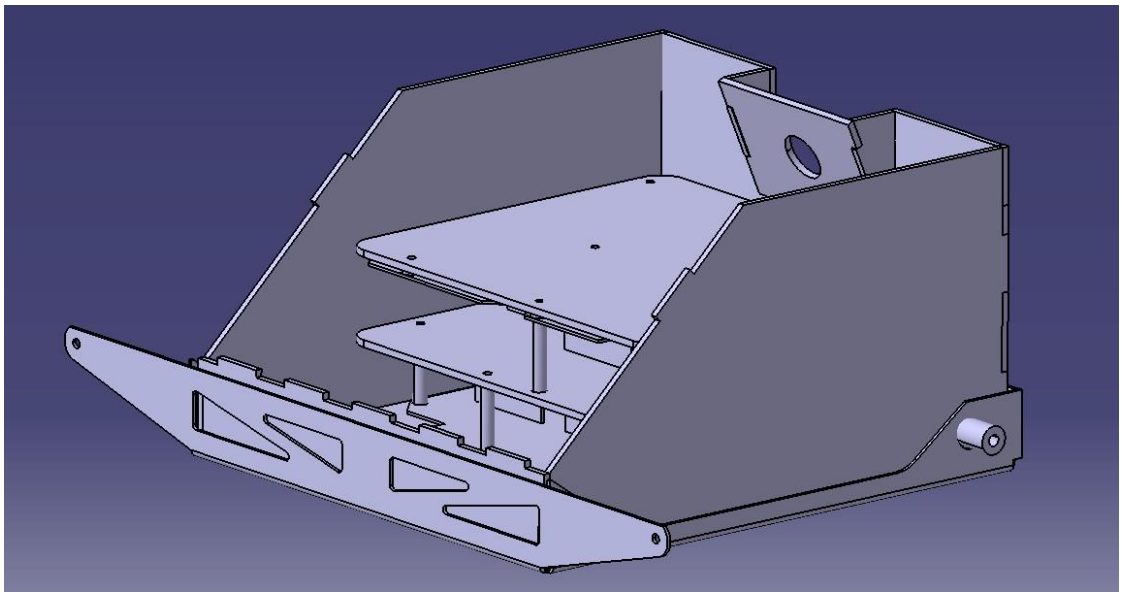
2.3 Säännöt ja turvallisuus

Metropolia Motorsport eurooppalaisena tiiminä seuraa Formula Student Germanyn sääntöjä. Viitattaessa sääntöihin viitataan kyseisiin sääntöihin. Projektin aikana seurattiin tuoreinta versiota eli Formula Student Rules 2022, version 1 [1].

Projektin suunnitteluun vaikuttavia sääntöjä ovat:

- EV 4.5.4, jossa määrätään, että kaikki korkeajännitekomponentit ja -laatikot tulee olla suojattu sateelta tai lätäköiltä.
- EV 4.2.1, jossa määrätään, että kaikki laatikot, jotka sisältävät korkeajännitekomponentteja pitää olla merkitty ISO 7010-W012 standardin mukaisella varoituskolmiolla, jossa on teksti “High Voltage”.
- EV 3.1.1, jossa määrätään, että kaikki sähköä johtavat komponentit alle 100 mm:n päässä korkeajännitteestä pitää maadoittaa niin, että resistanssi on alle 300 mΩ mitattuna matalajännitepiirin maadoituspisteestä.
- EV 4.5.8, jossa määrätään, että kaikissa korkeajännitejohdoissa, jotka kulkevat laatikoiden ulkopuolella pitää olla vedonpoisto vähintään molemmissa päissä, ja johtojen tulee kestää 200 N:n veto vahingoittumatta.

Edellä mainitut säännöt eivät juurikaan rajoittaneet invertterilaatikon suunnittelua, joka esitetään kuvassa 4. Osista kuitenkin pyrittiin tekemään mahdollisimman kestäviä ja hyvin toimivia.



Kuva 4. Catia V5 -ohjelmalla mallinnettu suunnittelumalli kaikista projektiin liittyvistä komponenteista.

Invertterilaatikon maadoitus on tärkeää turvallisuuden kannalta, sillä piirilevyissä kulkee korkeimmillaan 600 voltin jännite. Maadoitus toteutettiin sääntöjen mukaiseksi, eli säännön EV3.1.1 asettamat vaatimukset täytettiin.

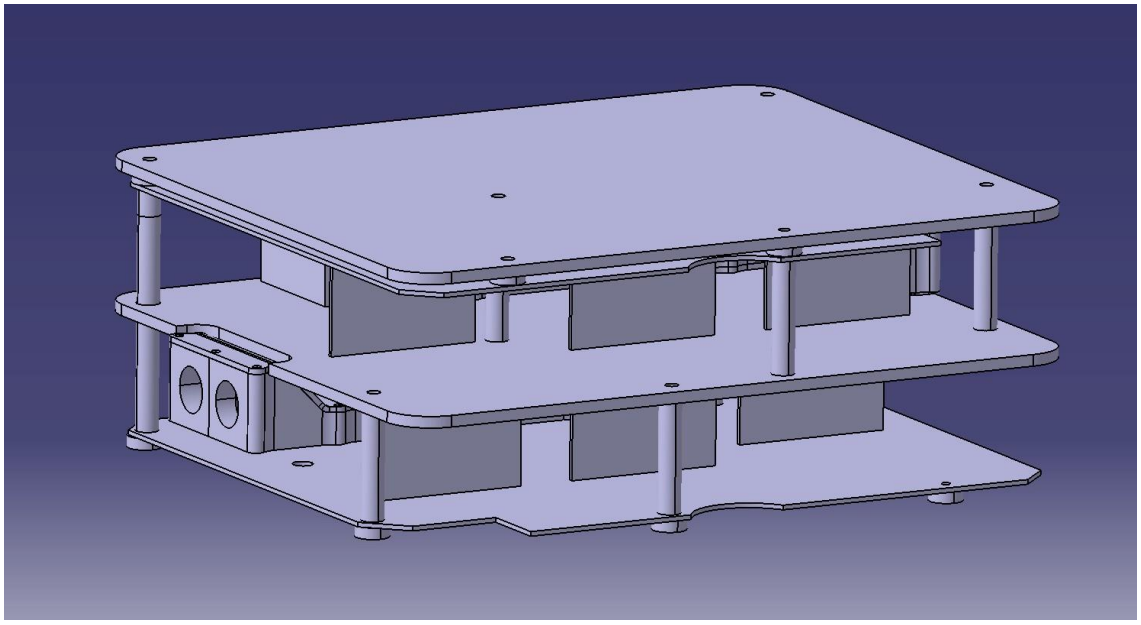
2.4 Helppokäyttöisyys

Invertterit tulee pystyä huoltamaan mahdollisimman vaivattomasti, joten laatikkoon tulee päästä käsiksi helposti. Laatikkoon suunniteltiin kansi, joka aukeaa laajalta alueelta ja helpottaa invertterien poistamista. Invertterit asetettiin päällekkäin, jotta tämän voi poistaa autosta pakettina ja purkaa muualla, jossa on enemmän tilaa. Invertteri on melko kookas, joten invertteripinon poistamiseksi tulee poistaa ensin tulipelti. Palamattomasta materiaalista valmistettu tulipelti sijaitsee kuljettajan selän takana ja jakaa ohjaamon sekä korkeajännitekomponentit. Invertterejä ei tarvitse huoltaa usein, joten tulipellin poistaminen ei vie liikaa aikaa. Invertterin kiinnityksessä pyrittiin käyttämään mahdollisimman paljon samanlaisia ruuveja, jotta asennus ja purkaminen helpottuisi.

2.5 Invertteripino

Jotta inverttereistä voitaisiin pudottaa mahdollisimman paljon painoa, on alumiiniset kuoret poistettava. Turvallisuuden vuoksi piirilevyjä ei voi asentaa autoon suojaamatta, joten ne on ympäröity eristävällä aramid-kuidusta valmistetulla laatikolla ja väliseinillä. Levyt asetettiin päällekkäin niin, että alkuperäinen letkulähtöjen asento pysyi samana. Moottorin liittimet asetettiin auton kulkusuunnassa eteenpäin ja tulipeltiä vastapäätä, jotta asennus ja purku helpottuisi.

Kahden piirilevyn välissä on välilevy, jotta piirilevyt eivät olisi suorassa kosketuksessa toisiinsa. Jäähdytyssiilin korkeuden takia sille jouduttiin leikkaamaan hahlo keskimmäiseen välilevyyn. Moottorijohtojen liittimien eteen suunniteltiin tukilevy, joka oli samaa materiaalia kuin laatikon muut seinät. Tukilevy pitää liittimien tarvitsemat lukituslevyt paikoillaan, jotta liittimet saa lukittua turvallisesti. Kuvassa 5 näkyy viimeisin invertteripinon suunnittelumalli.



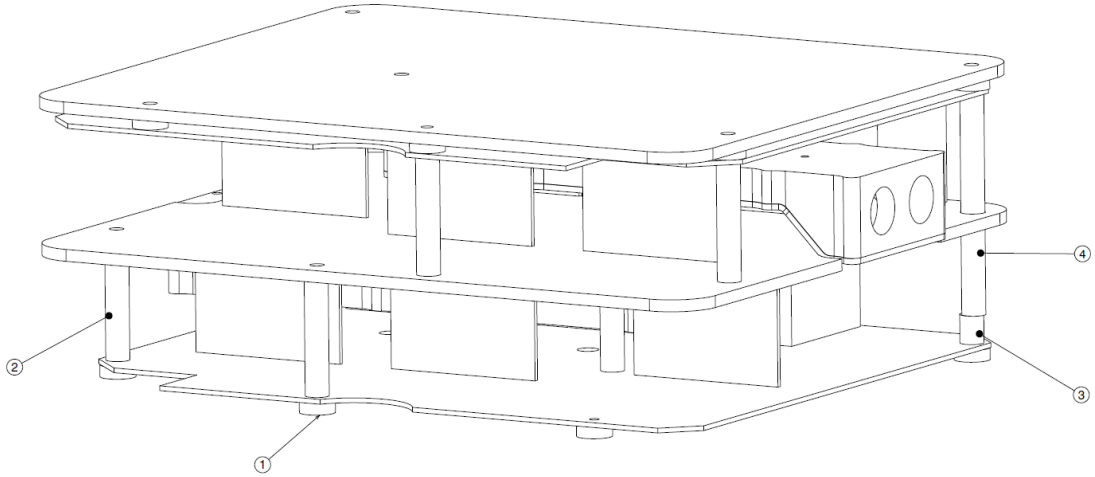
Kuva 5. Invertteripinon suunnittelumalli. Moottorin liittimien tukilevyt eivät näy kuvassa.

Väliholkit ja kiinnitys

Invertterit oli erotettu toisistaan välikappaleilla, jotka toimivat samalla piirilevyjen maadoittimina. Välikappaleiden tarkoitus oli pitää piirilevyt paikoillaan ja kaukana toisista, sillä piirilevyt sisältävät korkeaa jännitettä. 5 mm:n väliholkit suunniteltiin kannattelemaan piirilevyä irti laatikon pohjasta, jotta piirilevyn takapuolella olevat komponentit eivät osuisi mihinkään. Alumiiniset väliholkit päällystettiin kutistesukalla mahdollisten vahinkojen välttämiseksi.

Invertteripino kiinnitettiin telineeseen invertterilaatikon läpi menevillä M4-läpipulteilla. Teline kiinnitettiin auton runkoon käyttäen Nylock-lukkomuttereita. Näin saatiin invertteripinon maadoituspisteet maadoitettua auton runkoon sekä pidettyä invertteripino tukevasti paikallaan.

Välikappaleita oli neljä erilaista, ja ne on merkitty kuvaan 6. Enemmän tietoa mitoista löytyy taulukosta 2. Materiaaliksi valittiin alumiini sen virranjohtavuuden, keveyden sekä saatavuuden takia.



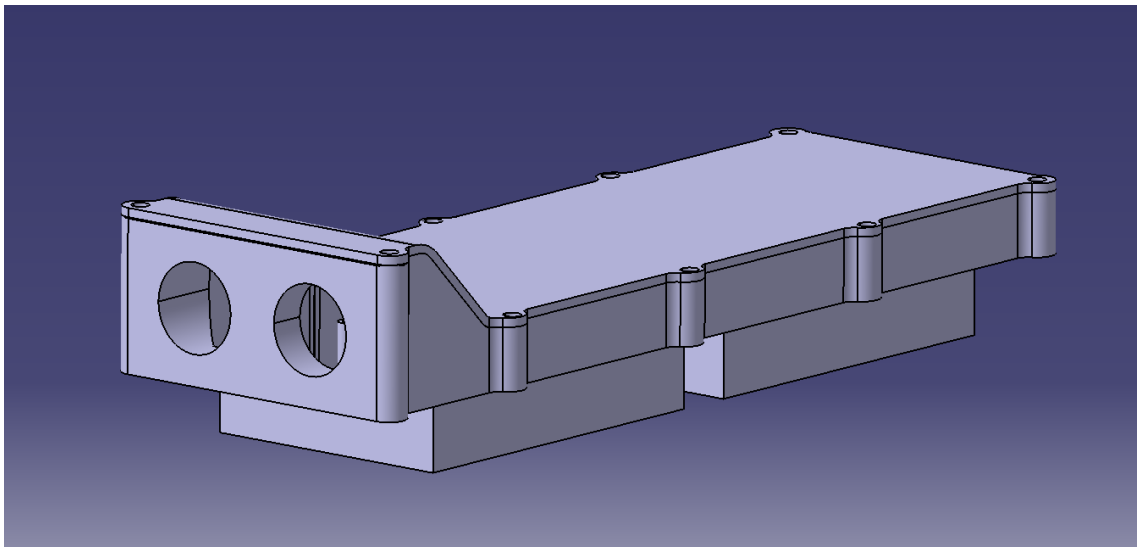
Kuva 6. Eri holkit numeroituina.

Taulukko 2. Väliholkit listattuina.

Numero	Korkeus	Halkaisija	Reikä	Kierre	Kpl
1	5 mm	15 mm	Läpi	Ei	12
2	50 mm	10 mm	20 mm	M4	6
3	12 mm	10 mm	Läpi	Ei	2
4	93 mm	10 mm	30 mm	M4	2

2.6 Jäähdytyssiili

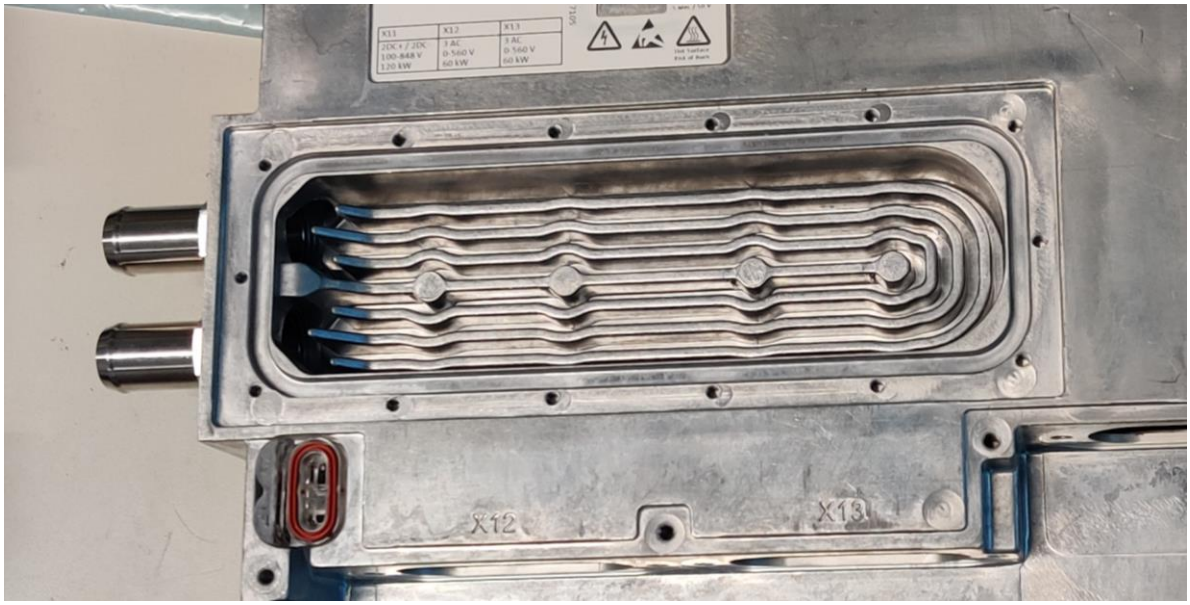
Invertteri kuumenee merkittävästi muuntaessaan tasavirtaa auton akustolta vaihtovirraksi, jota moottorit käyttävät, joten tarvitaan jotain jäähdyttämään sitä. Yleisesti jäähdytys voisi olla ilmajäähdytys tai vesijäähdytys. Jäähdytyspaketti haluttiin pitää hyvin samanlaisena kuin alkuperäinen, joten valittiin vesijäähdytys. Tämä myös toimi hyvin auton kanssa, sillä alkuperäiset invertterit olivat vesijäähdytteisiä ja autoon valmiiksi suunniteltua jäähdytysjärjestelmää voitiin hyödyntää. Kuvassa 7 näkyy alustava suunnittelumalli jäähdytyssiilistä.



Kuva 7. Jäähdytyssiilin suunnittelumalli.

2.6.1 Suunnittelu

Vanha jäähdytyssiili, joka näkyy kuvassa 8, oli tehty valamalla alumiinista ja se sijaitsi invertterikotelon kannessa. Kun kansi poistettiin, oli suunniteltava uusi jäähdytysjärjestelmä. Jäähdytyssiilin rivasto pidettiin tarkoituksella hyvin samanlaisena kuin alkuperäinen, jotta saavutettaisiin sama jäähdytysteho.

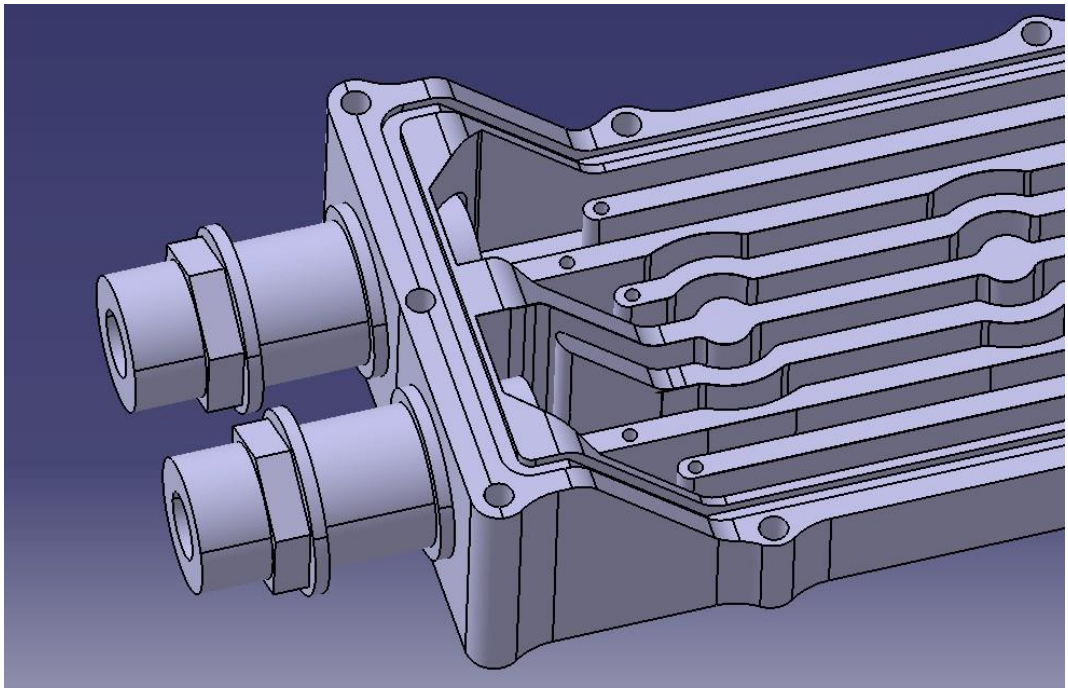


Kuva 8. Invertterin jäähdytyssiili.

Jäähdytyssiilin kansi suunniteltiin jäähdytyssiilin profiilin muotoiseksi. Kansi puristuu tiivistettä vasten, mikä estää veden pääsemisen jäähdytyssiilin ulkopuolelle paineistettaessakin. Ensin kansi suunniteltiin koneistettavaksi sen poikkeavan muodon takia. Lopulta päädyttiin laserleikkaukseen ja taittoon, sillä tämä metodi on yksinkertaisempi, vie vähemmän aikaa ja minimoi hukkamateriaalin.

Letkulähdöt suunniteltiin kiinnitettäväksi kierteellä jäähdytyssiilissä oleviin M20 kierteisiin (kuva 9). HPF021:n jäähdytysjärjestelmää ollaan projektin aikana uudelleenrakentamassa ohuemmilla jäähdytysletkuilla ja muutokset huomioitiin suunnitellessa. Adapterin toiseen päähän tehtiin ¾”:n 16 UNF -kierre, joka sopii uusiin letkuliittimiin. Letkulähtö asennettiin laatikon ulkopuolelta ja tiivistettiin o-renkaalla jäähdytyssiilin pintaan sekä invertterilaatikon pintaan. Tarvittaessa

voidaan lisätä tiivistävää ainetta invertterilaatikon pintaan, jos o-renkaan tiiveys ei ole riittävä esimerkiksi ajon aiheuttaman tärinän vuoksi. Adapterin voi kiristää laatikon ulkopuolelta käyttäen 21 mm:n kiintoavainta.



Kuva 9. Jäähdytysletkujen adapterit.

2.6.2 Rajoitteet

Lenzen käyttöoppaassa on määritetty tilavuusvirta 15–25 l/min, joka jäähdytysjärjestelmän tulee saavuttaa [2, s.36]. Kuvassa 10 näkyy ote käyttöoppaasta. Invertterin mukana tulleita lämpötilasensoreita käytettiin, jotta lämpötilan mittaus toimisi mahdollisimman samanlaisesti ja ettei Lenzen ohjelmoinnin puolesta syntyisi ongelmia.

4 Technical data
Water cooling

4.5 Water cooling

For cooling the MOBILE device, the integrated water cooler is connected to the vehicle-specific cooling circuit.

		EMDAG2...	EMDAG3... EMDAG4...	EMDAG5...
Connection of suction and pressure hoses		DN 20 (internal)		
Securing the hoses		Suitable hose clamps		
Flow direction				
in case of vertical installation		from the lower to the higher connection		
in case of horizontal or pending installation		Not relevant		
Fluid volume	l	0.09	0.16	0.12
Composition of the cooling fluid				
Water/ethylene glycol	%	50/50	50/50	50/50
Flow rate Derating at a lower flow rate	l/min	15 ... 25	15 ... 25	15 ... 25
Permissible pressure in the cooling system	bar	1 ... 2	1 ... 2	1 ... 2
Max. test pressure	bar	5	5	5
Permissible temperatures of the cooling fluid in continuous operation	°C	30 ... 65	30 ... 65	30 ... 65
Recommended switch-on temperature for coolant pump	°C	30	30	30

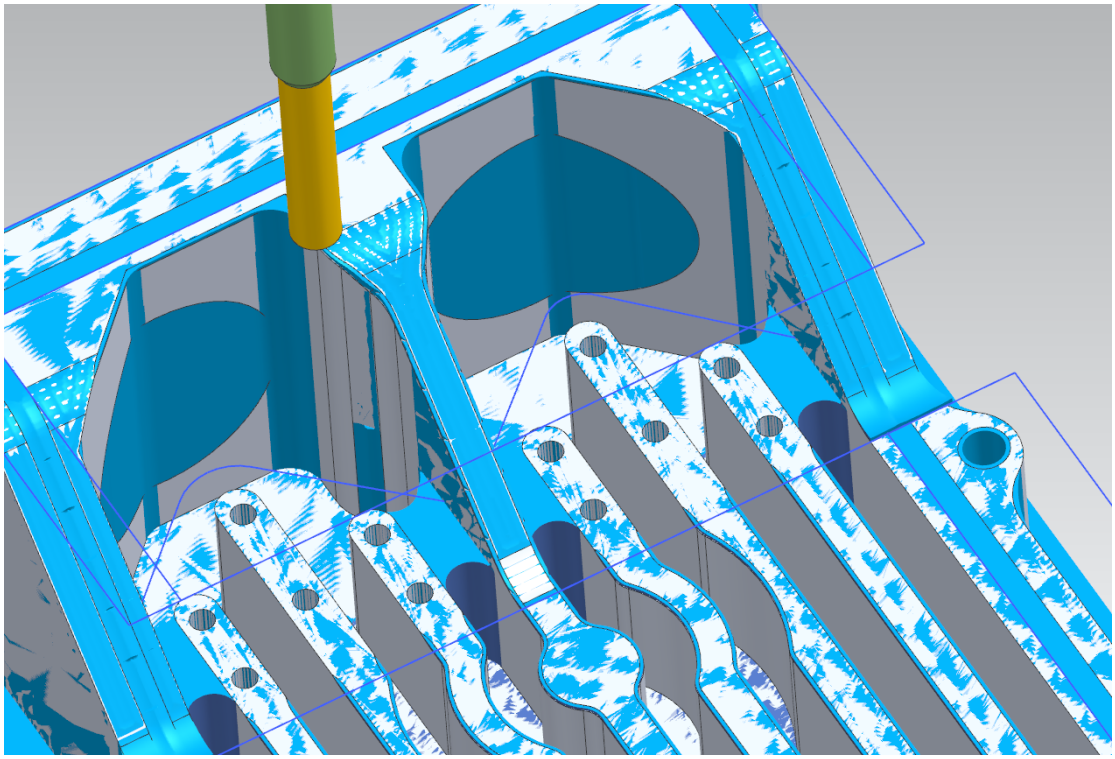
Kuva 10. Lenzen ohjekirjassa määritetyt ohjearvot [2, s.36].

Auton uuden jäähdytysjärjestelmän tulevaksi maksimipaineeksi on arvioitu 2 bar ja normaaliksi paineeksi 1,5 bar, mutta jäähdytyssiilin tulee kestää enemmän mahdollisten ongelmien estämiseksi. Varmuuskerroin paineen puolesta asetettiin kaksi kertaa suuremmaksi kuin arvioitu käyttöpaine, eli kolmeen baariin.

2.6.3 Koneistuksen rajoitteet

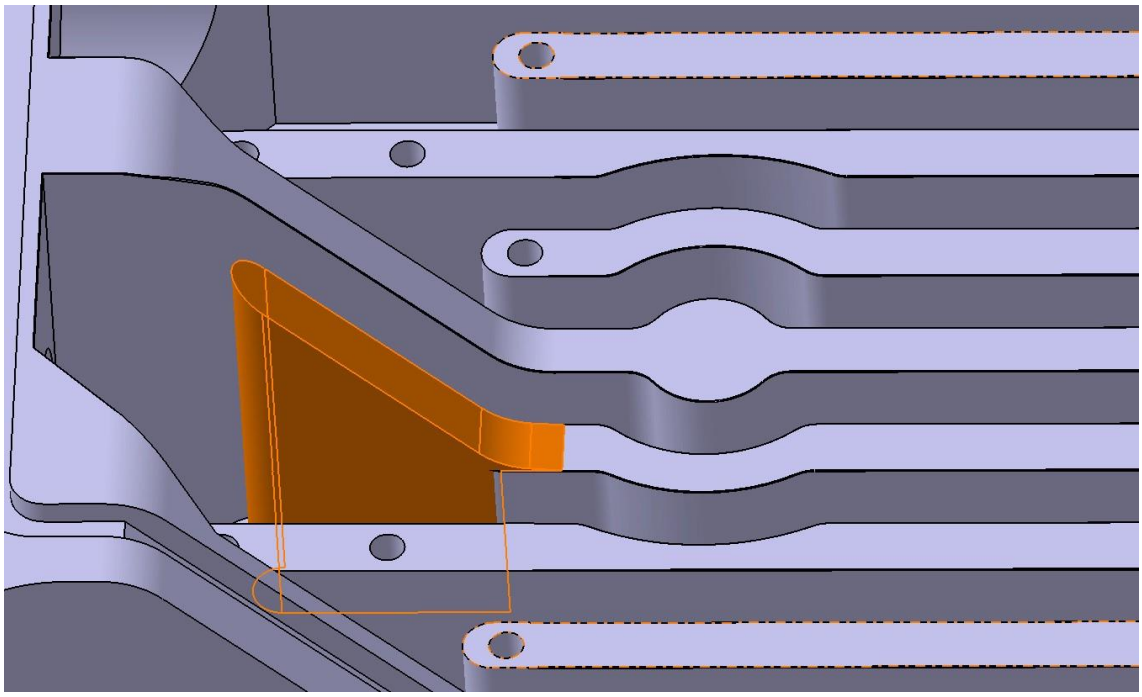
Jäähdytyssiilin pisin vapaapituus oli 32 mm ja leveys 4 mm. Näin pitkä vapaapituus aiheuttaa värinää jyrsintappiin. Se huonontaa pinnanlaatua, joka taas vaikuttaa veden virtaukseen negatiivisesti sekä näyttää ikävältä. 32 mm pitkiä M4 jyrsintappeja oli saatavilla hyvin huonosti, ja silti värinä tulisi mahdollisesti aiheuttamaan ongelmia. Kuvassa 11 näkyy kuinka jyrsintappi jättää koneistamatta osan rivoista, sillä se ei yletä pohjaan osumatta muihin muotoihin. Tästä syystä ripojen alkupäätä oli siirrettävä alkamaan kauempaa, jossa

seinämäkorkeus oli matalampi. Jäähdytyssiilistä 3D-tulostettiin malli, jolla tarkastettiin jäähdytyssiilin vapaamittoja sovittaen käytössä olevia koneistustyökaluja.



Kuva 11. Siemens NX CAM -ohjelma. Jyrsintappi ei mahdu leikkaamaan kaikkea. Sinisiin alueisiin ei päästä käsiksi.

Korkeat rivat suunniteltiin uudestaan 3D-tulostettaviksi paloiksi, jotka voi kiinnittää koneistuksen jälkeen (kuva 12). 3D-tulostetut rivat kiinnitettiin tapeilla, jotka painettiin molempiin kappaleisiin. 3D-tulostettavien palojen ei tarvitse olla tiukasti kiinni jäähdytyssiilissä, sillä kannen paikallaan ollessa tapit pitävät ne liikkumattomina. Näillä paloilla voi jälkeenpäin muokata jäähdytyssiilin geometriaa, mikäli se nähdään tarpeelliseksi.



Kuva 12. 3D-tulostettu korkea ripa merkitty oranssilla.

2.6.4 Tiivistys ja ruuvit

Jäähdytyssiili kiinnitettiin piirilevyn läpi M4 pulteilla ja isoilla aluslevyillä. Jäähdytyssiilin pohjassa on kierteet, joihin ruuvit kiristyvät. Projektissa voitiin hyödyntää Lenzen invertterikotelon mukana tulleita M4x12 uppokantaruuveja kannen kiinnittämiseen.

On hyvin tärkeää, että jäähdytyssiili on tiivistetty hyvin, sillä veden pääseminen piirilevyyn tai laatikkoon on vaarallista. Vesi voi aiheuttaa ruostumista, komponenttien toimintahäiriöitä ja pahimmassa tapauksessa jännitteen purkautumista ei-toivottuihin paikkoihin.

Jäähdytyssiilin kansi tiivistettiin 2 mm:n o-rengasnauhalla. Tätä varten jäähdytyssiiliin suunniteltiin o-rengasura, joka kiertää koko kannen. Valmistuksen kannalta tämä on hieman hankalaa, sillä jäähdytyssiilin kansi sisältää 45 asteen kulman. Tämä muoto on kuitenkin mahdollista valmistaa käyttäen HAAS-jyrsinkeskusta.

Kannen tiivisteen ura mitoitettiin ohjeiden mukaan [3]. Uran syvyydeksi valittiin 1,4 mm, jotta o-rengasnauhan puristussuhde tulisi olemaan 30 % eli hieman suositeltua korkeampi kannen muodon ja paineen aiheuttaman pullistuman takia (kaava 1). Uran leveydessä pyrittiin suositeltuun 65 %:n täyttösuhteeseen. Täyttösuhde laskettiin kaavan 2 mukaisesti. Laskujen perusteella uran täytyi olla 2,5 mm, jotta täyttösuhde olisi 64 %, kun käytetään 2 mm:n o-rengasnauhaa. Tiivisteen lämpötilaluokitusta ei ole suoranaisesti määritetty säännöissä, mutta silti luokitukseksi asetettiin muille jäähdytysjärjestelmän komponenteille sääntömääräinen 120 °C**.** Tiivisteen ei tarvitse kestää korkeita paineita, joten materiaaliksi voitiin valita yleinen ja hyvin saatavilla oleva NBR 70.

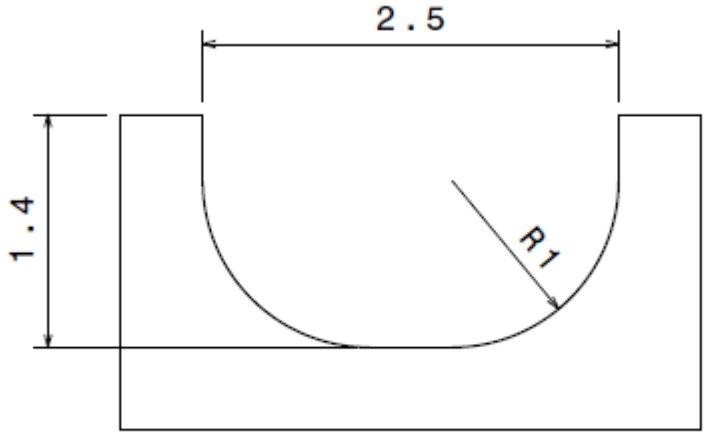
$$Hu = (100 - Sp) * Dr \tag{1}$$

Hu = Tiivisteuran korkeus (mm)
Sp = Täyttösuhde (%)
Dr = O-rengasnauhan halkaisija (mm)

$$St = 100 * \left(\frac{\pi * \left(\frac{Dr}{2}\right)^2}{\pi * \left(\frac{Du}{2}\right)^2} \right) \tag{2}$$

St = Täyttösuhde (%)
Du = Tiivisteuran halkaisija (mm)

Jäähdytyssiilin muodon takia ura jouduttiin koneistamaan pyöreäpäisellä jyrsinterällä, joita oli saatavilla vain 2 mm:n halkaisijalla, joten uraa levennettiin ajamalla toinen kierros niin, että uran leveydeksi tuli 2,5 mm. Ideaalitilanteessa tiivisteuran pohjan tulisi olla profiililtaan neliö, mutta tälläkin ratkaisulla voitiin saavuttaa hyvä tiiveys, johon ensisijaisesti pyrittiin. Kuva 13 hahmottelee tiivisteuran profiilin muotoa.



Kuva 13. Tiivisteuran mitoitus.

2.6.5 Kevennys

Alkuperäisessä suunnitelmassa jäähdytyssiilin paino oli 700 g. Muokkaamalla seinän profiilia ja poistamalla seinien ylimääräistä materiaalia jäähdytyssiilin painoa oli teoriassa mahdollista pudottaa 275 grammaa. Ruuvien ympärille jätettiin tarpeeksi materiaalia, ettei seinä rikkoudu kierteityksen aikana. Seinän kevennys oli helppo toteuttaa koneistuksessa.

3 Valmistus

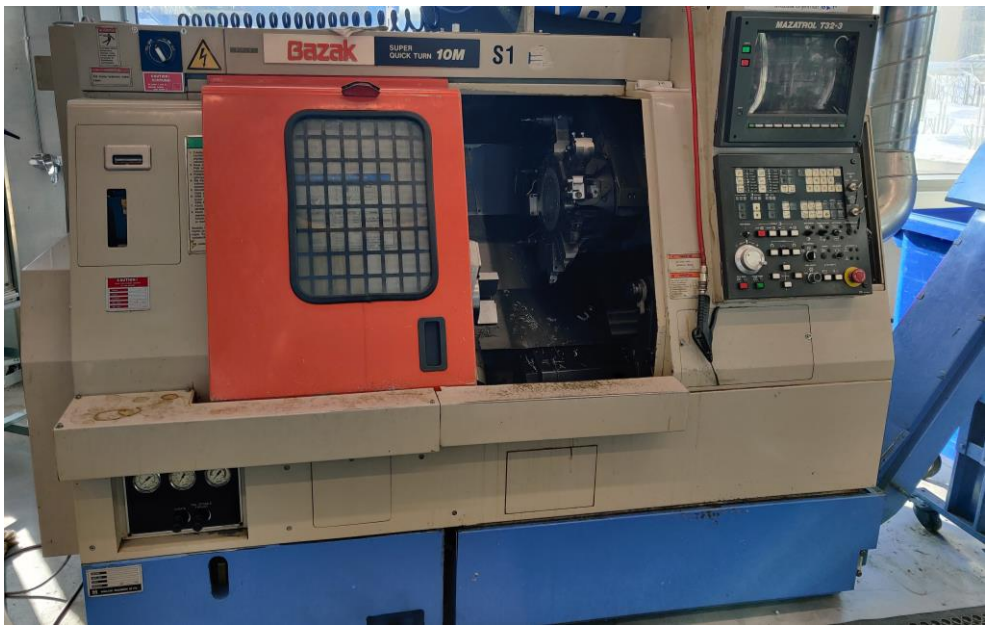
Valmistus toteutettiin käyttäen Metropolia Motorsportin ja Metropolia Ammattikorkeakoulun tiloja ja työkaluja. Kaikki valmistetut osat koekoottiin ja niiden sopivuus ja toimivuus varmistettiin.

3.1 Koneistus

Koneistukseen käytettiin Metropolia Ammattikorkeakoulun konehallin Mazak Quickturn 10M CNC-sorvia sekä manuaalisorveja. Jäähdytyssiili valmistettiin käyttäen HAAS UMC 750 -viisiakselijyrsinkeskusta (kuva 14).

Kuva 14. Jäähdytyssiilin valmistus meneillään.

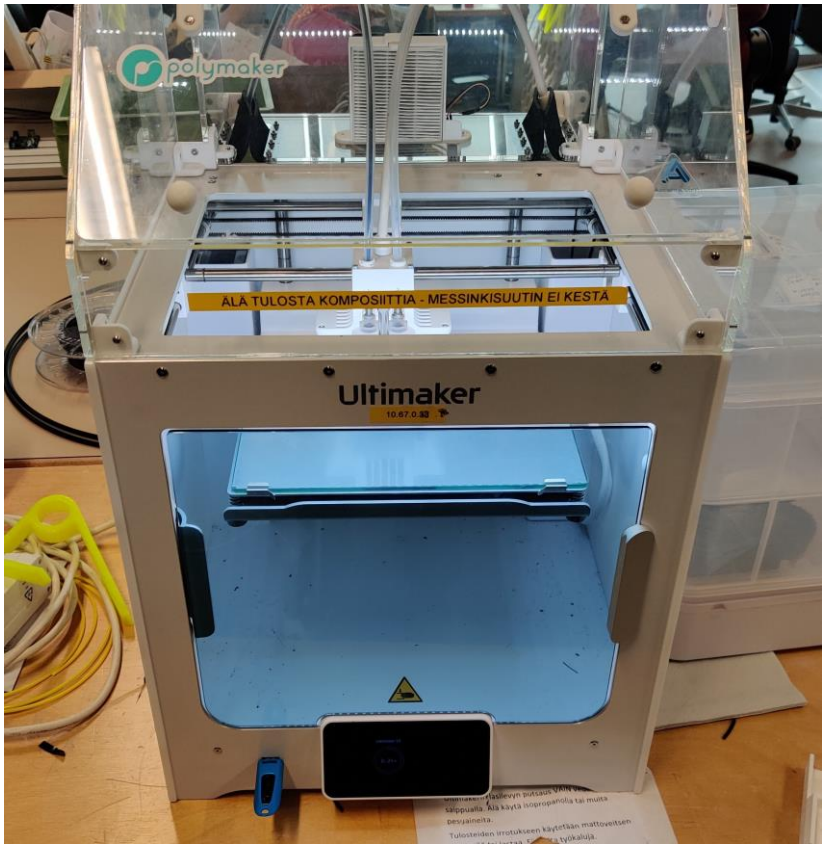
Väliholkit ja letkujen adapterit valmistettiin käyttäen kuvassa 15 näkyvää Mazak CNC-sorvia. Valmistetuista kappaleista tehtiin piirustukset, jotka luovutettiin Metropolia Motorsportin käyttöön myöhempää tarkastelua ja koneistusta varten, samoin jäähdytyssiilin valmistukseen liittyvät CAM-ohjelmat.



Kuva 15. Mazak Quickturn 10M CNC-sorvi.

3.2 3D-tulostus

3D-tulostus tehtiin Metropolia Ammattikorkeakoulun Ultimaker-tulostimilla. Valmistettavat osat eivät olleet suurikokoisia, joten niiden valmistus onnistui käyttäen kuvassa 16 näkyvää Ultimaker S3 -tulostinta. 3D-tulostusta käytettiin suunniteltujen osien mittojen sekä yhteensopivuuden tarkastamiseen.



Kuva 16. Ultimaker S3 3D-tulostin.

Materiaalina käytettiin PLA-muovia sen tiheysominaisuuksien tuoman keveyden takia. 3D-tulostamalla oli mahdollista valmistaa pieniä ja erikoisen muotoisia osia, jotka olisi ollut vaikea valmistaa muuten. Materiaali päätettiin saatavuuden mukaan, sillä materiaalien ympäristö ei vaatinut mitään tiettyä ominaisuutta.

3.3 Laserleikkaus, lämpökäsittely ja taitto

Kannet valmistettiin laserleikkaamalla ne 2,5 mm paksusta alumiinilevystä. Laserleikkaukseen käytettiin koneistuslaboratorion laserleikkuria. Paksu alumiinilevy ei kestä taittoa murtumatta, joten kappaleet olivat erkautuskäsiteltävä.

Erkautuskäsittelyssä kappale kuumennetaan uunissa noin 450–575 celsiukseen, minkä jälkeen se upotetaan nopeasti veteen. Erkautuskäsittelyn jälkeen materiaali on suhteellisen pehmeä muutaman tunnin ajan eli sen voi taittaa muotoonsa. Käsittelyn jälkeen materiaali kovettuu luonnollisesti normaalissa ympäristön lämpötilassa [4].

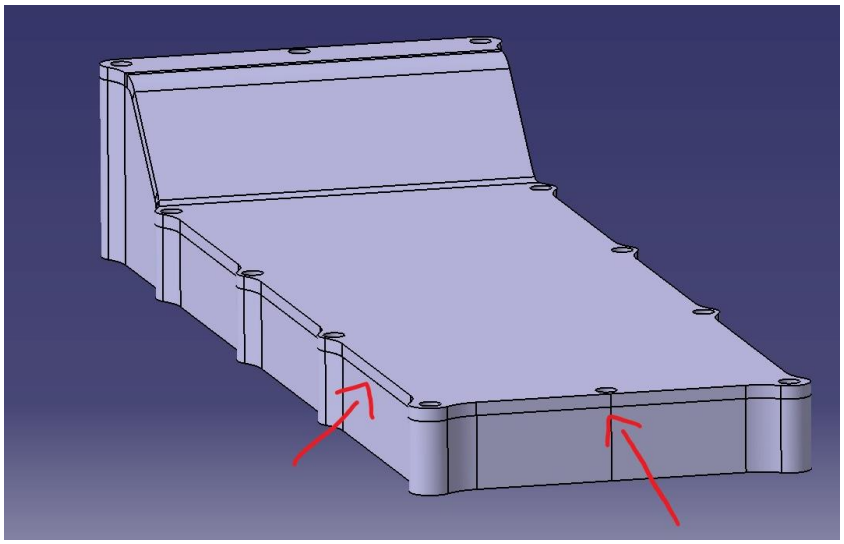
Kannet taitettiin käyttäen koneistuslaboratorion taittokonetta. Kannen sopivuus oli tiiveyden kannalta tärkeää, joten taitossa tuli käyttää työkalua oikealla säteellä. Oikeat työkalujen säteet ja mitoitukset tarkistettiin käyttämällä Gasparinin taittolaskuria [5].

3.4 Ilmenneitä ongelmia

Valmistuksen aikana ilmenneet ongelmat pyrittiin korjaamaan heti, jotta projektin lopputulokseksi saataisiin käyttövalmis kokonaisuus. Ongelmat korjattiin myös mallinnuksiin, ja vanhat versiot poistettiin sekaannuksen minimoimiseksi.

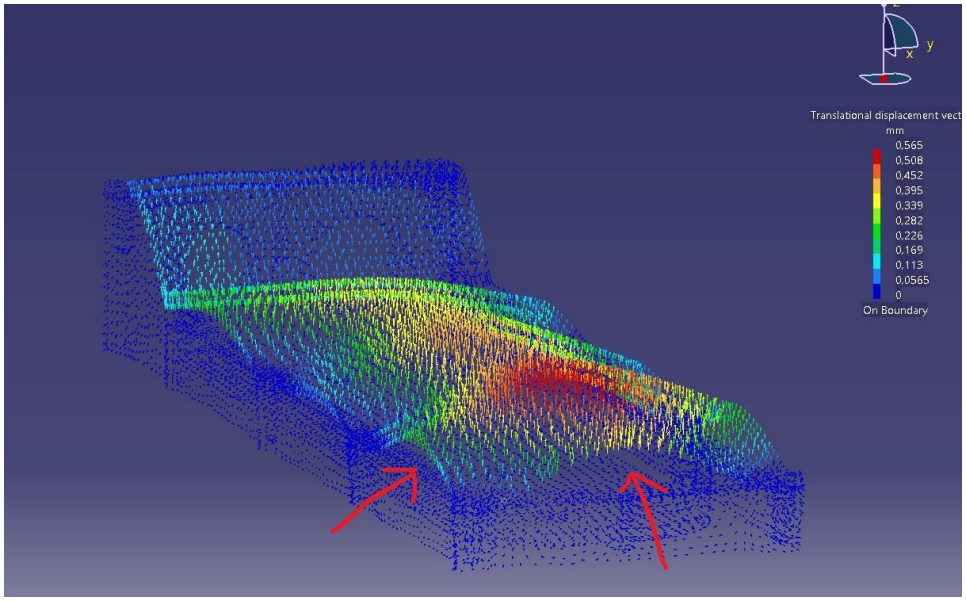
3.4.1 Jäähdytyssiilin koeponnistus

Jäähdytyssiilin testikappale koeponnistettiin paineilmalla tiiveyden testaamiseksi. Jäähdytyssiiliin 3D-tulostettiin kaksi tulppaa, joista toiseen painettiin venttiili, jotta paine saataisiin pysymään. Koeponnistuksen aikana huomattiin, että kansi vuotaa kuvaan 17 merkityistä kohdista. Tiivistävään pintaan kokeiltiin laittaa tasotiivistettä, mutta silti vuoto teki jäähdytyssiilistä käyttökelvottoman.



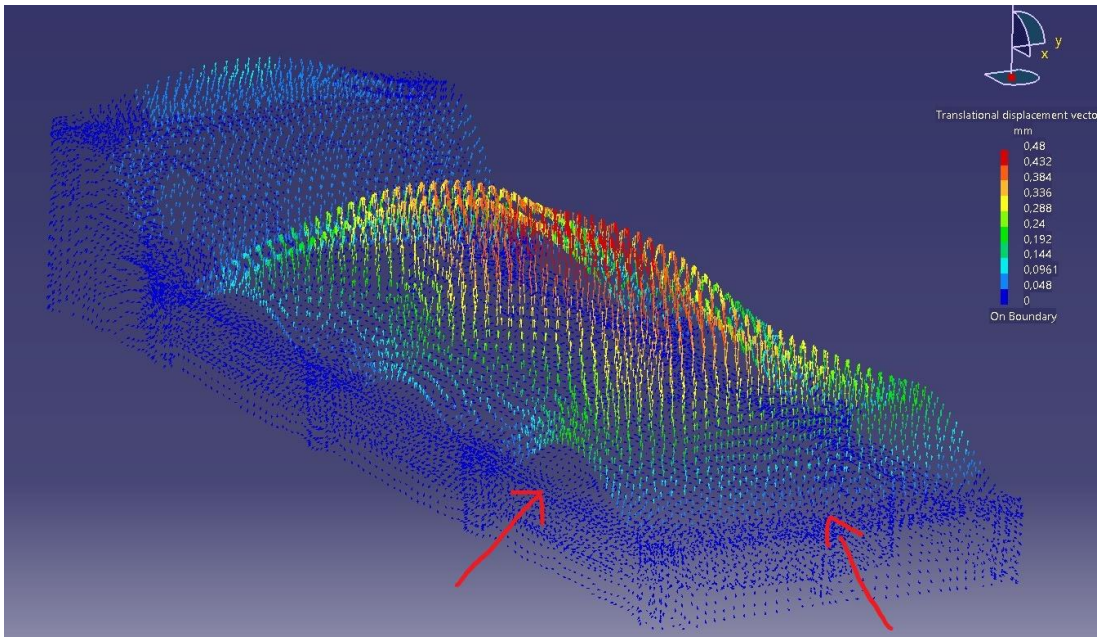
Kuva 17. Jäähdytyssiilin vuotokohdat. Kuvan malli on uusi, ja sisältää lisätyt reiät.

Tämän tapauksen johdosta jäähdytyssiilin kokoonpanosta tehtiin Catian FEA-ominaisuutta käyttäen analyysi. Kaikki FEM-analyysit tehtiin käyttäen 3 bar:n painetta. Kuvassa 18 näkyvässä analyysissä kävi ilmi, että 3 bar:n paineessa kansi liikkuu 0,39 mm tiivisteen kohdalta, mikä teki tiivisteen turhaksi tältä kohtaa.



Kuva 18. FEM-analyysi 2,5 mm:n alumiinikannella. Kuvaan merkitty vuotokohdat.

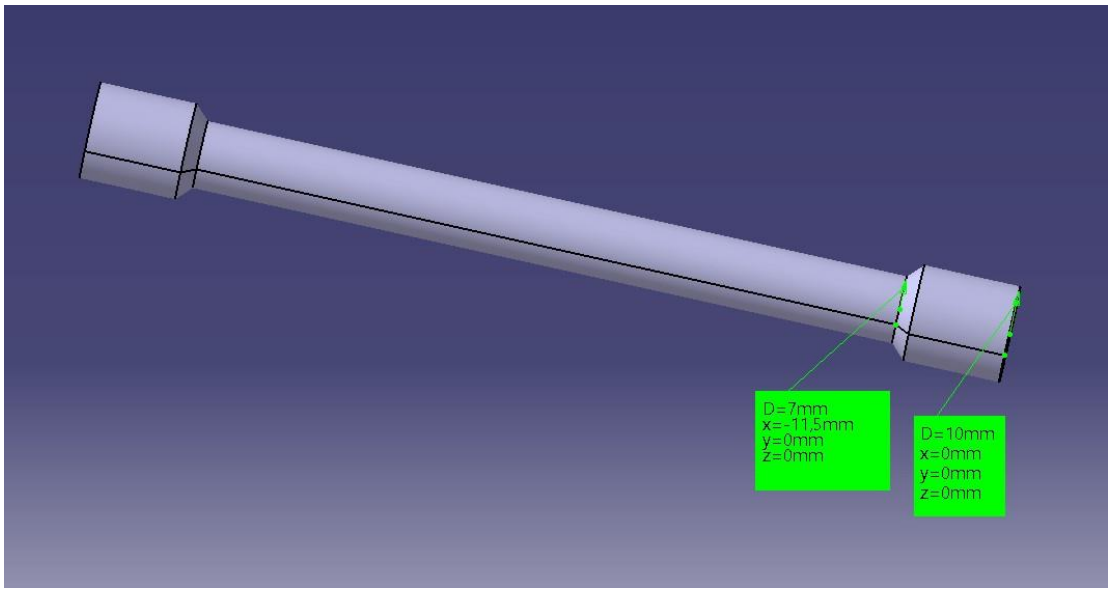
Ongelman korjaamiseksi jäähdytyssiiliin keskelle lisättiin ylimääräiset ruuvit molempiin päihin. Kuvassa 19 näkyvän uuden järjestelyn FEM-analyysien perusteella jäähdytyssiilin kansi taipuu 3 bar:n paineessa noin 0,48 mm ja tiivisteen kohdalta vain noin 0,16 mm. Jäähdytysjärjestelmän oletettu maksimi paine tulisi olemaan 2 bar.



Kuva 19. Uusi analyysi. Kuvaan merkitty vanhat vuotokohdat.

3.4.2 Invertteripinon väliholkit

Testikokoamisessa huomattiin, että resolverin johto ei mahtunut menemään oikeassa asennossa paikalleen. Tämän vuoksi pitkien väliholkkien mallia jouduttiin muuttamaan kaventamalla niitä keskeltä seitsemään millimetriin. Kuvasta 20 voi nähdä uuden mallin. Tämän muutoksen jälkeen resolverin liitin voitiin kiinnittää piirilevyyn.



Kuva 20. Uusi malli pitkästä väliholkista. Halkaisija on merkitty kirjaimella D.

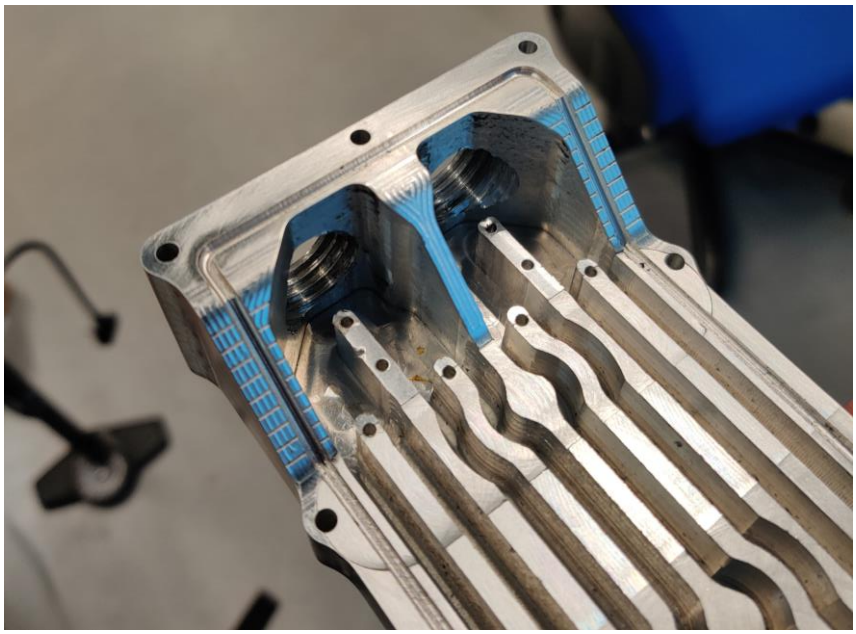
4 Yhteenveto

4.1 Tavoitteet ja niiden onnistuminen

Insinöörityön tavoitteina oli invertterien painon pudottaminen siten, että auto pysyy turvallisena ja toimivana. Toimivuutta ei voitu validoida, sillä projektia ei ehditty kokeilemaan käytännössä auton kanssa, sillä tarvittavat materiaalit invertterilaatikkoon eivät ehtineet saapua. Mallien optimoinnin avulla painoa saatiin pudotettua jäähdytyssiileistä ja invertteripinosta. Valmistetut osat koottiin ja punnittiin.

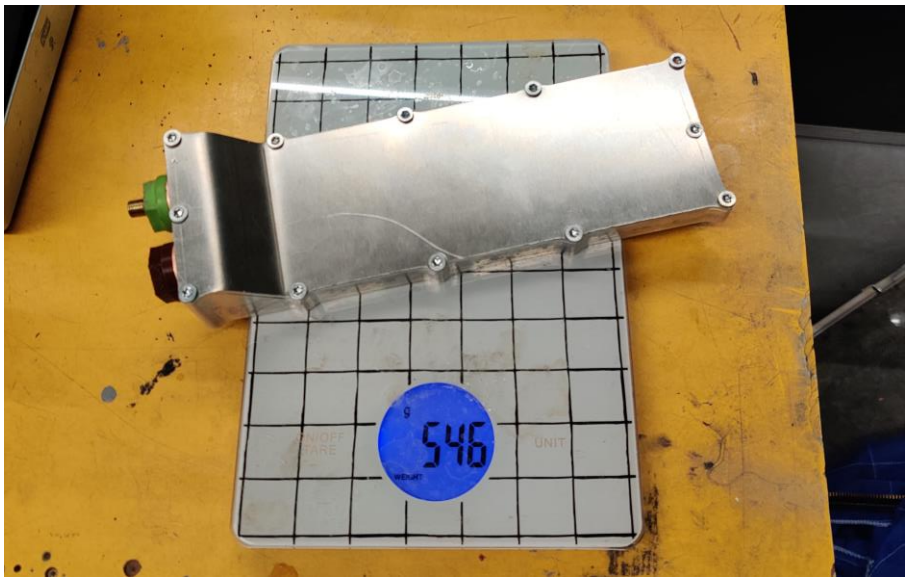
4.2 Jäähdytyssiili

Jäähdytyssiilejä koneistettiin kolme kappaletta, joista kaksi uusimmalla mallilla. Kolmas jäähdytyssiili toimii varalla tai testikappaleena. Kuten kuvasta 21 näkee, toiseen uudemmista malleista tuli vaakasuoria viiltoja tasopinnalle M20-jyrsintapista, mutta tämä ei vaikuttanut tiiveyteen.



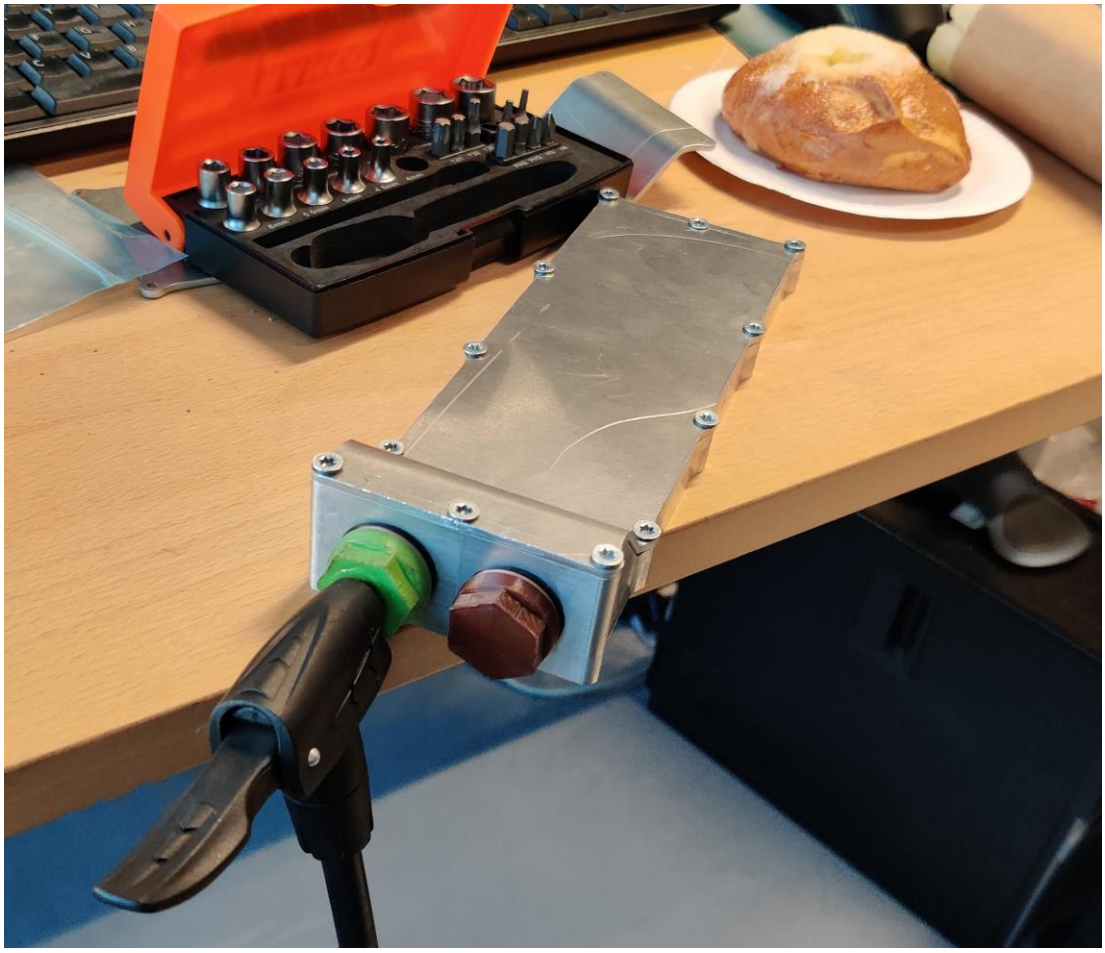
Kuva 21. Jyrsintapin aiheuttamat viillot.

Jäähdytyssiilin paino oli suunniteltuun 425 grammaan verrattuna jonkin verran painavampi eli 546 g (kuva 22). Tähän lisäksi tulivat vielä jäähdytyssiiliin kuuluvat jäähdytysletkujen adapterit, jotka painoivat 34 g kappale, eli kokonaispainoksi tuli 614 g ilman vettä. Invertteripinoon kuului kaksi jäähdytyssiilin kokoonpanoa.



Kuva 22. Jäähdytyssiilin paino.

Koeponnistus tehtiin uudelleen ja tällä kertaa jäähdytyssiili pystyi pitämään 3 bar:n paineen vuotamatta (kuva 23). Koeponnistukseen käytettiin polkupyörän pumppua, jotta painetta saatiin kontrolloitua tarkasti. Aikaisemmat ongelmat johtuivat todennäköisesti tiivisteurasta. Vanhassa mallissa tiivisteura oli 2 mm leveä ja o-rengasnauha oli myös 2 mm. O-rengasnauhalla ei ollut tilaa laajentua kannen puristaessa, mikä todennäköisesti teki tiivistyksestä lähes turhan. Uutta jäähdytyssiiliä kokeiltiin paineistaa ilman lisättyjä ruuveja, jolloin se piti noin 2 bar ennen kuin paine alkoi laskemaan, mikä vahvistaa hypoteesia huonosta tiivistyksestä.



Kuva 23. Jäähdytyssiilin koeponnistus.

4.3 Invertteripino

Invertteripinoa ei saatu koekoottua kokonaan puuttuvien aramid-välilevyjen takia. Invertteripino koekoottiin valmiina olleilla komponenteilla ja varmistettiin sopivuus invertteritelineen kanssa. Piirilevyt olivat tukevasti pinossa ja liittimet mahtuivat paikoilleen. Kuvassa 24 näkyy koekoottu invertteripino, jossa välilevynä oli käytetty pahvilaatikon palaa.

Kuva 24. Invertteripinon koekokoonpano.

Koko invertteripaketin painoksi tuli noin 6,8 kg, joka on 7,2 kg kevyempi kuin aiempi invertteripaketti, eli painoa pudotettiin 51,4 %. Tähän kuului invertteripino ja -laatikko sekä jäähdytyssiili. Aramid-levyjen paino arvioitiin samankaltaisen materiaalin painon ja pinta-alan mukaan. Tavoitteena oli pudottaa puolet invertteripaketin painosta, eli tavoite saavutettiin.

4.4 Huomioita ja kehityksen kohteita

Jäähdytyssiilin kannen muoto oli huono, sillä kannen suuren pinta-alan ja tasaisuuden takia se taipui helposti paineistaessa. Lisäksi kansi oli hankala saada taivutettua juuri oikeaksi; taivutusasetusten säätäminen vaati monta ylimääräistä palaa. Kannessa voisi olla muotoa, jotta pullistuminen ei koituisi ongelmaksi, mutta näin valmistus vaikeutuisi.

Jäähdytyssiilin urien koneistuksessa meni hyvin kauan, noin 30 minuuttia, sillä NX CAM teki työradan niin, että M4 jyrsintappi kulki kaikki urat kahdesti leikaten vain yhteen suuntaan. Tätä ominaisuutta ei saatu korjattua, mikä kaksinkertaisti koneistusajan kyseisessä vaiheessa.

Lähteet

1 Formula Student Rules 2022, Version: 1.0. 2022. Verkkoaineisto. Formula Student Germany. <https://www.formulastudent.de/fileadmin/user_upload/all/2022/rules/FS-Rules_2022_v1.0.pdf>. Luettu 15.3.2022.

2 Hardware manual. Lenze Schmidhauser Mobile Drive.

3 O-ring groove design. Verkkoaineisto. Global O-ring and seal. <https://www.globaloring.com/o-ring-groove-design/>. Luettu 27.3.2022.

4 Erkautuskarkaisu ja vanhennus: Alumiiniseokset. Verkkoaineisto. Bodycote. <https://www.bodycote.com/fi/palvelut/lampokasittely/erkautuskarkaisu-ja-vanhennus/erkautuskarkaisu-ja-vanhennus-alumiiniseokset/>. Luettu 24.3.2022.

5 Sheet metal bending parameters calculator. Verkkoaineisto. Gasparini. <https://www.gasparini.com/en/press-brake-bending-calculator>. Luettu 19.3.2022.