



TEKNIikka JA LIIKENNE

Auto- ja kuljetustekniikka

Tuotetekniikka

INSINÖÖRITYÖ

Formula SAE -kilpa-auton pyöräntuennan osat ja jarrujärjestelmä

**Työn tekijä: Teemu Ristelä
Työn ohjaajat: Pekka Hautala**

Työ hyväksytty: __. __. 2009



ALKULAUSE

Tämä insinööri työ käsittelee Metropolia Ammattikorkeakoulun kuudennen Formula SAE -kilpa-auton pyöräntuennan osien ja jarrujärjestelmän suunnittelua, toteutusta ja testaamista.

Haluan kiittää jo eläkkeelle jäänyttä yliopettaja Matti Parpolaa, joka suurella henkilökohtaisella panoksellaan on luonut Helsingin Ammattikorkeakoulun Formula SAE –projektin. Lisäksi kiitos kuuluu työn ohjaajalle, yliopettaja Pekka Hautalalle

Erityiskiitos kuuluu myös Henry Fordin Säätiölle, jolta saatu henkilökohtainen apuraha mahdollisti täysipainoisen työskentelyn projektin parissa kesän 2007 aikana. Tämä aika auttoi huomattavasti uuden, vuoden 2008 kilpa-auton esisuunnittelutyössä ja käytännössä mahdollisti kireän aikataulun varsinaiselle auton suunnittelulle ja valmistukselle.

Suuri kiitos kuuluu myös tiimin kaikille yhteistyökumppaneille. Audi Finland, Mobil 1, Bosch, Valmet Automotive sekä tiimin muut yhteistyökumppanit ovat taloudellisella tuellaan ja tietotaidollaan vahvasti olleet mukana suomalaisen insinööritaidon ylläpitämisessä ja kehittämisessä. Ilman tätä tukea tällaista projektia ei voitaisi ylläpitää.

Helsingissä 10.5.2009

Teemu Ristelä

TIIVISTELMÄ

Työn tekijä: Teemu Ristelä	
Työn nimi: Formula SAE –kilpa-auton pyöräntuennan osat ja jarrujärjestelmä	
Päivämäärä: 10.5.2009	Sivumäärä: 48+3 liitettä
Koulutusohjelma: Auto- ja kuljetustekniikka	Suuntautumisvaihtoehto: Tuotetekniikka
Työn ohjaaja: Pekka Hautala, yliopettaja	
<p>Tämän insinööriyön tarkoituksena oli suunnitella Metropolia Ammattikorkeakoulun Formula SAE -kilpa-auton pyöräntuennan osia ja jarrujärjestelmä. Tavoitteena oli suunnitella jousittamattomalta massaltaan kevyt ja jäykkä pyöräntuennan ulkopää, joka olisi rakenteellisten ratkaisujensa ansiosta helppo huoltaa ja ylläpitää.</p> <p>Koska jarrujärjestelmän mitoitusperiaatteet on käyty läpi jo aikaisemmin valmistuneissa insinööritöissä, keskitytään tässä työssä kevyemmän ja paremmin huollettavan järjestelmän suunnitteluun ja toteutukseen sekä uudenlaisen jarrutasapainonsäätömenetelmään.</p> <p>Ensin käydään läpi koko auton suunnittelulle asetetut tavoitteet. Tämän jälkeen pureudutaan Formula SAE -sarjan sääntöjen asettamiin raja-arvoihin. Seuraavaksi käydään läpi pyöräntuennan tehtävät yleensä sekä HPF008-auton pyöräntuennan osien suunnittelu- ja valmistusprosessi.</p> <p>Tämän jälkeen luodaan katsaus ajoneuvon jarrujärjestelmän tehtäviin yleensä, jonka jälkeen käydään läpi jarrujärjestelmän suunnittelu.</p> <p>Lopussa kerrataan testikausi ja kilpailumenestys Formula SAE 2008 -kilpailussa. Viimeiseksi kerrotaan suunnittelun onnistuminen ja pohditaan mahdollisia parannuskohteita.</p> <p>Kilpa-auton suunnittelussa onnistuttiin hyvin ja asetetut tavoitteet auton painonsäästön suhteen saavutettiin. Sekä pyöräntuennan osat että jarrujärjestelmä toimi pääasiassa luotettavasti.</p>	
Avainsanat: Formula SAE, Formula Student, olka-akseli, napa-akseli, jarrujärjestelmä	

ABSTRACT

Name: Teemu Ristelä	
Title: Formula SAE Race Car suspension components and brake system	
Date: 10.5.2009	Number of pages: 48+3 attachments
Department: Automotive and transport engineering	Study Programme: Product technology
Supervisor: Pekka Hautala, Principal Lecturer	
<p>The aim of this graduate work was to design suspension components and brake system for a Formula SAE race car. The goal was to design an upright and a wheel hub that would feature low unsprung mass and rigidity. This system should be designed so that it would be easily maintained and set up.</p> <p>The design principles of an automotive brake system has been presented in the graduate works from previous years. That is why this graduate work concentrates on a brake system that would be easier to maintain and lighter. This work also presents a new way to control the brake balance.</p> <p>In the beginning we go through the set design goals for the whole car. After that we go through the boundaries set by the Formula SAE rules. Then we go through what are the general requirements for an automotive suspension system and also the design and manufacturing process of Helsinki Polytechnic Formula SAE race car suspension parts.</p> <p>After that the general requirements for an automotive brake system are presented and then we take a look at the design process of the brake system for a Formula SAE race car.</p> <p>In the final section we go through the testing season and the competition in Detroit. Last we take a look at how the system worked in real life and present some improvements for the future.</p> <p>The design of the race car was a success and the target to reduce weight was reached. For most occasions the brake system and the suspension components were reliable.</p>	
Keywords: Formula SAE, Formula Student, upright, wheel hub, brake system	

SISÄLLYS

ALKULAUSE

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

1 JOHDANTO	1
2 SUUNNITTELUN LÄHTÖKOHDAT JA TAVOITTEET	3
2.1 Säännöt	4
2.1.1 <i>Pyöräntuenta koskevat säännöt</i>	4
2.1.2 <i>Jarrujärjestelmää koskevat säännöt</i>	5
2.2 Pyöräntuennan ulkopää	6
2.3 Jarrujärjestelmä	6
2.4 Suunnittelun työkalut	6
3 PYÖRÄNTUENNAN TEHTÄVÄT	9
4 PYÖRÄNTUENNAN SUUNNITTELU	9
4.1. Olka-akselin suunnittelu	10
4.1.1 <i>Olka-akseliin vaikuttavien voimien määrittäminen</i>	10
4.1.2 <i>Olka-akselin valmistusmenetelmän valitseminen</i>	13
4.1.3 <i>Olka-akselin lujuuslaskenta</i>	15
4.2 Olka-akselin valmistusprosessi	18
4.3 Napa-akselin suunnittelu	22
4.3.1 <i>Napa-akseliin vaikuttavien voimien määrittäminen</i>	22
4.3.2 <i>Napa-akselin valmistusmenetelmän valitseminen</i>	23
4.3.3 <i>Napa-akselin lujuuslaskenta</i>	24
4.4 Napa-akselin valmistusprosessi	27
4.5 Olka- ja napa-akselin käyttökokemukset HPF008-autossa	28
5 JARRUJÄRJESTELMÄN TEHTÄVÄT	31
6 JARRUJÄRJESTELMÄN SUUNNITTELU	31
6.1 Jarrusatuloiden valinta	32
6.2 Pääsylinterien valinta	35
6.3 Poljinasetelman suunnittelu	36
6.4 Säädetty jarrutasapaino	38
7 TESTI- JA KILPALIKAUSI 2008	41

8 SUUNNITTELUN TULOKSET JA PARANNUSKOHTEET	43
VIITELUETTELO	46
LIITELUETTELO	48

1 JOHDANTO

Formula SAE on maailmanlaajuinen kilpailuluokka formula-tyyppisille autoille, jotka on suunniteltu ja valmistettu yliopistoissa ja korkeakouluissa opiskelijavetoisesti. Se on perustettu jo vuonna 1986. Sen perustivat kolme suurta autotehdasta: General Motors, Ford ja Chrysler.

Virallisia kilpailuja sarjassa ajetaan Yhdysvalloissa, Australiassa, Englannissa, Saksassa, Italiassa ja Japanissa. Kilpailevien ajoneuvojen määrä vaihtelee kilpailukohtaisesti välillä 30 - 120. Yhdysvaltain Detroitissa järjestettävä kilpailu kokoa vuosittain noin 120 tiimiä ympäri maailmaa ja on samalla sarjan suurin kilpailu. Tämä kilpailu asetettiin myös Helsingin Ammattikorkeakoulu Stadian (nyk. Metropolia Ammattikorkeakoulu) kilpailukauden 2008 päätavoitteeksi.

Formula SAE -kilpailu koostuu seitsemästä osa-alueesta, kolmesta staattisesta ja neljästä dynaamisesta osa-alueesta. Staattisia arvostelukohteita ovat auton teknisen suunnittelun arvostelu (design event), kustannustehokkuuden arviointi (cost event) sekä koko projektin esittely (presentation event). Dynaamiset osa-alueet eli auton nopeutta rataolosuhteissa kuvaavat osa-alueet pitävät sisällään neljä eri ajokilpailua: kiihdytys 75 m matkalla (acceleration), kahdeksikkoajo (skid pad), sprintajo ennestään tuntemattomalla radalla (autocross) ja 22 km mittainen kestävyysajo (endurance). Sprintajon aikojen perusteella jaetaan lähtöjärjestys kestävyysajoon.

Stadia Motorsport Formula Engineering Team on osallistunut luokan virallisiin kilpailuihin vuodesta 2002 lähtien. Tämä työ käsittelee vuoden 2008 kilpa-auton, HPF008:n pyöräntuennan osien ja jarrujärjestelmän suunnittelua ja toteutusta.

Ensin käydään läpi suunnittelun lähtökohdat ja tavoitteet koko autolle ja sääntöjen asettamat vaatimukset. Tämän jälkeen selvitetään pyöräntuennalle asetetut tavoitteet ja lähtökohdat. Tämän jälkeen siirrytään pyöräntuennan komponenttien suunnittelu- ja valmistusvaiheeseen. Seuraavaksi käsitellään jarrujärjestelmän tehtävät ja järjestelmän suunnittelu. Jarrujärjestelmän komponenttien valinta käsitellään seuraavaksi.

Viimeisenä käydään läpi itsekehitetyn jarrutasapainon säätöjärjestelmän perusteet.

Lopuksi luodaan katsaus kilpailukauteen 2008 sekä paneudutaan suunnittelun onnistumiseen.

Työn tavoitteena on toimia tiedon siirtäjänä tuleville, Metropolia Ammattikorkeakoulun Formula-projektiin osallistuville opiskelijoille. Kun tieto on kerran hankittu, on se yhteen työhön koottuna helpompi käsitellä ja samoja virheitä vältetään toistamasta.

2 SUUNNITTELUN LÄHTÖKOHDAT JA TAVOITTEET

Suunnittelun tavoitteet asetettiin elokuussa 2008. Pää tavoite oli tehdä kilpa-auto, joka painaa alle 200 kiloa ilman kuljettajaa ja joka on ulkonäöltään muita kilpailijoita selvästi edellä, mutta silti tunnistettavissa Helsingin ammattikorkeakoulun opiskelijoiden suunnittelema. Aikaisempien vuosien kilpailuissa koulumme kilpa-autokonseptit oli monesti todettu erittäin hyvän näköisiksi. Tästä perinteestä emme halunneet luopua, vaikka päätös tarkoittaisikin kompromisseja suunnittelun muilla osa-alueilla. Olimme jo aiemmissa kilpailuissa todenneet auton visuaalisen ilmeen erittäin tehokkaaksi myyntiargumentiksi, kun arvostellaan auton suunnittelua tai kun prototyyppiä yritetään myydä kuvitteelliselle valmistajalle.

Massaltaan alle 200 kiloa painava kilpa-auto tarkoitti edelliseen kilpa-autoon verrattuna noin 10 prosenttiyksikön painonsäästöä. Täten jokaisen osa-alueen suunnittelun oli onnistuttava. Koska vanha auto tunnettiin hyvin, selkeät parannuskohteet oli helposti löydettävissä. Painonsäästön lisäksi tavoite oli pienentää auton dynaamista indeksiä, eli kaikki paino yritettiin tuoda mahdollisimman lähelle auton massakeskipistettä. Tällä pyrittiin parantamaan auton reagointia rata-ajossa.

Muut uudelle HPF008-nimeä kantavalle kilpa-autolle asetetut tavoitteet perustuivat tiimin vanhoista kilpa-autoista saatuihin kokemuksiin ja testaustyöhön. Monia osa-alueita päätettiin kehittää edelleen ja kokonaan uusia ratkaisuja päätettiin tuoda esille muun muassa elektroniikan osa-alueelle.

Autosta päätettiin myös tehdä sellainen, että monenkokoiset kuljettajat pystyisivät väsymättä ajamaan sitä helposti ja tehokkaasti.

Aikaisemmat kokemukset vuosien varrelta olivat myös osoittaneet, että riittävän pitkä testikausi valmiilla autolla tarvitaan ennen ensimmäisiä kisoja, jotta saavutetaan tarvittava tekninen luotettavuus. Lisäksi auton testaaminen ja säätäminen on ainoa keino tehdä siitä nopeampi, eikä pidä myöskään väheksyä kuljettajien ajomäärän vaikutusta kierrosaikaan. Näin ollen asetettiin ennennäkemättömän tiukka aikataulu auton suunnittelulle ja valmistukselle: HPF008-auton tulisi olla ajokuntoinen tammikuussa 2008. Tämä tarkoitti sitä, että aikaa koko suunnittelu- ja valmistusprosessille oli ainoastaan kuusi kuukautta.

2.1 Säännöt

Jokainen Formula SAE -kilpailu alkaa kilpa-autojen teknisellä katsastuksella. Katsastus keskittyy erityisesti auton turvallisuuteen liittyviin seikkoihin, ja jokaisen auton on läpäistävä katsastus päästäkseen ajamaan. Usein katsastus venyy monien tuntien mittaiseksi ja monet tiimit joutuvat muuttamaan kilpa-autojaan useampaankin kertaan. Sääntöjen tarkka tuntemus onkin oltava yksi tärkeimmistä suunnittelun lähtökohdista. Vain sääntöjen mukaisella kilpa-autolla voi pärjätä kokonaiskilpailussa kun tavoitteet menestymiselle on asetettu korkealle. Formula SAE -sääntökirja vuodelle 2008 pitää sisällään kaikki säännöt niin kilpa-autolle kuin staattisille osa-alueillekin, unohtamatta tiimin jäsenten turvallista toimintaa kilpailupaikoilla.

Teknisten määräysten lisäksi säännöt asettavat suunnittelun perusajatuksen kilpailuihin osallistuville tiimeille. Tavoitteena on suunnitella, valmistaa ja esitellä tuomaristolle formula-auton tyyppinen pieni kilpa-auto, jota voi ajaa erikokoiset kuljettajat. /1, s. 9./

2.1.1 Pyöräntuenta koskevat säännöt

Pyöräntuenta ja jousitusta määrittelevät säännöt ovat tässä kilpailuluokassa hyvin vapaat. Autossa on oltava jousitus ja neljä rengasta. Jousituksen kokonaisliikematkan tulee olla vähintään 50,8 mm (2 tuumaa) mitattuna korista maahan nähden. Sekä sisään- että ulosjousto tulee olla vähintään 25,4 mm (1 tuuma).

Akselivälin on oltava vähintään 1520 mm. Raideleveydelle ei ole määriteltä vähimmäisarvoa mutta kapeamman akselin – etu tai taka-akselin – tulee olla vähintään 75 % leveämmästä. Tällä säännöllä rajataan myös mahdollisuus asettaa pyörät jonoon. Vanteiden on oltava halkaisijaltaan vähintään kahdeksan tuumaiset mutta niiden leveyttä ei ole rajoitettu.

Ohjauspyörällä on oltava mekaaninen yhteys vähintään kahteen renkaaseen. Myös nelipyöräohjaus on sallittu, jolloin suurin sallittu kääntökulma toiselle ohjaavalle akselille on $\pm 3^\circ$ suoraan ajettaessa. /1, s. 20 – 22./

2.1.2 Jarrujärjestelmää koskevat säännöt

Jarrujärjestelmää koskevat säännöt ovat myös laadittu siten, että ne antavat suunnittelijoille mahdollisuuden käyttää luovuuttaan. Jarrujen tulee vaikuttaa kaikkiin neljään pyörään yhtä hallintalaitetta käyttäen. Jarrujärjestelmän tulee olla hydraulinen ja kaksipiirinen, jolloin toisen piirin pettäessä jarrutustehoa on edelleen kahdella pyörällä. Molempien hydraulisten piirien tulee olla varustettu omilla nestesäiliöillään, joko ulkoisilla tai käyttösylintereihin integroiduilla. Tasauspyörästäön kautta kahteen pyörään vaikuttava, yksijarruinen järjestelmä on myös sallittu. Jarrujen hallintalaitteelta on oltava mekaaninen yhteys käyttösylintereihin, sähkötoimiset (brake by wire) jarrut ovat kielletyt.

Jarrujen oikean toiminnan toteaminen tapahtuu kilpailupaikalla katsastuksen yhteydessä suoritettavassa kokeessa. Kokeessa kuljettaja kiihdyttää voimakkaasti lyhyen matkan, jolloin nopeus nousee noin 50 km/h tasolle. Tämän jälkeen hän jarruttaa voimakkaasti ja kaikkien neljän pyörän tulee lukkiutua yhtäaikaisesti, auton samalla pysyessä kuljettajan hallinnassa. Tällä varmistetaan, että kaikki kilpailussa liikkuvat ajoneuvot ovat turvallisesti hallittavissa.

Jarrujen hydraulikkalinjat eivät saa sisältää pelkästään muovisia putkia, vaan kaikkialla on käytettävä metallilla suojattuja linjoja, esimerkiksi teräspunoksella vahvistettuja teflon-letkuja. Kaikki hydraulikkalinjat on vielä erikseen suojattava, jos on ilmeinen vaara sille, että jonkun voimansiirron osan vaurioituminen autossa aiheuttaisi mahdollisesti hydraulikkalinjan vaurioitumisen ja sitä kautta onnettomuusriskin. Linjat on myös sijoitettava siten, että pienet kolarit eivät aiheuta niille vaurioita.

Jarrujärjestelmä tulee lisäksi olla varustettu jarrujen hallintalaitteeseen sijoitetulla analogisella kytkimellä (brake over travel switch), joka katkaisee sytytysvirran ja mahdollisten sähköisten polttoainepumppujen virran, jos jarrujärjestelmään tulee vika ja jarrujen teho laskee. Kytkin ei saa olla kuljettajan kontrolloitavissa, eikä se saa toimia minkään ohjainlaitteen kautta.

/1, s. 22./

2.2 Pyöräntuennan ulkopää

Tavoitteet olka- ja napa-akselin suunnittelulle asetettiin samalla tavalla kuten koko autollekin. Pyöräntuennan ulkopään jousittamattoman massan tuli vähentyä 5 %. Myös pyörivän, jousittamattoman massan tuli vähentyä 5 %. Lisäksi kokemukset aiemmista ratkaisuista johtivat päätökseen, että rakenteelta haluttiin aiempaa helpompaa huolettavuutta ja nopeampaa säädettävyyttä. Olka-akselin oli myös oltava sellainen, että se sallii tulevaisuudessa mahdollisuuden testata hiilikuidusta valmistettuja tukivarsia, jotka olisivat teräksestä valmistettuja ulkomitoiltaan suuremmat.

2.3 Jarrujärjestelmä

Jarrujärjestelmälle asetettiin päätavoitteeksi alhainen kokonaisuudessa. Tämä tarkoitti kokonaisuudessaan noin 10 prosenttiyksikön painonsäästöä edelliseen kilpa-autoon verrattuna. Kokonaisuudessaan pyrittiin vähentämään oikeilla komponenttivalinnoilla, sekä yhdessä pyöräntuennan kanssa hyvällä suunnittelulla. Jarrujärjestelmän tuli olla myös helposti säädettävä, koska rata-olosuhteet vaihtelevat useasti ja kuljettajien ajotyyleissä on myös eroja. Järjestelmältä haluttiin myös vähäistä huollon tarvetta, jolloin kilpa-auton muille säätötoimenpiteille jäisi enemmän aikaa. Kilpa-auton testausaika on joka tapauksessa riittämätön, joten toimintavarmuutta pidettiin arvokkaana asiana.

Lisäksi jarrujen tuottaman lämpökuorman haluttiin vaikuttavan muihin rakenteisiin mahdollisimman vähän.

2.4 Suunnittelun työkalut

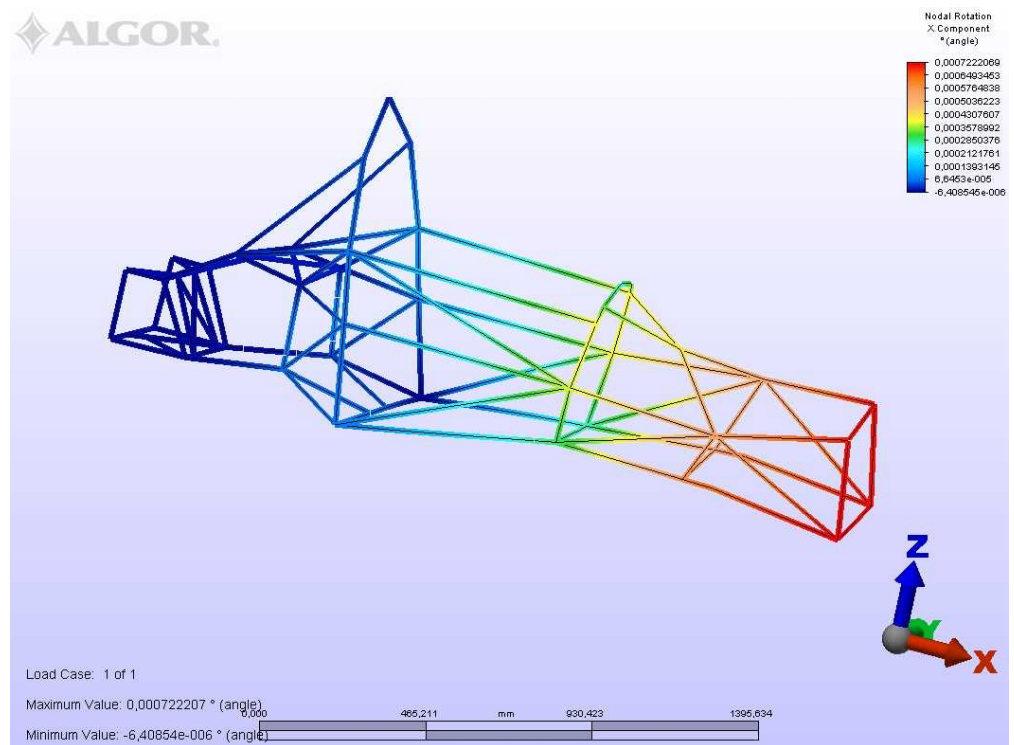
HPF008-auton kaikki komponentit mallinnettiin ja suunniteltiin kolmiulotteisesti ennen kuin yhtään komponenttia valmistettiin (kuva 1). Tähän suunnitteluun käytettiin CATIAV5R17- ja CATIA V5R18- 3D-ohjelmistoja. Ohjelma on erinomainen apuväline hahmotettaessa tulevaa kilpa-autoa ja sen ominaisuuksia. Jokaisen osan ollessa kolmiulotteisessa mallissa tiedetään niiden varaamat tilat jo ennen valmistusvaihetta ja yllätyksiltä vältytään. Myös monien komponenttien toimintaa pystyttiin simuloimaan 3D-mallissa. Tällä varmistettiin muun muassa se, että pyörät mahtuvat kääntymään tarpeeksi eivätkä ne missään tilanteessa ota kiinni koriin tai tukivarsiin.



Kuva 1. HPF008:n pääkokoonpanon 3D-malli

CATIA mahdollistaa lisäksi ihmismallin tuomisen suunnitteluun mukaan. Ohjelmassa on valmiiksi mallinnettuna erikokoisia ihmishahmoja, joita kokeiltiin sijoittaa auton 3D-malliin, ja näin ollen pystyttiin hahmottamaan rungon mitoitusta ja ergonomiaa. 3D-mallinnuksen perusteet CATIAssa oli käyty jo opetuksessa läpi, joten kynnys aloittaa suunnittelutyö tällä ohjelmistolla oli matalalla ja ongelmatilanteissa apua sai koulun henkilökunnalta.

Toinen tärkeä ohjelmisto suunnittelutyössä ja simuloinnissa oli Algor FemPro (kuva 2). Tällä ohjelmalla tehtiin lähestulkoon kaikki lujuuslaskennat. Komponenttien lujuuslaskenta ennen osien valmistusta on erittäin tärkeää, jotta saadaan osien painoa vähennettyä, yksinkertaisesti vähentämällä materiaalin määrää, siellä missä sitä ei tarvita. Laskentaan tarvittavat voimat oli joko laskemalla määritetty tai mitattu ratakokeilla venymäliuskoja käyttäen. Algor FemPro -ohjelmiston yhteiskäyttö CATIA -mallinnusohjelman kanssa on erittäin aikaa vievä prosessi, koska ohjelmat eivät suoraan kommunikoi keskenään, vaan tarvitaan eri tiedostomuotoja näiden kahden välillä. Algoria kuitenkin päätettiin käyttää, koska siihen oli ammattitaitoista apua ja opetusta saatavilla koulussa. Runkoon kiinnitettävän törmäysvaimentimen laskennat ja simulaatiot tehtiin Abaqus-ohjelmistolla.



Kuva 2. HPR008:n runko lujuuslaskentaohjelma Algor FemPro:ssa

3 PYÖRÄNTUENNAN TEHTÄVÄT

Kilpa-autossa pyöräntuennan tehtävät eroavat henkilöautoon nähden jonkin verran. Tärkein tehtävä on kuitenkin sama: pyöräntuenta välittää veto-, jarrutus- ja sivuvoimat ajoneuvon koriin. Muita asioita, joihin pyöräntuennalla on merkittävä vaikutus, ovat ajoneuvon suuntavakaus, kaarreominaisuudet ja ajomukavuus. Lisäksi pyöräntuennalle asetetaan vaatimukseksi pieni tilantarve, keveys ja yksinkertaisuus, joka taas vaikuttaa hintaan /2, s. 72/.

Kilpa-auton pyöräntuenta suunniteltaessa tärkeintä on keskittyä sen välittämiin renkaan tuottamiin voimiin sekä kaarreajo-ominaisuuksiin. Kaarreajo-ominaisuudet taas syntyvät usean tekijän summana. On otettava huomioon renkaan ominaisuudet, ohjauksen geometria ja jousituksen liikeradat. (tähän viittaus !!!) ei omaa tietoa

4 PYÖRÄNTUENNAN SUUNNITTELU

Jousitusgeometrian suunnittelua on käsitelty aiemmin Aimo Niemen 2006 valmistuneessa insinööriyössä /12/. Jotta suunniteltu jousitusgeometria toimisi halutulla tavalla, on pyöräntuennan oltava rakenteeltaan mahdollisimman vähän joustava. Mahdollisesti joustavia komponentteja pyörän tuennassa on suuri määrä: vanne, napa-akseli, pyörän laakerointi, olka-akseli, tukivarsien nivelet, tukivarret ja tukivarsien korinpuoleiset kiinnityskohdat.

4.1. Olka-akselin suunnittelu

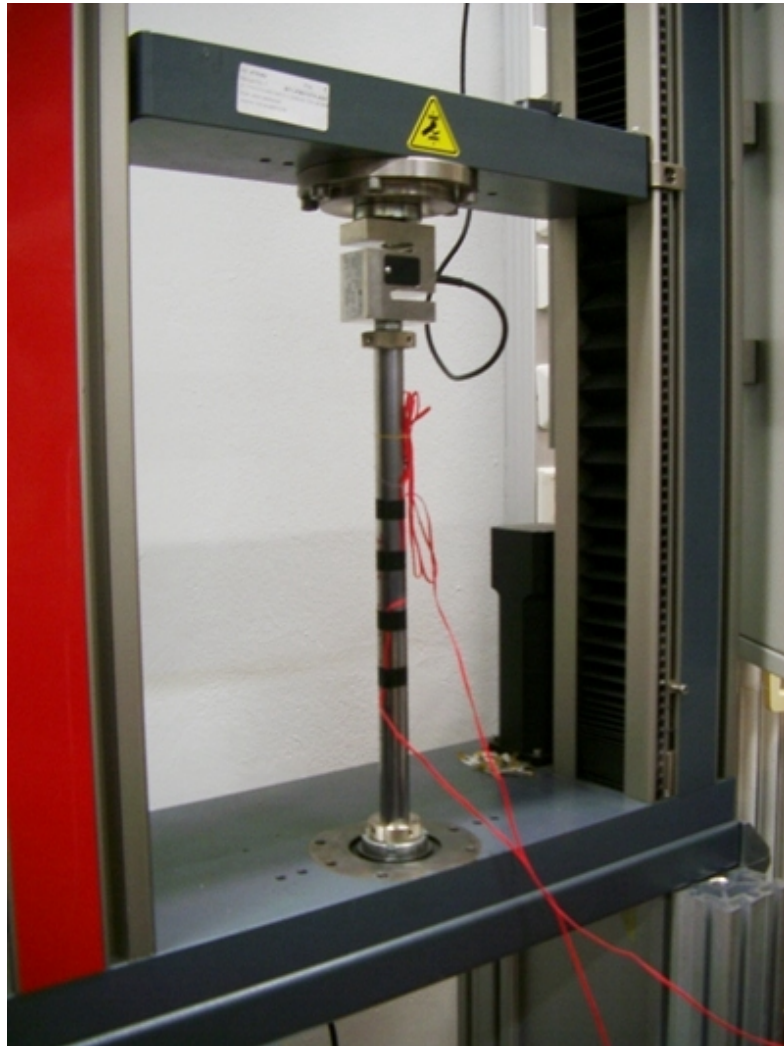
4.1.1 Olka-akseliin vaikuttavien voimien määrittäminen

Olka-akselin (kuva 3) tehtävä on välittää renkaan tuottamat voimat tukivarsille /2, s. 78/. Lisäksi se on kiinnityspisteenä jarrusatulalle HPF008-kilpa-autossa. Jotta suunniteltavasta olka-akselista ei tulisi turhan painava, oli siihen vaikuttavat voimat selvitettävä.



Kuva 3. Henkilöauton olka-akseli, jossa kiinnityspaikat jarrusatulalle ja tukivarsille.

Olka-akseliin vaikuttavat voimat selvitettiin käyttäen testausvälineenä venymäliuskoja. Venymäliuskat asennettiin samanlaisen teräsputken pintaan, jota tukivarsissa oli käytössä vuoden 2007 kilpa-auto HPF007:ssä. Samankokoista suurlujuusteräsputkea oli tarkoitus myös käyttää HPF008:n tukivarsissa. Tämän jälkeen venymäliuskoilla varustetut putket asetettiin vuorotellen Konelaboratoriossa sijaitsevaan venytys-puristuspenkkiin. Jokaista putkea venytettiin ja puristettiin vuorollaan, jolloin saatiin tietää, minkä suuruista voimaa tietyn suuruinen siirtymä putkessa vastaa (kuva 4).



Kuva 4. Venymäliuskojen kalibrointi puristus-vetokokeessa

Venymäliuskan toiminta perustuu siinä olevaan metalliliuskan muodon muutokseen, joka johtaa anturin resistanssin muutokseen. Näin ollen putken siirtymälle ja siihen vaikuttavalle voimalle saadaan yhteys.

Kun venymäliuskat saatiin kalibroitua, oli aika asentaa samanlaiset liuskat vuoden 2007 kilpa-auton tukivarsiputkiin (kuva 5). Varsinaisia testiajoja ajettiin kahdella eri radalla, koska erilaisten pintamateriaalien merkitys tukivarsissa vaikuttaviin voimiin haluttiin saada selville. Venymäliuskat olivat kytkettynä auton omaan MoTec-tiedonkeruuyksikköön, johon olimme määrittäneet laskentakaavan siirtymän ja voiman yhteydestä. Näin ollen tuloksena saimme suoraan ajotapahtuman aikaisia, tukivarsissa vaikuttavia voimia.



Kuva 5. Venymäliuskat asennettuna auton tukivarsiin

Testaaminen aloitettiin Hyvinkään kartingradalla erikseen valmistellulla, lyhyellä keiloista kootulla radalla. Ilma oli hyvin kylmä ja kostea, joten mitatut siirtymät ja niistä lasketut voimat jäivät melko pieniksi. Autolla ajettiin tahallisen rajusti, useasti myös keiloihin osuen. Lisäksi kuljettajat jarruttivat ja kiihdyttivät mahdollisimman voimakkaasti, jotta jokaisesta ajotilanteesta saataisiin maksimivoimat esille.

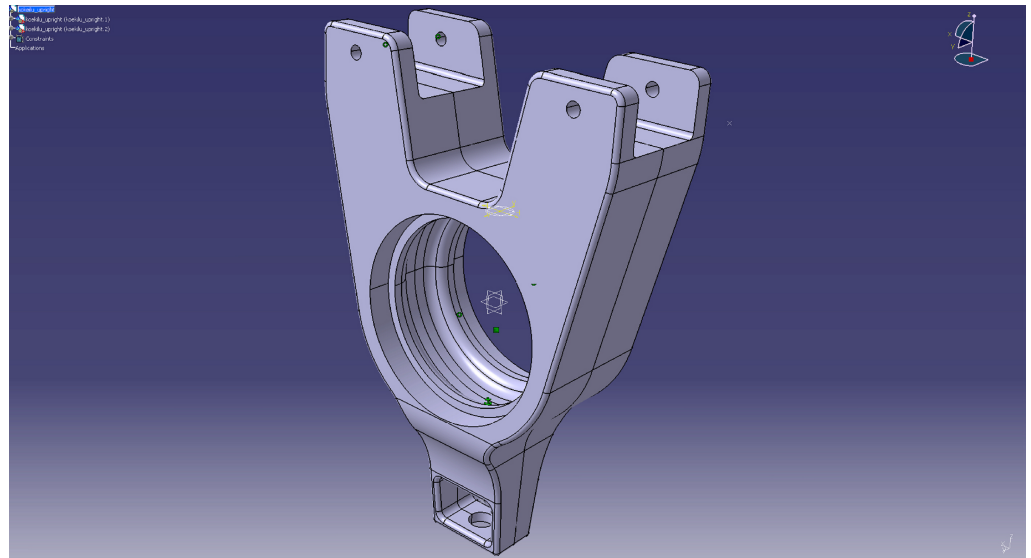
Toinen testauspaikkamme oli sisäkatingrata VM Karting Center Vantaalla. Tämä rata on ollut tiimin testauspaikka joka talvi, kun lunta on vielä maassa ja ulkona ei voi ajaa. Tälle radalle ominaista on sileä, tasainen pinta, joten arvelimme jo etukäteen tukivarsissa vaikuttavien voimien jäävän ulkoradan mittauksia pienemmiksi. Radalla on kuitenkin lukuisa määrä reunakivetyksiä, joista yliajettaessa tiedonkeruu rekisteröi suuret voimat tukivarsissa.

Venymäliuskojen toiminnan perusteet ja tukivarsien mitoituspäätökset on käyty aiemmin läpi Timo Riskun 2006 valmistuneessa insinöörityössä /10/.

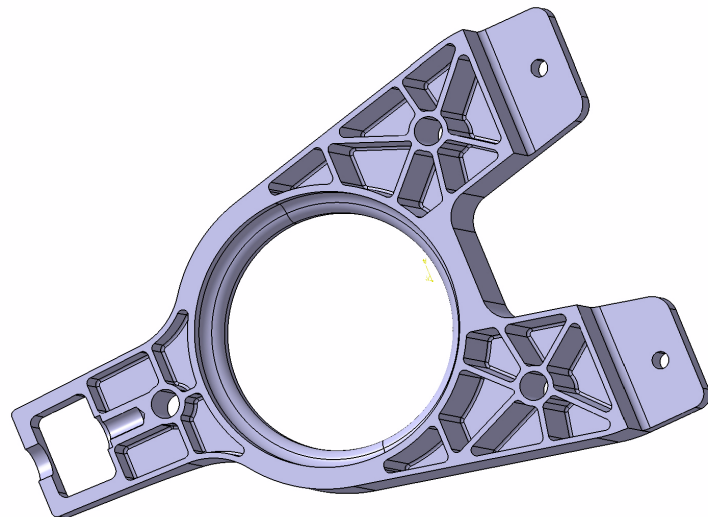
4.1.2 Olka-akselin valmistusmenetelmän valitseminen

Tiedettäessä olka-akseliin maksimikuormituksella vaikuttavat voimat voitiin käynnistää eri materiaalien ja konstruktioiden vertailututkimus. Tämä tutkimus toteutettiin CATIA - ja Algor FemPro -ohjelmistojen avulla. Päätettiin, että vertailun kohteeksi otetaan kolme eri valmistusmenetelmää: ohuista teräslevyistä hitsaamalla koottava rakenne, magnesiumista valettava, kaksiosainen rakenne sekä alumiinilevystä koneistettava olka-akseli. Nämä kolme menetelmää valittiin otettaessa huomioon tiimin yhteistyökumppanit, jotka pystyivät tarjoamaan näille kolmelle menetelmälle valmistuspuitteet. Tiimin voimavaroja ei haluttu liikaa panostaa itse valmistusprosessiin, koska suunnittelu- ja valmistusaikataulu oli erittäin kiireinen.

Jokaisesta eri menetelmällä valmistetusta olka-akselista tehtiin lukuisia 3D-malleja. Tämän jälkeen kaikista tehtiin lujuuslaskelmat ja tuloksia päästiin vertailemaan. Myös kaikkien ratkaisujen massa oli tiedossa 3D-malliin perustuen. 3D-ohjelmaan oli määritetty seuraavat materiaalien tiheydet: teräs $7850\text{kg}/\text{m}^3$, alumiini $2700\text{kg}/\text{m}^3$ ja magnesium $1800\text{kg}/\text{m}^3$ /5, s. 92/. Kuvissa 6 ja 7 on esitetty teräslevyistä hitsatun ja magnesiumista valetun rakenteen 3D-mallit.



Kuva 6. Teräslevyistä hitsatun olka-akselin 3D-malli



Kuva 7. Magnesiumista valetun olka-akselin puolikas 3D-malli

Kaikilla valmistusmenetelmillä oli omat hyvät puolensa, joten laadittiin taulukko (taulukko 1) kuvaamaan eri menetelmien hyviä ja huonoja puolia. Arvosteluasteikkona käytettiin numeroita 1, 2 ja 3. Kun jokin valmistusmenetelmä sai arvosanakseen ykkösen, se tarkoitti heikkoa muihin kahteen verrattaessa. Päinvastoin arvosana kolme tarkoitti sitä, että ominaisuus oli muihin nähden parempi.

Taulukko 1. Eri valmistusmenetelmien vertailu

	Teräslevyistä hitsattu	Magnesiumista valettu	Alumiinista koneistus
Massa	1	3	2
Jäykkyys	3	1	2
Syö tiimin resursseja	1	1	3
Hinta	3	2	1
Huollettavuus	1	2	3
Korjattavuus	3	1	2
Yhteensä	12	10	13

Asteikko

1 = huono

2 = keskinkertainen 3 = hyvä

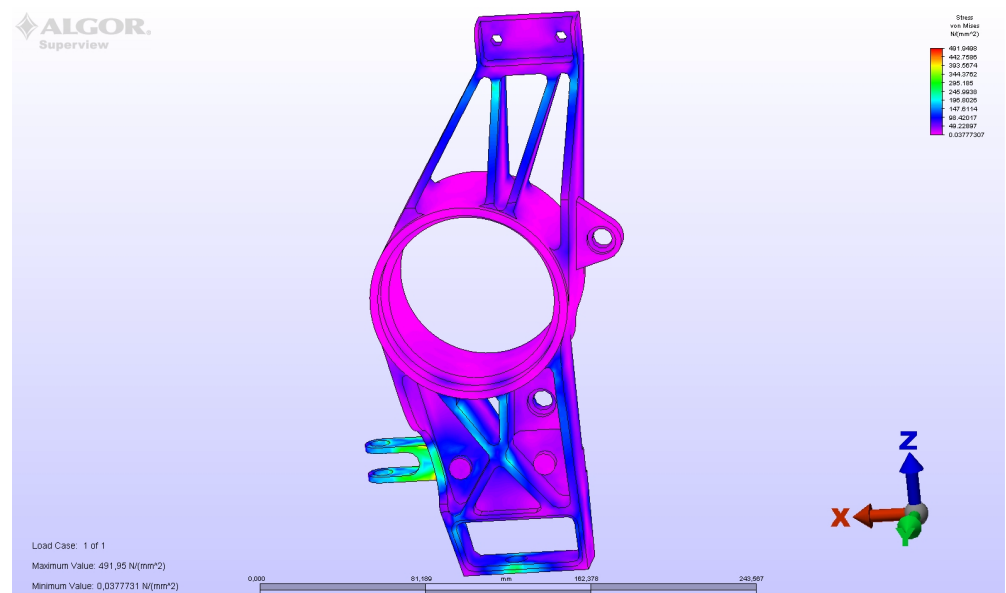
Kun tämä vertailu tehtiin, päätettiin, että olka-akselit valmistetaan koneistamalla alumiinista. Huolimatta työstömenetelmän korkeasta hinnasta, todettiin, että on tärkeää, ettei valmistusprosessi kuluta tiimin voimavaroja. Lisäksi alumiinista koneistamalla tehty versio asettui painoltaan ja jäykkyydeltään teräksestä hitsatun ja magnesiumista valetun rakenteen väliin (taulukko 2). Silti se kuitenkin täytti asetetun tavoitteen viiden prosentin painonsäästöavoitteesta.

Taulukko 2. Olka-akselin painot eri valmistusmenetelmillä

	Teräslevyistä hitsattu	Magnesiumista valettu	Alumiinista koneistus
Massa (g)	900	700	760
Siirtymät (max kuorma) (mm)	< 0,015	< 0,1	< 0,02
Jännitys mat. myötörajaan nähden (%)	45	70	60

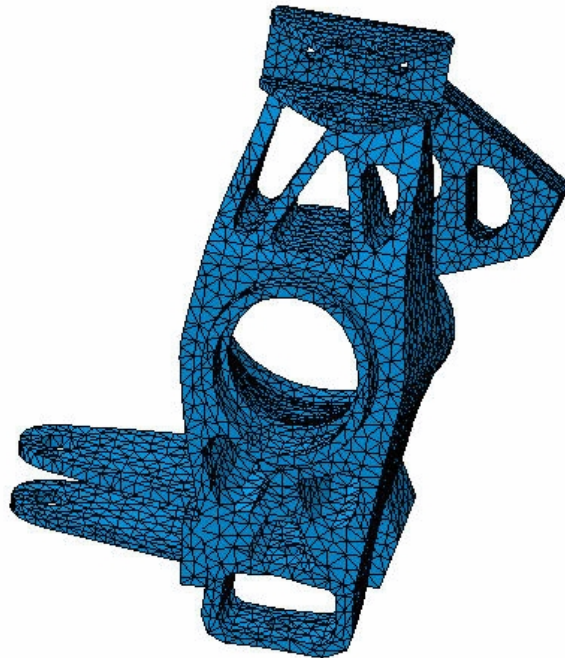
4.1.3 Olka-akselin lujuuslaskenta

Olka-akselin valmistusmenetelmän varmistuttua, jatkettiin kehitystyötä 3D-mallissa. Aina kun muutoksia tehtiin rakenteeseen, tarkasteltiin muutoksien vaikutukset lujuuslaskentaohjelmassa (kuva 8).



Kuva 8. Etuolka-akselin kolmas versio lujuuslaskentaohjelma Algor FemProssa

Kuten todettu, lujuuslaskennan perusteena käytettiin rataolosuhteissa mitattuja tukivarsissa vaikuttavia voimia. Ensimmäinen vaihe lujuuslaskennassa on luoda 3D-malliin laskentaverkko (mesh). Tämä laskentaverkko on kuvattu kuvassa 9. Kun laskentaverkko luodaan, ohjelma jakaa 3D-mallin pinnan pieniin ruutuihin. Laskentaverkon tarkkuudella eli ruutujen koolla on suuri vaikutus sekä laskennan tarkkuuteen että laskentaan tarvittavaan aikaan. Turhan tarkkojen laskentaverkkojen käyttö ei ole mahdollista tiukassa suunnitteluajataulussa, sillä yhteen simulaatioon voi kulua useita kymmeniä tunteja. Vähemmälläkin tarkkuudella päästään jo suuntaa antaviin tuloksiin ja selvät suunnitteluvirheet mallissa voidaan eliminoida ja muuttaa seuraavaan malliin. Suunnittelun edetessä voidaan asteittain siirtyä käyttämään tarkempia laskentaverkkoja.



Kuva 9. Algor FemPro-laskentaverkko

Ennen varsinaisten voimien asettamista simuloitavaan malliin, asetetaan käytettävän materiaalin ominaisuudet. Taulukkoon 3 on koottu käyttämämme Uddeholm Alumeclu-*suurlujuusalumiinin* ominaisuudet, jotka syötettiin Algor FemPro:hon /4, s.1/.

Taulukko 3. Uddeholm Alumecin ominaisuudet

Tiheys kg / m^3	2830
Kimmoduuli N / mm^2	71500
Lämpölaajenemiskerroin / $^{\circ}C$ 20 $^{\circ}C$ -> 100 $^{\circ}C$	23 x 10⁻⁶
Lämmönjohtavuus $W / m^{\circ}C$	165
Ominaislämpö $J / kg^{\circ}C$	890
Myötöraja N / mm^2 (levyt s = 50 - 100 mm)	520

Laskennassa malliin kohdistuvia jännityksiä verrataan asetetun materiaalin myötörajaan ja näin saadaan tulokseksi varmuuskerroin. Väreillä ilmaistut jännitykset helpottavat ja nopeuttavat mallin analysointia huomattavasti.

Olka-akselille asetettiin raja-arvoiksi liikkumattomuus kuvassa y- ja x-akselin suunnassa, laakereiden pintojen kohdalta. Kierto y-akselin ympäri sallittiin, jotta laakereiden toimintaa pystyttiin simuloimaan tarkemmin. Lisäksi kääntövarsi sidottiin paikalleen olka-akseliin sen kiinnityspulttien kohdalta. Tämän jälkeen asetettiin ylätukivarrelta tuleva voima negatiiviseen y-suuntaan, ja alatukivarressa vaikuttava voima positiiviseen y-suuntaan /2, s. 81/. Lisäksi raidetangossa vaikuttava voima asetettiin vaikuttamaan olka-akselin irrotettavaan kääntövarteen.

Jarruttamistapahtuman synnyttävät voimat simuloitiin erillisellä laskennalla. Koska renkaan ja tien välinen kitkakerroin, etupyörän dynaamisesta painonsiirrosta kasvanut massa ja renkaan dynaaminen vierinsäde olivat tiedossa, saatiin laskettua jarrulevyiltä vaadittu momentti /3, s. 8/. Tämän momentin myös jarrusatula siirtää olka-akseliin. Näin ollen momentti muutettiin vastaamaan kahta voimaa, jotka asetettiin vaikuttamaan jarrusatulan kiinnityskorvakkeisiin. Olka-akselin raja-arvoiksi asetettiin jälleen liikkumattomuus y-akselin molempiin suuntiin laakeripesän kohdalta ja myös liikkumattomuus z-akselin molempiin suuntiin. Kierto y-akselin ympäri sallittiin, koska olka-akseli laakeroitaisiin tästä kohdasta. Koska tukivarret ottavat vastaan jarrutustilanteessa syntyvät voimat /2, s. 73/, estettiin olka-akseli liikkumattomaksi x-akselin suhteen ala- ja ylätukivarsien kiinnityspisteistä. Todellisuudessa pyöräntuenta ei koskaan ole täysin jäykkä tukivarsien joustamisen vuoksi, mutta simuloinnissa tämä tarkkuus riittää.

Kun simulointi oli valmis, voitiin tarkastella jarruvoimien synnyttäviä jännityksiä sekä siirtymiä olka-akselissa.

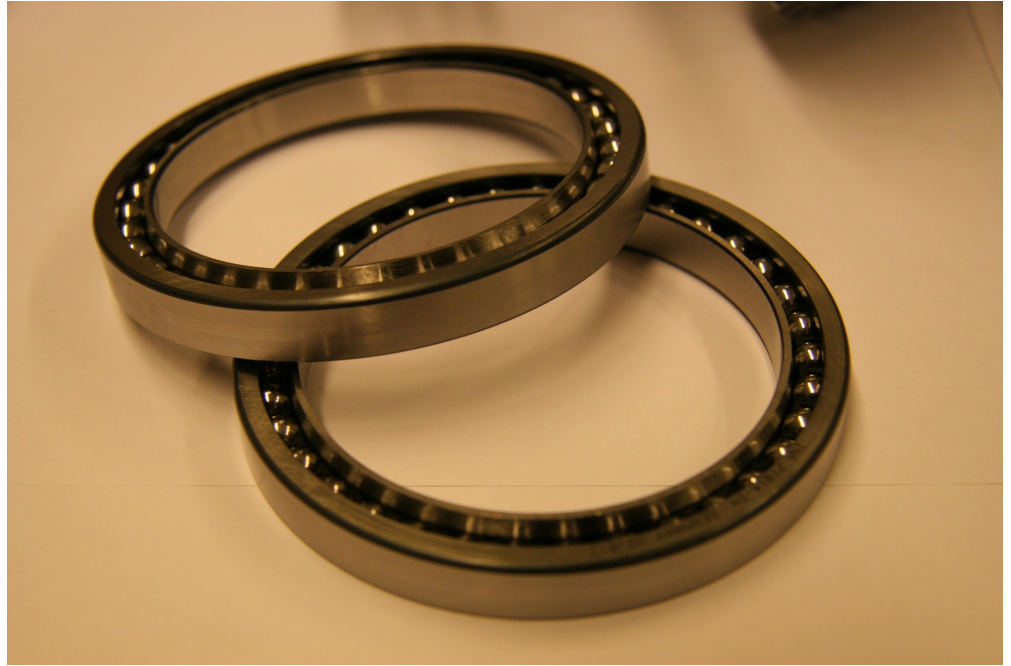
Olka-akselin kestävyyttä tarkasteltaessa on tärkeää mitoitaa se myös materiaalin väsymisen suhteen. Vaikka kappale periaatteessa kestäisikin suurimmat, hetkelliset kuormat myötörajojensa puolesta, on se myös mitoitettava väsymisen perusteella. /5, s. 34./

Väsymistarkastelu on maksimikuormitusta selvästi vaikeampi simuloida. Olka-akselin väsymistarkastelu tehtiin samoilla raja-arvoilla kuin maksimikuormatarkastelut. Olka-akseli asetettiin laskentamalliin kiinni laakeripesien kohdalta ja se sai pyöriä y-akselin ympäri. Väsymistarkastelussa voimat perustuivat rataolosuhteissa mitattujen tukivarsivoimien keskiarvoon. Ylä- ja alatukivarrelle asetettiin omat, vastakkaissuuntaiset voimat ja kääntövarrelle omansa. Kappaleen väsymistä tarkasteltaessa on huomioitava, että myötörajana käytetään ainoastaan 25 % materiaali myötörajasta /5, s. 34/.

4.2 Olka-akselin valmistusprosessi

Osien valmistus suunniteltiin jo alusta lähtien tehtäväksi ulkopuolisella koneistajalla. Valmistajaksi valittiin Tmi Mikko Konola Rantsilasta. Konola on ollut tiimin monivuotinen osien valmistaja. Aikaisempien osien laatu, hinta sekä toimitukset nopealla ja joustavalla aikataululla ovat olleet hänen vahvuuksiaan jo pitkään, eikä yhteistyön jatkumiselle ollut esteitä.

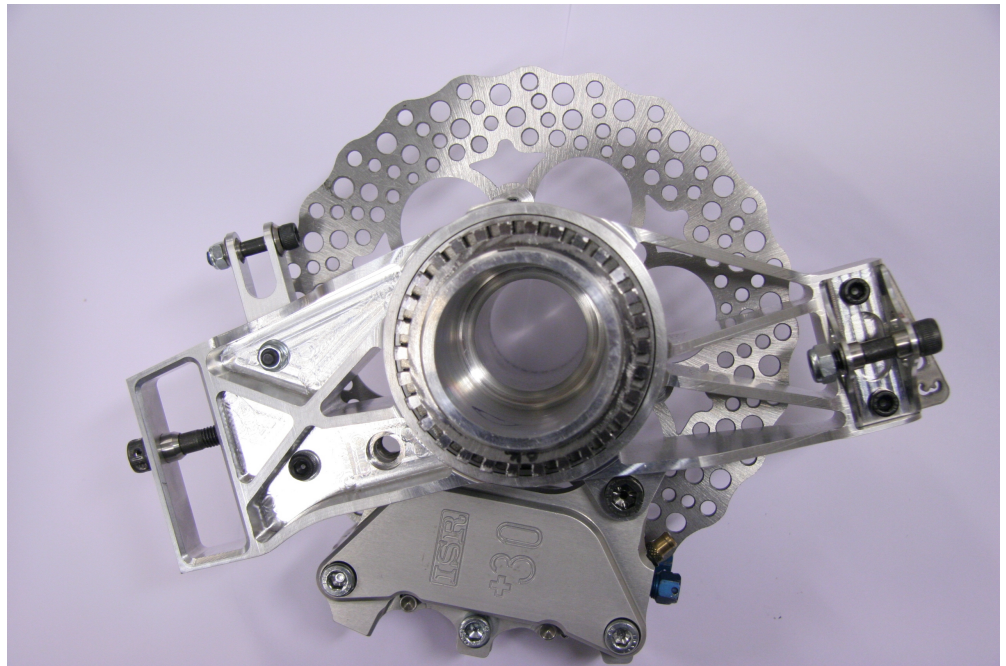
Ennen koneistusta valmiista 3D-malleista oli luotava työpiirustus. Etu- ja takaolka-akseleiden työpiirustukset on kuvattu liitteessä 1. Työpiirustuksista tuli ilmetä toleranssit kaikille tarkoille mitoille. Laakereiksi oli valittu vinot urakuulalaakerit (kuva 11) FAG:n laakerivalikoimasta ja nämä vaativat oikean toleranssin, jotta lämpösovite yhdessä laakeriliiman kanssa toimisi oikein. Toleranssi olka-akselin laakeripesälle valittiin laakerivalmistajan Internet sivuilta löytyvistä ohjeista sillä perusteella, että olka-akseli tulitisiin lämmittämään noin 100 celsiusasteeseen ennen laakereiden asennusta. Näin kappaleen jäähtyessä saataisiin oikean suuruinen puristussovite. /6/



Kuva 11. FAG:n valmistamat yksiriviset vinot urakuulalaakeri

Yksirivisen, vinon urakuulalaakerin käyttämiselle oli selkeä peruste: se kestäisi enemmän aksiaalista rasitusta kuin suora urakuulalaakeri /6/. Lisäksi kokemukset vuoden 2007 kilpa-autosta vahvistivat tämän.

Työpiirustuksen ei tarvinnut sisältää muita tarkkoja mitoituksia, vaan olka-akseleiden muodot saatiin suoraan 3D-mallista. 3D-mallista tallennetaan .stp-muotoinen tiedosto, jonka koneistaja voi avata omalla, koneistuskeskuksen ohjaamiseen tarkoitetulla MasterCam-ohjelmistolla. Tällä ohjelmalla luodaan koneistuskeskuksen käyttämät liikeradat, työstönopeudet, sekä käytettävät lastuamistyökalut. Yhden olka-akselin valmistuskustannus oli noin 300 euroa. Tämä oli mielestämme erittäin kohtuullinen hinta ottaen huomioon, että Konola teki osat valmiiksi joulun pyhäpäivinä. Työn jälki oli erittäin hyvää ja osat mittatarkkoja. Kuvissa 12 ja 13 valmiit etu- ja takaolka-akselit.



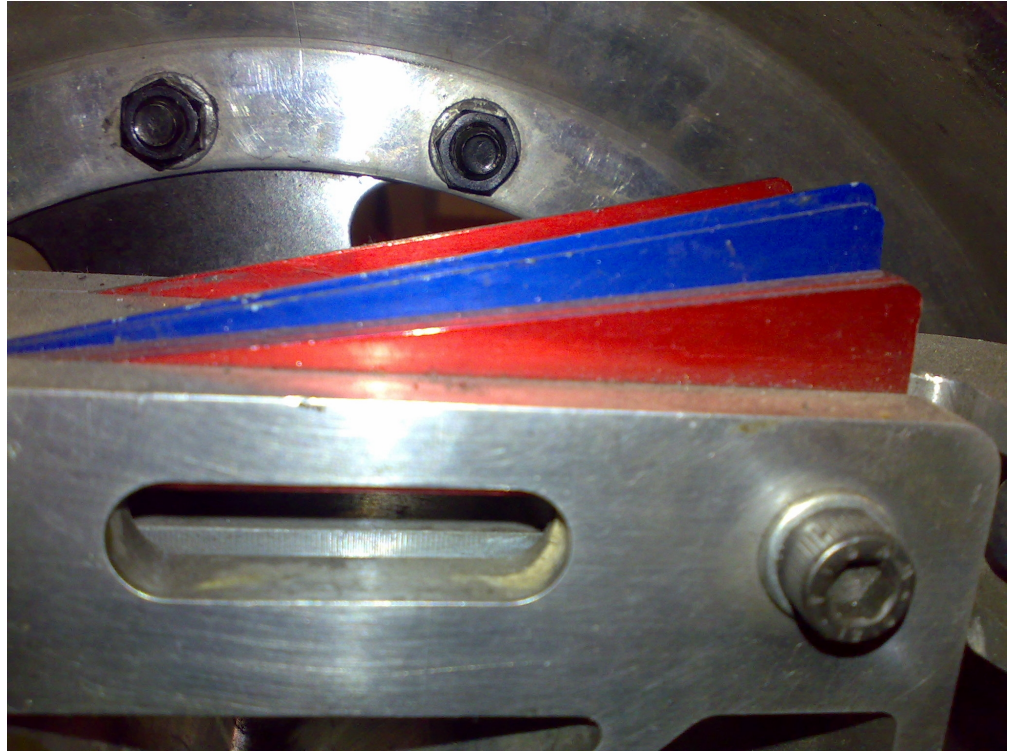
Kuva 12. HPF008:n etuolka-akseli koottuna



Kuva 13. HPF008:n takaolka-akseli ennen laakereiden asennusta

Alumiinista koneistettavat olka-akselit oli alun perin tarkoitus anodisoida kulutuskestävyyden lisäämiseksi. Lisäksi olka-akseleista haluttiin tehdä väriltään kiiltävän punaiset. Anodisoinnin tarkoitus on sähkökemiallisella prosessilla vahvistaa alumiinin pinnan oksidikalvoa haluttuun paksuuteen. Anodisoitavat osat saadaan lisäksi halutun värisiksi (kuva 14). Prosessi aloitetaan puhdistamalla anodisoitava kappale rasvanpoistoaineella, lipeäpeittauksella ja happoon upottamalla. Tämän jälkeen tehdään itse

anodisointi noin 20 celsiusasteisessa rikkihapossa ja lisätään haluttu väriaine. Viimeiseksi anodisoitu pinta tiivistetään kylmä- tai kuumatiivistyksellä. Lopputuloksena saatavan oksidikerroksen ominaisuudet ovat: hyvä ulkonäkö, erilaiset värit (jos haluttu), pinnan kasvanut kovuus, korroosionkestävyys, korkea lämmönkestävyys ja sähkön eristyskyky./ 7/



Kuva 14. Värilliseksi anodisoituja alumiiniosia pyöräntuennassa

Anodisointiin ei kuitenkaan riittänyt aikaa, sillä suunnittelun aikana tehdyt pakolliset muutokset olka-akseleihin myöhästyttivät osien valmistusta sen verran, että olka-akselit oli pakko asentaa autoon sellaisenaan, kirkkaan värisinä. Olka-akselit kuitenkin irrotettiin autosta testaukseen tulleen tauon aikana ja ne kiilloitettiin mekaanisesti kiillotuslaikalla ja tahnalla. Näin saatiin paremmin puhtaana pysyvä ja näyttävä pinta osille.

4.3 Napa-akselin suunnittelu

4.3.1 Napa-akseliin vaikuttavien voimien määrittäminen

Napa-akseliin vaikuttavien voimien määrittäminen oli ensimmäinen tehtävä. Koska myös napa-akselin kautta kulkevat kaikki renkaan kehittämät voimat, oli nämä voimat tunnettava /2, s. 78 - 79/.

Voimien määrittämisen lähtökohdaksi asetettiin tilanne, jossa koko kilpa-auton massa – kuljettajan massa mukaan lukien – tulee ääritilanteessa yhdelle pyörälle. Suunnitteluvaiheessa tämä massa arvioitiin olevan 270 kg. Koska napa-akselissa tultaisiin käyttämään keskimutterikiinnitystä yhdellä mutterilla, ja mutterin kartio keskittäisi vanteen napa-akseliin, vaikuttaisi tämä 2700 N:n voima napa-akselissa keskimutterin mittaisella alueella napa-akselissa. Tämän, joskin rata-olosuhteissa epärealistisen tilanteen arveltiin olevan kaikkein raskain kuormitus napa-akselille.

HPF008-autoon suunniteltiin käytettävän uivia jarrulevyjä /3, s. 41/ napa-akseleihin kiinnitettyinä kaikissa pyörissä. Jarruvoimien aiheuttama kuormitus napa-akselissa oli siis tunnettava. Jarrulevyiltä tarvittava hidastusmomentti siirretään napa-akseliin levyn kiinnityskohdista, joita napa-akseliin suunniteltiin tehtävän kuusi kappaletta. Dynaamisen painonsiirron vuoksi suurin jarruttava momentti tarvitaan etuakselilla /3, s. 8 - 12/. Suunnitteilla olevasta autosta tunnettiin painojako ja akseliväli. Painopisteen korkeus, renkaan ja tien välinen kitkakerroin oli arvioitava, jotta saatiin laskettua dynaamisen painonsiirron määrä. Renkaan dynaaminen säde oli myös tiedossa, joten jarrulevyiltä vaadittava momentti pystyttiin määrittämään. Tätä arvoa käytettiin kaikkien neljän pyörän napa-akselin jarrulevyn kiinnityskohtia lukuun ottamatta simuloitaessa.

HPF008-auto on takavetoinen. Tämä tarkoittaa sitä, että taka-akselilla napa-akselin on myös välitettävä tiehen veto-akselilta tuleva vääntömomentti. Koska moottorin tuottama vääntömomentti, välityssuhde, taka-akselipaino ja renkaan ja tien välinen kitkakerroin tunnettiin, pystyttiin laskemaan momentti, jonka napa-akselin olisi välitettävä. Tämä momentti jaettiin kolmeen yhtä suureen voimakomponenttiin, jotka kuvasivat kolmirullaisen vetoakselin nivelen vaikutusta napa-akselissa.

4.3.2 Napa-akselin valmistusmenetelmän valitseminen

Napa-akselin valmistusmenetelmää valittaessa luotiin katsaus Helsingin Ammattikorkeakoulun edellisten vuosien kilpa-autoihin. Kokemukset vanhoista autoista ovat olleet erittäin arvokkaita uusia ratkaisuja kehitettäessä. Havaittiin, että vuosien 2004 ja 2005 kilpa-autoissa oli käytetty napa-akselin materiaalina alumiinia. Tarkasteltaessa vuosien 2006 ja 2007 kilpa-autoja, havaittiin, että napa-akselien materiaaleissa oli palattu vuoden 2003 ratkaisuihin eli käytetty materiaali oli terästä. Päätimme selvittää, miksi materiaali oli vaihtunut takaisin teräkseen. Päätökset materiaalivalintojen taustalla selvisivät haastatteleamalla vanhoja, jo valmistuneita tiimin jäseniä. Vuodesta 2003 vuoteen 2006 tiimissä mukana olleella Jussi Hyvösellä oli selkeä näkemys aiheesta. Hyvösen mukaan alumiiniset napa-akselit eivät olleet kestäneet kilpa-autossa, joten ne oli päätetty korvata vuoden 2006 kilpa-autoon teräksillä. Osittain huonon keston Hyvösen mukaan selitti jarruista napa-akseliin siirtynyt lämpö, joka pehmensi alumiinia.

Tämä haastattelu antoi alkusysäyksen materiaalivalintojen selvittämiseksi. Halusimme tietää, onko alumiinista valmistetun napa-akselin käyttö todella mahdotonta.

Eri materiaalien ja työstömenetelmien hyvistä ja huonoista puolista tehtiin vertailutaulukko aivan kuten olka-akselin valmistusmenetelmää valittaessakin. Materiaalien ja valmistusmenetelmien arvosteluperiaate oli myös sama. Taulukkoon 4 on koottu arvostelut kolmelle, parhaalle vaihtoehdolle huomioiden tiimin resurssit ja yhteistyökumppanit.

Taulukko 4. Napa-akselin materiaali ja työmenetelmien arvostelu

	Teräksestä koneistettu	Alumiinista valettu	Alumiinista koneistus
Massa	1	3	2
Jäykkyys	3	2	2
Syö tiimin resursseja	3	1	3
Hinta	1	2	2
Huollettavuus	2	2	2
Korjattavuus	3	2	2
Yhteensä	13	12	13

Asteikko

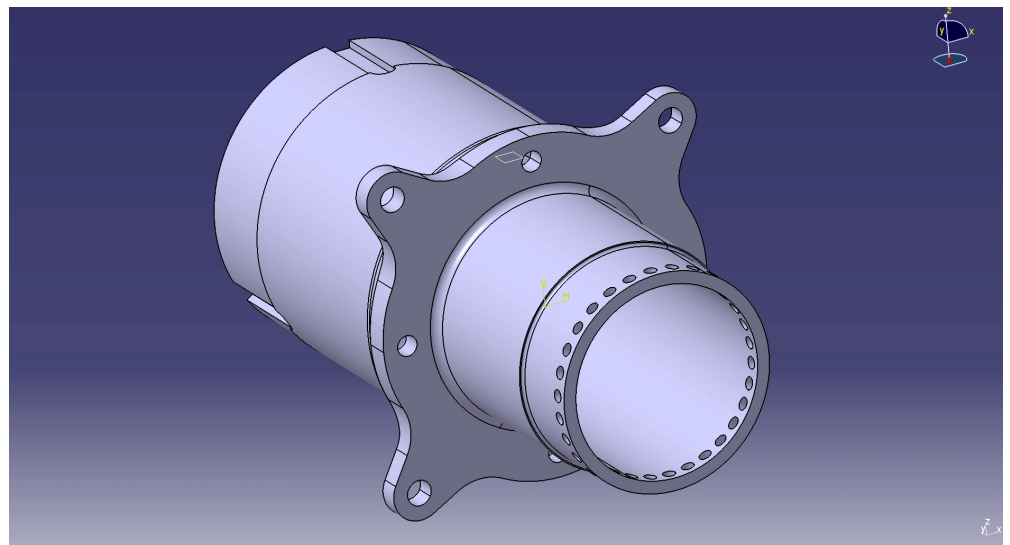
1 = huono

2 = keskinkertainen 3 = hyvä

Teräksestä ja alumiinista koneistettavat vaihtoehdot nousivat arvosteluperusteillamme parhaiksi vaihtoehdoiksi. Näistä menetelmistä valittiin alumiinista koneistaminen, koska halusimme painottaa materiaalin keveyttä ja lisäksi yhtenäistää pyöräntuennan osalta vallitsevaa linjaa teettää osat alumiinista. Napa-akseleissa päätettiin käyttää samaa, Uddeholmin toimittamaa Alumecc-suurlujuusalumiinia kuin olka-akseleissakin. Materiaalin tiedot ovat nähtävissä taulukosta 3.

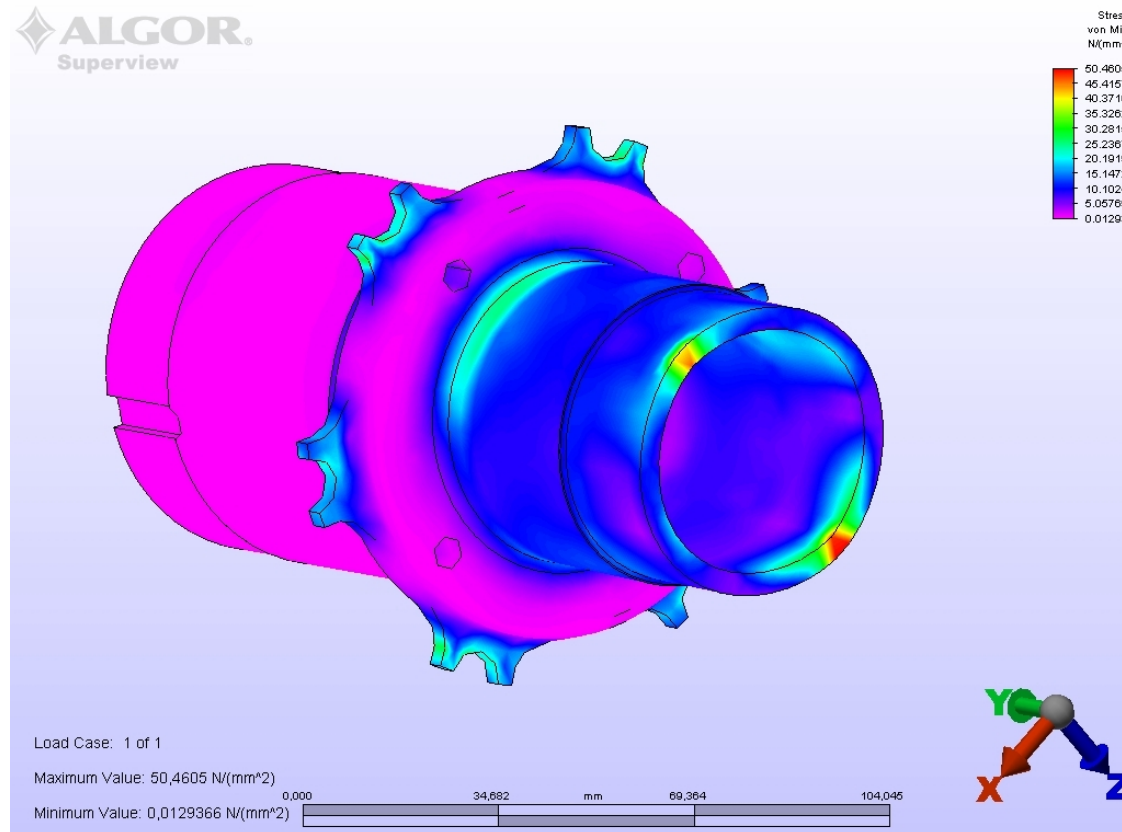
4.3.3 Napa-akselin lujuuslaskenta

Kehitystyö napa-akselissa tapahtui kuten olka-akselissakin, kahden ohjelman välillä. Napa-akseliin tuli muutoksia useita kymmeniä kertoja ja näiden muutoksien vaikutukset tuli aina varmistaa lujuuslaskennalla. Eräs ongelma oli kahden erilaisen vanteen käyttäminen autossa. Napa-akselin piti luonnollisesti sopia molemmille.



Kuva 15. Ensimmäinen 3D-malli HPF008:n etupyörän napa-akselista

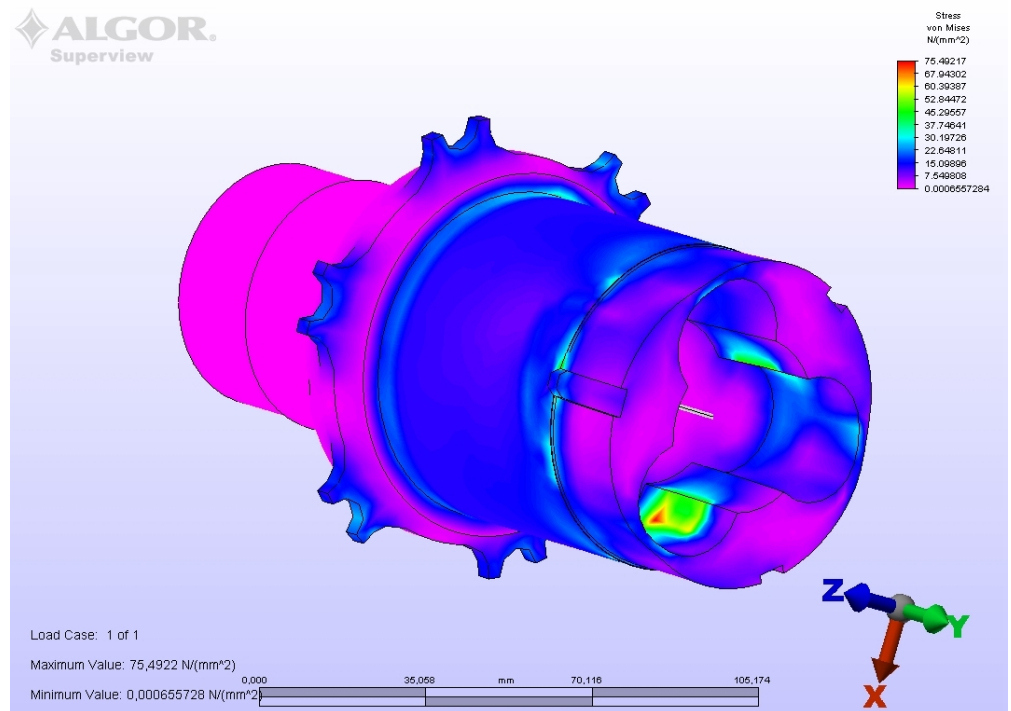
Kuvassa 16 on napa-akselin kuormitustilanne, jossa keskimutterin kohdalle on asetettu koko auton paino 2700 N ja lisäksi jarruvoima 3000 N jaettuna tasaisesti kaikille kuudelle jarrulevyn kiinnikkeelle. Kappale oli sidottu laakereiden suunnitelluilta kohdilta x-, y- ja z-akseleiden suhteen, mutta se oli vapaa pyörimään y-akselin ympäri. Lujuuslaskentaohjelmaan oli luotu erillinen ympyräkoordinaatisto, joka mahdollisti pyörähdyskappaleiden tarkastelun.



Kuva 16. Napa-akseli lujuuslaskentaohjelmassa

Eri värien avulla voidaan tulkita napa-akselissa olevat jännitykset. Lisäksi maksimiarvo on kerrottu kuvan vasemmassa alareunassa. Tässä kuormitustilanteessa jännityksen maksimiarvoksi saimme $50,5 \text{ N/mm}^2$. Tämä jännitys esiintyi aivan akselin ulkopäässä, kuvassa 16 punaisella merkityllä alueella. Maksimijännitystä verrattaessa käytettävän materiaalin myötörajan (taulukko 4), voitiin turvallisesti vähentää materiaalin seinämävahvuutta. Myös jarruvoimien aiheuttamat jännitykset olivat pieniä ja hyväksyttävissä.

Takanapa-akseleita tarkasteltaessa oli otettava huomioon myös vetoakseleilta tuleva vääntömomenti. Takarenkaiden välittämän maksimivääntömomentin laskenta on käsitelty Jussi Hyvösen, vuonna 2005 valmistuneessa insinööriyössä /9/. Tässä työssä esitettyjen kaavojen avulla uuden HPF008-auton maksimivääntömomentiksi pyörällä saatiin 300Nm. Tämä vääntömomenti jaettiin siis kolmeen yhtä suureen voimakomponenttiin, jotka asetettiin vaikuttamaan napa-akseliin. Kuvassa 17 on esitetty vetoakselilta tulevan vääntömomentin vaikutus napa-akseliin.



Kuva 17. Vääntömomentin vaikutus napa-akseliin

Kuvasta voidaan havaita, miten vääntömomentin aiheuttama kuormitus jakautuu aina jarrulevyn kiinnityskohtaan asti. Tässä kohdassa myös materiaalin seinämäpaksuus kasvaa runsaasti, eli voidaan todeta, että laskentamalli toimii. Jännityksen maksimiarvoksi saatiin $75,5 \text{ N} / \text{mm}^2$, jota verrattaessa materiaalin arvoihin (taulukko 4), voitiin todeta napa-akselin kestävän maksimikuormituksen. Päätettiin kuitenkin pysyä huomattavan kaukana materiaalin myötörajasta, sillä vetoakselin nivelen rullat ajanmyötä kuluttavat alumiinista valmistetun nivelen pesän. Tämä oli todettu testeissä HPF007-kilpa-autolla, jonka teräksestä tehtyyn napa-akseliin asennettiin alumiininen vetonivelen pesä.

4.4 Napa-akselin valmistusprosessi

Koska napa-akselit oli päätetty valmistaa alumiini pyörötangosta koneistamalla, otettiin yhteyttä MDN Engineering-yrityksen Niko Kinnariseen. Kinnarinen oli monena aikaisempana vuonna tehnyt tiimin napa-akselit, emmekä nähneet estettä yhteistyön jatkumiselle. Koska Kinnarisella ei ollut käytössään modernia työstökeskusta, oli napa-akseleista tehtävä tarkka työpiirustus, josta kaikkien mittojen oli selvitävä. Laakereiden puristusovite saatiin laakerivalmistaja Internet -sivuilta /6/. Napa-akseleista tehdyt työpiirustukset ovat liitteessä 2.

Akseleiden koneistaminen kesti ainoastaan viikon, ja lopputuloksen oltiin tyytyväisiä. Pinnanlaatu oli hyvä ja akselissa olevat kierteet sekä keskimutterille että laakerien kiristysmutterille olivat toimivat.

Valmis takanapa-akseli on kuvattu kuvassa 18.



Kuva 18. Valmis napa-akseli

Napa-akseleihin suunniteltiin myös oma kiristysmutteri laakereille, jotka näkyvät kuvassa 18, oikeanpuoleisessa akselissa. Mutteria kiristettäessä laakereille saatiin oikean suuruinen esijännitys aksiaalisessa suunnassa, jotta pyörälle ei jäänyt yhtään välystä. Laakeria vastaan tuleva mutteri oli valmistettu alumiinista. Tämä siksi, että toinen, varsinaisesti koko paketin lukitseva teräsmutteri toimi samalla pyörintänopeusanturin lukukehänä.

Molemmat mutterit eivät voineet olla terästä, koska silloin myös laakerien esijännitykseen käytettävän mutterin hammastus olisi aiheuttamallaan magneettikentällä sotkenut nopeusanturin. Täten materiaalin oli oltava ei-magneettista. Pyörintänopeusanturi on tyypiltään induktiivinen, eli se tarkkailee magneettivuon tiheyden muutosta. Tästä johtuu mutterissa johtuva hammastus. Kun hampaiden lukumäärä yhtä mutterin kierrosta kohden tunnetaan, voidaan siitä johtaa pyörintänopeus. HPF008-autossa tätä pyörintänopeustietoa käytettiin sekä MoTec-tiedonkeruulaitteistossa että Tatech-moottorinohjausyksikössä luistoneston apuna.

Nämä hammastetut mutterit olivat erittäin haastavia koneistaa, koska kierre oli saatava toimivaksi erittäin lyhyellä matkalla. Muttereissa olevia kierteitä jouduttiin vielä viilaaman käsin koneistuksen jälkeen, jotta ne saatiin kierrettyä napa-akseliin.

4.5 Olka- ja napa-akselin käyttökokemukset HPF008-autossa

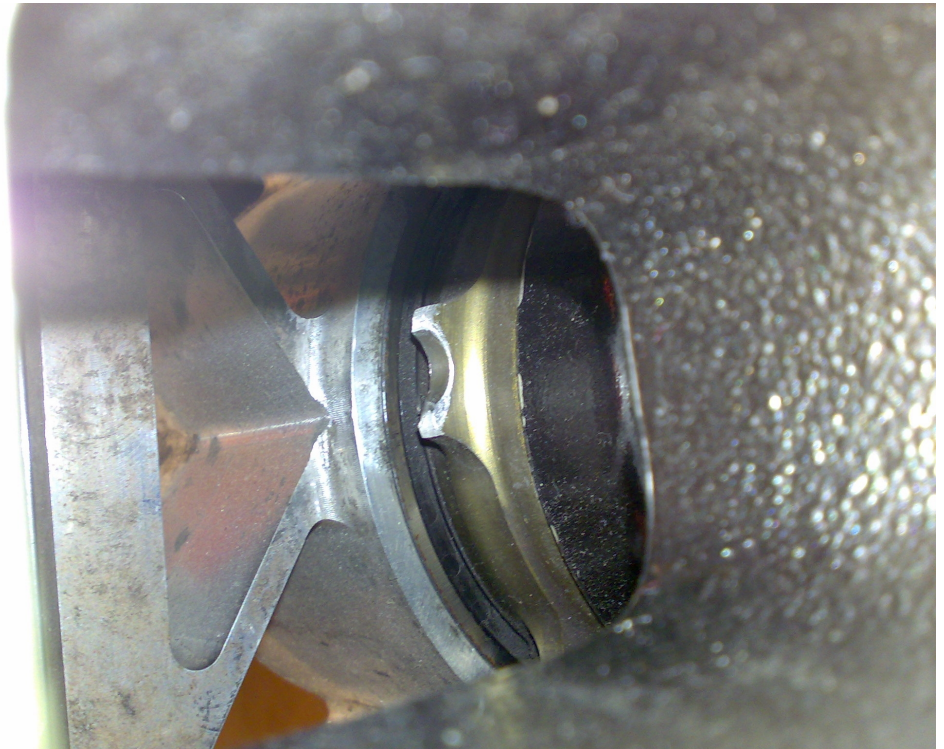
Sekä olka-akseli että napa-akseli todettiin jo ensitesteissä rakenteeltaan erittäin toimivaksi. Olka-akseleihin suunniteltu, ohuilla shimmilevyillä toteutettu pyörän pystykallistuman säätö oli erittäin nopea ja helppokäyttöinen. Myös pystykallistuman säätövara oli jopa eri rengasmerkeillä ajettaessa riittävän suuri. Olka-akseleissa olevien pyörintänopeusanturien paikkojen suunnittelun voitiin todeta jääneen puolitiehen. Anturit oli tarkoitus kiinnittää pultilla, mutta pultille suunniteltu ja toteutettu kierre olka-akselissa oli aivan liian lyhyt ja se ei kestänyt. Näin ollen pyörintänopeusanturit irtoilivat liian usein. Tämä tarkoitti myös tiedonkeruun ja välillä myös luistoneston toiminnan häiriintymistä.

Laakereiden asennuksessa napa-akseliin huomattiin myös puute. Koska akselissa oleva laakeripinta oli kokonaisuudessaan koneistettu samaan halkaisijaan, laakereita vaihdettaessa alumiinipinta kului ajan myötä ja täten puristusovite katosi lopulta kokonaan.

Myös laakereiden kiristämiseen tarkoitetut mutterit aiheuttivat harmaita hiuksia tiimin jäsenille. Koska mutterit – kuten myös napa-akseli – olivat valmistettu alumiinista, mutterit tahtoivat helposti jumiutua akseliin. Ongelmaa pystyttiin vähentämään huomattavasti käyttämällä kuparitahnaa aina muttereita asennettaessa. Käytettävien laakereiden kestoiässä ei ollut

valittamista, ja koskaan kisoissa ei matkanteko katkennut olka- tai napa-akselissa ilmenneen ongelman takia.

Vuoden 2008 kilpailukauden jo ollessa ohi, HPF008-autolla ajettiin edelleen testejä, joissa kokeiltiin uusia osia ja uusien kuljettajien annettiin tutustua autoon. Syksyn 2008 viimeisissä testeissä oikean takapyörän napa-akselista petti jarrulevyn kiinnityskohdat ja levy pääsi pyörimään vapaasti, jarrutustehon hävitessä tältä pyörältä. Vauriota tulkittaessa todettiin, että jarrulevyn kiinnittämiseen käytetyt teräsholkit olivat ajan saatossa muokanneet alumiinista valmistettua napa-akselia siten, että ne pääsivät hakkaamaan napa-akselissa olleita levyn kiinnikkeitä jokaisella jarrutuksella ja napa-akselin materiaali oli väsynyt. Kuvasta 19 voidaan todeta tämä jarrulevyn kiinnikkeiden pettäminen.



Kuva 19. Napa-akselin kuluneet jarrulevyn kiinnikkeet

Tämä kiinnikkeiden kulumisen ja pettäminen oli ensimmäinen ajon estänyt vika napa-akseleissa. Toisaalta kausi oli jo ohi eli akseli kesti sen minkä sen pitikin, olla toimiva kaikissa kisoissa. Harmittava vika kuitenkin esti testaustyön jatkamisen samana päivänä. Autolla ajettiin kuitenkin vielä tämän jälkeen joitakin testejä, tosin ilman takajarruja.

Napa-akseleissa ilmeni erittäin kuumissa olosuhteissa ajetuissa testeissä hieman laajentumista. Tämä tuli ilmi vanteen juuttumisena akseliin. Tämän havaittuamme hioimme vanteiden keskireikää, jolloin keskireiän halkaisija suureni noin kymmenysosemillin verran. Tämä poisti vanteen juuttumisongelman.

Alumiiniset, anodisoimatta jääneet pinnat pysyivät koko kauden siistin näköisinä. Myöskään hapettumista tai korroosiota ei ollut havaittavissa pinnoilla. Tähän vaikutti varmasti osaltaan pinnoille tehty koneellinen kiillotus.



Kuva 20. Valmis, koottu takapyörän tuenta

5 JARRUJÄRJESTELMÄN TEHTÄVÄT

Jarrujärjestelmän tehtävä on toistuvasti ja tehokkaasti pystyttävä hidastamaan ajoneuvon vauhti haluttuun nopeuteen /3, s. 3/. Kilpa-autoissa jarrujärjestelmä joutuu huomattavasti kovemmalle rasitukselle kuin henkilöautoissa, kovista nopeuksista ja toistuvista hidastustapahtumista johtuen. Täten komponenttien mitoittamista on tarkasteltava eri lähtökohdista. Formula SAE -auton jarrujärjestelmän sääntöjen määräämät vaatimukset kerrottiin jo aiemmin tässä työssä.

Jarrujärjestelmän tulee myös pystyä jakamaan jarruvoima tasaisesti kaikille pyörille. Jarrutasapaino ei saa olla liikaa toisella akselilla, vaan jarruvoimat tulee jakaa dynaamisten pyöränkuormien muutokset huomioon ottaen. Pääosa jarrutehosta tarvitaan etuakselilla johtuen nimenomaan dynaamisesta painonsiirrosta.

HPF008-kilpa-autossa jarrujärjestelmältä haluttiin myös mukautumiskykyä eri olosuhteisiin ja eri kuljettajien ajotapoihin. Näistä lähtökohdista lähdettiin suunnittelemaan jarrujärjestelmää.

Ennen kaikkea, jarrujärjestelmän tulee olla varmatoiminen, koska kyse on turvallisuudesta.

6 JARRUJÄRJESTELMÄN SUUNNITTELU

Jarrujärjestelmän laskennallinen suunnittelu ja komponenttien mitoittaminen on käyty läpi vuonna 2005 valmistuneessa, Ville Sandgrenin tekemässä insinööriyössä /11/. Jarrujärjestelmän perussuunnitteluun käytettiin nimenomaan tätä työtä. Komponenttien valinnalle muiden rakenneratkaisuiden kehittämiseksi sen sijaan oli edelleen paljon tehtävää.

Kuten kaikki muutkin osat, jarrujärjestelmä mallinnettiin kokonaisuudessaan käyttäen 3D-suunnitteluohjelmaa CATIAa. Näin vältyttiin komponenttien virheelliseltä sijoittelulta ja autoa rakennettaessa tulisi vähemmän yllätyksiä.

Suunnittelun lähtökohdaksi asetettiin sellainen linja, että ainoastaan jarrulevyt tehtäisiin itse. Katsoimme jälleen tärkeäksi, että tiimin jäsenten

aikaa ei menisi liian paljon omien suunnitelmien testaamiseen ja valmistukseen. Myös yhteinen toteamus oli, että jarrujärjestelmän osia, kuten satuloita ja pääsylintereitä, oli erittäin hyvin tarjolla valmiina ostettavaksi. Tämänkokoiseen autoon on runsaasti saatavilla sopivan kokoisia osia, jotka on alun perin suunniteltu ja valmistettu moottoripyöriä varten. Myös jarrujen hydraulikkalinjaan oli saatavilla runsaasti osia suoraan kilpa-autoihin osia myyviltä liikkeiltä.

Jarrulevyjä taas ei ole juurikaan saatavilla valmiina osto-osana johtuen vanteen pienestä koosta. Esimerkiksi karting autoihin suunnitellut jarrulevyt olisivat kooltaan sopivat, mutta merkittävästi liian painavia. Näin ollen jarrulevyt päätettiin suunnitella itse ja valmistuttaa alihankkijalla.

Koska jarrujärjestelmältä haluttiin helppoa säädettävyyttä, halusimme kehittää kokonaan uuden tavan säätää jarrutasapainoa, tavan, jota ei olisi aiemmin ollut käytössä Formula SAE -autoissa. Aiemmin käytetty tapa säätää jarrutasapainoa oli periaatteessa hyvä, mutta mahdollisti säätämisen ainoastaan varikolla, ei auton liikkuessa.

Poljinasetelman tavoitteeksi asetettiin liikuteltavuus ja erittäin yksinkertainen rakenne. Tämä ratkaisu pakotti keksimään esimerkiksi pääsylintereille kokonaan uudenlaisen kiinnityspaikan.

6.1 Jarrusatuloiden valinta

Sen jälkeen, kun tiedossa oli jarrusatuloiden käyttösylinterien määrä/satula ja halkaisija sekä pääsylintereiden halkaisija, etsittiin Internetistä sopivia ehdokkaita. Taulukkoon 5 on koottu tietoja eri jarrusatuloiden malleista, jotka kaikki rakenteensa puolesta sopivat uuteen HPF008-autoon. Kriteerit ovat asetettu omien näkemystemme mukaisesti. Hinnat satuloille ovat ulkomaisten jälleenmyyjien verkkokauppojen hintoja.

Taulukko 5. Eri jarrusatula vaihtoehtoja etupyörille

Valmistaja	Hinta, €/kpl	Paino, g	Edustaja Suomessa
Etusatulat			
Alcon	430	860	kyllä
Willwood	180	1100	ei
ISR	256	850	ei
Brembo	930	750	kyllä
Outlaw	247	680	ei
AP-Racing	630	750	kyllä
StopTech	330	890	ei
Tokico	345	1200	kyllä

Kuten taulukosta käy ilmi, satuloiden hinnoissa oli suuria eroja. Myös painoissa oli huomattavia eroja, mutta suoraa korrelaatiota hinnan ja painon välille ei ollut nähtävissä. Näistä vaihtoehtoista valitsimme ruotsalaisen valmistaja ISR:n satulat. ISR:n tuotteita oli käytetty jo aiemminkin tiimin autoissa ja tuotteet olivat pääasiassa toimineet hienosti. Lisäksi merkittävää oli heidän antamansa alennus korkeakouluille. ISR antoi käyttöömmme lisäksi 3D-mallin, joten suunnittelu helpottui huomattavasti. Valinta etusatuloiden osalta oli siis selvä.



Kuva 21. ISR:n valmistama etusatula /15/

Sopivia takasatuloita oli saatavissa hieman etusatuloita vaikeammin. Koska takasatuloiden männän halkaisijan tuli olla 32 mm, löysimme vain kourallisen painoltaan ja hinnaltaan sopivia vaihtoehtoja. Nämä vaihtoehdot on lueteltu taulukossa 6.

Taulukko 6. Eri jarrusatula vaihtoehtoja takapyörille

Valmistaja	Hinta, €/kpl	Paino, g	Edustaja Suomessa
Takasatulat			
Brembo	121	510	kyllä
ISR	220	470	ei
Wilwood	150	560	ei
AP-Racing	380	460	kyllä

Painoerojen jäädessä huomattavan pieneksi päätimme valita Brembon valmistaman tuotteen. Se oli samalla 50 grammaa kevyempi kuin edellisen vuosimallin kilpa-autossa.



Kuva 22. Brembon valmistama kaksimäntäinen takasatula /14/

Tästä Brembon valmistamasta satulasta oli myös saatavilla tarkka työpiirustus, joten siitä oli helppo luoda 3D-malli suunnittelun tueksi.

6.2 Pääsylinterien valinta

Pääsylinterien valintaan vaikutti eniten poljinasetelman suunnittelu. Poljinasetelma päätettiin toteuttaa niin, että pääsylinterit tulisivat asettumaan kuljettajan jalkojen alapuolelle ja ne olisivat toimintaperiaatteeltaan vedettävät. Poljinasetelmasta lisää myöhemmin.

Hyviä, sopivan kokoisella männällä varustettuja pääsylintereitä, jotka toimivat veto-periaatteella oli tarjolla vain kahdelta valmistajalta, AP-Racingilta ja Tiltonilta. Näistä päädyttiin valitsemaan AP-Racingin valmistama pääsylinteri, heillä oli maahantuojia, Autoracing Helsingissä. Lisäksi AP-Racing pääsylinterit olivat huippukevyet, massaltaan ainoastaan 230 g/kpl. Hintataso tosin oli kova, 430€/kpl. Vastaavilla ominaisuuksilla varustettuja tuotteita emme löytäneet, joten hinta oli hyväksyttävä. Tuotteet tilattiinkin Autoracingilta, ja ne saapuivat kolmessa viikossa. Myös pääsylintereistä oli saatavilla tekninen piirustus, joten niistä pystyttiin

luomaan 3D-malli poljinasetelman suunnittelun tueksi. Kuvassa 23 on AP-Racingin vedettävä pääsylinteri.



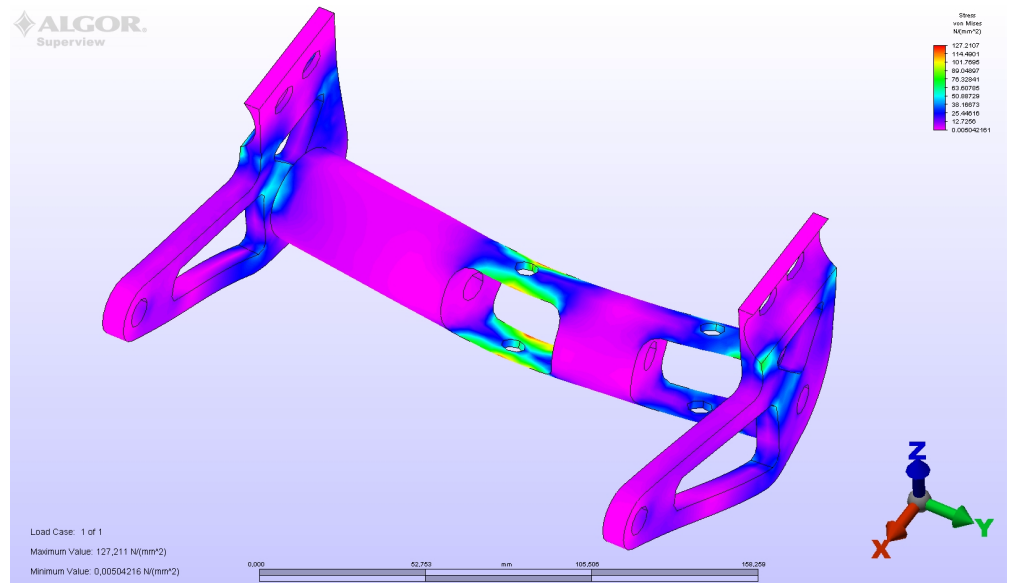
Kuva 23. AP-Racing pääsylinteri /13/

6.3 Poljinasetelman suunnittelu

Aiemmin päätetty tavoite saada kaikki paino lähemmäs auton massakeskipistettä asetti poljinasetelman suunnitteluun lisähaasteita: se on yksittäisistä osakokonaisuuksista yksi kauimpana massakeskipisteestä sijaitseva. Tällä perusteella päätettiin hylätä aikaisemmin käytetyt, kuljettajien jalkojen eteen sijoitetut työntämisperusteella toimivat pääsylinterit. Jotta poljinasetelma säilyisi kevyenä ja pystyttiin välttymään monimutkaisilta linkkutoimisilta työnnettäviltä pääsylintereiltä, vedettävät pääsylinterit olivat ainoa ratkaisu ongelmaan.

Koko poljinasetelman oli lisäksi oltava säädettävissä erimittaisille kuljettajille, jotta jokainen pystyisi täysipainoisesti ajamaan autoa. Asetelmasta päätettiin tehdä sellainen, että pääsylinterit olisivat molemmin puolin kuljettajan vasenta jalkaa ja ne olisi yhdistettynä jarrupolkimeen sijoitettuun, jarrutasapainon säätämiseen käytettävään kierretankoon (balance bar).

Pääsylintereiden kiinnityskohdan on oltava tukeva, jotta missään tilanteessa jarrutustehoa ei olisi vaara menettää. Kuvassa 24 on lujuuslaskentamalli pääsylinterin kiinnityspisteestä.

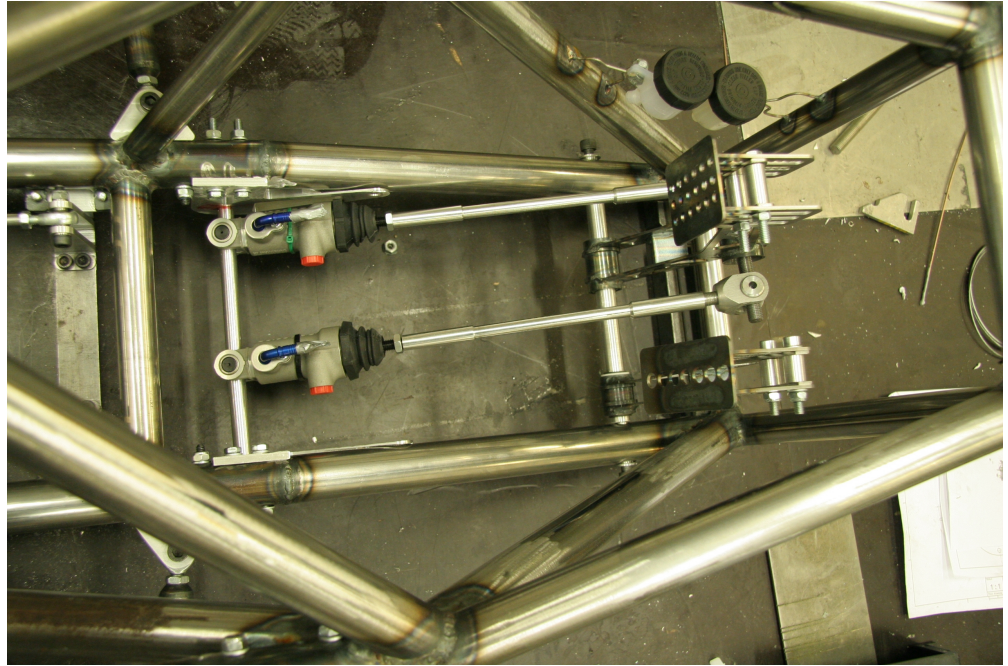


Kuva 24. Pääsylinterien kiinnityspisteen lujuuslaskentamalli

Tässä mallissa on simuloitu tilannetta, jossa kuljettaja painaa hätätilanteessa paniikinomaisesti jarrupoljinta 150 kilon massalla. 150 kilon arvioitiin olevan suurin massa, jonka kuljettaja voisi hetkellisesti polkaista. Tästä voidaan laskea voima, jolla pääsylinterit vetävät tankoa, koska tunnetaan polkimen vipusuhde. Kaavassa 1 lasketaan voima, jolla yksi pääsylinteri vetää tankoa.

$$F_{\text{pääsylinteri}} = \frac{F_{\text{jalka}}}{s} : 2 \quad (1)$$

Kaavassa s on polkimen vipusuhde ja F_{jalka} kuljettajan jalalta tuleva voima. Käyttämällä vipusuhteena arvoa 0,5 – pääsylinterit kiinnitetty polkimeen laakeroinnin ja jalan kontaktipisteen puoleen väliin – saatiin yhden pääsylinterin vetovoimaksi 1471 N. Tämä voima sijoitettiin molempien pääsylinterien kiinnityspisteeseen. Pääsylinterien kiinnityskohtien liike oli estetty x-, y- ja z-akselien suhteen neljästä kohdasta. Suurin jännitys kohdistui kokeessa keskimmäisen pääsylinterin kiinnityskohtaan, jännityksen ollessa 127 N/mm^2 . Tätä verrattaessa materiaalin myötörajaan, oltiin turvallisella alueella. Koska kyseessä oli turvallisuuteen liittyvä osa, hyväksyttiin myötörajaan verrattaessa korkea varmuuskerroin 4,1. Liitteessä 3 on kuvattuna alumiinisten polkimien kiinnitysosien työpiirustukset.



Kuva 25. Valmis poljinasetelma

Kuvassa 25 on lähes valmis poljinasetelma, josta näkyy myös, miten polkimien pituussuuntainen säädettävyys erimittaisille kuljettajille on toteutettu. Polkimet sijaitsevat omalla akselillaan ja tätä akselia pystytään liikuttamaan rungossa 50 mm. Lisäksi polkimien lappujen paikkaa pystytään säätämään. Kun polkimien paikkaa rungossa muutetaan, muutetaan samalla pääsylintereiden ja jarrupolkimen välissä olevan kierretangon mitta. Kuvasta 25 puuttuu komposiittimateriaalista valmistettu lattia, joka suojaa jalkoja osumasta pääsylintereihin. Lattiassa on myös kantapäille paikat, joten jalat eivät päässeet heilumaan.

6.4 Säädettävä jarrutasapaino

HPF008-autoon haluttiin toteuttaa auton CAN-väylää hyväkseen käyttävä, sähköinen jarrutasapainon säätö. Tätä säätöä käyttämällä kuljettaja pystyisi kesken ajon säätämään jarrutasapainon haluamakseen ja ajotyylilleen sopivaksi. Myös radan kitkakertoimen muuttuessa esimerkiksi sateen sattuessa jarrutasapainon pystyisi muuttamaan oikeaksi.

Säädettävä jarrutasapaino on yleensä toteutettu balance barilla, joka toimii siten, että kahden pääsylinterin välissä on kierretanko, jossa on kuulalaakeri. Tämän kuulalaakerin paikkaa siirtämällä polkimessa, lähemmäs etu- tai takahydraulipiirin pääsylinteriä, voidaan jarrutasapainoa muuttaa. Se pääsylinteri, joka on lähempänä kuulaa, alkaa toimimaan ensin. /8/

Eri vaihtoehtoja säädettävän tasapainon tarvitsemiksi komponenteiksi alettiin tutkia. Parhaaksi ideaksi todettiin käyttää säätämiseen sähköistä, pientä askelmoottoria. Tällaisella askelmoottorilla on hyvänä puolena se, että sillä on niin sanottu pitomomentti, eli auton tärinä ei pääsisi kiertämään balance baria itsekseen.

Askelmoottorit, jotka tuottivat riittävän vääntömomentin, olivat kovin painavia ja kalliita. Niinpä ratkaisua etsittiin muualta. Hewlett Packardin valmistamassa mustesuihkutulostimesta löysimme ensimmäisen askelmoottorimme, joka oli kooltaan sopiva. Kehitystyö päätettiin aloittaa tällä moottorilla.

Auton runkoon hitsattiin kiinnike askelmoottorille ja sen ulostuloakseliin kiinnitettiin vaijeri, joka kytkettiin balance bariin. Ensimmäisessä kokeilussa käytetty polkupyörän vaijeri osoittautui kuitenkin liian heppoiseksi eikä balance bar pyörinyt lainkaan, ainoastaan vaijeri kiertyi itsensä ympärille. Toiseen kokeeseen vaihdettiin tukevampi vaijeri. Tämä vaijeri pyörittikin jo balance baria, mutta takkuillen. Syyksi paljastui käytössä hieman vaurioitunut balance barin kierreosa. Kierteen korjaamisen ja öljyämisen jälkeen olimme valmiina uuteen yritykseen. Tällä kertaa kaikki toimi hyvin, ja moottori liikutti balance baria suunnitellusti. Moottorin todettiin kuitenkin olevan alimitoitettu, sillä jalkaa ei voinut pitää jarrupolkimella samaan aikaan kun säätöä tehtiin. Kitka balance barin ja polkimen välillä kasvoi liian suureksi. Koska halusimme pitää mahdollisimman kevyen askelmoottorin, annoimme kuljettajille ohjeen nostaa jalka jarrupolkimelta, kun he haluavat muuttaa jarrutasapainoa ajon aikana.

Tasapainon säätö vaati kuitenkin vielä huomattavaa kehitystä. Koska emme halunneet, että balance baria voi pyörittää loputtomasti suuntaan tai toiseen, tarvittiin akselille paikoitustunnistin. Tämän avulla tiedettäisiin aina, missä kohtaa jarrutasapaino teoreettisesti on. Auton rattiin oli vielä tarkoitus tehdä digitaalinen näyttö, josta kuljettaja tietäisi aina, missä kohtaa balanssi milloinkin on. Tämä jäi kuitenkin ajan puutteen vuoksi tekemättä.



Kuva 26. HPF008:n ratti jossa painikkeet (F ja R) jarrutasapainon säädölle

7 TESTI- JA KILPALIKAUSI 2008

Testikausi päästiin aloittamaan suunnitelman mukaan tammikuussa 2008. Paikkana oli sisärata VM-Karting Center Vantaalla. Tämä rata oli jo vuosien ajan toiminut tiimin testiratana talviaikaan kun maassa oli vielä lunta. Alussa tiimillä oli vaikeuksia saada renkaiden lämpötila halutulle tasolle ja kaiken kaikkiaan uusi HPF008-auto tuntui melko liukkaalta. Eri rengasmerkkien välillä oli suuri ero siinä, miten ne tämän sisäradan liukkaalla asfaltilla käyttäytyivät. Suuremmilta ongelmilta vältyttiin, ja auto toimi.

Heti alussa oli kuitenkin selvää, että aikaisempina vuosina kiusannut auton aliohjaaminen ei ollut kadonnut tehdyistä muutoksista huolimatta. Tähän paneuduttiin tarkemmin ensimmäisissä ulkoratatesteissä.

Testien aikana keskityttiin erityisesti luotettavuuden parantamiseen, olihan ensimmäiseen kilpailuun aikaa ainoastaan kolme kuukautta. Luotettavuus paranikin testien edetessä.

Jarruissa havaittiin ensimmäiset ongelmat toisissa sisällä ajetuissa testeissä. Jarrupalojen kulutus oli voimakasta. Tähän epäiltiin syyksi väärin toteutettua sisäänajoa. Syy paljastuikin juuri huonoksi sisäänajoksi, koska myöhemmin keväällä ajetuissa testeissä ongelmaa ei enää esiintynyt. Jarruissa oli myös melko paljon pieniä vuotoja ensimmäisissä testeissä. Tähän syy löytyi menetelmästä, jolla hydraulilinjat olimme tehneet. Korjattuamme tämän vian jarrut toimivat suunnitellusti loppukevään.

Ennen ensimmäistä kilpailua tiimi matkusti kilpailupaikan lähelle ja vietti viikon testaten autoa ja parantamalla sen luotettavuutta edelleen. Testipaikalla pääsimme tutustumaan ensikertaa todella lämpimiin olosuhteisiin, kun ilman lämpötila lähenteli 30 celsiusastetta. Auton käyttö tuntui paranevan, kun ilman lämpötila nousi ja renkaat saatiin paremmin oikeaan käyttölämpötilaansa.

Helsingin Ammattikorkeakoulu Stadian Formula SAE -tiimin kilpailukausi alkoi toukokuussa Yhdysvalloissa, Michiganissa. Michigan International Speedway oli paikkana kilpailulle ja tarjosi mahtavat puitteet kilpailulle. Mukaan olivat ilmoittautuneet kaikki huipputiimit ympäri maailmaa. Osallistujia tässä Formula SAE 2009 -kilpailussa oli yhteensä 120.

Kilpailu alkoi Stadian tiimiltä hyvin, joukkue oli ensimmäistä kertaa historiansa aikana kaikkien osallistujien joukosta suunnittelukilpailun eli Design-osion finaalissa kolmen muun joukkueen kanssa! Menestyminen kustannusanalyysissä oli myös iloinen uutinen, tuloksena 83 pistettä sadasta. Business Plan Presentation ei mennyt odotusten mukaisesti, tuloksena vaatimattomat 51,5 pistettä 75 mahdollisesta.

Seuraavana oli vuorossa kilpailun dynaamiset osiot, joihin tiimi lähti luottavaisin mielin, auto oli osoittanut kilpailukykyisyytensä jo testeissä. Kolea ja kostea keli kuitenkin yllätti tiimin, ja tulokset kiihdytyksessä ja kahdeksikkoajossa jäivät keskinkertaisiksi. Paljon jäi siis parannettavaa mentäessä kohti autocross-osiota ja kestävyysajoa.

Autocross-osio meni tiimiltä kohtuullisesti, sijoitus 15. Ongelmana tässä osiossa oli jälleen renkaiden lämpeäminen, vaikkakin aurinko oli jo hieman lämmittänyt rataa.

Ennen viimeistä osiota eli kestävyysajoa tiimin odotukset olivat korkealla. Lähdimme viimeiseen osioon kokonaiskilpailun viidenneltä sijalta ja tavoite oli nousta kolmen parhaan joukkoon.

Kestävyysajossa kuitenkin koko kevään ajan tehty työ valui hukkaan. Jo kestävyysajon kolmannella kierroksella tuomaristo liputti tiimin kuljettajan tekniseen tarkastukseen varikolle. Syy: kuljettajan pään asento sääntöjen vastainen. Samat kilpailutuomarit olivat vain kahta päivää aiemmin todenneet HPF008-kilpurin katsastuksessa sääntöjen mukaiseksi. Vaikka tiimin jäsenet protestoivat hylkäyspäätöstä voimakkaasti, ei mitään enää ollut tehtävissä. Kauden päätavoitteeksi asetetussa kilpailussa epäonnistuttiin. Kuukausia myöhemmin kilpailun järjestäjät totesivat tehneensä virheen ja pyysivät anteeksi. Se ei kuitenkaan enää lohduttanut. Kokonaiskilpailun sijoitukseksi jäi 29.

8 SUUNNITTELUN TULOKSET JA PARANNUSKOHTEET

HPF008-autolle asetetut päätavoitteet onnistuttiin täyttämään. Tavoitteena oli suunnitella ja rakentaa kilpa-auto, joka painaisi alle 200 kilogrammaa ajokuntoisena. Formula SAE -kilpailuissa Detroitissa auton painoksi mitattiin 199,8 kilogrammaa. Lisäksi auton ensimmäinen liikkuminen nähtiin tammikuun puolessa välissä, kuten oli tavoitteeksi asetettukin.

Painonsäästön osalta suunnittelussa onnistuttiin myös pyöräntuennan ja jarrujärjestelmän osalta. Tämä vaikutti osaltaan koko auton painotavoitteen täyttämiseen. Kokonaisuudessaan HPF008-auton pyöräntuenta oli 3,3 kg kevyempi verrattaessa vuoden 2007 kilpa-autoon. Pyörivä massa väheni 1,8 kg. Vastaavasti prosenttiyksiköinä laskettuna tämä tarkoittaa 8,5 ja 5,2 prosenttiyksikön kevennystä. Pyöräntuennan osista onnistuttiin myös suunnittelemaan sellaiset, että auton säätäminen radalla olisi mahdollisimman yksinkertaista. Asia tuli selvästi ilmi, kun valitut renkaat vaativat oletettua enemmän camber-kulmaa. Myös vaihdettavat kääntövarret etuolka-akseleissa toimivat helposti.

Jarrujärjestelmässä oli kauden alkuvaiheessa monia pieniä murheita hydraulikkalinjassa. Liian usein esiintyi nestevuotoja, jotka aina keskeyttivät testaustyön hetkeksi. Suunnitteluvaiheessa arvioitu painopisteen korkeus todettiin auton valmistuttua oletettua matalammaksi. Näin painonsiirron määrä jarrutustapahtuman aikana jäi oletettua pienemmäksi. Jarrutasapainon säädöllä asia oli kuitenkin korjattavissa ja pääsylinterien koon muuttamiselle ei ollut tarvetta. Jarrupalat kuluivat kauden aikana myös huomattavasti oletettua enemmän. Syynä saattaa olla liian avonaiset jarrulevyt, jotka reikien reunoista repivät jarrupalojen pintaa. Monesti todettiin palojen pinnan kadonneen kokonaan hyvin nopeassa ajassa ja epäiltiin myös valmistusvirhettä. Myös ajoittain huono sisäänajo saattoi olla syynä jarrupalojen kestoajan lyhyydelle.

Olka- ja napa-akseleille tehdyt lujuuslaskennat validoitiin radalla autoa testatessa. Olka-akselit kestivät koko kauden ilman ongelmia. Voitiin siis olla tyytyväisiä ja todeta lujuuslaskentojen onnistuneen. Toisaalta, kilpa-autossa osia voitaisiin vaihtaa useasti ja osien ei tarvitsisi kestää pitkään, mutta varmuus ja huollontarpeen vähyyys vapauttaa kallisarvoista aikaa auton varsinaiselle säätötyölle. Jatkoa ajatellen olka- ja napa-akselien

materiaaleja ja valmistusmetodeja kannattaa edelleen vertailla ja ennen kaikkea etsiä uusia yhteistyökumppaneita, joilla olisi mahdollisuus olla suunnittelun tukena ja apuna. Tärkeää olisi edelleen huomioida, ettei minkään osan tai kokoonpanon valmistus veisi kohtuuttomasti tiimin jäsenten aikaa. Tämä asettaa haasteita tiimin johdolle, jonka tehtävä on hankkia uusia yhteistyökumppaneita yritysmaailmasta. Yritysmaailman edelleen vahvempi osallistuminen projektiin olisi siis erittäin suotavaa.

Jatkossa kilpa-auton suunnittelu pitäisi aloittaa yhä aiemmin. Tällä tavoin turvattaisiin edelleen riittävä testijakso ennen ensimmäisiä kilpailuita. Paremmin tehty suunnitteluvaihe helpottaa auton valmistusprosessia ja viimehetken ratkaisuille ei ole tarvetta. Jokainen osa, joka autoon tullaan laittamaan olisi jo suunnitteluvaiheessa oltava myös 3D-mallissa.

Koska kyseessä on insinööritaidon kilpailu, olisi joka vuosi tuotava uusia ratkaisuita, joita muilla ei ole esittää. Metropolia Ammattikorkeakoulun joukkue on ollut mukana jo niin monena vuonna, että auton peruskonsepti on hyvä. Joukosta erottuakseen tiimin on oltava uskaliaampi: uusia ajatuksia ja ratkaisuja ei tulisi missään nimessä tuomita etukäteen vaan jokaisen tiimin jäsenen pitäisi saada vapaus toteuttaa omia ideoitaan. Tämä kuitenkin vääjäämättä johtaa siihen, että tiimin resursseja ja jäsenten määrää tulisi kasvattaa, jotta aika riittäisi myös hyvän tietopohjan luomiselle. Valmistuneiden tiimin jäsenten tekemät insinöörityöt ovatkin hyvä keino luoda uusille osallistujille kattava tietopohja. Ennen ensimmäistäkään viivan piirtoa tulisi pitää rennossa ilmapiirissä suunnittelu- ja ideointipalaveri, jossa jokainen saisi vapaasti heittää ajatuksiaan ilmoille. Ideavaiheessa kaikenlainen kritiikki olisi kielletty. Näitä ajatuksia ja ideoita jokainen voisi sitten viedä eteenpäin omat, ja koulumme resurssit huomioon ottaen.



Kuva 27. Valmis HPF008-auto

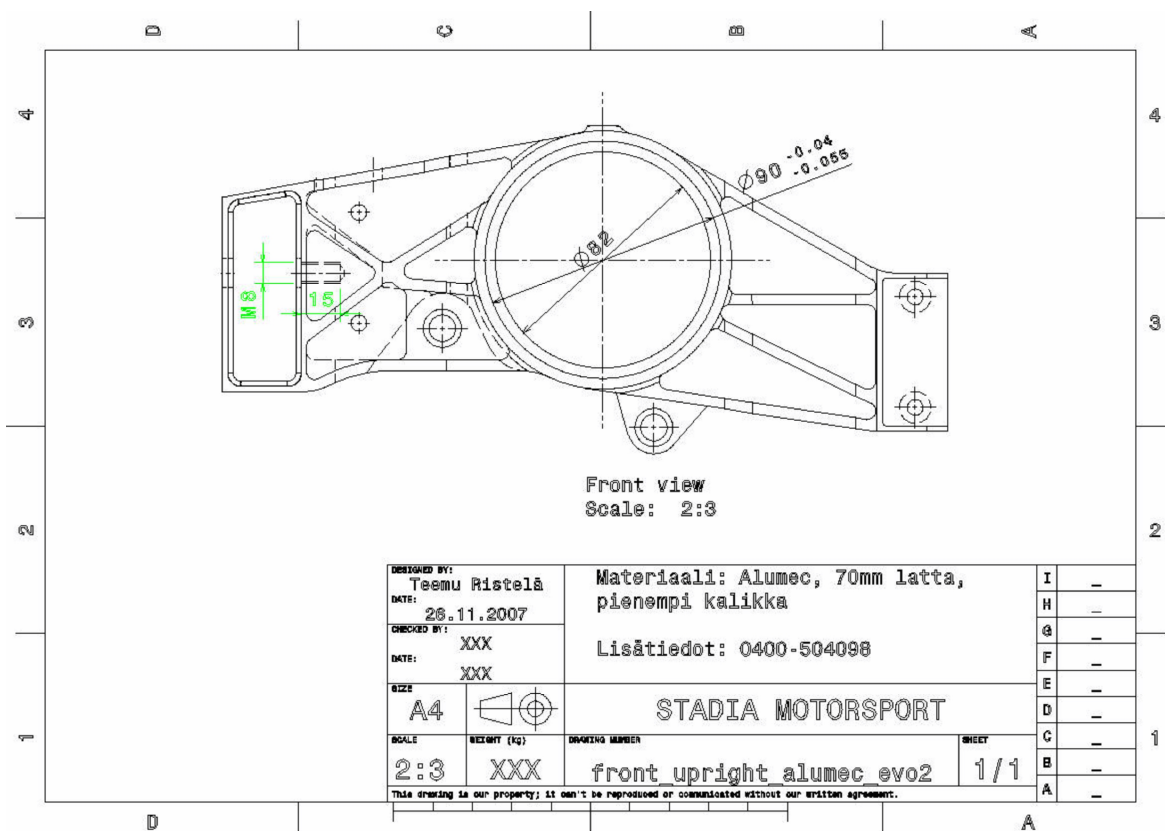
VIITELUETTELO

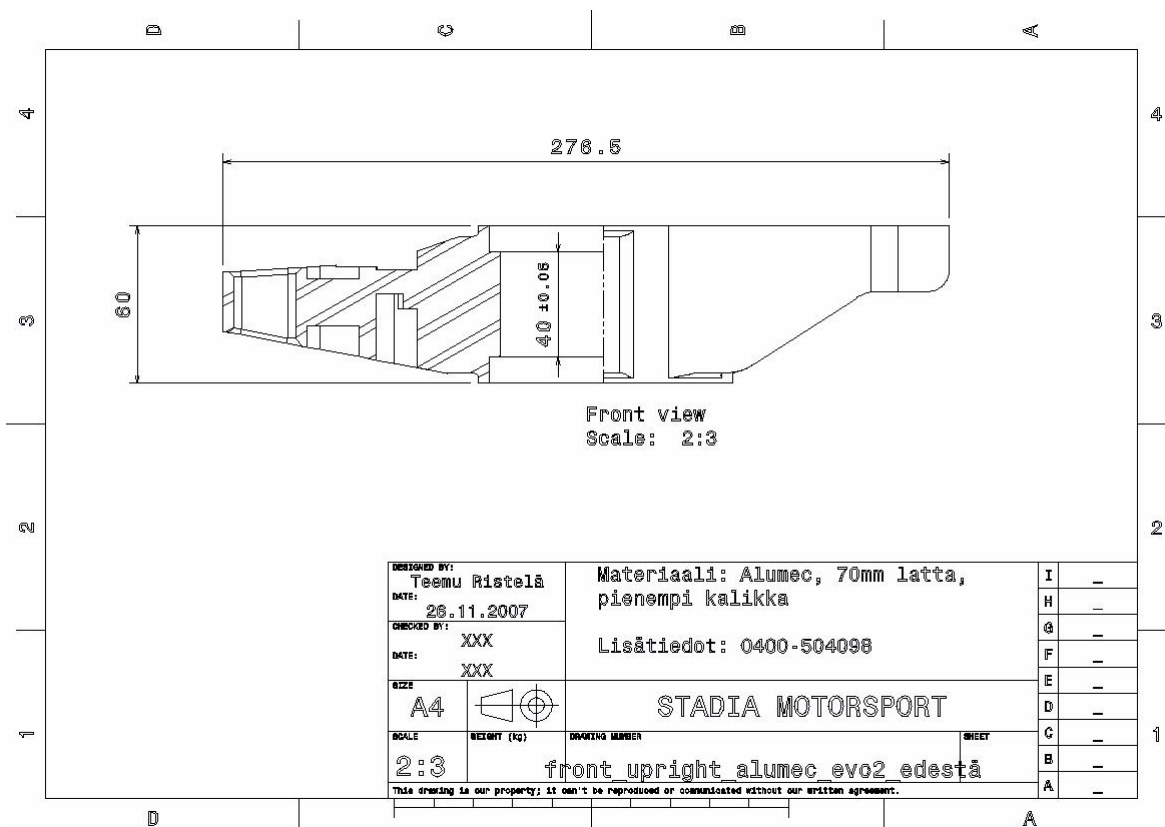
- [1] Society of Automotive Engineers, 2008 Formula SAE Rules. [verkkodokumentti] 2008. [viitattu 31.8.2008]. Saatavissa: <http://students.sae.org/competitions/formulaseries/rules/rules.pdf>
- [2] Kytö Petri, Alustarakenteet 2. Opetusmateriaali. Helsingin Ammattikorkeakoulu Stadia
- [3] Kytö Petri, Jarrut. Opetusmateriaali. Helsingin Ammattikorkeakoulu Stadia
- [4] Oy Uddeholm Ab, 2004. [verkkodokumentti] 1.11.2004. [viitattu 25.4.2009] Saatavissa: <http://www.uddeholm.fi/finnish/files/alumec.pdf>
- [5] Airila Mauri - Ekman Kalevi - Hautala Pekka - Kivioja Seppo - Kleimola Matti - Martikka Heikki - Miettinen Juha - Niemi Erkki - Ranta Aarno - Rinkinen Jari - Salonen Pekka - Verho Arto - Vilenius Matti - Välimaa Veikko. Koneenosien suunnittelu. WSOY, Helsinki, 2003.
- [6] Schaeffler Group, 2009 Bearing Design Principles: [verkkodokumentti] 2009. [viitattu 27.4.2009]. Saatavissa: http://medias.ina.de/medias/en!hp.tg;/b3XeG7nC890_
- [7] Bodycote Pintakäsittely Oy Finland, Menetelmät – Anodisointi. [verkkodokumentti] 2009. [viitattu 25.4.2009]. Saatavissa: <http://www.bodycote.fi/fi/mainframe/anodisointi.htm>
- [8] Performance friction brakes, Bias bar setup and technical notes. [Verkkodokumentti] 2003. [viitattu 26.4.2009]. Saatavissa: http://www.performancefriction.com/pages/Race_tech_pages/20020401_Bias.pdf
- [9] Jussi Hyvönen, Formula Student –kilpa-auton voimansiirto. Insinööriyö. Helsingin Ammattikorkeakoulu Stadia, Helsinki, 2005.
- [10] Timo Risku, Formula Student HPF006:n pyöräntuenta. Insinööriyö. Helsingin Ammattikorkeakoulu Stadia, Helsinki, 2006.
- [11] Ville Sandgren, HPF004-kilpa-auton jarrujärjestelmä. Insinööriyö. Helsingin Ammattikorkeakoulu Stadia, Helsinki, 2005.
- [12] Aimo Niemi, Formula Student – alusta ja jousitus. Insinööriyö. Helsingin Ammattikorkeakoulu Stadia, Helsinki, 2006.
- [13] AP Racing, 2009 Formula SAE/Student master cylinders: [verkkodokumentti] 2008. [viitattu 28.1.2009]. Saatavissa: http://www.apracing.com/info/index.asp?section=Formula+Student+%2F+SAE_986

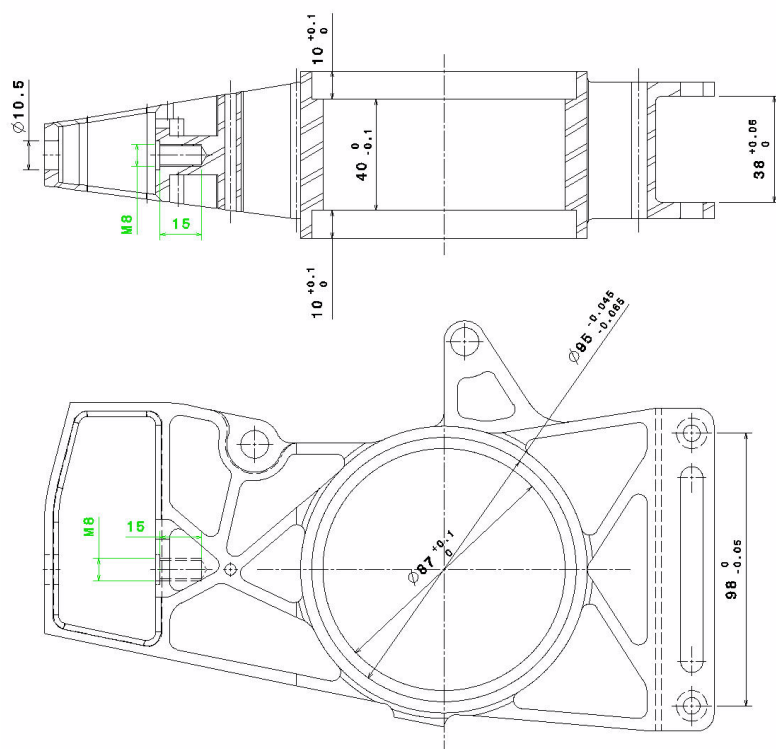
- [14] Yoyodyneti, 2009 32mm Caliper P2 32 Gold Rear Side inlet and Bleed – Brembo: [verkkodokumentti] 2009. [viitattu 27.4.2009]. Saatavissa: <http://www.yoyodyneti.com/ProductInfo.aspx?productid=20.6950.21>
- [15] ISR Brakes-Sweden, 2008 22-025 4 piston caliper: [verkkodokumentti] 2008. [viitattu 22.11.2008]. Saatavissa: <http://www.isr-brakes.se/images/products.asp?Prod=22-025-OK>

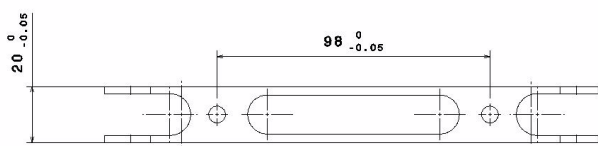
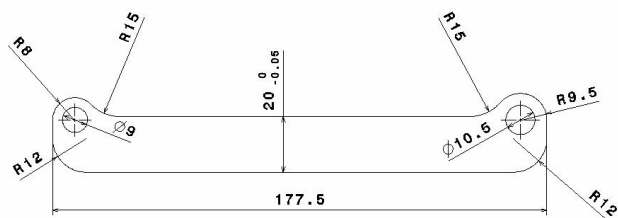
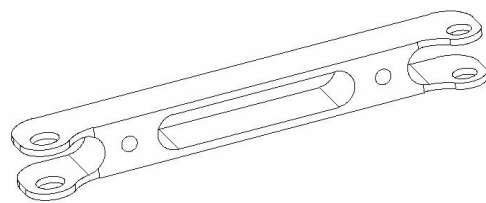
LIITELUETTELO

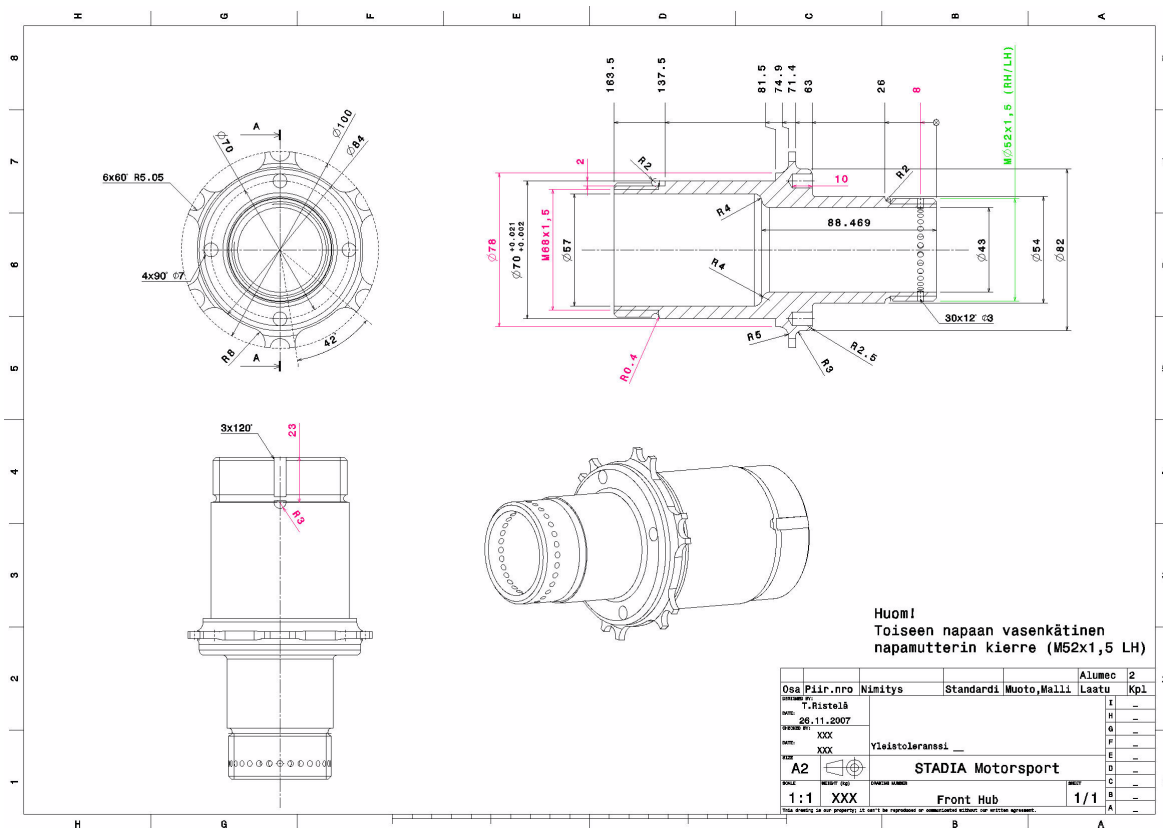
- LIITE 1: Olka-akseleista tehdyt työpiirrustukset valmistusta varten
- LIITE 2: Napa-akseleista tehdyt työpiirrustukset valmistusta varten
- LIITE 3: Pääsylinterien kiinnitysosien työpiirrustukset valmistusta varten











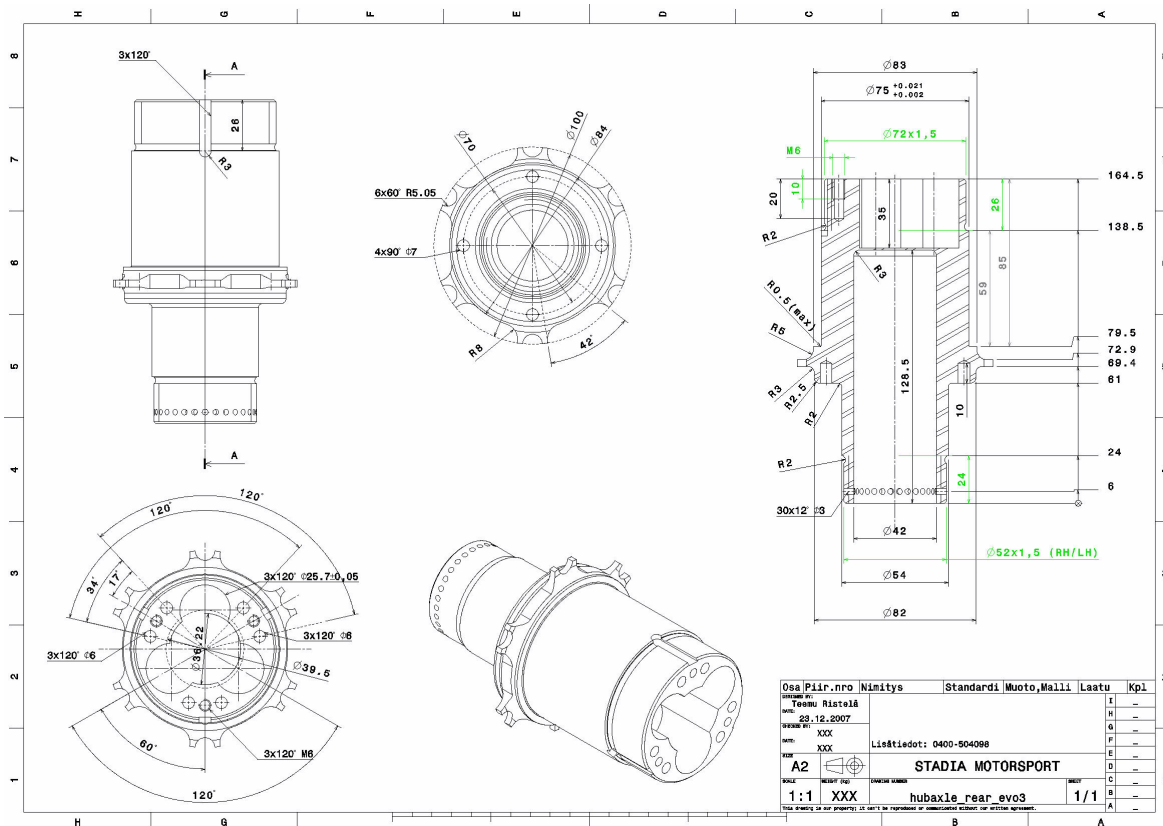
Huomi
Toiseen napaan vasenkätinen
napamutterin kierre (M52x1,5 LH)

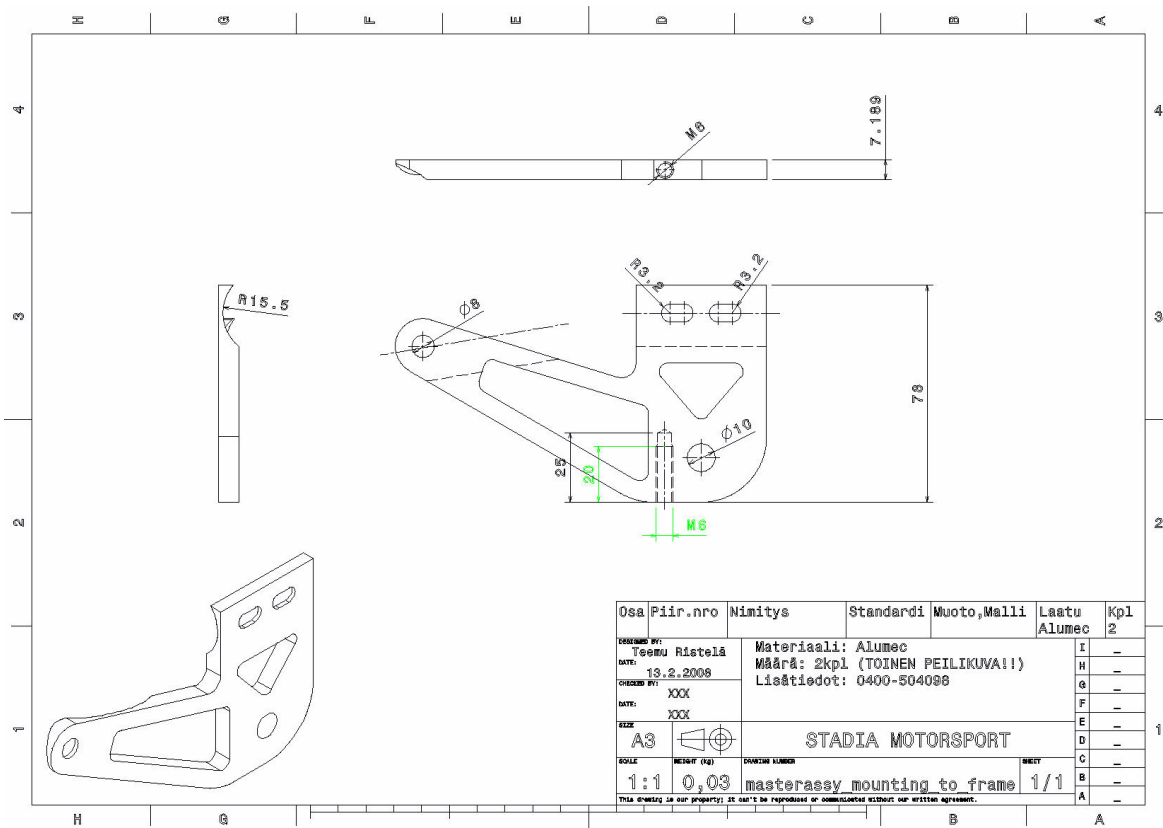
Osa	Piir.nro	Nimitys	Standardi	Muoto,Malli	Alumec	2
					Laatu	Kpl
TEKIJÄ	T.Ristelä				I	
PIIRIT	26.11.2007				H	
YHTEYSTIEDOT	XXX	Yleistoleranssi			F	
YHTEYSTIEDOT	XXX				E	
YHTEYSTIEDOT	A2				D	
YHTEYSTIEDOT	1:1	XXX	Front Hub		C	
YHTEYSTIEDOT					B	
YHTEYSTIEDOT					A	

STADIA Motorsport

Front Hub

1/1





Osa	Piir.nro	Nimitys	Standardi	Muoto,Malli	Leatu	Kpl
					Alumec	2
DESIGNED BY:	Teemu Ristelä	Materiaali: Alumec			I	-
DATE:	13.2.2008	Määrä: 2kpl (TOINEN PEILIKUVA!!)			H	-
CHECKED BY:	XXX	Lisätiedot: 0400-504098			G	-
DATE:	XXX				F	-
SIZE:	A3				E	-
SCALE:	1:1	0,03			D	-
		masterassy mounting to frame			C	-
					B	-
					A	-

STADIA MOTORSPORT
 1:1 0,03 masterassy mounting to frame 1/1

THIS DRAWING IS OUR PROPERTY; IT CAN'T BE REPRODUCED OR COMMUNICATED WITHOUT OUR WRITTEN AGREEMENT.