

Juho Jalava-Kanervio

HPF014-kilpa-auton olka-akseli

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Auto- ja kuljetustekniikan koulutusohjelma

Insinöörityö

5.2.2015

Tekijä Otsikko	Juho Jalava-Kanervio HPF014-kilpa-auton olka-akseli
Sivumäärä Aika	43 sivua + 2 liitettä 5.2.2015
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Auto- ja kuljetustekniikan koulutusohjelma
Suuntautumisvaihtoehto	Tuotetekniikan suuntautumisvaihtoehto
Ohjaaja	Pasi Oikarinen, erikoisopettaja
<p>Insinööriyö toteutettiin osana Metropolia Motorsport ry:n Formula Student -projektia, ja sen tarkoituksena oli suunnitella ja valmistaa Formula Student -auton olka-akselit. Suunnittelu sisälsi mallinnuksen, voimien arvioinnin sekä tietokoneavusteisen lujuuslaskennan. Olka-akselin suunnittelussa otettiin huomioon kokonaisuus jonka osa olka-akseli on. Valmistus sisälsi olka-akselin koneistuksen ja koneistusvälineistön käytön opetteluun.</p> <p>Suunnittelun lähtökohdaksi otettiin jousitusgeometria sekä joitakin komponentteja. Vanne-koon muuttaminen 13-tuumaisesta 10-tuumaiseen oli suurin haasteiden lisääjä suunnittelussa. Olka-akselin mallinnukseen vaikutti koko auton suunnitteluprosessin eteneminen. Autossa ja jousituksen kokonaisuudessa tapahtui muutoksia, jotka piti johtaa olka-akselin mallinnukseen. Kaikkia jousitusgeometrian muutoksia ei voitu tyydyttävästi toteuttaa olka-akselin mallinnuksessa, jolloin geometriaan tehtiin muutoksia. Lujuuslaskennalla varmistettiin kappaleen kestävyys sekä selvitettiin kappaleen jäykkyyttä.</p> <p>Valmistusmenetelmänä käytettiin koneistusta ja tämä otettiin huomioon jo suunnitteluvaiheessa. Suunniteltu osa oli valmistuskelpoinen ja lopullisena tuotteena syntyi toimiva osa.</p> <p>Olka-akselia ei päästy testaamaan käytännössä, koska HPF014-kilpa-auton sähköjärjestelmiä ei saatu toimimaan kunnolla. Lopullinen koeponnistus jäi siten tekemättä.</p>	
Avainsanat	Pyöräntuenta, olka-akseli, Formula Student

Author Title	Juho Jalava-Kanervio HPF014 Race Car Steering Knuckle
Number of Pages Date	43 pages + 2 appendices 5 February 2015
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Automotive Engineering
Specialisation option	Automotive Design Engineering
Instructor	Pasi Oikarinen, Lecturer
<p>The purpose of this thesis was to design and produce front suspension uprights for a Formula Student car. Designing of upright was separated into modeling and load evaluation and structural analysis. During the whole design process it was kept in mind that the part could be manufactured with basic abilities.</p> <p>The thesis was carried out as a part of Metropolia Motorsport's Formula Student project. As a part of such a project it was crucial that the design was completed in 3 months. The estimated manufacturing time was one month including the learning process for the new equipment.</p> <p>The basis of the design was the suspension geometry and some preselected components. The previous cars were designed on 13- inch diameter wheels and the new wheel size was 10 inches. The smaller wheel offered a lot less space for all the suspension components. However, the biggest design challenge was the whole design process of the car. Some alterations in the suspension geometry were so severe that the upright needed a complete redesign. If a suspension geometry was not achievable on a satisfactory level, then the geometry could also be adjusted. The purpose of the structural analysis was to ensure the strength and to investigate the stiffness of the component.</p> <p>Machining was chosen as the method of manufacturing. A part of this thesis was also to learn to use a new machining program and machinery. Machining as manufacturing method was taken into account during the whole design process.</p> <p>The uprights were completed in satisfactory time. However, the car was never finished completely and it was never raced.</p>	
Keywords	Wheel support, spindle, suspension upright, steering knuckle, Formula Student

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Olka-akselin suunnittelu	3
2.1	Olka-akseli osana kokonaisuutta	3
2.1.1	Pyöränlaakerit	5
2.1.2	Jarrut	6
2.1.3	Pallonivelet	7
2.1.4	Pyörännavan tiiviste	9
2.1.5	Pyörintänopeusanturi	10
2.1.6	Vanne	10
2.1.7	Pyörännapa	12
2.1.8	Kääntövarsi	13
2.1.9	Tukivarret	13
2.2	Jousitusgeometria	14
2.2.1	Caster-kulma, jättö ja kääntövarsi	17
2.2.2	KPI ja A-mitta	18
2.2.3	Ohjausgeometria	19
2.3	3D-mallinnus	20
2.4	Lujuuslaskenta	24
2.5	Koneistus	32
3	Pohdintaa	37
3.1	Pohdintaa mallinnuksesta	37
3.2	Pohdintaa lujuuslaskennasta	38
3.3	Pohdintaa koneistuksesta	40
3.4	Olka-akselin toiminta käytössä	41
	Lähteet	42
	Liitteet	
	Liite 1. Työkuvat	
	Liite 2. Lujuuslaskentakuvat	

Lyhenteet

FS Formula Student

FEM Finite Element Method, tietokoneavusteinen lujuuslaskentatapa

SAE Society of Automotive Engineers

KPI Kingpin Inclination, olkatappilinjan takakallistuma

AM Additive Manufacturing

1 Johdanto

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on esitellä ja selostaa Metropolia Ammattikorkeakoulun HPF014 Formula Student -auton olka-akselien suunnittelu ja valmistusprosessia. Formula Student -kilpasarja on kansainvälinen korkeakoulujen välinen kilpa-autosarja. Sarjan ideana on, että opiskelijat suunnittelevat ja valmistavat uuden kilpa-auton joka vuosi. Kilpailumenestys riippuu sekä ajosuoritteista että insinööriyön laadusta.

Olka-akselin suunnittelun lähtökohdiksi otettiin formulaa varten suunniteltu jousitusgeometria sellaisenaan eikä tässä opinnäytetyössä keskitytä ajodynamiikkaan tai jousitusgeometriaan kuin niiltä osin kuin se on välttämätöntä olka-akselin toteutuksen kannalta. Olka-akselin suunnitteleprosessin aikana kilpa-auton jousitusgeometria kuitenkin muuttui muista syistä ja geometrian muutokset aiheuttivat lisämuutoksia olka-akseliin.

Henkilökohtaiset lähtökohdati tämäntyyppiseen työhön olivat omasta mielestäni kohtuulliset. Koin, että minulla oli keskimääräistä insinööriopiskelijaa paremmat mallinnustaidot sekä aikaisempi kokemus vastaavantyyppisten osien suunnittelusta. Valmistusteknisesti ehdoton haaste oli koneistustaitojen puute. Sorvaaminen oli lastuavan työstön osalta tuttua, mutta tietokoneohjattu jyrsintä ei. Tarkoitus oli, että valmistuksen osat itse, mutta jotta osat saataisiin tehtyä, tulisi siis ensin opetella käyttämään koneistuskeskusta ja siihen liittyvää ohjelmistoa.

Formula Student -auton suunnittelu ja toteutus on ryhmätyönä toteutettavaa opiskelijoiden vapaaehtoista projektitoimintaa. Projektin tavoitteena on toteuttaa kokonainen kilpa-auto vuosittain. Suunnitteluprosessiin tulee tosinaan laajojakin muutoksia, ja jo valmiiksi katsotut asiat joudutaan miettimään kokonaan uudelleen. Tällaisista muutoksista johtuen olka-akselin suunnitteluun kului runsaasti aikaa. Formula Student -projektille on luonteenomaista, että työskentely tapahtuu hyvin itsenäisesti ja että koeponnistus tapahtuu viime kädessä vasta kilparadalla. Pelkän suunnitteluprosessin kestoksi arvioitiin noin kolme kuukautta, painotuksen ollessa sellainen, että aikataulussa pysyminen olisi tärkeämpää kuin esimerkiksi keveys. Itse asiassa aikataulussa pysyminen oli kaikkein tärkein seikka, jonka eteen hyväksyttiin runsaasti kompromisseja.

Olka-akselin suunnittelussa on koko ajan otettava huomioon, että olka-akseli on osa kokonaisuutta. Olka-akseli on osa auton jousitusta ja siihen kiinnittyy erinäisiä osia, kuten

pyörän navat ja tukivarret. Olka-akseli ei seiso staattisesti paikoillaan, vaan se liikkuu nivelten varassa, kun auto on liikkeessä. Liikevaroja pitää siis olla riittävästi. Olka-akseliin kohdistuu ajon aikana voimia, jotka sen tulee kestää olematta liian painava. Osan tulee olla kevyt, mutta jäykkyydestä olisi hyötyä. Suunnittelussa tulee myös ottaa huomioon valittu valmistustekniikka sekä valmistuksen edullisuus. Koska osa oli tarkoitus valmistaa itse, piti huolehtia siitä, ettei valmistus vaatisi erityisosaamista vaan onnistuisi perustaidoin. Henkilökohtaisesti minulle oli tärkeää, että osasta tulisi mahdollisimman yksinkertainen, vaikka kyse onkin makuasiasta. Mielestäni monimutkaisuus itsessään ei tuo lisäarvoa, paremminkin päinvastoin.

Tässä opinnäytetyössä ei esitetä kaikkia olka-akselin kehitysversioita, vaan esitellään lähinnä vain kokonaisuus, johon päädyttiin. Joistakin kehitysversioista mainitaan erikseen, jos on koettu, että niistä olisi apua vastaavien osien suunnittelijoille. Havainnollistavia kuvia käytetään runsaasti sanallisen selityksen tukena. Työssä esitellään jonkin verran edellisinä vuosina valmistuneiden autojen ratkaisuja ja muutoksia niihin. Opinnäytetyössä suhtaudutaan kriittisesti siinä tehtyihin ratkaisuihin ja esitetään niihin parannusehdotuksia. Opinnäytetyö on tyypiltään työselostus ja siinä pyritään pilkkomaan olka-akselin suunnittelu- ja valmistusprosessin havainnollisiin palasiin, jotta saataisiin mahdollisimman hyvä kuva siitä, miksi tehtiin niin kuin tehtiin.

Työselosteen osiot on pyritty jaottelemaan joko prosessin vaiheen tai ongelman pohjalta. Ensimmäisessä ja toisessa luvussa esitetään olka-akseli osana kokonaisuutta ja kerrotaan, miten jousitusgeometria on vaikuttanut tämän osan suunnitteluun. Jousitusgeometrian yhteydessä käydään läpi joitakin peruskäsitteitä ja niihin liittyviä työssä ilmenneitä haasteita. Luvussa 2.1 käydään erikseen läpi suurin osa olka-akseliin kiinnittyvistä osista siten, että selostetaan, miksi ne on valittu ja mikä niiden vaikutus on suunnitellun osan kannalta. Valitut komponentit ja jousitusgeometria ovat toimineet ikään kuin kehyksenä olka-akselin muotoilulle.

Kolmas luku on selostus 3D-mallinnuksesta. Siinä on pyritty selostamaan mallinnusprosessin havainnollisesti ja seikkaperäisesti siten, että siitä selväisi mahdollisimman hyvin, miksi juuri tähän rakenteeseen on päädytty. Esityksessä yritetään antaa yleiskuva siitä, miten mallinnus tehtiin kuitenkin menemättä liian pieniin yksityiskohtiin. Tässä luvussa kerrotaan myös, miten valmistustekniikka on otettu huomioon.

Neljänteen lukuun on sisällytetty selostus voimien arvioinnista sekä lujuuslaskennasta. Tässä osiossa selostetaan myös, millaisia muutoksia kappaleeseen tehtiin tietokoneavusteisen lujuuslaskennan avulla. Viides luku käsittää valmistusprosessin. Valmistusprosessina päädyttiin lastuavaan työstöön. Opinnäytetyö sisältää selostuksen valmistusprosessista sellaisena kuin se tässä tapauksessa toteutui.

Lopuksi tehdään yhteenveto siitä, miten suunnittelu- ja valmistusprosessi kokonaisuutena sujui ja millaisena osa lopulta toteutui. Tässä yhteydessä arvioidaan myös osan toimintaa osana kokonaisuutta ja mitä toivomisen varaa se jätti.

Opinnäytetyössä käytetään koko ajoneuvosta puhuttaessa koordinaatistoa, jossa X-suunta on auton keskilinjalla kulkusuuntaan nähden eteenpäin, Y-suunta on kulkusuuntaan nähden vasemmalle ja Z-suunta pystysuoraan ylöspäin (SAE J670). Koneistuksen osalta pätee, että X- ja Y-suuntien muodostama taso on maanpinnan suuntainen ja Z-suunta pystysuoraan.

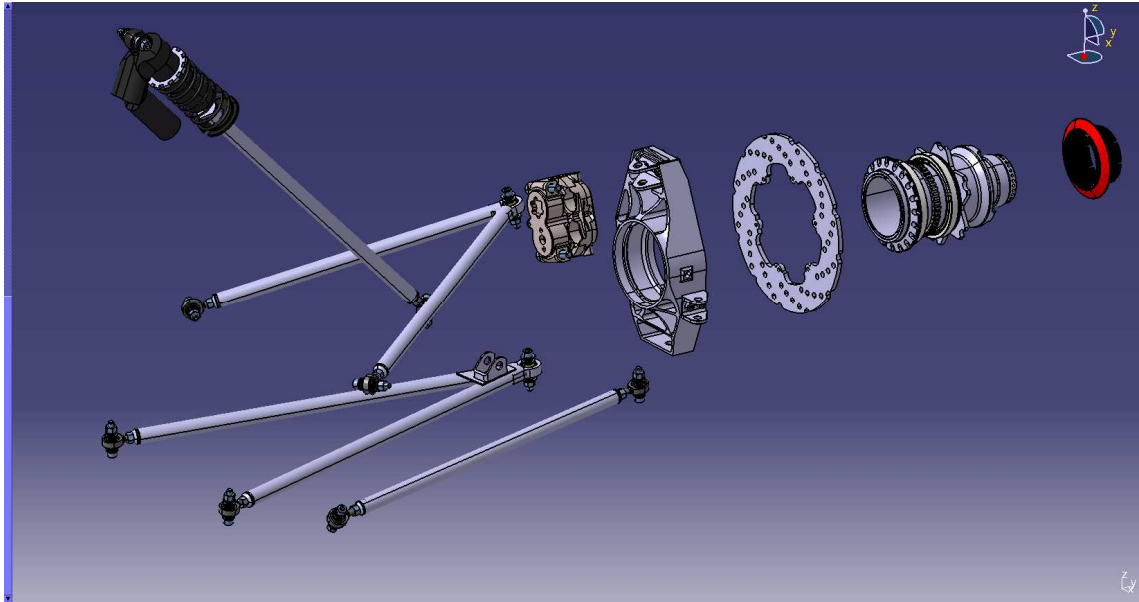
Olka-akselin suunnittelun pääasiallisena työvälineenä käytettiin Catia-mallinnus ohjelmaa. Catia-ohjelmistoa käytettiin sekä 3D-mallinnukseen että lujuuslaskentaan. Suunnittelun apuna käytettiin myös tavallista Excel-taulukkolaskentaohjelmistoa sekä paperia ja kynää. Valmistuksessa käytettiin Quaser MV154 -koneistuskeskusta ja HAAS UMC-750 -koneistuskeskusta ja niiden ohjaukseen Delcam-ohjelmistoa. Delcam-ohjelmistosta tai HAAS-työstökeskuksesta ei itselläni ollut lainkaan aikaisempaa osaamista.

2 Olka-akselin suunnittelu

2.1 Olka-akseli osana kokonaisuutta

Olka-akselin suunnittelussa on tärkeää ottaa huomioon kokonaisuus, johon olka-akseli on kiinnittyneenä, sillä olka-akseli on olennainen osa pyörän tuentaa. Olka-akseli itse kiinnittyy tukivarsien välityksellä auton runkoon. Olka-akseliin kiinnittyy ennen kaikkea pyörä, jonka varassa auton kaikki liikkeet tapahtuvat. Pyörä kiinnittyy olka-akseliin pyörännavan välityksellä, ja jotta pyörä voisi pyöriä, pitää jonnekin sijoittaa laakerointi. Jotta autolla voidaan hidastaa vauhtia, pyörää täytyy voida jarruttaa. Jarruttamisen tuottama momentti pitää tukea olka-akseliin. Ohjaus- ja jousitusliikkeet pitää mahdollistaa nivelillä.

(Kuva 1.) Kaikki nämä olka-akseliin kiinnittyvät osat vaativat oman tilansa ja niiden kaikkien toimivuudelle on omat laajemmatkin vaatimuksensa. Esimerkiksi jarruilla on muitakin tarpeita kuin että ne mahtuvat paikoilleen. Jarrulevyn pitää mahtua pyörimään, ja jarrulevylle pitää saada jäähdyttävää ilmaa ajon aikana.



Kuva 1. Yleiskuva pyöräntuennan komponenteista.

Valmiina hankittavat osat helpottavat olka-akselin suunnittelua siinä mielessä, että niihin ei tule muutoksia suunnitteluprosessin kuluessa, ellei niitä päätetä vaihtaa täysin toisiin.

Jousitusgeometria antaa olka-akselille tukipisteet auton rungon suhteen. Perusajatuk-sena on että rengas, joka on kiinni olka-akselissa pyörän navan välityksellä, seuraa tien pintaa. Tien pinta on kuitenkin epätasainen, jolloin auton runko liikkuu pystysuunnassa suhteessa renkaaseen (Smith 1978: 64). Olka-akselin ja autonrungon yhdistävät tukivar-ret liikkuvat siten nivelpisteidensä sallimissa rajoissa. Tämän lisäksi auton kuljettaja ha-luaa ohjata autoa kääntämällä pyöriä. Olka-akselin on siis mahdollistettava sekä jousi-tuksen että ohjauksen liikkeitä. Olka-akselin liikkeitä eivät myöskään saa taivuttaa ympärillään olevia osia kuten tukivarsia.

Kiihdyttäminen, jarruttaminen ja auton ohjaaminen aiheuttavat olka-akseliin voimia, jotka se täytyy kestää. Olka-akseli ei saa tietenkään rikkoutua näiden kuormitusten alaisena,

mutta jo elastisista muodonmuutoksista voi olla haittaa. Osalta vaaditaan jäykkyyttä esimerkiksi siitä syystä, etteivät jousituksen geometria tai pyöränkulmat muutu kuormituksen alaisina. (Blundell 2007: 146–149; Milliken 1995: 833–839, 372.)

Kilpa-auto on erikoistapaus, jossa keveydelle annetaan erityistä painoarvoa. Tavoitteena on muodostaa mahdollisimman kevyt kokonaisuus, eikä ainoastaan mahdollisimman kevyitä yksittäisiä osia. Olka-akseli kuuluu kokonaisuudessaan auton jousittamattomaan massaan, ja kilpa-autolle katsotaan olevan hyväksi, että jousitetun ja jousittamattoman massan suhde olisi mahdollisimman suuri (Dixon 1996: 221). Suhteen suurentamien muuttuu hankalammaksi, samalla kun pyöräntuenta muuttuu yhä kevyemmäksi. Toisaalta, jos pyöräntuennan keventäminen vaikeutuu, niin pientä etua voitaisiin kuitenkin saavuttaa tekemällä kompromissi pyörivien massojen pienentämiseksi. Olka-akselin keventäminen saattaa lisäksi johtaa tilanteeseen, jossa sen elastiset muodonmuutokset häiritsevät jonkin muun osan kuten pyörän laakerin toimintaa.

Massatuotannolle tyypilliset taloudelliset tavoitteet eivät ole ohjanneet olka-akselin suunnittelua, vaikka kokonaiskustannukset on pyritty pitämään siedettävänä. Joitakin komponentteja ei todennäköisesti olisi valittu käytettäväksi, ellei niitä olisi saatu tähän projektiin tuotetuksena yhteistyökumppanilta. Valittu valmistusmenetelmä tai materiaali eivät ole massatuotannolle otollisia, mutta projektin luonteeseen ne soveltuvat hyvin. Metropolian koneistuslaitteet olivat käytettävissä ilman erillisiä kustannuksia, ja materiaali oli saatu tuotetuksena Alumeco Oy:ltä.

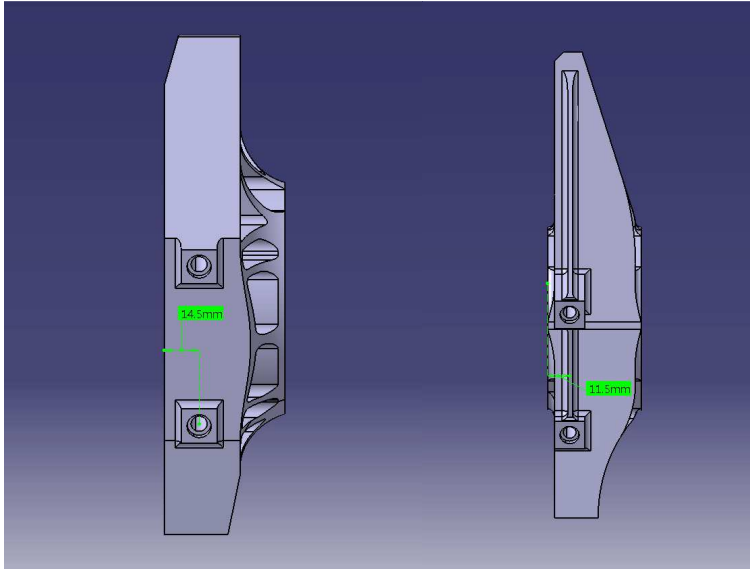
2.1.1 Pyöränlaakerit

Pyöränlaakerien valinta tehtiin pitkälti kokemuksen perusteella. Laakeriksi valittiin INA:n 71814-B-TVH, joka on kapea suurihalkaisijainen viistokuulalaakeri, jonka ehdottomaksi eduksi koettiin pieni paino suhteessa rasituksenkeston. Painoa tällaisella laakerilla on 91 grammaa. Kyseisen laakerin rasitusrajat ovat huomattavasti korkeammat kuin mitä tällaisessa kilpa autossa syntyy. (Rolling Bearings 2008: 276.) Vierintävastus tällä laakerilla oli koettu erinomaisen pieneksi. Laakerin suuri halkaisija mahdollistaa myös vetonivelen sijoittamisen keskelle laakeria ja pyörännapaa. Selkeäksi haitaksi kyseiselle laakerilla voidaan kuitenkin katsoa, ettei siinä itsessään ole minkäänlaisia tiivisteitä. Näiden laakerien ostohinta on sellainen, ettei niitä välttämättä olisi järkevää käyttää, ellei niitä saataisi tuotetuksena Schaeffler Finland Oy:ltä.

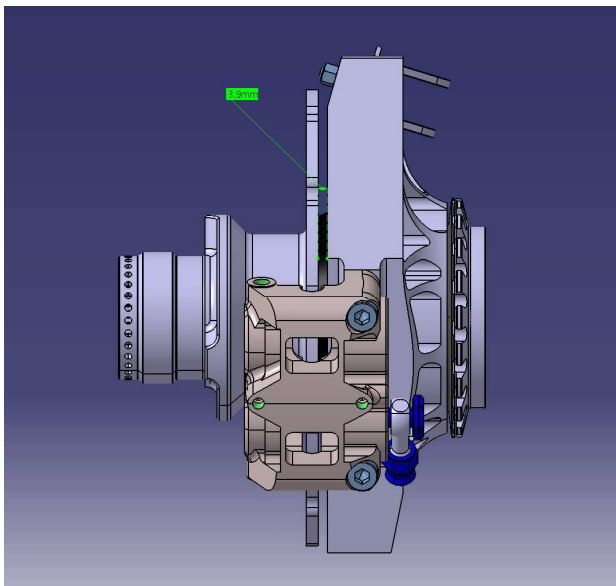
Olka-akseliin tulevista laakeripesistä pitää suunnitella riittävän jäykät, jotta laakerien kehiin ei kohdistuisi väntörasituksia. Laakereille pitää myös suunnitella sopiva ahdistusovite olka-akseliin. Liian pieni ahdistus päästää laakerin liikkumaan pesässään liian suuren vioittaessa laakeria. Lämpölaajeneminen muuttaa ahdistusovitteen tiukkuutta olka-akselin valmistusmateriaalista riippuen. Koska olka-akselin materiaaliksi valittiin alumiini ja laakerin ulkokehä on terästä, ahdistus pienenee lämpötilan noustessa. (Valtanen 2010: 225, 309.) Sopivaksi asennustiukkuudeksi valittiin 5 millimetrinsadasosaa. Ahdistus on tiukempi kuin samaa laakeria käyttäneissä aikaisempien vuosien olka-akseleissa. Sovite on tiukempi, koska uudessa olka-akselissa jarrulevy on hyvin lähellä olka-akselia, siten jarrujen epäiltiin kuumentavan olka-akselia enemmän kuin aiemmin.

2.1.2 Jarrut

Jarrusatula otettiin eräänä lähtökohtana olka-akselin suunnitteluun. Jarrusatulan, kuten muidenkin jarrujärjestelmän osien valinnan tai suunnittelun, oli tehnyt Metropolia Motorsportin jarrupäällikkö Valtteri Hirvonen. Jarrusatula oli ISR:n valmistama nelimäntäinen radiaalikiinnitteinen kiinteä alumiinisatula, joka on tarkoitettu ohuelle jarrulevylle. Jarrusatula sijoitettiin olka-akseliin noin kello neljään, jotta painopiste olisi mahdollisimman alhaalla ja keskellä. Satulan kiinnitys olka-akseliin siirrettiin mahdollisimman keskelle olka-akselia Y-koordinaatiston suunnassa. (Kuva 2.) Satula siirtyessä keskemälle on jarrulevyäkin siirrettävä. Jarrulevy tulikin hyvin lähellä olka-akselia (kuva 3). Jarrujen lämpösäteily saattaa aiheuttaa olka-akseliin liiallista lämpenemistä ja esimerkiksi laakerien löystymistä olka-akselin sisällä. Valmistusmateriaalina käytettävän muottialumiinin lujuus laskee jo melko matalissa lämpötiloissa (Molding & toolin aluminium Hokotol & Weldural 2012). Koska jarrulevyn linjan täytyy olla sivussa jarrusatulan kiinnityspisteistä, syntyy olka-akseliin sekä Y-akselin ympäri kiertyvä momentti että toinen momentti, joka pyrkii kiertämään jarrusatulan kiinnityskorvakkeita eri suuntiin Y-suunnassa. Jarrulevyn halkaisija pyrittiin saamaan suureksi viemällä jarrusatula mahdollisimman lähelle vanteen kehää. Jarrulevyn halkaisijaksi saatiin 190 mm.



Kuva 2. HPF014e- ja HPF013e-olka-akselit rinnakkain.



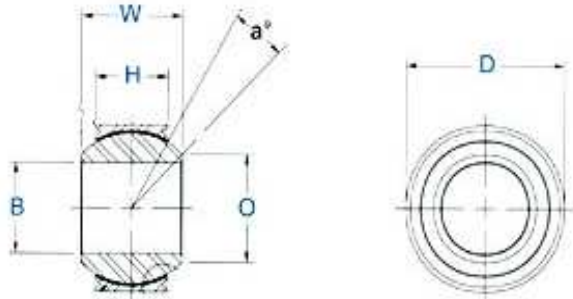
Kuva 3. Jarrulevy 3,9 mm:n etäisyydellä olka-akselista.

2.1.3 Pallonivelet

Palloniveliksi valittiin Aurora Bearing Companyn valmistamat PWB-5-TG-malliset pallonivelet. Valintaan päädyttiin lähinnä pienen halkaisijan ja muita niveliä suuremman kään-
tökulman takia. Nivelen sietämät rasitukset ovat suuremmat kuin tarvitsisi, mutta tästä ei ole mitään haittaa. Kyseinen nivel on amerikkalainen ja on mitoitettu tuumamitoin (Aurora Bearing company PWB-5TG 2014) (kaavio 1). Laakerin saatavuus Suomesta on

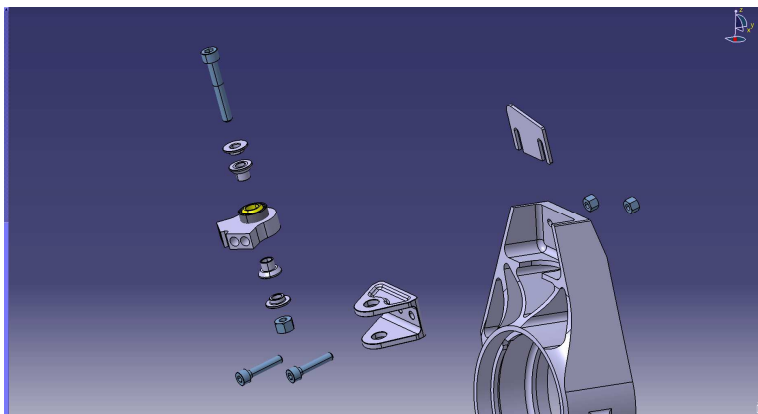
heikko. Laakerin valintaan vaikutti myös aikaisempi kokemus sen käytöstä ja se, että laakereita oli jo valmiiksi varastossa. Tulevaisuudessa kannattaisi harkita tämän laakerin korvaamista edullisemmalla vaihtoehdolla. Kaavio 1 havainnollistaa laakerin muotoa ja mitoitusta.

B	7,94
D	17,46
W	11,10
H	8,05
O	10,19
a	14 deg.



Kaavio 1. Pallonivelen mitat.

Laakerin suurimmat suositellut kuormitukset olivat radiaalisesti noin 42 kN ja aksiaalisesti noin 7,2 kN (Aurora Bearing company PWB-5TG 2014). Käytössä ei päästä lähellekään mainittuja maksimikuormituksia, mutta nivelet kuluvat kuitenkin aikaa myöden väljiksi. Pallonivelet prässätään tukivarsissa oleviin pesiin ja pultataan kiinni olka-akseliin. Olka-akseliin pitää jättää riittävästi liikkumatilaa tukivarsien päiden ympärille. Ylätukivarsi kiinnitetään olka-akseliin erillisellä haarukalla. Haarukka mahdollistaa cambersäädön lisäämällä tai vähentämällä säätölevyjä haarukan ja olka-akselin väliin. (Kuva 4.)

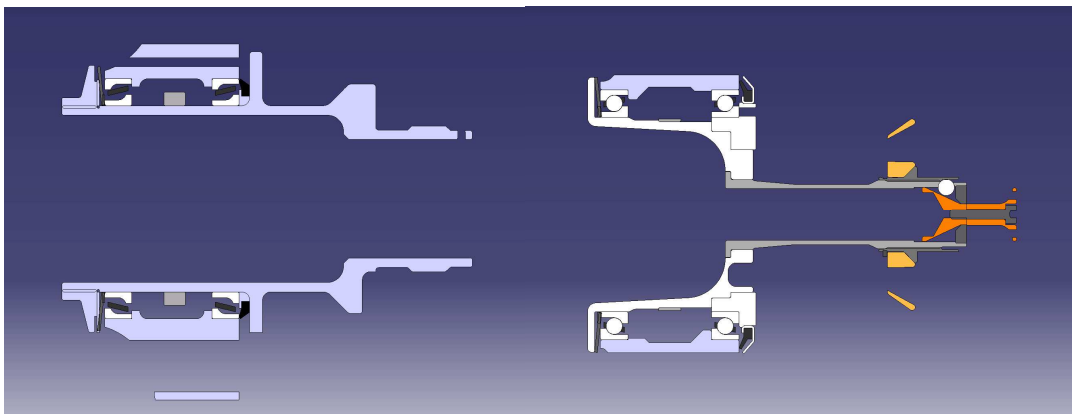


Kuva 4. Yläpallonivelen kiinnitys.

2.1.4 Pyörännavan tiiviste

Aikaisemmin todettiin, että valitussa pyöränlaakerissa itsessään ei ole lainkaan tiivisteitä. Metropolia Motorsportin muutamassa aikaisemmassa autossa tiivistys on ratkaistu niin sanotulla gammarengastiivisteellä. HPF011-auton napojen tiivisteiden ongelmana oli, että tiiviste kalvoi uran olka-akseliin. Tämä johtui siitä, että tiiviste laahasi suoraan alumiiniseen olka-akseliin. HPF013-autossa ongelmaa yritettiin ratkaista erillisellä teräksisellä laahauspinnalla. Tämä olka-akseliin prässätty teräsrenas saattoi olla syyllinen autoa vaivanneisiin pyöränlaakeriongelmiin. Mainittakoon tässä kohtaa, että edellä mainitut autot käyttivät muutoin täsmälleen samanlaista pyörännapaa ja tiivistettä. Teräksinen laahauspinta oli helpohko tapa yrittää ratkaista ongelma.

HPF014-autoon tuli toisentyyppinen napa (kuva 5), ja tiivisteongelma korjattiin siten, että valittiin aikaisempaa pienempi gammarengas, jolloin tiivistys voitiin kohdistaa suoraan laakerin ulkokehään. Tiivisteeksi valittiin 75 mm:n sisähalkaisijalla oleva RB-gamma-renas. Tiivistettä ei kuitenkaan käytetty aivan sellaisenaan, vaan se sovitettiin suoraan napaan ilman sen alkuperäistä teräksistä kiinnityskehää. Rakenne koettiin helpommaksi tehdä ilman kiinnityskehää ja lisäksi säästettiin hieman painossa.



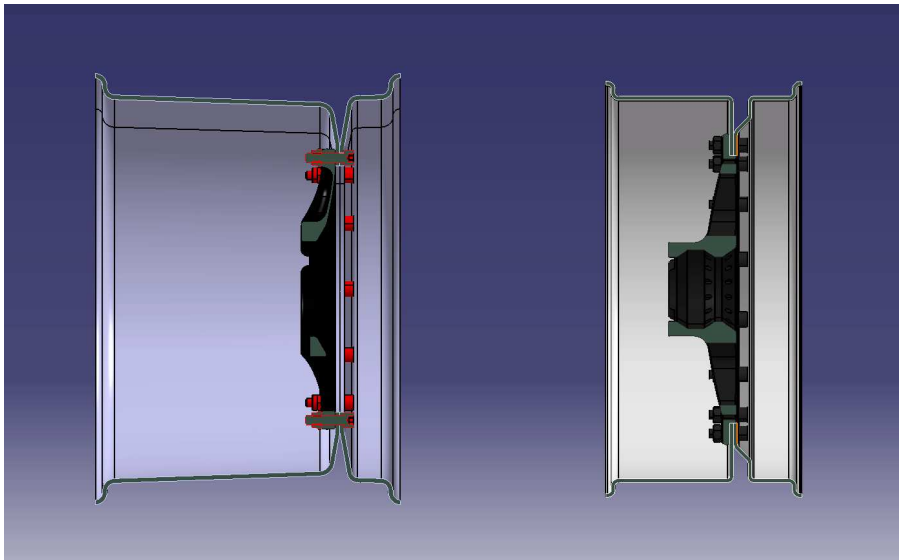
Kuva 5. HPF014:n (vas.) ja HPF011:n (oik.) pyörännapojen vertailu.

2.1.5 Pyörintänopeusanturi

Pyörän pyörimisnopeutta mittaava anturi sijoitettiin keskelle olka-akselia siten, että anturi-ipyörä jää suojaan olka-akselin sisälle. Anturiksi valittiin aikaisempaa pienempi kierreellä M8x1 oleva Hall-anturi.

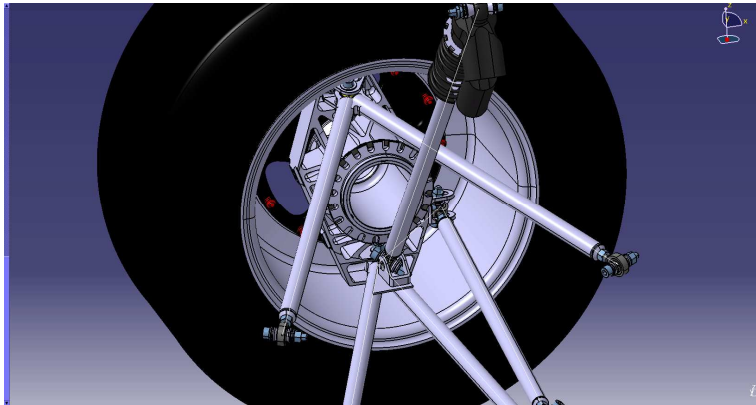
2.1.6 Vanne

Auton vanteiksi oli tarkoitus tulla sekä puoliksi tiimin valmistamat alumiinivanteet että tiimin valmistamat ja suunnittelemaat komposiittivanteet. Vannekoko muuttui 13 tuumasta 10 tuumaan, eli vanteen halkaisija pieneni noin 7,5 cm entisestä. Olka-akselille ja muille komponenteille jäi siten huomattavasti vähemmän tilaa. Suunnitelmien edetessä hiilikuituvanteen muodon annettiin vaikuttaa enemmän olka-akselin ja navan suunnitteluun kuin toisin päin. Vanteen muoto hakeutui lujuuslaskennan myötä sellaiseksi, että sen kiinnityspinta oli selvästi sivussa vanteen keskilinjasta. Niin sanottu ET-mitta oli suuresti negatiivinen. Jotta jarrusatula pystyi väistämään vanteen, piti navan olla pitkä, ikään kuin putkimainen. Aikaisemmissa vanteissa on ollut voimakas olake (kuva 6), joka on mahdollistanut lyhyemmän navan. Uusi vannemalli mahdollisti itse vanteen painon pienentämisen, mutta pyörännapa jouduttiin suunnittelemaan aikaisempaa pidemmäksi ja painavammaksi (ks. kuva 5).



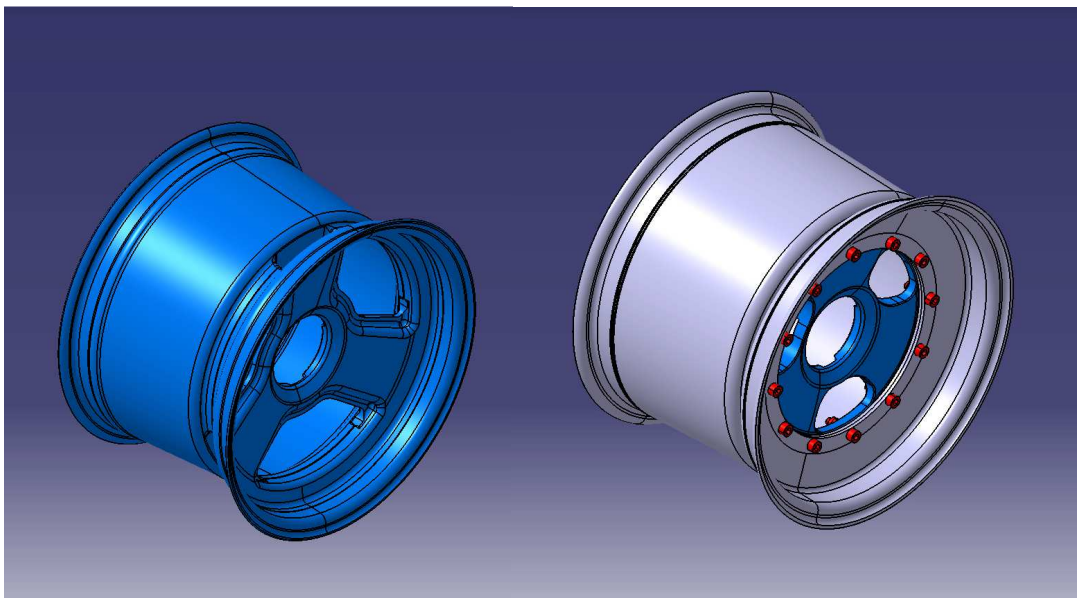
Kuva 6. HPF014-vanne (vas.) ja HPF013-vanne (oik.)

Olka-akselia suunniteltaessa piti erityisesti pitää huolta siitä, että tukivarret tai raidetanko eivät pääse ottamaan kiinni vanteeseen ohjaus- tai joustoliikkeiden takia. Pyörien pitää pystyä kääntymään noin 20 astetta kumpaakin suuntaan. Olka-akselia suunniteltaessa piti tehdä muutoksia jousitusgeometriaan, jotta edellä mainittuja kosketuksia ei tapahtuisi. Tätä asiaa käsitellään tarkemmin luvussa 2.2.



Kuva 7. Yleiskuva vanteen sisäpuolelta.

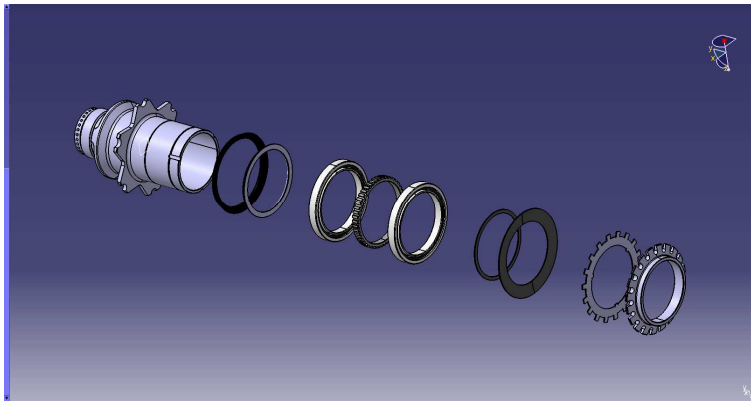
Vanteen suunnittelu oli erään opiskelijan insinööriyön aihe (Ketonen 2014). Vanteen malli muuttui sen suunnitteluprosessin aikana useita kertoja. Tämä aiheutti muutoksia myös olka-akselin ja navan suunnitteluun. Kuvasta 8 voi nähdä suunnitellut vanteet.



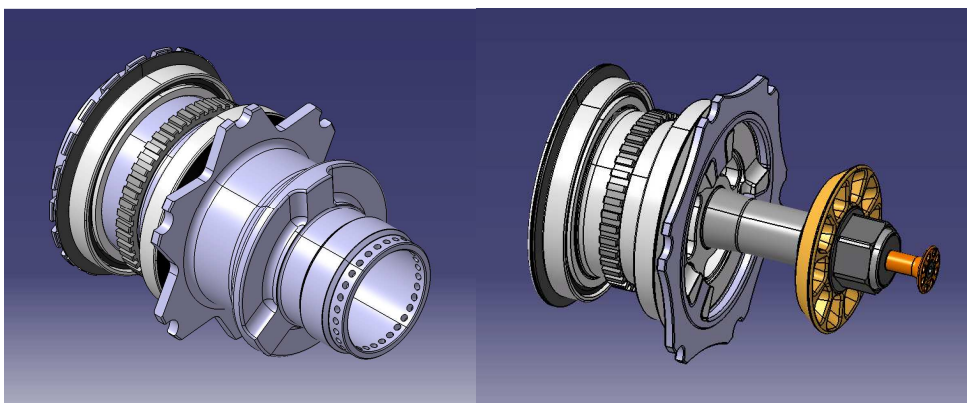
Kuva 8. Vanteet.

2.1.7 Pyörännapa

Vanteen muodosta johtuen napa muodostui melko pitkäksi. Jarrulevyn kiinnitys tapahtuu suoraan napaan ilman erillistä keskiötä, ja jarrulevy tuli lähelle olka-akselia. Navan kiinnitys olka-akseliin tapahtuu olka-akselin takaa mutterilla ja lukitusmutterilla. Napa on ahdistussovitteella kiinni ulommassa pyöränlaakerissa ja liukusovitteella sisemmässä pyöränlaakerissa. Sisemmässä laakerissa on esijännitysjoussi pitämässä huolen siitä, ettei laakeriin tule välystä missään tilanteessa. Vanne kiinnittyy napaan yhdellä isolla mutterilla, ja pyöränmutterin kierre on suoraan navassa. Vanteen ja navan kosketuspinnassa on muotolukitus, joka huolehtii momentin siirrosta. Pyörintänopeusanturin kehä on kiinnitetty napaan liimaamalla. Kuva 9 havainnollistaa navan rakennetta, ja kuvasta 10 voidaan havaita eroja HPF011:sta ja HPF014:sta välillä.



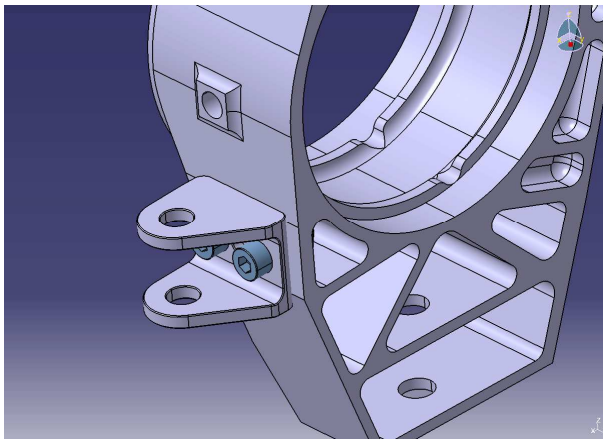
Kuva 9. Pyörännapa



Kuva 10. HPF014- ja HPF011-napojen vertailu.

2.1.8 Kääntövarsi

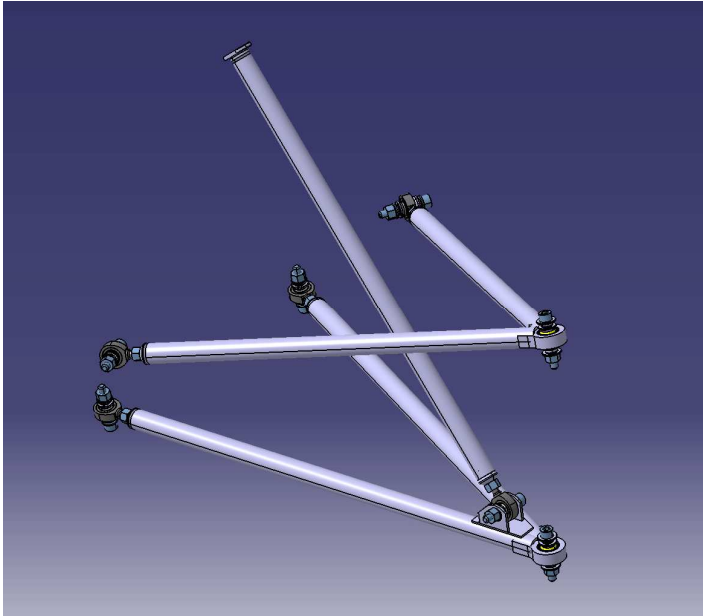
Koska vanne pienei 10 tuumaan, pienei myös vanteen sisällä oleva tila huomattavasti. Käytettäessä 13 tuuman vanteita saatiin kääntövarrelle riittävä pituus, vaikka raidetangon pää oli alapallonivelen tasolla. 10 tuuman vannetta varten kääntövarrelle tehtiin lisää tilaa nostamalla raidetangon nivelpistettä alapallonivelen yläpuolelle. Lisäksi kääntövarrelle tehtiin lisää pituutta lyhentämällä etupyörän jättöä. Kääntövarsi suunniteltiin irrotettavaksi, jotta ohjausgeometriaa voitaisiin jälkikäteen muuttaa. Vaihdevarren ajateltiin olevan parempi myös mahdollisissa törmäystilanteissa ja koneistusaihion koko saatiin samalla pienemmäksi. Raidetangon ympärille piti jättää ylimääräistä tilaa, koska raidetanko ei saanut ottaa kiinni olka-akseliin mahdollisten muutosten jälkeen. Kääntövarren kiinnitys suunniteltiin pultti ja mutteri -tyyppiseksi, jotta kierteen vioittumisesta ei olisi haittaa. (Kuva 11.)



Kuva 11. Kääntövarsi.

2.1.9 Tukivarret

Etujousitus koostuu kahdesta päällekkäisestä kolmiotukivarresta (kuva 12). Tukivarret valmistettiin teräsputkesta hitsaamalla. Olka-akselin suunnittelun kannalta oleellista oli ottaa huomioon tukivarsien väliset kulmat, tukivarsien paksuus sekä tukivarsien ulkopäiden koko. Työntötanko haluttiin kiinnittää alatukivarteen mahdollisimman lähelle alapalloniveltä, jotta tukivarsia taivuttava voima kohdistuisi lähelle palloniveltä. Tästä syystä oli vaarana, että olka-akseli tai pyörännapa koskettavat työntötankoon.

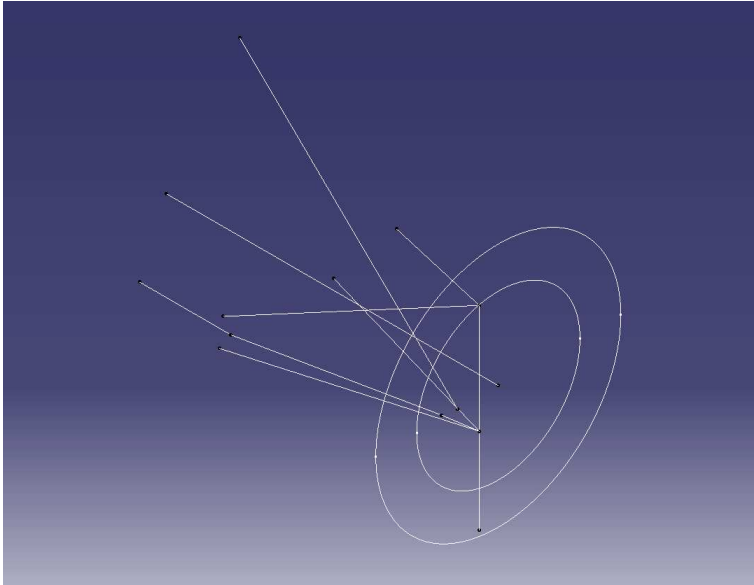


Kuva 12. HPF014:n tukivarret.

Ylätukivarren putkien väliseksi kulmaksi saatiin 54 astetta ja alatukivarren putkien väliseksi kulmaksi 27 astetta. Ylätukivarrelle vanne tarjosi runsaasti tilaa, mutta alatukivarren kulma jouduttiin tekemään hyvin pieneksi.

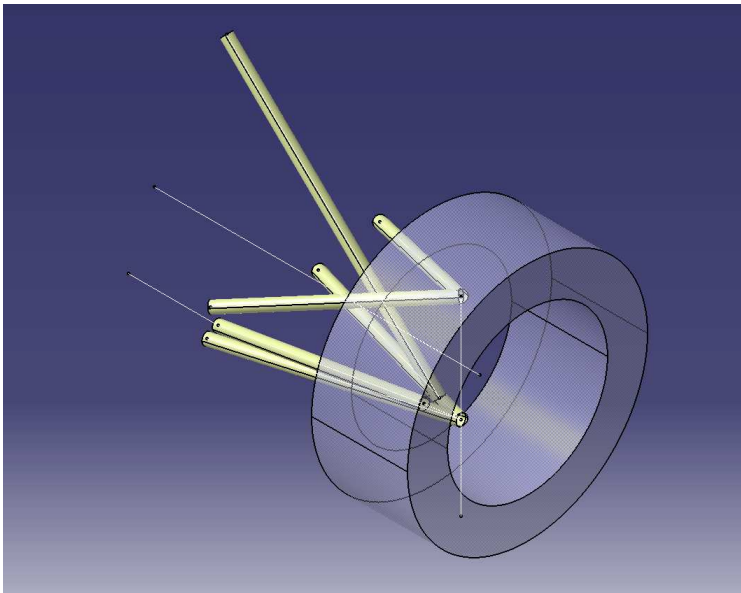
2.2 Jousitusgeometria

Jousitusgeometria on toiminut perustana olka-akselin ja sitä ympäröivien osien suunnittelulle, mutta siihenkin on tehty muutoksia silloin, kun jotakin ei ole voitu toteuttaa. Olka-akselin suunnittelun kannalta oleellisia jousitusgeometriasta poimittavia seikkoja ovat jousituksen nivelpisteet, tukivarsien asennot sekä ohjauksen raidetangon asento. Jousitusgeometria on muuttunut olka-akselin suunnittelun aikana ja sen muutokset ovat siirtyneet olka-akseliin (kuva 13). Jousituksen lankamalli, joka havainnollistaa jousituksen nivelpisteitä sekä muita avainkomponentteja.



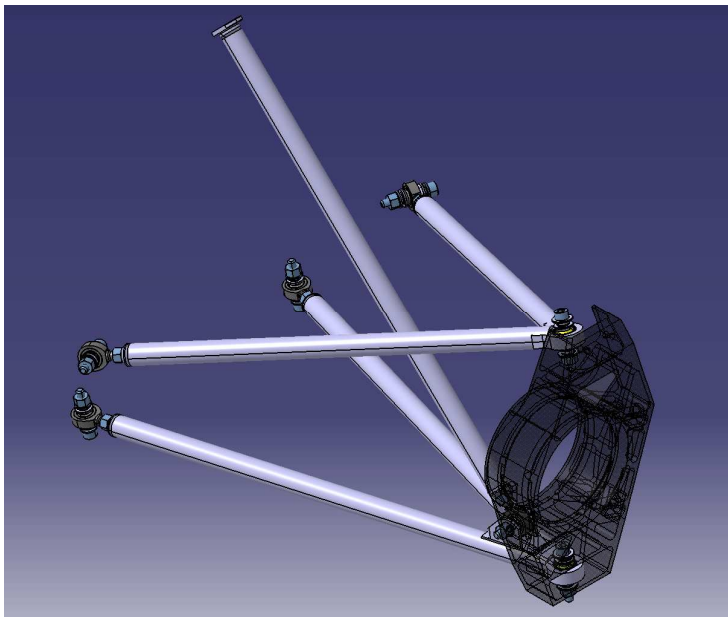
Kuva 13. Jousituksen lankamalli.

Päällekkäiset kolmiotukivarret muodostava HPF014-auton etujousituksen perusrakenteen. Yksi kolmiomainen tukivarsi tukee yläpallonivelen X- ja Y-suunnassa ja toinen samankaltainen antaa alapallonivelelle tuennan X- Y- ja Z-suunnassa. Ohjaus on toteutettu hammastangolla, joka on sijoitettu alatukivarren etupuolelle, runkoputken päälle. Jousi ja iskunvaimennin on nivelöity suoraan alatukivarteen. (Kuva 14.)



Kuva 14. Jousituksen tilamalli.

Formula-SAE sarjan säännöt vaativat, että autossa on oltava jousitus ja että jousituksella pitää olla liikevaraa vähintään 25 mm perusasennosta kumpaankin suuntaan. Jotta voitaisiin varmistua, että tämä sääntö täytyy aina, on liikematkaan lisättävä jonkin verran ylimääräistä. (Formula SAE rules 2014. T6.1.1.) HPF014-auton jousituksen kokonaisliikematka on 75 mm, pääosa tästä matkasta oli ajateltu olevan ulosjouston puolella. Mikään auton osista ei saa törmätä, hangata tai ottaa kiinni, kun jousitus ja ohjaus liikkuvat äärilaidasta toiseen. Pyörän tulee kääntyä vähintään 20 astetta kumpaankin suuntaan häiriöttä. Koko autoa ajatellen täytyy myös huolehtia, ettei pyörä kääntyessään hankaa esimerkiksi katteisiin tai etusiipeen.

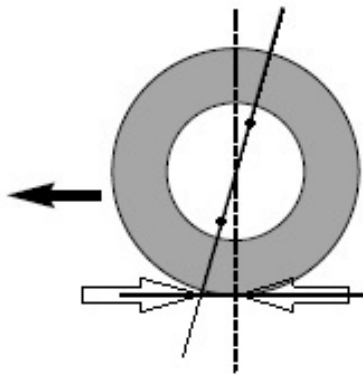


Kuva 15. HPF014-auton jousituksen kokoonpano.

Olka-akselin suunnitteluun jousitusgeometriasta poimittavat asiat voidaan pilkkoa osiin. Ei kuitenkaan voida olettaa, että ne voitaisiin täysin eriyttää toisistaan, koska ne vaikuttavat toisiinsa aina jonkin verran. Seuraavissa alaluvuissa olen pyrkinyt jakamaan jousitusgeometrian ongelmaa joidenkin peruskäsitteiden avulla pienemmiksi kokonaisuuksiksi. Olemassa ollutta jousitusgeometriaa on aina pyritty noudattamaan, ja siihen on tehty muutoksia vain, jos sitä ei ole pystytty toteuttamaan. Jousitusgeometriaan on tullut myös muutoksia prosessin aikana ja ne on johdettu olka-akselin suunnitteluun. Esimerkiksi tukivarsien rungon puoleisten kiinnityspisteiden muutos heijastuu myös palloniveliin paikkoihin.

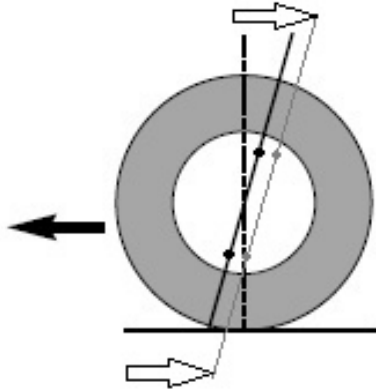
2.2.1 Caster-kulma, jättö ja kääntövarsi

Caster-kulma muodostuu ylä- ja alapallonivelen välisen suoran kallistumasta katsottaessa autoa sivulta (Gillespie 1992: 283; Milliken 1995: 624–627) (kuva 16). Pallonivelet on HPF014:n tapauksessa sijoitettu vanteen sisälle, ja ne vaativat ympärilleen riittävästi liikkumatilaa. HPF014:n caster-kulmaksi oli suunniteltu noin 8 astetta. Koska valitusta caster-kulmasta haluttiin pitää kiinni, tarvittava tila haettiin tuomalla yläpalloniveltä alas ja eteenpäin. Alapalloniveltä siirrettiin vastaavasti taakse ja ylöspäin.



Kuva 16. Caster-kulma ja jättö.

Koska HPF014-autoon tuli 10 tuuman vanteet, oli tila vanteen sisällä varsin rajallinen. Kääntövarsi haluttiin kuitenkin mahdollisimman pitkäksi, jotta ohjauksen mahdollisilla väljyyksillä olisi mahdollisimman vähän vaikutusta. Kääntövarrelle pyrittiin luomaan lisää pituutta pienentämällä jättöä. Jätöksä kutsutaan caster-linjan kuvitteellisen jatkeen ja pyörän maassa olevan kosketuspisteen välistä matkaa. (Bastow 2004: 11; Milliken 1995: 624–627.) Jätön pienentäminen tarkoitti sitä, että molemmat pallonivelet siirtyivät taaksepäin X-suunnassa. Kuvassa 16 caster-linja kulkee pyörän keskiön läpi. Kuvassa 17 caster-linja kulkee pyörän keskiön takaa, mutta caster-kulma on edelleen sama. HPF014-autossa caster-linja kulkee 5 mm pyörän keskiön takaa mitattuna suorassa kulmassa linjaan nähden.



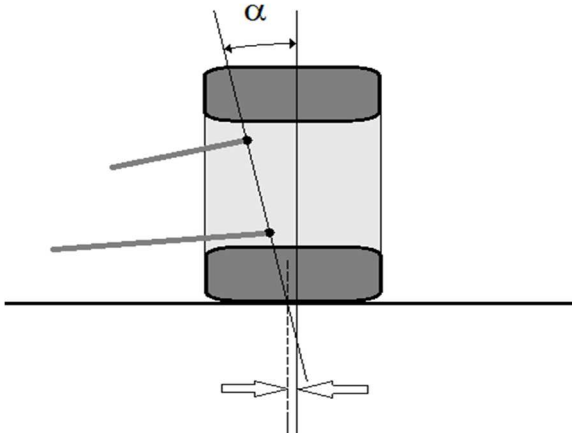
Kuva 17. Jätön pienennys.

Jätön pienentämisestä johtuen yläpallonivelelle oli tehtävä jälleen lisää tilaa tuomalla sitä alaspäin ja hivenen eteenpäin jotta haluttu caster-kulma jälleen saavutettiin. Jousitusgeometriassa kääntövarrelle oli pyritty tekemään lisää tilaa myös nostamalla sitä kohti renkaan keskiosaa. HPF011- ja HPF013-autoissa raidetangon ulompi pää oli alapallonivelen korkeudella. Tällä tavalla joustosta johtuvat ohjauskulman muutokset saatiin helposti pieniksi. HPF014:ssa raidetangon yläpää oli nostettu 20 mm alapallonivelen yläpuolelle. HPF014-autossa caster-kulmaksi saatiin 8 astetta ja jätöksi muodostui noin 25 mm.

Pallonivelten sijainti vaikuttaa siihen, miten suuret voimat palloniveeliin kohdistuu (Reimpell 2001: 7). Jotta palloniveeliin kohdistuisi mahdollisimman pienet rasitukset, olisi parempi, että ne sijaitsisivat mahdollisimman etäällä toisistaan, ja vieläpä siten, että alapallonivel olisi mahdollisimman lähellä maanpintaa. Alapalloniveleen vaikuttaa huomattavasti suurempi voima kuin yläpalloniveleen. Tätä on käsitelty tarkemmin luvussa 2.4 lujuuslaskennan yhteydessä.

2.2.2 KPI ja A-mitta

KPI -lyhenne muodostuu englanninkielisistä sanoista Kingpin Inclination, joka suomeksi tarkoittaa olkatappilinjan sivukallistumaa. KPI voidaan määrittää pallonivelten läpi kulkevan linjan kallistumasta katsottaessa autoa edestäpäin. A-mitta puolestaan lasketaan olkatappilinjan ja pyörän keskilinjan erosta. (Happian-Smith 2004: 279–280; Milliken 1995: 624–627; kuva 18).



Kuva 18. KPI ja A-mitta.

KPI-kulmaksi HPF014-autoon valittiin 8 astetta ja A-mitta asetui 5 millimetriin. Tämän yhdistelmän seurauksena pallonivelet sijoituivat syväälle vanteen sisään. Tästä puolestaan seuraa, että kolmiotukivarsien kulma jäi pieneksi. Mitä pienempään kulmaan tukivarret asettuisivat, sitä suuremmaksi niihin kohdistuvat rasitukset tulisivat. Jos A-mittaa suurennettaisiin, siirtyisivät pallonivelet ulommas vanteesta ja tukivarsille jäisi enemmän tilaa. Jos KPI-kulmaa suurennettaisiin, olisivat seuraukset samansuuntaiset. Alun alkaen A-mitta oli 0 millimetriä, mutta tämä todettiin liian hankalaksi toteuttaa. Kun A-mitta muutettiin 5 millimetriin, jäi tukivarsille riittävästi tilaa.

Koska vanne oli kooltaan 10 x 7 tuumaa, niin pyörän tuennan suunnittelussa oli hankalutena saada haluttu geometria toimivaksi. Suuremmalla vanteen halkaisijalla olisi ollut esimerkiksi helpompi kasvattaa alatukivarren putkien välistä kulmaa ja saada silti riittävä kääntyvyys. Suunnitteluvaiheessa pitää olla huolellinen, etteivät mitkään osat ota kiinni toisiinsa millään muulla tavoin kuin on suunniteltu. Pyörien pitää mahtua kääntymään riittävästi ilman, että vanne hankaa tukivarteen tai olka-akseli vääntää raidetankoa.

2.2.3 Ohjausgeometria

Ohjausgeometria ei sinällään vaikuttanut olka-akselin suunnitteluun juurikaan. Toki oli huolehdittava siitä, että raidetanko ei missään vaiheessa törmää olka-akseliin tai vanteeseen. Kuten jo aikaisemmin mainittiin, kääntövarresta haluttiin mahdollisimman pitkä, jotta ohjausjärjestelmän mahdolliset väljyydet vaikuttaisivat pyörän kääntökulmaan mahdollisimman vähän.

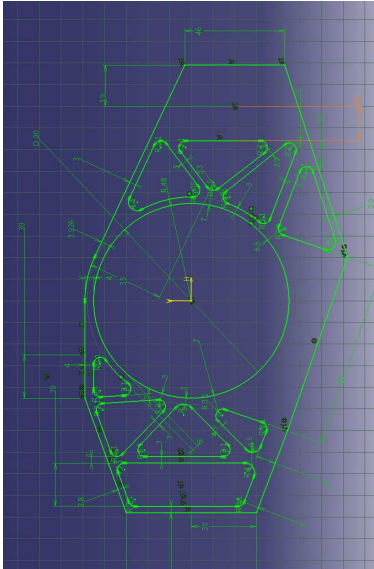
2.3 3D-mallinnus

Olka-akselin 3D-mallinnuksesta minulla oli jo aikaisempaa kokemusta, ja tämän uuden olka-akselin mallinnuksessa päädyttiin käyttämään samaa kaavaa kuin, aikaisemmissa malleissa. Tavoitteena oli, että malliin tulisi mieluusti vain vähän erillisiä piirroksia, joita tästä lähtien kutsutaan sketch-nimellä. Mallinnuksen aikana ei tehty lainkaan riippuvuus-suhteita muihin osiin, koska ei haluttu, että muihin osiin mahdollisesti tehtävät muutokset muuttaisivat olka-akselin mallia hallitsemattomasti. Olka-akselin mallinnustyö ei pyri olemaan malliesimerkki mallinnuksesta, jossa käytetään paljon hienoja mallinnusohjelman ominaisuuksia, vaan esimerkki yhdestä tavasta, jolla työ on saatu tehtyä varmasti ja yksinkertaisesti.

Mallinnuksessa on pyritty ottamaan huomioon koneistus valmistusmenetelmänä. Tämä näkyy esimerkiksi siinä, että X- ja Y-liikkeellä ajettaviin nurkkiin on tehty pyöritykset, jotka ovat suurempia kuin käytettävän työkalun säde. Tämä helpottaa koneistusta, koska työkalu seuraa kaarevaa linjaa, eikä joudu pysähtymään nurkissa. Kappale pyrittiin mallintamaan sellaiseksi, että se voidaan tehdä 3-akselisella työstökeskuksella. Vaikka osa pyrittiin tekemään kevyeksi, niin joihinkin kohtiin jätettiin materiaalivahvuutta koneistamisen helpottamiseksi, sillä liian ohuet seinämät saattavat aiheuttavat värinää koneistettaessa ja pinnanlaatu heikkenee.

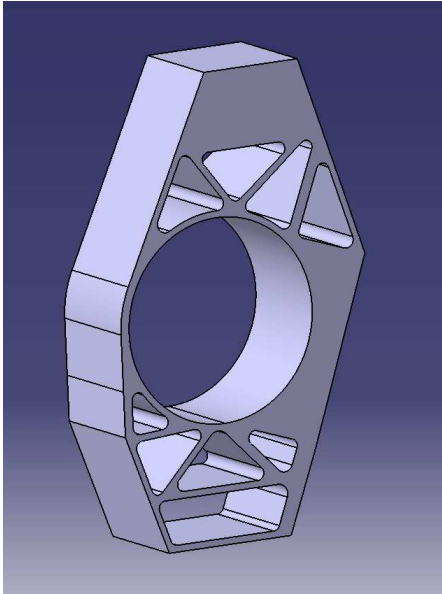
Osan keveyteen yritettiin kiinnittää huomiota, mutta tavoitteeksi asetettiin vain se, että uusi osa ei saa olla painavampi kuin edellisen vuoden versio. Vaikka HPF013-auton olka-akselit olivat kestäneet käytössä hyvin, oli niiden kanssa ollut ongelmia, jotka saattoivat johtua liiallisista elastisista muodonluutoksista. Tästä syystä HPF014:n olka-akselit päätettiin tehdä hieman tukevammiksi.

Mallinnus aloitettiin luomalla ensin jousituksen nivelpisteet, etuakselilinja ja maanpinnan taso, jotka kopioin jousitusgeometriasta. Tämän jälkeen tehtiin yksi sketch Z-X-tasolle, joka antaa perusmuodon koko olka-akselille (kuva 19). Keskellä näkyy pyöränlaakerin pesä, oikealle on varattu paikka jarrusatulan kiinnitykselle, alhaalta löytyy paikka alapalonivelelle ja ylös on jätetty tilaa yläpallonivelelle. Keskeltä katsottuna noin kello kahdeksassa on pieni ja tukevaksi suunniteltu tasku kääntövartta varten.



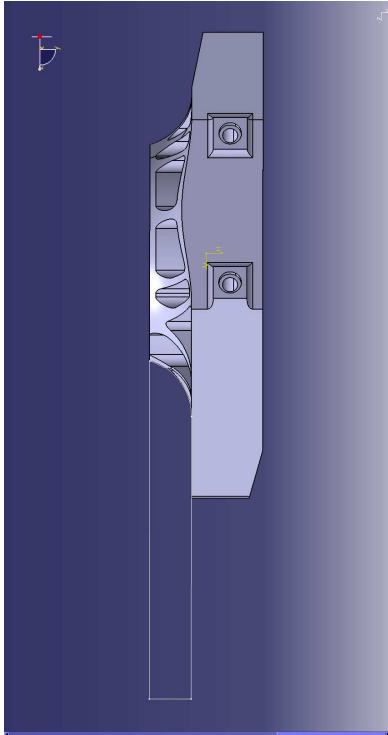
Kuva 19. Olka-akselin muodon sketch.

Tästä sketchistä näkyy jo hyvin olka-akselin lopullinen muoto (kuva 20). Sketchissä näkyvät nurkan pyöristykset olisi voinut tehdä myös Catian-pyöristystyökalulla, mutta sketchin muuttaminen jälkikäteen olisi voinut hajottaa mallin pyöristykset ikävällä tavalla. Sketchissä useimmat piirteet on mitoitettu paikoille ja sidosten käyttöä on vältetty. Esimerkiksi ripojen paksuutta ei ole määritelty siten, että viivat olisivat yhdensuuntaiset ja 3 mm:n päässä toisistaan vaan siten, että ripa voi olla eri paksuinen eri päistä. Nurkkien pyöristykset on myös sijoitettu mitoittamalla eikä sitomalla niitä ympäröiviin elementteihin. Sketchin tekeminen tällä tavoin helpottaa mielestäni lujuuslaskennan yhteydessä tehtävien muutosten tekemistä.



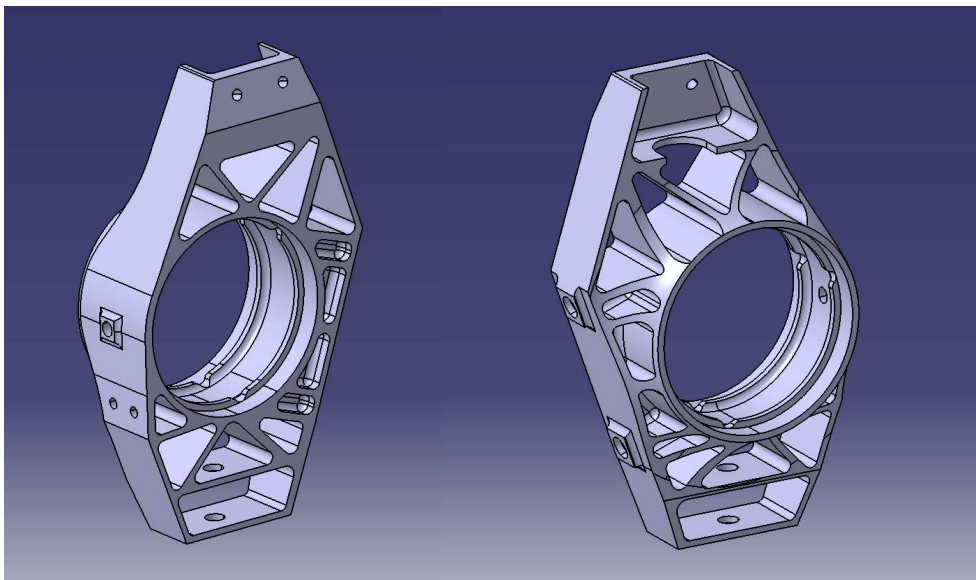
Kuva 20. Ensimmäisestä sketchistä tehty muoto.

Seuraavassa vaiheessa muotoiltiin jarrusatulan paikka, jarrusatulan kiinnityksen kevennykset, alapallonivelen reiät ja pyörintänopeusanturin paikka. Jarrusatulan korotukset olisi voinut muotoilla jo ensimmäiseen sketchiin mutta tällä kertaa ne tulivat mukaan vasta nyt. Olka-akselin takaa poistettiin pyörähdyssymmetrinen osuus (kuva 21) lähinnä kevennysmielessä, mutta sillä tavoin saatiin myös lisättyä tukivarsien liikkumatilaa. Tämä pyörähdyssymmetrinen muoto olisi ollut valmistusvaiheessa tehdä sorvaamalla, jolloin materiaalia olisi saatu poistettua tehokkaasti.



Kuva 21. Olka-akselin kevennys.

Kevennyspyörähdyksen jälkeen muotoiltiin yläpallonivelen kolo. Viimeisiksi asioiksi jäi joidenkin pyöristysten tekeminen sekä laakerien ohjauspintojen ja laakerien ulosvetokolojen mallinnus. Lopullinen malli näytti kuvan 22 kappaleelta.



Kuva 22. Olka-akselin lopullinen malli.

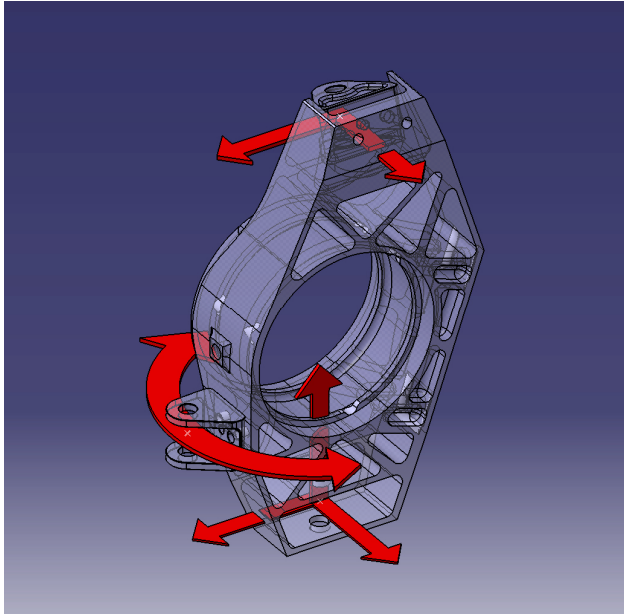
Mallinnusta tehdessä jousituksen ja ohjauksen liikkeiden tarkasteluun ei käytetty Catian animaatio-ominaisuuksia. Riittävästä liikkumatilasta pyrittiin huolehtimaan hieman alkeellisesti sitomalla alapallonivelen piste omalle paikalleen ja kääntelemällä olka-akselin, renkaan ja navan kokoonpanoa olkatappilinjan ympäri.

Olka-akselia ei mallinnettu yhdeltä istumalta valmiiksi asti. Lopullisen muodon löytämiseen vaadittiin useita yrityksiä, ennen kuin tyydyttävä lopputulos saatiin aikaiseksi. Lopullisessa muodossaan olka-akselin malli kuitenkin syntyi edellä kuvatulla tavalla. Aikaisemmissa luvuissa on jo kuvattu, millaisia haasteita eri komponentit ja niiden sijoittelu on aiheuttanut. Olka-akselin 3-D-mallin valmistumiseen vaikutti eniten ympäröivien komponenttien jatkuva muuttuminen. Eritystä hankaluutta aiheutti jousitus- ja ohjausgeometrian muutokset, sillä jotkut muutokset muuttivat mallia niin paljon, että se oli käytännössä mallinnettava kokonaan uudelleen.

2.4 Lujuuslaskenta

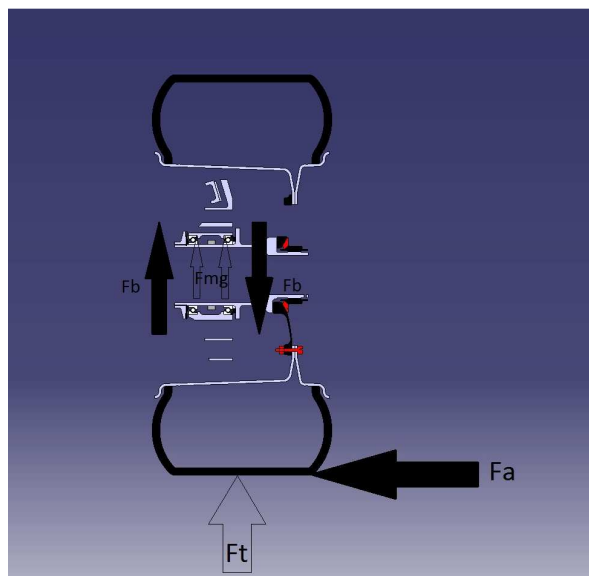
Lujuuslaskenta tehtiin tietokoneavusteisesti käyttämällä Catian rakenneanalyysiominaisuuksia. Alkuperäisen suunnitelman mukaan lujuuslaskentaan oli tarkoitus käyttää Ansys- tai Abaqus-ohjelmistoa. Koska aikataulullisesti olisi ollut mahdotonta oppia käyttämään täysin uutta ohjelmaa, niin Ansys- ja Abaqus-ohjelmien käyttö hylättiin. Catian lujuuslaskentaominaisuuksista oli itselläni hieman kokemusta. Minkäänlaista koulutusta en ole saanut minkään lujuuslaskentaohjelmiston käyttöön, eikä lujuuslaskentamallin oikeellisuudesta ole siten varmuutta. Lujuuslaskentamallille ei löytynyt tarkastajaa, joten laskennan laadunvalvonta jäi siis itselle. Tästä syystä tämän opinnäytetyön lujuuslaskentaosuus sisältää vain selostuksen siitä, miten lujuuslaskenta toteutettiin käytettävissä olleella aikataululla.

Lujuuslaskenta alkoi määrittelemällä olka-akseliin kohdistuvien voimien suuruudet ja selvittämällä, miten voimat kohdistuvat olka-akseliin. Olka-akseli kiinnittyy autoon kolmen tukipisteen avulla. HPF014:n tapauksessa alapallonivel on tuettu tukivarrella X- ja Y-suunnassa. Lisäksi työntötanko estää alapallonivelen liikkeet Z-suunnassa. Ylätukivarsi estää puolestaan yläpallonivelen liikkeet X- ja Y-suunnassa. Raidetangon pää pitää huolen siitä, ettei olka-akseli pääse pyörimään vapaasti olkatappilinjan ympäri. Kuva 23 esittää edellä selitettyjä tukisuuntia.



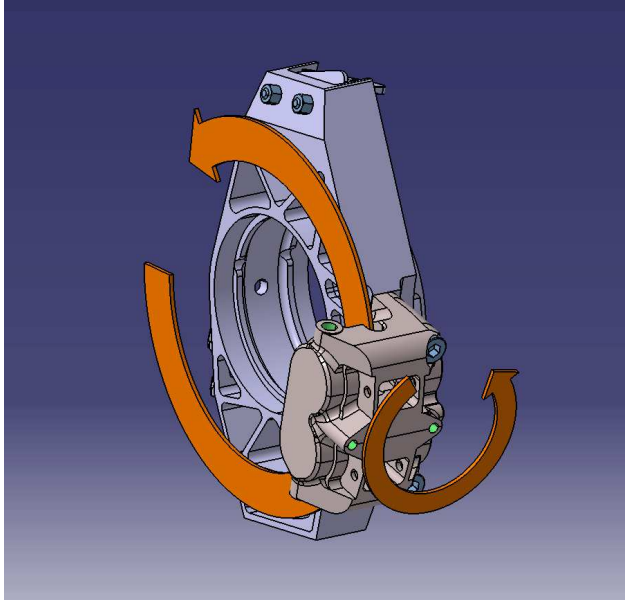
Kuva 23. Olka-akselin nivelpisteiden tukisuunnat.

Painovoima aiheuttaa laakeripintoihin ylöspäin suuntautuvan voiman. Jarruttaminen lisää laakerivoimaan X-akselin suuntaisen taaksepäin osoittavan voiman. Sivuttaiskiihtyvyys aiheuttaa molempiin laakereihin pystysuoran mutta vastakkaissuuntaisen voiman. Viimeksi mainittujen voimien suunta riippuu sivuttaiskiihtyvyyden suunnasta. Sivuttaiskiihtyvyydestä aiheutuu myös pyörän akselin suuntainen voima. Kuvalla 24 havainnollistetaan olka-akseliin kohdistuvia kiihtyvyyksien aiheuttamia voimia.



Kuva 24. Pyöräntuentaan kohdistuvia voimia.

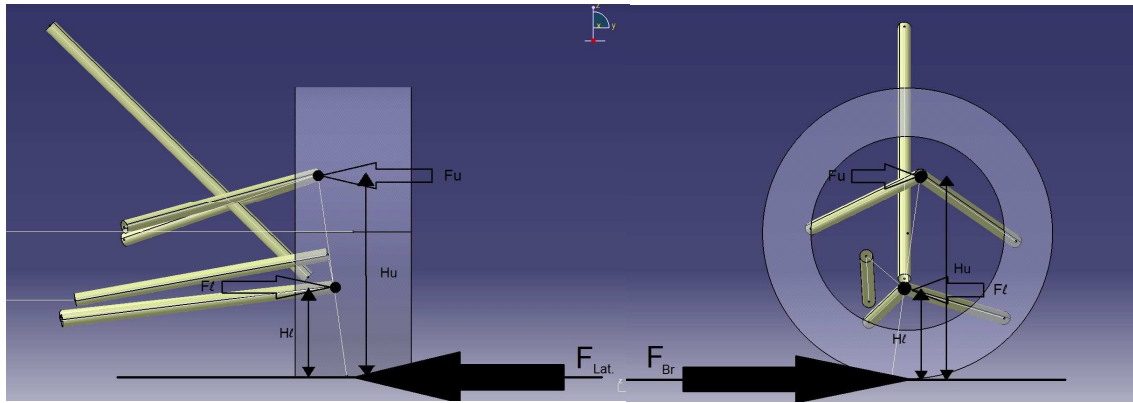
Jarruttaessa jarrusatulasta kohdistuu olka-akseliin kiertomomentti Y-akselin ympäri. Lisäksi jarruttaminen aiheuttaa myös toisen kiertomomentin, joka pyrkii kiertämään satulan kiinnityskorvakkeita eri suuntiin. Tämä johtuu momenttivarresta, joka muodostuu jarrulevyn linjan ja satulan kiinnityspulttien väliin. (Kuva 25.)



Kuva 25. Jarrujen tuottamat momentit.

Asiaa voidaan kuitenkin katsoa myös ikään kuin toisin päin. Laakeripinnat voidaan lukita siten, että ne sitovat olka-akselin paikoilleen X-, Y- ja Z-suunnassa ja estävät olka-akselin kiertymisen X-akselin ympäri. Olka-akseli sidotaan Y-akselin suhteen jarrusatulan avulla. Kiertyminen Z-akselin suhteen estetään sitomalla kääntövarsi ainoastaan Y-suunnassa. Tarkkaan ottaen kääntövarren kiertyminen pitäisi sitoa olkatappilinjan ympäri. Tällä tavalla toimittaessa voimat, jotka rasittavat olka-akselia voidaan kohdistaa ylä- ja alapalloniveliin nivelpisteisiin.

Olka-akselia suunnitellessa päädyttiin tähän jälkimmäiseen tapaan. Molempia tapoja kehitettiin aluksi mutta jälkimmäinen tapa koettiin yksinkertaisemmaksi. Voimat, jotka palloniveliin kohdistuu, laskettiin Excel-taulukkolaskentaohjelmalla. HPF013-auton tietojen perusteella auton massaksi arvioitiin 280 kg. Kittakertoimeksi arvioitiin 1,7. Kuva 26 selostaa sitä seuraavaa laskentaa.



Kuva 26. Pyöräntuentaan kohdistuvat voimat

$$F_{Br} = m \cdot g \cdot \mu$$

$$F_{Br} \approx 4500N$$

$$F_{Lat.} = F_{Br}$$

$$F_l = F_{Br} \left(\frac{H_u}{H_u - H_l} \right)$$

$$F_l \approx 8500N$$

$$F_u = F_{Br} - F_l$$

$$F_u \approx -4000N$$

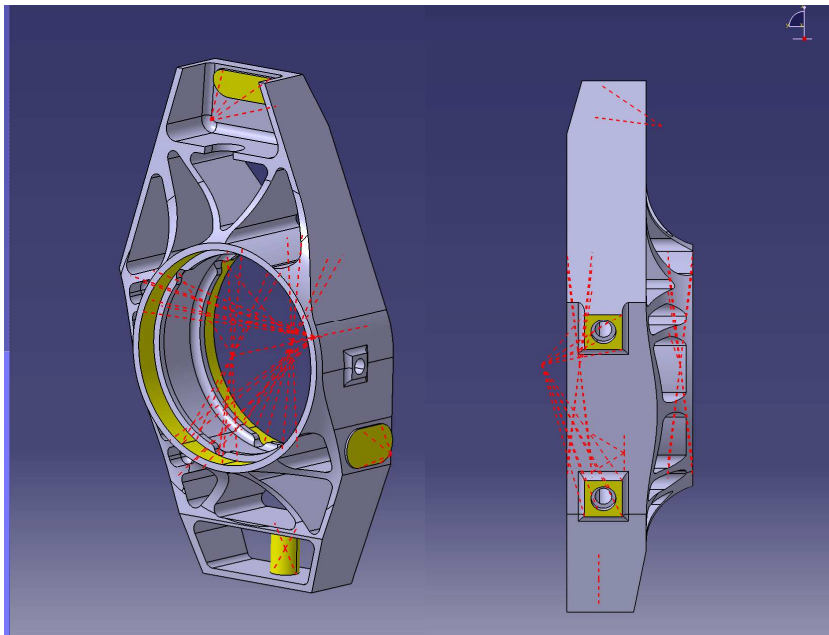
$$F_z = m \cdot g$$

$$F_z \approx 3000N$$

Näillä laskelmilla saatiin arvioitua palloniveliin kohdistuvat kuormitukset X-, Y- ja Z-suunnassa. Lujuuslaskennat toistettiin erikseen viidelle eri kuormitustilanteelle: täydelle jarrutukselle, täydelle sivuttaiskiihtyvyydelle molempiin suuntiin sekä näiden yhdistelmille.

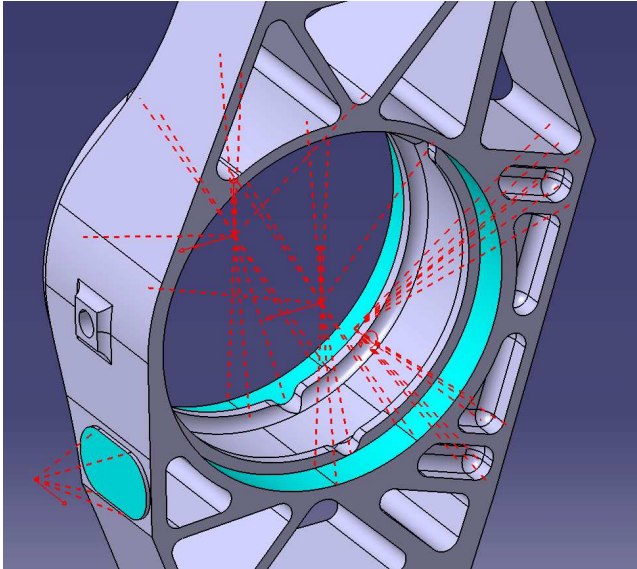
Mallinnettua osaa muokattiin hieman lujuuslaskentaa varten. Alapalloniveltä varten malliin lisättiin ikään kuin akseli pallonivelen pultinreikien väliin. Yläpalloniveltä varten tehtiin apupinta, samoin kuin kääntövartta varten. Nämä apupinnat luotiin, jotta kappaleen sidosten tekemiseen käytettyjen virtuaaliosien kiinnittäminen olisi helpompaa.

Sidosten luomisessa sekä voimien kohdistamisessa apuna käytettiin Catian smooth virtual parteja. Pyöränlaakereita kuvaamaan luotiin virtuaaliosat, jotka kiinnitettiin laakeripintoihin. Jarrusatula korvattiin virtuaaliosalla, joka kiinnitettiin satulan korvakkeisiin sekä erilliseen pisteeseen, joka sijaitsi keskiakselilla samassa kohdassa kuin jarrulevy. Näiden lisäksi tarvittiin virtuaaliset osat yläpallonivelen kiinnityskorvakkeeksi sekä kääntövartta imitoimaan. Alapallonivelelle tehtiin myös oma virtuaaliosa. (Kuva 27.)

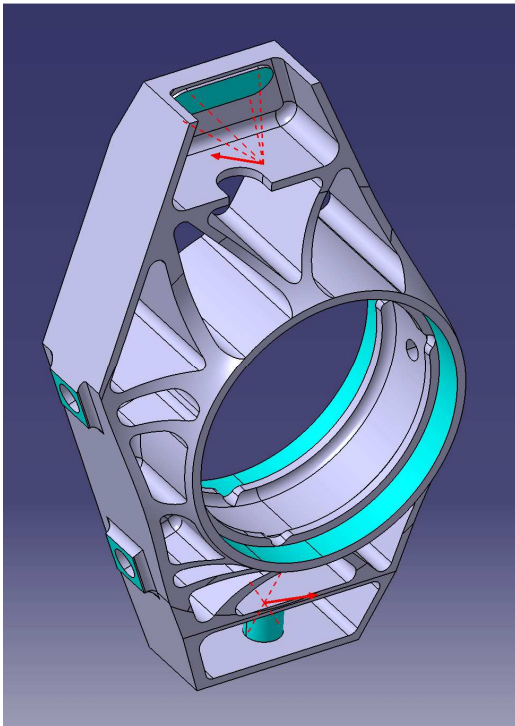


Kuva 27. Virtuaaliosat ja apupinnat.

Virtuaaliosien kiinnittämiseksi sijoitettiin käyttäjän määriteltävissä olevat sidokset pyöränlaakerien virtuaaliosien keskelle, kääntövarren virtuaaliosan kärkeen ja jarrusatulan virtuaaliosaan (kuva 28). Olka-akselia rasittavat voimat kohdistettiin ylä- ja alapallonivelen virtuaaliosiin (kuva 29).



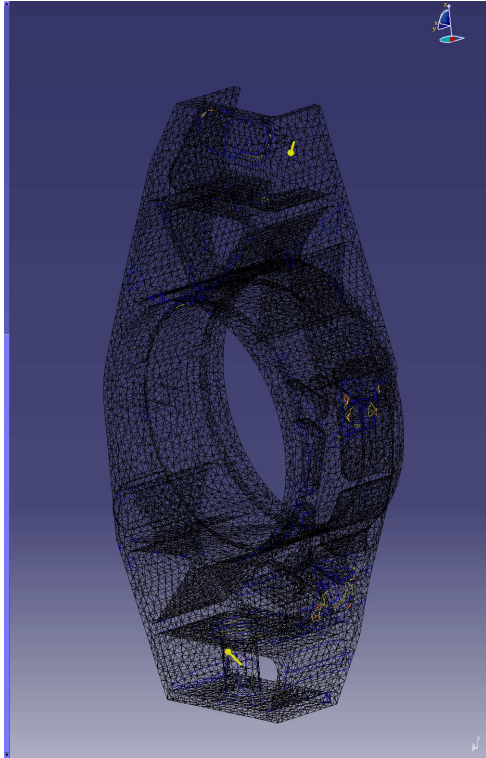
Kuva 28. Olka-akselin sidokset lujuslaskennassa.



Kuva 29. Voimien kohdistuminen nivelpisteisiin.

Edellä mainittujen sidosten ja voimien kohdistuspisteiden asettelun jälkeen voitiin alkaa suorittaa lujuslaskentaa. Ohjelma luo malliin verkon, jonka avulla rasituksia lasketaan (kuva 30). Verkon silmäkoko vaikuttaa laskennan tarkkuuteen. Aluksi verkon silmäkoko

pidettiin melko suurena, jotta ylipäättään varmistuttiin laskentamallin toimivuudesta. Suuremmalla verkonsilmällä laskenta onnistuu nopeammin, pienellä verkonsilmällä laskenta on tarkempaa ja kestää silloin pidempään. Ohjelmistossa on myös ominaisuus, joka muuttaa verkonsilmäkokoja automaattisesti siten, että verkko muuttuu tiheämmäksi siellä missä virhearvio on suurempi.

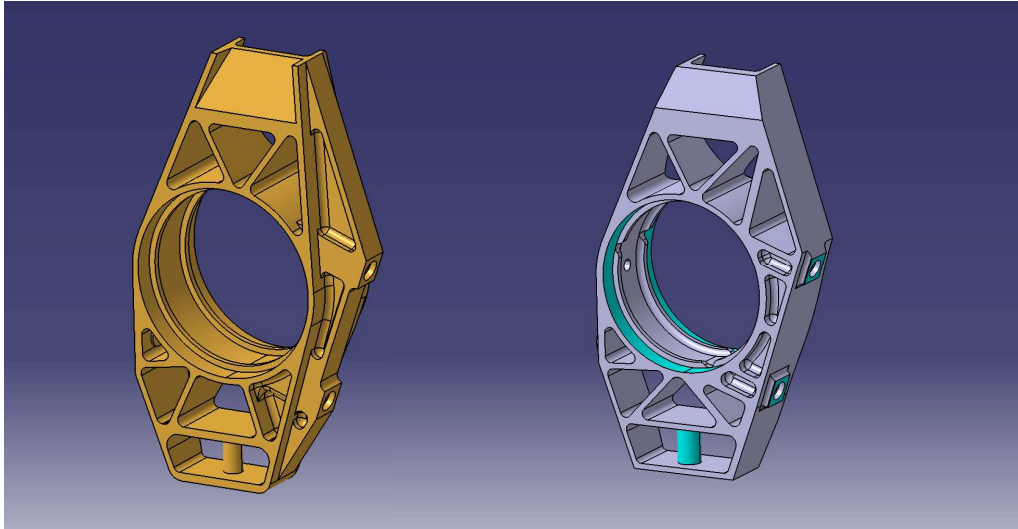


Kuva 30. Mallin verkko.

Lujuuslaskennan tarkoituksena on analysoida mallinnetun kappaleen jännityksiä lasketujen rasiusten alaisina. Jos laskennassa havaitaan, että jännitykset nousevat yli halutun rajan, muutetaan mallia ja suoritetaan laskenta uudelleen. Laskentaverkon silmäkoko muutetaan pienemmäksi sitä mukaa, kun mallin jännitykset pysyvät siedettävänä. Catiassa verkon silmäkoon voi asettaa millimetreinä. Mallin toimivuuden kokeiluun käytettiin 5 mm:n reikäkoko. 2 mm:n silmäkolla yhteen laskentaan tarvittava aika suhteessa tarkkuuteen koettiin sopivaksi kappaleen muokkaamiseen. Tarkistuslaskentaa suoritettiin 0,2 mm:n verkonsilmällä, jolloin laskenta-aika venyi useampaan tuntiin.

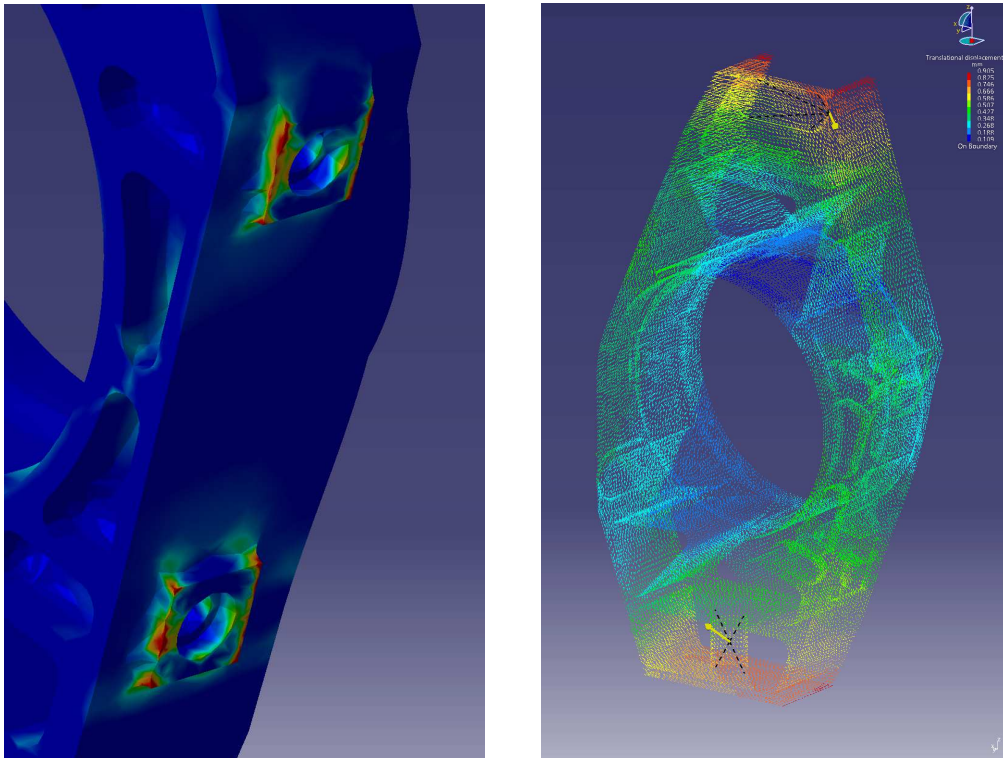
Yksinkertaistettuna lujuuslaskennassa suoritetaan ensin laskenta, jonka perusteella muutetaan mallia. Tätä toistetaan kunnes tulos tyydyttää. Laskenta-muutostoistoja tehtiin olka-akselia suunnitellessa kymmenittäin. Mitään lukua asiasta ei pidetty. HPF014:n

olka-akseliin tehtiin melko paljon muutoksia lujuuslaskennan aikana (kuva 31). Suurin osa muutoksista tapahtui jarrusatulan kiinnityksen alueella, mutta myös huomaamattomammilla muutoksilla on ollut selkeitä vaikutuksia alueellisten jännitysten suuruuteen.



Kuva 31. Olka-akseli ennen ja jälkeen lujuuslaskentaa.

Olka-akselin tapauksessa suurimmat jännitykset pyrittiin pitämään noin 100 MPa:ssa. Valmistusmateriaaliksi oli valittu muottialumiini, jonka myötölujuus on noin 500 MPa. Kappale on mitoitettu enemmänkin väsymiskestävyyden kuin lujuuden suhteen (Blundell 2007: 149; Milliken 1995: 833–839, 372). Lujuuslaskentamallissa havaittiin kuitenkin pistemäisiä, hyvin suuria, jopa tuhansien megapascalien jännityksiä, jotka jätettiin huomiotta. Huomiotta jättämisen syynä oli ohjelman osoittama samaan kohtaan kohdistuva hyvin suuri virhearvio. Myös virtuaaliosien kiinnityspintojen reunoihin muodosti pistekuorimituksia, jotka jätettiin huomiotta. (Kuva 32.) Muodonmuutosten suuruudet kertovat kappaleen jäykkyydestä. Palloniveliä kiinnityspisteiden siirtymiksi laskentaohjelmisto laski suuruusluokaksi 0,5 mm (kuva 33). Mallin keskimääräisen virheen suuruudeksi hyväksyttiin 5 prosenttia.



Kuvat 32 ja 33. Virtuaaliosan aiheuttamia pistejännityksiä ja kappaleen siirtymiä.

2.5 Koneistus

Valmistustekniikaksi valittiin koneistus jo suunnittelun aluksi. Olka-akseli olisi voitu valmistaa myös valamalla, hitsaamalla tai AM-menetelmiä hyväksikäyttämällä. Koneistukseen päädyttiin suurelta osin kustannussyistä, sillä osat eivät mahdollisesti tulisi maksamaan kuin oman työpanoksen verran. Hitsaamalla olisi myös voitu päästä edulliseen ratkaisuun, mutta hitsaamalla valmistetun osan onnistumista epäiltiin ylipäänsä. AM-menetelmällä valmistetun osan rakenne olisi voitu suunnitella vapaammin, mutta osa olisi tullut liian kalliiksi, minkä lisäksi osan toimitusaika olisi voinut olla hallitsematon. Valettu osa olisi ollut myös yksi mahdollinen vaihtoehto, mutta yksittäiskappaleen valmistuksesta kiinnostunutta valimoa ei löytynyt. Koneistuksessa nähtiin edullisuuden lisäksi myös muita hyviä puolia. Yksi hyvä puoli oli, että osien valmistusaikataulu olisi itsestä kiinni. Lisäksi koneistuksen puolesta puhui se, että myös hitsatut, valetut ja pikamallinnetut osat vaatisivat jonkin verran koneistusta valmistuakseen. Koneistetuista olka-akseleista oli myös aikaisempaa kokemusta.

Tämän opinnäytetyön eräänä osana oli opetella käyttämään uusia koneistusohjelmia sekä laitteita. Itselläni oli aikaisempaa kokemusta koneistuksesta, mutta pääosin sorvaamisesta. Minulla oli myös hieman kokemusta Quaser-merkkisen koneistuskeskuksen käytöstä ja Mastercam-ohjelmistosta. Opinnäytetyön puitteissa opettelin Delcam-ohjelmiston käyttöä sekä HAAS UMC-750 -mallisen koneistuskeskuksen käyttöä. Metropolia Motorsportilla on Mastercam-ohjelmiston käyttöoikeus ja Metropolia Ammattikorkeakoululla on opetuksessa käytetyn Delcamin käyttöoikeudet. Osan valmistumisen kannalta olisi ollut parempi, jos olisi käytetty Mastercam-ohjelmistoa ja Quaseria, mutta oppimisen kannalta päädyin Delcamiin ja HAASiin.

Olka-akselien valmistusmateriaaliksi valittiin muottialumiini. Tähän päädyttiin lähinnä siitä syystä, että muottialumiinit ovat suurlujuuksisia ja koneistettavuudeltaan parhaita. Muottialumiinit ovat kilohinnaltaan arvokkaita, mutta Alumeco Oy:ltä saatiin Hokotol-nimikkeellä myytävää muottialumiinia tuotetukena. Aihion paino oli noin 5 kg, jolloin ostohinnaksi olisi tullut noin 70 euroa ottaen huomioon vain kilohinnan eikä sahaus- ja toimitusmaksuja.

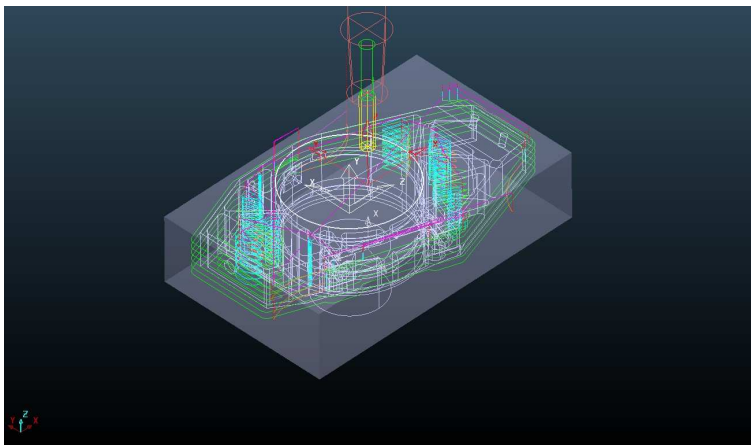
Koska itselleni tuli henkilökohtaisia esteitä kevään 2014 aikana, en osallistunut HPF014-auton valmistukseen enkä valmistanut olka-akseleita tuolloin. Keväällä 2014 olka-akselit valmisti loppujen lopuksi Timo Elonen Metropolian laitteistolla. Syksyllä 2014 opettelin kuitenkin sekä Delcam-ohjelmiston että koneistuskeskusten käyttöä ja valmistin yhden vasemmanpuoleisen olka-akselin itselle opiksi sekä tätä opinnäytetyötä varten. Tämä opinnäytetyö selostaa olka-akselin valmistusta siinä muodossa kuin se tapahtui minun tekemänäni.

Olka-akselien koneistusvaihe aloitettiin Delcam Powermill -ohjelmiston opettelulla. Delcam-ohjelmistossa on kääntämisominaisuus, jonka avulla Catia-malli voidaan tuoda suoraan Delcamiin. Koulun opetusmateriaalista sain perustietoja, mutta koneistusratojen luominen tapahtui pääosin yrityksen ja erehdyksen kautta. Erilaisia radanluontistrategioita on Delcamissa kymmeniä. Strategiat jaetaan karkeasti 2,5D-, 3D-, poraus- ja viimeistelystrategioihin, mutta on myös erillinen siipipyörien koneistusstrategia. Suurimman osan olka-akselin muodoista olisi pystynyt tekemään 2,5D-strategiolla, mutta 3D-strategioita käytettiin kokeilumielessä, vaikka aitoja 3D-ajoja ei tehtykään.

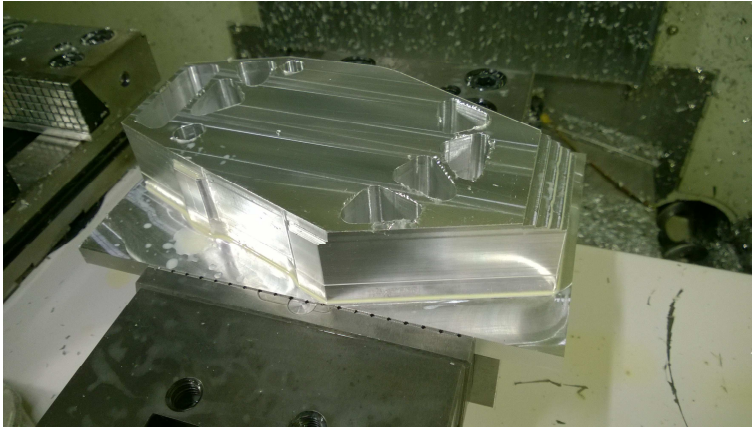
Kappaleen kiinnitystapa koneistamista varten oli hankala päättää. Kiinnitys vaikuttaisi suurelta osin siihen, millaisia ratoja koneistuksessa käytettäisiin. Erillisiä kiinnityskertoja

haluttiin vähän. Lopulta päädyttiin suunnitelmaan, jossa olisi kolme eri kiinnitystä. Ensin kappaleen toinen puoli koneistettaisiin Quaserilla ja kiinnitys tehtäisiin ruuvipuristimella. Loput sivut ja yksityiskohdat, kuten ruuvinreiät, koneistettaisiin HAASilla ja kiinnitys tapahtuisi erillisen koneistetun kiinnitys- ja kohdistuskappaleen avulla. Lopuksi pyöräläakerien pesät sorvattaisiin lopulliseen mittaansa pehmeitä leukoja käyttäen. Näin ajateltiin, että kiinnityksistä tulisi mahdollisimman tukevia ja kohdistus tapahtuisi parhaalla mahdollisella tavalla. Koneistussuunnitelmaa pohdittaessa otettiin huomioon myös se, että materiaalissa saattaa olla sisäisiä jännityksiä, jotka saattavat muuttaa kappaleen muotoa samalla kun materiaalia poistetaan. Tästä syystä laakeripesien sorvaus jätettiin viimeiseksi.

Ensimmäisen vaiheen koneistus tehtiin siis Quaser-työstökeskuksella. Tähän ratkaisuun päädyttiin siksi, että Quaseriin oli helpompi kiinnittää iso kappale, sillä HAAS työstökeskukseen on kiinnitetty Gerardin pienehkö ruuvipuristin, jota ei haluttu irrottaa. Työkaluina käytettiin sekalaisia jyrshintappeja ja pääosin lämpösovitteellisia työkalunpitimiä. Työstöarvoja haettiin Sandvik Coromantin ohjekirjasta (Tekninen käsikirja Sandvik Coromant 2010.) Kuvassa 34 näkyy olka-akselin rouhintatyöstörata, jossa aihioista poistetaan melko paljon materiaalia ja kappaleen muoto alkaa hahmottua. Kuvassa 35 on kappale saman työstön jälkeen. Laakeripintoja lukuun ottamatta kappaleen toinen puoli koneistettiin valmiiksi 30 mm:n syvyyteen. Kappaleessa olevia poteroita ei voitu jyrsiä läpi asti yhdeltä puolelta, koska jyrshintappien pituus ei ollut riittävä. Ensimmäisen vaiheen lopuksi työkappaleeseen porattiin 16 mm:n reikä sekä reikä kohdistustappia varten.

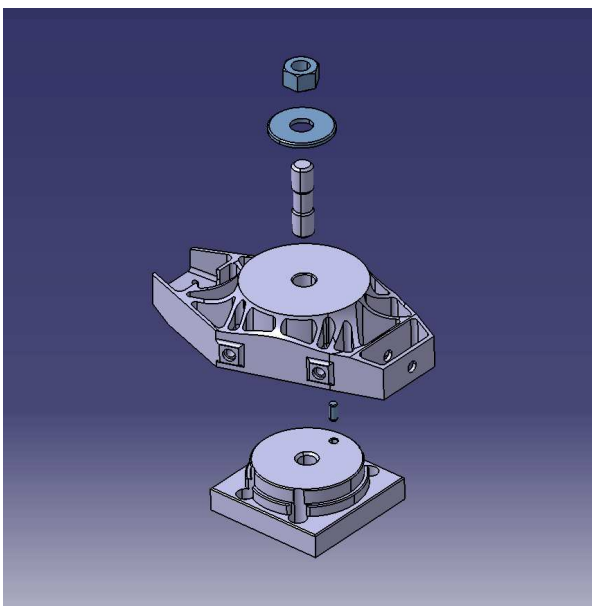


Kuva 34. Olka-akselin rouhintatyöstörata.



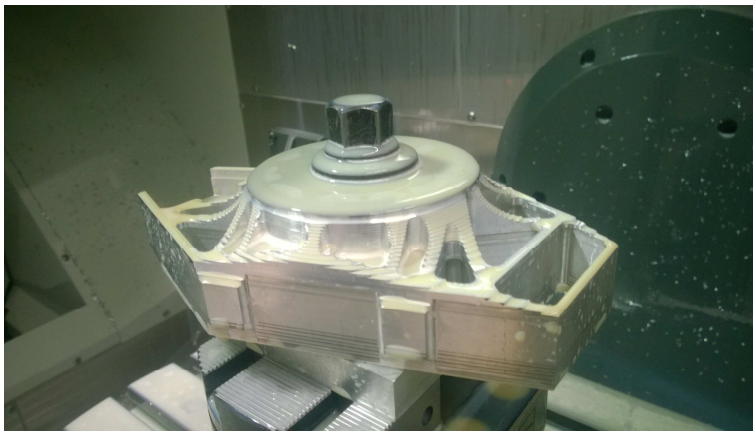
Kuva 35. Olka-akselin aihio rouhinnan jälkeen.

Toisen vaiheen koneistuksia varten piti tehdä erillinen kiinnityskappale. Oli tärkeää, että työkappale saatiin kiinnitettyä juuri oikeaan asentoon. Koska ensimmäisessä vaiheessa poteroiden seinämiin ei jätetty työvaraa, oli toisessa vaiheessa jyrstävien poteroiden osuttava tismalleen oikein. Mikäli kiinnitys olisi virheellinen, jäisi poteroiden seinämiin pykälät. Kiinnityskappaleen ideana oli, että sen sylinteripinnat olisivat kevyellä ahdistusovitteella työkappaleeseen ja että kohdistustappi pitäisi huolen kappaleen asennosta Z-akselin ympäri. Tukeva M16-vaarnaruuvi pitäisi paketin koossa. (Kuva 36.) Kiinnityspala koneistettiin siten, että sen keskiakseli tuli samaan kohtaan työstökeskuksen C-akselin kanssa, eikä sitä irroitettu missään vaiheessa.



Kuva 36. Toisen vaiheen kiinnitys.

Toisen vaiheen koneistukset tehtiin HAAS UMC-750 -koneistukeskuksella. Tässä vaiheessa jyrättiin kappaleen toisen puolen muodot sekä porattiin kaikki reiät. Toisen puolen laakeripesää ei kiinnityksen takia voitu jyrätä vielä tässä vaiheessa. Koska HAAS on 5-akselinen työstökeskus, voitiin hyödyntää B- ja C-akselien kääntöjä ja kaikki poraukset saatiin tehtyä yhdellä kiinnityksellä. Näitä porauksia olivat jarrusatulan pulttien reiät, jotka myös kierteytettiin, palloniveliä kiinnitysreiät, kääntövarren kiinnitysreiät sekä pyörintänopeusanturin reikä. (Kuva 37.)



Kuva 37. Olka-akseli ennen viimeistelyä.

Viimeisessä vaiheessa sorvattiin laakeripesät lopulliseen mittaansa. Koska ensimmäisessä vaiheessa laakeripesään oli jätetty runsaasti materiaalia kiinnitystä varten, piti ylimääräinen rouhia ensin pois ja lopulta sorvata laakeripesät lopulliseen mittaansa. Sorvaus tehtiin Mazak-automaattisorvilla ja kiinnitystä varten sorvattiin pehmeät leuat. Laakeripesien pyöreys tarkastettiin kolmipistemikrometrillä.

3 Pohdintaa

3.1 Pohdintaa mallinnuksesta

Mallinnuksen ehdottomana hankaluutena oli osakokonaisuuden alituinen muuttuminen. Mallinnustyössä aika ei kulu yhden 3D-mallin tekemiseen vain sen alituisen muuttamiseen ja osakokonaisuuden toiminnan varmistamiseen. Olka-akselin mallinnuksen kannalta tälle asialle ei voitu tehdä paljon muuta, kuin yrittää tehdä mallista mahdollisimman joustava muutosten suhteen. Mielestäni onnistuin tässä melko hyvin, eivätkä lopulliseen malliin tehtävät maltilliset muutokset riko mallia mitenkään. Malliin oli myös helppo tehdä nopeita muutoksia lujuuslaskennassa havaittujen ongelmien pohjalta.

Mielestäni mallin muoto onnistuttiin saamaan melko yksinkertaiseksi. Kappaleen muodot saatiin tehtyä pääosin kahdella piirroksella, joskin näiden kahden lisäksi tarvittiin muutamia piirroksia kiinnitysreikien ja joidenkin yksityiskohtien tekemiseen. Malli voitaisiin tehdä vielä yksinkertaisemmin, jos mallinnusohjelman ominaisuuksia osaisi käyttää tehokkaammin. Annetulla aikataululla ja taitojen lähtötasolla kappaleesta tuli kuitenkin toimiva. Alusta asti oli ollut selvää, että olka-akselin täytyy valmistua aikataulussa. Aikataulussa pysyttiinkin melko hyvin.

Mallin muodot yritettiin suunnitella siten, että ne olisi mahdollisia koneistaa 3-akselisella työstökeskuksella. Mielestäni tässä tavoitteessa onnistuttiin hyvin.

Jos vielä muuttaisin tässä kappaleessa jotakin kuitenkaan suunnittelematta sitä kokonaan uudelleen, lisäisin kevennyksiä ripojen liitoskohtiin. Olka-akselissa olevien ripojen kiinnityskohdista voisi mielestäni poistaa materiaalia kappaleen merkittävästi heikentyttä. Materiaalin poistaminen kappaleen ulkoreunoilta onnistuisi melko helposti koneistamalla. Koska alumiini menettää lujuuttansa jo melko alhaisissa lämpötiloissa, on jarrulevyn sijoittaminen lähelle olka-akselia melko arveluttavaa. Jälkikäteen ajateltuna siirtäisin jarrusatulan kiinnityskorvakkeet lähemmäs kappaleen reunaa ja yrittäisin kompensoida menetetyt jäykkyyden lisäämällä materiaalia. Jarrusatulan kiinnityspintojen korotukset voisi myös jättää tekemättä ja korvata ne jonkinlaisilla holkeilla.

Suunnitteluprosessin aikana pyörän navasta muotoutui melko pitkä, ja samalla olka-akselissa olevat pyöränlaakerit siirtyivät kohti auton keskilinjaa. Tämä aiheutti lopputuloksen, jossa pyörän napa osui ohjausliikkeiden johdosta työntötankoon. Kosketus johtui osittain myös siitä, että pyörän napaa oli muutettu vielä olka-akselin suunnittelun jälkeenkkin. Jos laakereita olisi siirretty ulospäin, olisi vastaavasti myös jarruja jouduttu siirtämään. Vanteen ET-mitta ja raideleveys olisi voitu pitää samana, jos napaa olisi lyhennetty laakerien siirtoa vastaava matka. Väistämätön lopputulos olisi ollut, että jarrulevy olisi siirtynyt lähemmäs vanteen keskiötä. Toisaalta jarrujen siirto olisi kuitenkin lisännyt lämpökuormitusta vanteeseen.

Lopullisessa mallissa on joitakin kohtia, kuten yläpallonivelen kiinnityksessä, joihin voisi sanoa unohtuneen materiaalia. Tällaisilla paikoilla tarkoitan kohtia, joista olisi voinut poistaa materiaalia ilman, että lujuus tai jäykkyys olisi kärsinyt.

3.2 Pohdintaa lujuuslaskennasta

Lujuuslaskennalle asetettuja tavoitteita ei täytetty mielestäni kovinkaan hyvin. Esimerkiksi Ansys- tai Abaqus-laskentaohjelmien opettelu jäi toteutumatta. Aikataulullisesti ei ollut mahdollista opiskella tietokoneavusteista lujuuslaskentaa, eikä suoritettun lujuuslaskennan laadusta ole varmuutta.

Catian omaa lujuuslaskentaohjelmistoa käytettiin, koska itselläni oli hieman perusteita sen käytöstä. Metropolia Motorsportilla oli myös dokumentteja siitä, miten lujuuslaskentaa oli aikaisemmin suoritettu vastaaville osille. Näistä dokumenteista havaittiin, että lujuuslaskennan laatu oli ollut siinä määrin heikkoa, että pelkästään niissä tehtyjen suoranaisten virheiden korjaamisella saataisiin aikaiseksi positiivista kehitystä.

Olka-akseliin kohdistuvia rasituksia arvioitiin siten, että ajoneuvo voisi saavuttaa yhtäaikaisesti suurimman mahdollisen pitkittäis- ja sivuttaiskihtiyyden. Laskenta, jota käytettiin, ei vastaa todellisuutta, sillä rengas voi tuottaa maksimaalisen kitkavoiman vain yhteen suuntaan kerrallaan (Milliken 1995: 57–59). Tämän yksinkertaistuksen summana on kuitenkin vain lisääntynyt varmuuskerroin. Toisaalta paremmin todellisuutta vastaavalla laskennalla voitaisiin suunnitella kevyempi osa.

Valmistusmateriaalina käytetyn muottialumiinin myötölujuus on noin 500 MPa. Lujuuslaskennassa kappaleesta pyrittiin muotoilemaan sellainen, että maksimijännitykset pysyisivät noin 100 MPa:n suuruusluokassa, jolloin varmuuskerroin olisi noin viisi. Varmuuskerroin kuitenkin pienenee nopeasti jo melko matalissa lämpötiloissa. Olka-akseliin kohdistuvista lämpörasituksista ei kuitenkaan ollut mitään dataa.

Ei voida tulkita, että olka-akseliin kohdistuisi vain staattista kuormitusta, mutta siihen ei kohdistu myöskään vastaava vaihtojännitystä kuin pyöriviin akseleihin. Vaihteleva jännitys aiheuttaa kuitenkin kappaleen väsymistä nopeammin kuin staattinen. Tämä oli yksi syy siihen, että varmuuskerroin myötörajaan haluttiin pitää suurena. Olka-akselin jäykkyydelle on myös vaatimuksia, vaikka mitään numeerisia tavoitteita ei osattu määrittää. Verrattuna HPF013:n olka-akseliin HPF014:n olka-akselin palloniveliin siirtymät puolituitivat vastaavilla voimilla. Tässä kohtaa tulee kuitenkin ottaa huomioon, että HPF013e:n olka-akseli on ulkomitoiltaan suurempi.

Lujuuslaskennan luotettavuutta alentaa muun muassa se, että lujuuslaskentamallin luomisessa sovellettiin ohjelman ominaisuuksia, joita ei täysin ymmärretty. Esimerkiksi virtuaaliosien tarkkoja ominaisuuksia ei tiedetty. Kappaleeseen tehtiin myös joitakin apupintoja virtuaaliosien kiinnittämiseksi, eli kappale jolle lujuuslaskenta tehtiin, ei ollut täysin vastaava kuin todellinen osa. Todellisuudessa esimerkiksi jarrusatula on kiinni olka-akselissa pulttiliitoksilla sekä lisäksi kohdistustapeilla. Pulttiliitos käytännössä puristaa kappaleet toisiaan vasten ja kitka huolehtii, etteivät kappaleet liiku toisiinsa nähden. Pintoihin kohdistuu siis puristusta. Lisäksi tässä tapauksessa kappaleita pitää paikoillaan myös lukitustapit. Kaiken tämän lisäksi pulttiliitoksessa muodostuu kierteeseen leikkausjännitystä. Lujuuslaskennassa kaikki äsken mainitut pelkästään jarrusatulan kiinnitykseen liittyvät asiat yksinkertaistettiin johonkin tuntemattomaan ohjelmassa tapahtuvaan asiaan. Lujuuslaskentaohjelmiston tulosten tulkintaan käytettiin omaa harkintaa. Pistemäisiä rasituksia jätettiin huomiotta, jos samalle alueelle sijoittui myös suuri virhearvio. Huomiotta jätettiin myös jännityspiikit virtuaalisten osien kiinnityksissä.

Laskentamallin tuloksista voidaan havaita, että suuri osa kappaleesta on hyvin kevyesti rasittunut. Toisaalta kappaleen epäjatkuvuuskohtiin syntyy pistemäisiä jännityskohtia. Kevyesti rasittuneisiin kohtiin täytyy toisinaan jättää materiaalia, jotta kappaleen valmistaminen olisi helpompaa. 3D-mallin muuttamisessa käytin ohjenuorana ajatusta siitä, että jos jossakin kohdassa esiintyy liian suuria jännityksiä, se tarkoittaa sitä, että jossakin

toisessa kohdassa jännitystä on liian vähän. Toisin sanoen jos jokin osuus on liian jäykkä, jokin toinen osuus joustaa senkin puolesta. Jännitykset täytyy ikään kuin tasata.

Koska käytetyn muottialumiinin lujuus laskee melko matalissa lämpötiloissa, voitaisiin jatkossa harkita paremmin lämpöä kestäväää laatua. Esimerkiksi Weldural-seos on lujuusominaisuuksiltaan riittäväää, mutta sen lämmönkesto on parempi.

3.3 Pohdintaa koneistuksesta

Tämän opinnäytetyön puitteissa piti myös valmistaa olka-akselit HPF014-kilpa-autoon. Henkilökohtaisista syistä näin ei kuitenkaan tapahtunut, vaan olka-akselit koneisti Timo Elonen. Opinnäytetyön suunnitelmaan kuului Delcam PowerMill -ohjelmiston ja HAAS-työstökeskuksen käytön opettelu. Koska halusin oikeasti oppia käyttämään kumpaakin, suhtauduin olka-akselin valmistukseen opettelun kannalta. Tästä syystä olka-akselin koneistusosuus vei huomattavasti enemmän aikaa kuin se varsinaisen kilpurin valmistuskauden aikana olisi saanut viedä.

Koska koneistuskeskus on arvokas laite, koneistuksessa noudatettiin mitä suurinta varovaisuutta. Erilaisia koneistusstrategioita kokeiltiin myös puhtaasti oppimisen kannalta. Lastuaminen olisi voinut olla rohkeampaa, mutta kappaleesta haluttiin saada tarkasti oikeanlainen. Vahingossa väljäksi mennyttä laakeripesää ei olisi voinut korjata, ja kaikki siihen mennessä tehty työ olisi menetetty. Olka-akselia koneistaessa sattui yksi virhe, joka olisi voinut pilata koko kappaleen. Viimeistä laakeripesää sorvattaessa ei ollut varmaa, kuinka suurta leukapainetta voi käyttää, ja jo miltei valmis kappale irtosi sorvinleuoista ja jäi pyörimään sorvauspuomin ympärille. Tämä aiheutti joitakin pieniä kosmeettisia virheitä. Jotkin kappaleeseen syntyneet koneistusvirheet olisi ehkä voinut välttää, jos olisi enemmän rutiinia laitteiden käytöstä. Esimerkiksi jarrusatulan kiinnityksen korotuksiin tuli pienet lovet, koska rouhinnassa työkalun pituuskompensointi oli liian pitkä.

Kappaleen kiinnittäminen koneistuksen aikana on asia, johon olisi kannattanut kiinnittää enemmän huomiota jo suunnittelun aluksi. Nyt kului paljon aikaa kappaleen kiinnittämisen miettimiseen ja toteuttamiseen. Kiinnitys oli kriittinen siitä syystä, että kappaleessa oli paljon pintoja, jotka piti koneistaa kahdesta suunnasta, eikä niiden väliin saanut jäädä

pykälää. Tässä onnistuttiin hyvin, toisin sanoen kiinnitys- ja paikoitusratkaisu oli onnistunut. Toisen vaiheen kiinnitystä olisi kuitenkin voinut parantaa käyttämällä useampaa kohdistustappia.

Koneistettavuuden kannalta kappale jätti kaikesta suunnittelusta huolimatta toivomisen varaa. Tulevaisuudessa harkitsisin mahdollisuutta suurentaa X- ja Y-suunnassa jyrstävien pyöristysten suurentamista. Joitakin muotoja voisi myös yrittää yksinkertaistaa.

Kappaleeseen haluttiin myös hyvä pinnanlaatu. Onnistuin tässä mielestäni kohtalaisesti. Käsien viimeisteltäviä pintoja jäi, mutta jälki oli parempaa kuin joinakin aikaisempina vuosina. Parhaassa tapauksessa tarvittava käsien viimeistely vie ainoastaan minuutteja, mutta jos kappale tai työkalut pääsevät värähtelemään pahoin, saattaa yhden olka-akselin käsien viimeistelyyn kulua kokonainen päivä.

Lopputuloksen mittatarkkuuden tarkasteluun olisi voinut käyttää enemmän aikaa. Tärkeimmät mitat olka-akselissa ovat laakeripesien halkaisijat, niiden samankeskeisyys ja samansuuntaisuus. Koneistuksessa nähtiin paljon vaivaa, jotta lopputulos olisi näiltä osin mahdollisimman hyvä, mutta niitä ei ole varmistettu mitenkään.

3.4 Olka-akselin toiminta käytössä

HPF014 Formula Student -auto ei koskaan valmistunut kokonaisuudessaan, eikä siitä koskaan tullut ajokelpoista. Olka-akselien koeponnistus jäi siis tekemättä.

Lähteet

Aurora Bearing company PWB-5TG. Verkkodokumentti. Aurora bearing company <<http://cad.aurorabearing.com/item/products-commercial-spherical-bearing-english-units/pwb-tg-pwb-t-series-spherical-bearings-ptfe-lined/pwb-5tg-2>>. Luettu 10.11.2014.

Bastow D., Howard G. & Whitehead J. 2004. Car Suspension and Handling. Warrendale, PA: SAE international.

Blundell M. & Harty D. 2007. The Multibody Systems Approach to Vehicle Dynamics. Burlington MA: Butterworth-Heinemann.

Dixon, J. C. 1996. Tires, Suspension and Handling. Warrendale, PA: SAE international.

Formula SAE rules 2014. 2013. Verkkodokumentti. fsonline. <<http://www.fsaeonline.com/page.aspx?pageid=e179e647-cb8c-4ab0-860c-ec69aae080a3>>. Luettu 15.9.2013.

Gillespie, T. D. 1992. Fundamentals of Vehicle Dynamics. Warrendale, PA: SAE international.

Reimpell J., Stoll H. & Betzler J. W. 2001. The Automotive Chassis. Woburn, MA: Butterworth-Heinemann.

Happian-Smith, Julian. 2004. An introduction to Modern Vehicle Design. Burlington, MA: Butterworth-Heinemann.

Ketonen, Markus. 2014. Formula SAE -kilpa-auton alumiini- ja komposiittivanteiden suunnittelu. Insinööriyö. Metropolia Ammattikorkeakoulu.

Milliken W. & Milliken D. 1995. Race Car Vehicle Dynamics. Warrendale, PA: SAE international.

Molding & Tooling Aluminium Weldural & Hokotol. 2012. Aleris international inc. Verkkodokumentti. <http://www.aleris.com/sites/default/files/ALERIS_Molding_Tooling_Aluminium_Weldural_Hokotol_Brochure_Issue_%207-12_en_websafe.pdf>. Luettu 10.11.2014.

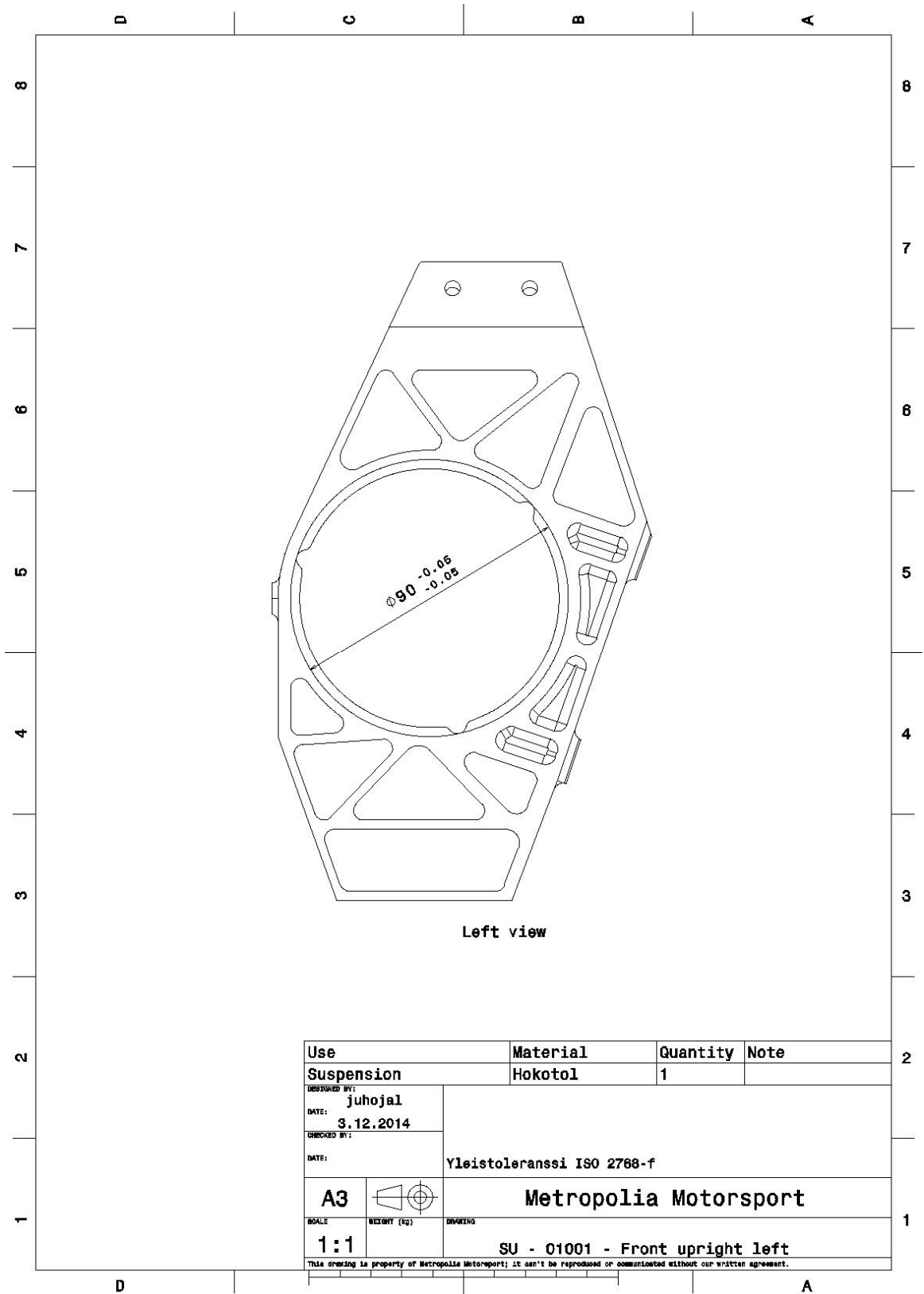
Rolling Bearings. 2008. Schaeffler Group Industrial.

Smith, Carroll. 1978. Tune to Win. Fallbrook, CA: Aero Publishers, inc.

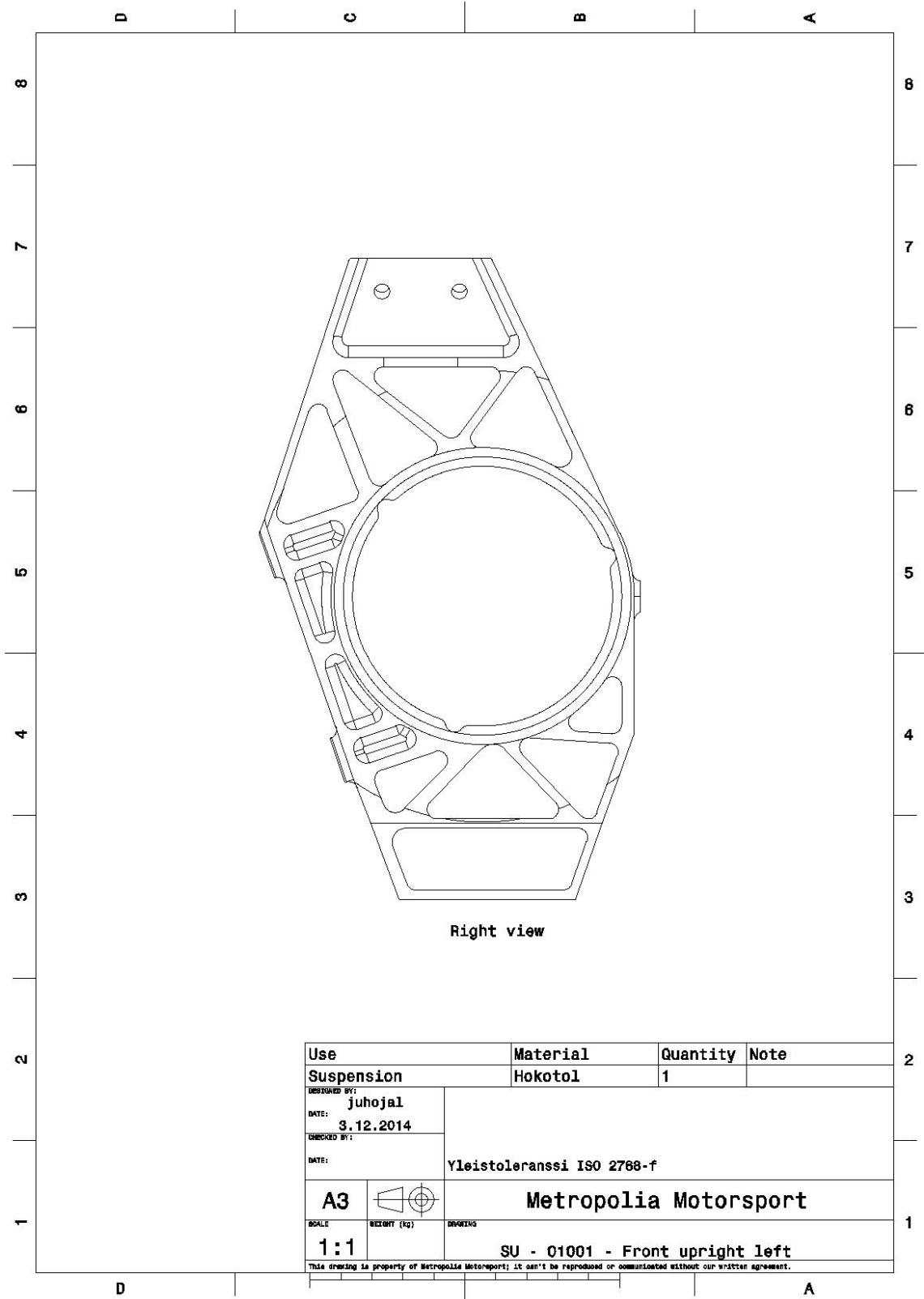
Tekninen käsikirja Sandvik Coromant. 2010. Sandvik Coromant AB. Ruotsi.

Valtanen, Esko. 2010. Tekniikan taulukkokirja. Mikkeli: Genesis-Kirjat Oy.

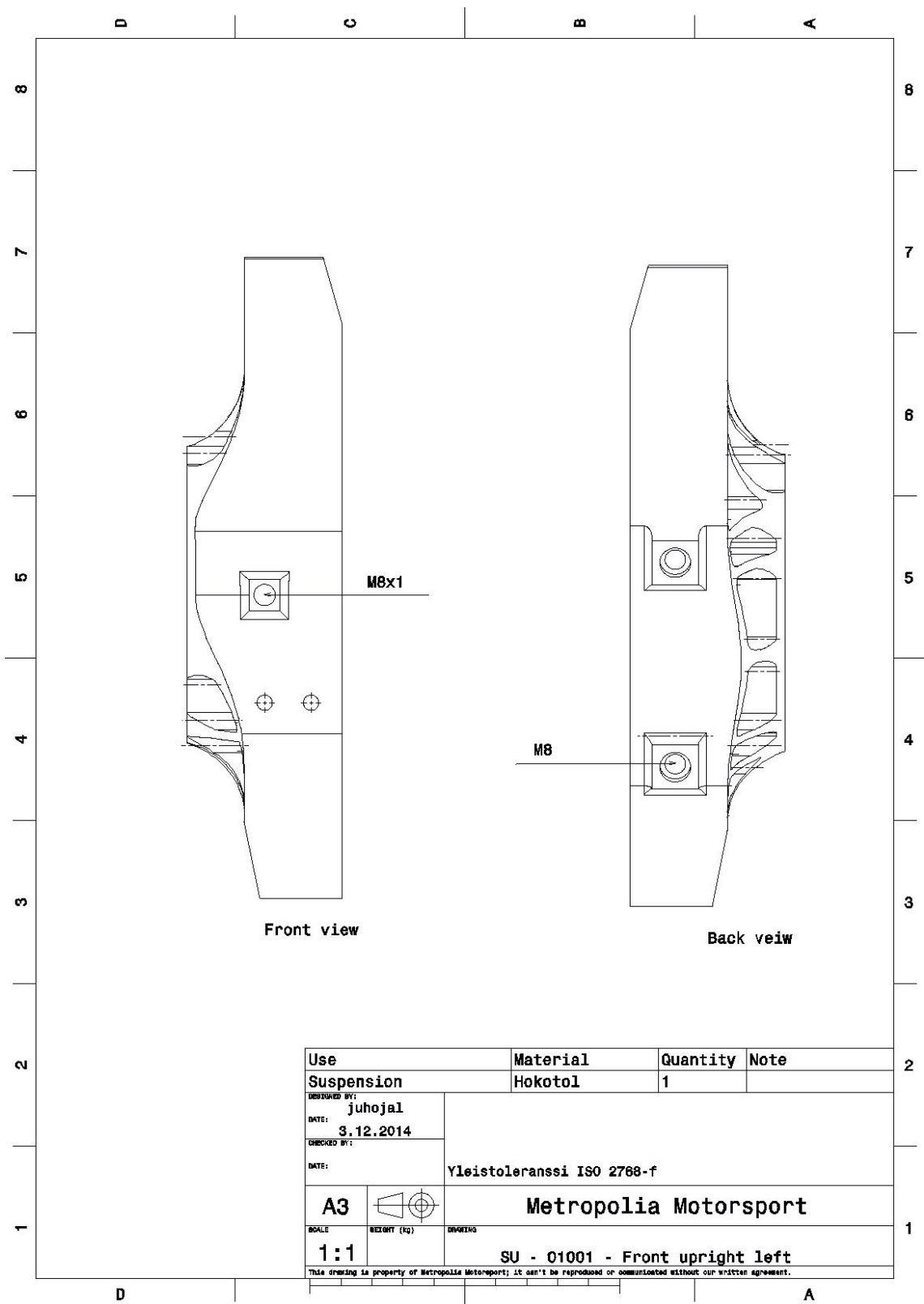
Työkuva 1



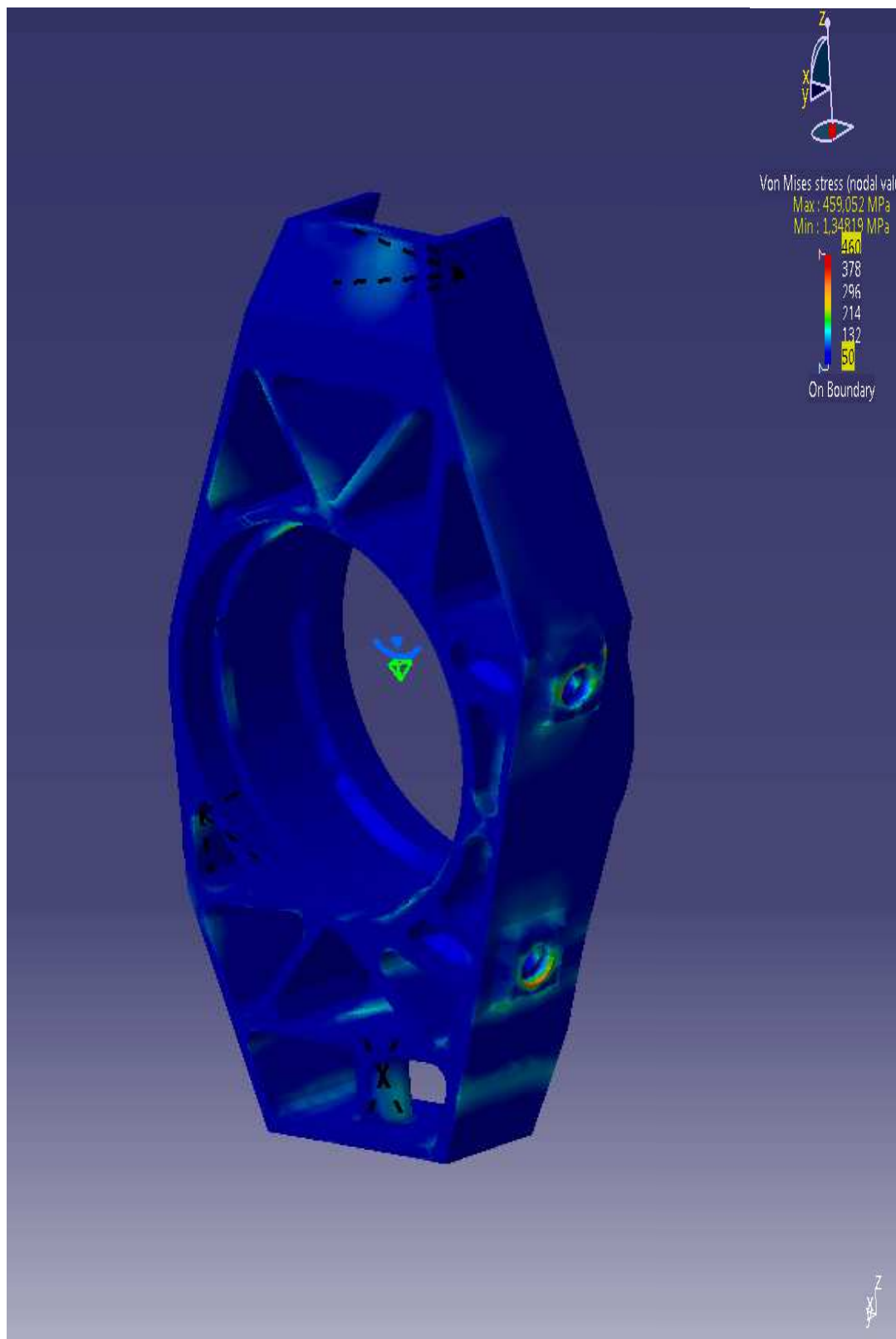
Työkuva 2



Työkuva 3



Catia FEM kuva 1



Catia FEM kuva 2

