

TAMPEREEN AMMATTIKORKEAKOULU
Auto- ja kuljetustekniikka koulutusohjelma
Auto- ja työkonetekniikka

Tutkintotyö

Marko Mäntyniemi

FORMULA STUDENT -PROJEKTI

Runkosuunnittelu

Työn ohjaaja
Työn teettäjä
Tampere 2008

Tekn. lis. Tauno Kulojärvi
TAMK Formula Student RY

TAMPEREEN AMMATTIKORKEAKOULU

Auto- ja kuljetustekniikka

Auto- ja työkonetekniikka

Mäntyniemi, Marko

Formula Student -auton rungon suunnitteleminen

Tutkintotyö

44 sivua, 8 liitettä

Työn ohjaaja

Tekn. Lis. Tauno Kulojärvi

Työn teettäjä

TAMK Formula Student RY

Huhtikuu 2008

Hakusanat

rungon suunnittelu, formula student, kilpa-auto, lujuuslaskenta

TIIVISTELMÄ

Työn tarkoituksena on ollut suunnitella ja valmistaa Formula Student -auton runko, kiinnittäen erityisesti huomiota rungon keveyteen, kestävyteen ja tarkoituksenmukaisuuteen. Formula Student -kilpailuluokka on kansainvälinen insinööri- ja yliopisto-opiskelijoille tarkoitettu auton suunnittelu- ja toteutuskilpailu. Kilpailuissa arvostellaan auton suunnitteluratkaisuja, kustannustehokkuutta, suorituskykyä ja polttoainetaloutta.

Työ aloitettiin package layout -suunnitelman tekemisellä, jossa tärkeimmät pääkomponentit sijoitettiin suunnitelluille paikoille ja runko mallinnettiin osien ympärille. Rungon mallinnuksessa pyrittiin huomioimaan kaikkien komponenttien kiinnitykset runkoon ja eri osien vaatima tilantarve, jotta suunnittelua ei tarvitse tehdä enää valmistusvaiheessa. Rungon kestävyys erilaisissa ajotilanteissa ja mahdollisissa onnettomuustilanteissa varmistettiin lujuuslaskennalla, jossa keskityttiin saamaan rakenne samalla kevyeksi ja kestäväksi. Lujuuslaskentaan käytettiin paljon aikaa, sillä se mahdollisti rungon keventämisen kestävyuden kuitenkin kärsimättä.

Lopullisten suunnitelmien perusteella valmistettiin Formula Student -auton runko, joka täyttää sille asetetut vaatimukset. Autolla tullaan osallistumaan 2008 heinäkuussa Silverstonessa järjestettäviin Formula Student -kilpailuihin. Työstä on toivottavasti apua tulevia kilpa-autoja suunnitteleville insinööriopiskelijoille.

TAMPERE POLYTECHNIC

Automobile and Transport Engineering

Automobile and Off Road Vehicle Engineering

Mäntyniemi, Marko Formula Student -car frame desing

Engineering Thesis 44 pages, 8 appendices

Thesis Supervisor Lic. Tech. Tauno Kulojärvi

April 2008

Keywords frame, frame design, racecar, formula student

ABSTRACT

The main purpose was to design a light, torsionally stiff and safe Formula Student car's frame structure. The Formula Student competition class is a global engineering and driving competition. In the competition judges estimate design, cost effectiveness and performance of the car. The design starts with drafting a package layout plan of the car. The frame was designed to be a natural attachment place for all of the main components. It is assured that the frame endures all possible loadings by using strength analysis. When computing strength analysis, the main focus was in five main areas: front impact crash, side impact crash, torsional stiffness, vibration analysis and different driving situations. The result of the design was a light, suitable and durable frame structure. I hope this work could help new Formula Student car's frame designers.

ALKUSANAT

Tämä työ on osa syksyllä 2006 alkanutta Formula Student -projektia. Projektin tavoitteena on ollut suunnitella ja toteuttaa täysiverinen Formula Student -kilpa-auto. Ensimmäinen tiimin tavoite oli osallistua heinäkuussa 2007 Formula Student -kilpailun kolmosluokkaan suunnitelmien perusteella. Kilpailu antoi hienon kokemuksen kisasta ja sen kovasta tasosta. Kilpailun jälkeen aloitettiin työnimellä FS008 kulkevan auton suunnittelu, jolla osallistutaan ykkösluokkaan heinäkuussa 2008 järjestettävissä Formula Student -kilpailuissa.

Kilpa-auton suunnitteleminen on erittäin haastava prosessi. Suunnittelun lähtökohtien valinta on tehtävä huolella, sillä väärät lähtökohdat johtavat vääjäämättä huonoon lopputulokseen. Työn haastavuudesta kertoo Formula 1 -tiimien erittäin suuri panostus autojen kehitystyöhön. Työmäärä yllätti varmasti koko tiimin ja haluankin kiittää koko tiimiä ja erityisesti moottoripäällikkö Joni Kaiterniemeä ja alustapäällikkö Esa Huhtamäkeä erittäin suuresta panostuksesta projektin eteen. Maarit Piristä haluan kiittää kärsivällisyydestä ja henkisestä tuesta.

Tampereella 23.5.2008

Marko Mäntyniemi

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ.....	2
ABSTRACT	3
ALKUSANAT.....	4
SISÄLLYSLUETTELO	5
1 JOHDANTO.....	6
2 FORMULA STUDENT -KILPAILULUOKKA.....	6
3 FORMULA STUDENT -PROJEKTIN TOTEUTUS	8
4 RUNGON SUUNNITTELUPERUSTEET	12
4.1 Runkomateriaalin valinta.....	12
4.2 Rungon mallinnus.....	13
5 RUNGON LUJUUSLASKENTA	16
5.1 Rungon lujuuslaskenta.....	16
5.2 Kohtisuora törmäystilanne.....	18
5.3 Sivutörmäystilanne	21
5.4 Jarrutustilanne.....	23
5.5 Rungon vääntöjäykkyys	30
5.6 Rungon ominaistuujuudet	31
5.7 Turvavöiden kiinnityslenkit.....	32
6 RUNGON VALMISTUS	35
6.1 Valmistusmenetelmät	35
6.2 Rungon valmistus	36
6.3 Rungon turvavarusteet.....	40
7 PÄÄTELMÄT	43
LÄHTEET	44
LIITTEET	44

1 JOHDANTO

Formula Student -kilpailuluokka on kansainvälinen insinööri- ja yliopisto-opiskelijoille tarkoitettu auton suunnittelu-, valmistus- ja ajokilpailu. Oma vastuualueeni on runkosuunnittelu ja tässä työssä käsitelläänkin Formula Student -auton rungon suunnitteluun, lujuuslaskentaa ja valmistukseen liittyviä asioita.

Työn tarkoituksena on suunnitella ja toteuttaa Formula Student -kilpa-auton runko, joka on kevyt, vääntöjäykkä ja turvallinen. Rungon täytyy toimia myös luontevasti erilaisten osien kiinnityspaikkana, joten rungon rakenteen suunnitteluun kiinnitetään erityistä huomiota. Rungon viimeistelyä ei myöskään käsitellä tässä työssä, sillä se suoritetaan testauksen jälkeen.

2 FORMULA STUDENT -KILPAILULUOKKA

Formula Student/SAE -kilpailuluokka on tarkoitettu insinööri- ja yliopisto-opiskelijoille. Luokka on auton suunnittelu-, rakennus- ja ajokilpailu, joten pelkästään ajokilpailusta ei ole kyse. Kilpailuista käytetään Formula Student -nimeä Euroopan alueella, ja muualla maailmassa Formula SAE -nimitystä. Tässä työssä käytetään Formula Student -nimitystä, koska osallistumme Euroopassa järjestettäviin kilpailuihin. Kilpailuja järjestetään ympäri maailman, ja kisoihin osallistuu satoja eri yliopistoja ja ammattikorkeakouluja. Kilpailuun on tarkat säännöt, jotka löytyvät esimerkiksi internetistä:

<http://students.sae.org/competitions/formulaseries/rules/rules.pdf>

Kilpailu jakautuu selkeästi staattiseen ja dynaamiseen osioon. Staattisessa osiossa arvostellaan auton suunnittelua ja toteutusta sekä kustannustehokkuutta ja esitellään koko projekti. Auton suunnittelusta täytyy osata kertoa erittäin tarkasti ja perustella käytetyt ratkaisut. Auton rakentamiseen käytetylle rahamäärälle on

annettu säännöissä yläraja, ja kustannusanalyysissä arvioidaan, kuinka kustannustehokkaasti auto on suunniteltu ja rakennettu. Viimeisessä staattisessa osiossa yritetään myydä auto kuvitteelliselle ajoneuvovalmistajalle eli auton rakenteet täytyy suunnitella sarjatuotantoa ajatellen. Staattisella osiolla pyritään valmistamaan insinöörioppilaita tulevaisuuden työpaikan haasteisiin.

Dynaamisessa osiossa arvostellaan auton suorituskykyä, polttoainetaloutta sekä kestävyyttä. Suorituskykyä mitataan 75 metrin kiihdytyksellä, vakioympyräkokeella ja aika-ajoilla. Polttoainetaloutta ja kestävyyttä testataan 22 km:n mittaisella kestävyysajolla. Staattisesta ja dynaamisesta osioista on mahdollista saada 1000 pistettä, joiden jakautuminen käy ilmi taulukosta 1.

Taulukko 1 Pisteiden jakautuminen

Tehtävä:	Pisteet:
Auton suunnittelu	150
Kustannusanalyysi	100
Projektin esittely	75
Auton kiihtyvyys	75
Vakioympyräkoe	50
Aika-ajot	150
Kestävyysajo	350
Polttoainetalous	50
Yhteensä	1000

Formula Student -kilpailuluokka jakautuu vielä kolmeen alaluokkaan, joissa kilpaillaan seuraavista asioista:

1. Alaluokka: Vaaditaan kirjalliset osiot (staattinen osio) sekä valmis auto (dynaaminen osio)
2. Alaluokka: Vaaditaan kirjalliset osiot sekä valmiita komponentteja. Valmis runkorakenne on esimerkiksi pakollinen.
3. Alaluokka: Vaaditaan ainoastaan kirjalliset osiot.

Euroopan alueella ainoastaan Englannissa järjestettävässä kilpailussa on mahdollisuus osallistua kaikkiin kolmeen alaluokkaan. Muissa maissa on

mahdollisuus osallistua ainoastaan ensimmäiseen luokkaan. Tuomareina kilpailuissa toimivat autoalan parhaimmat ammattilaiset, Formula 1 -luokasta alkaen. /1/

3 FORMULA STUDENT -PROJEKTIN TOTEUTUS

Formula Student -projekti on Tampereen ammattikorkeakoulun ensimmäinen tämän kilpailuluokan säännöt täyttävä auton suunnittelu- ja rakennusprojekti. Suomessa ainoastaan Helsingin ammattikorkeakoulu on rakentanut Formula Student -autoja aikaisemmin, jo vuodesta 2001 alkaen. Tämä on toinen Tampereen ammattikorkeakoulun autonsuunnittelu- ja -valmistusprojekti, ensimmäinen oli SFR-projekti (tulee englannin kielen sanoista Small Fast Racer eli Pieni Nopea Kilpa-auto), jonka osittain innoittamana lähdimme toteuttamaan omaa projektia. Auton valmistusta rajoittavien sääntöjen ja suunniteluun ja markkinointiin liittyvien raportointien takia oli selvää, että projektista tulisi erittäin laaja ja aikaa vievä.

Formula Student -auton suunnittelu- ja valmistusprojekti käynnistyi marraskuussa 2006. Aloitusvaiheessa tiimiin kuului 12 henkilöä. Projektin toteutuksen suunnittelu aloitettiin tutustumalla SFR-projektiin, johon osallistuneilta saimme hyviä neuvoja hallintaan, osien hankintaan ja muihin käytännön asioihin. Heidän kanssa on tehty yhteistyötä useasti projektin aikana, etenkin osahankintoja tehdessämme. Kävimme myös tutustumassa Helsingissä olevaan toiseen Formula Student -tiimiin, jolta saimme paljon tietoa juuri Formula Student -autosta ja sen säännöistä yms. Tämän tiimin käyttämä aika projektiin ja heidän toimintansa ammattimaisuus on antanut hyvän käsityksen projektiin kuluva ajasta ja vaadittavasta panostuksesta. Helsinkiläisten kanssa on tehty paljon yhteistyötä, etenkin heidän tiimipäällikkönsä Jari Rask on ollut suureksi avuksi. Erilaisiin ongelmiin ja sääntöjen tulkintaan heiltä on saatu paljon apua.

Tutustumiskierroksen jälkeen ymmärrettiin, että toiminnan taustalle tarvitaan järjestäytynyt yhdistys, jotta erilaisten asioiden hoitaminen yksinkertaistuisi. Marraskuussa 2006 pidettiin perustamiskokous ja perustettiin TAMK Formula Student Ry:n. Vastuuhenkilöt valittiin seuraavasti:

- Puheenjohtaja: Maarit Mäkelä
- Varapuheenjohtaja: Miikka Mäenpää
- Sihteeri: Marko Mäntyniemi
- Rahastonhoitaja: Markus Kautiala

Yhdistyksen kautta saatiin avattua Ikaalisten Säästöpankkiin tili, jolloin rahaliikenteen hoitaminen on helpompaa kuin koulun monien portaiden kautta. Lisäksi omat varamme pysyivät näin selvästi erillään tiimin varoista. Projektin alkuvaiheessa aikaa kului paljon yleisten käytännön asioiden järjestelyyn. Samaan aikaan tehtiin myös karkeaa osa-aluejakoa ja päätettiin auton perustiedoista. Autoon tulisi nelisylinterinen 600 kuutioinen moottoripyörän moottori, vannekoko olisi 13”, tehonsiirto toteutettaisiin lukollisella tasauspyörästöllä ja ketjuvedolla. Runkorakenteena käytettäisiin ristikkotyypistä rakennetta. Projekti käynnistyikin nopeasti, sillä oppilaitoksen avustuksella saatiin ostettua Yamaha-merkinen moottoripyörän moottorin, joka oli lähes käyttämätön, koska se oli ollut vain huolto- ja koulutuskäytössä.

Karkean aikataulun laatiminen projektille oli seuraava vaihe. Silloin päätettiin ottaa rohkeasti ensimmäiseksi tavoitteeksi heinäkuussa 2007 Silverstonessa järjestettävät kilpailut ja osallistuminen siellä kolmosluokkaan. Kun kilpailuista tultaisiin takaisin, alkaisi itse auton valmistusvaihe, ja autolla osallistuttaisiin 2008 heinäkuussa olevaan kilpailuun täysimittaisesti ykkösluokkassa.

Samanaikaisesti pohdittiin rahoitusta projektillemme. Päätettiin teettää yrityksiä varten esitteitä, joissa kerrotaan Formula Student -kilpailusta, tiimistä ja sen tavoitteista. Teetettiin myös edustavat tiimipaidat. Näiden avustuksella saatiin

muutamia sponsoreita ja etenkin osahankinnoissa on saatu alennuksia monilta yrityksiltä. Sponsorit on esitelty verkkosivuiltamme www.tamk.fi/formula. Suurimmat avustukset on saatu Henry Ford -säätiöltä, jolta saatiin 6000 euroa toukokuussa 2007 ja K.F. ja Maria Dunderbergin Testamenttisäätiöltä viidelle tiimin jäsenelle 1500 euron stipendit helmikuussa 2008. Näiden avustusten avulla auton rakennuksen budjetti toteutuu. Myös vuodelle 2008 haettiin Henry Ford -säätiöltä apurahaa matkakulujen täyttämiseksi. Oppilaitos on myös luvannut avustaa matkakuluissa. Auton rakennusvaiheessa on saatu avustusta oppilaitokselta materiaali- ja työkaluhankintoihin. Projektin rahoitus on järjestynyt alun vaikeuksien jälkeen melko helposti ja tulevaisuudessa sponsorien saaminen todennäköisesti helpottuu, kun ensimmäisen auto saadaan valmiiksi.

Kevät ja kesä 2007 kuluivat auton suunnitelmia tehtäessä ja kilpailuun valmistauduttaessa. Auton toteutusprojekti jaettiin tarkemmin eri osa-alueisiin ja perustettiin kahden tai kolmen hengen osa-alue ryhmiä, jotka vastasivat näistä. Itse kilpailu osoitti konkreettisesti Formula Student -kilpailuluokan kovan tason sekä suunnitelmien olevan varsin alkuvaiheessa. Kilpailun jälkeen pidettiin hätäkokous, jossa päätettiin aloittaa työnimellä FS008 auton suunnittelu puhtaalta pöydältä ja aivan erilaisella volyyymilla. Aluksi tehtiin tarkka aikataulu ja selvitettiin, mitä erilaisia ohjelmia eri osa-alueet tarvitsevat suunnittelun avuksi ja aloitettiin niiden hankinta. Päätettiin myös ottaa tiimiimme lisää jäseniä syyskuussa, jotta toiminnalle olisi jatkajia ja tiimiin tarvittiin lisää jäseniä suunnittelemaan ja toteuttamaan autoa.

Marraskuussa 2007 tiimiin kuului 13 henkilöä, joista muutama jäi syksyn suunnitteluvaiheessa tiimistä pois. Tiimissä on nyt jokaiselta vuosikursilta jäseniä, mikä takaa toiminnan jatkuvuuden. Osa-aluejako tiimissämme on seuraava:

- Tiimipäällikkö: Maarit Mäkelä
- Tekninen johtaja ja runkosuunnittelu: Marko Mäntyniemi
- Alustan suunnittelu: Esa Huhtamäki, Miikka Mäenpää ja Mikko Taupila
- Moottori: Joni Kaiterniemi, Anssi Alatalo ja Pekka Kilpeläinen
- Voimansiirto: Henri Kuljuntausta ja Mika Paavilainen
- Jarrujärjestelmä: Johannes Salminen
- Sähköjärjestelmä: Sebastian Naumanen
- Internet-sivusto: Jaana Sokka

Auton valmistus ja käytettävien osien hankinta alkoi joulukuussa 2007.

Varsinainen valmistus kuitenkin alkoi vasta maaliskuussa 2008, jolloin auton suunnitelmat olivat lähes valmiit. Auton valmistuminen ajoittuu touko-kesäkuun vaihteeseen 2008, jolloin jää riittävästi testiaikaa, ennen heinäkuun puolessa välissä olevaa Silverstonessa järjestettävää Formula Student -kilpailua.

Projektin suurimpia haasteita ovat olleet realististen aikataulujen tekeminen ja laadittujen aikataulujen noudattaminen. Ongelmia aiheutti tiimin jäsenillä koulun, työnteon ja projektin toteuttamisen yhteensovittaminen. Tiimissä olisi ollut tarvetta markkinoinnin ja tiedottamisen ammattilaiselle, sillä projektin olemassaolo ei ole vielä kukaan yleisesti TAMK:ssa tiedossa, mikä vaikeuttaa muiden asioiden hoitamista. Tietoisuus projektissa on kyllä lisääntynyt selvästi talven ja kevään 2008 aikana. Tulevaisuudessa tiimiin kannattaa hakea osaamista liiketalouden ja markkinoinnin puolelta, jolla parannettaisiin entisestään oppilaitoksen eri osastojen yhteistyötä.

4 RUNGON SUUNNITTELUPERUSTEET

4.1 Runkomateriaalin valinta

Runkomateriaalin valinta aloitettiin tutustumalla huolellisesti Formula Student -kilpailuluokan sääntöihin etenkin rungon osalta. Säännöt ovat erittäin tarkat juuri rungon osalta, mihin vaikuttavat tarkat turvallisuusnäkökohdat. Rungon pitää suojata kuljettajaa mahdollisissa onnettomuustilanteissa.

Säännöt mahdollistavat neljä perusrunkoratkaisua: teräsputkirunko, alumiiniputkirunko, alumiinipalkkirunko, hiilikuitumonokokki. Erivaihtoehtojen pohdinnan jälkeen päädyttiin teräsputkirunkorakenteeseen, koska oppilaitoksessa on erinomaiset valmiudet hitsata terästä, Suomessa valmistetaan korkealaatuista teräsputkea ja materiaalina teräs on tuttu. Oikein suunnitteleamalla saadaan myös kevyt ja vääntöjäykkä ristikkorakenne. Alkuperäisen suunnitelman tavoitteena mukaisena oli rakentaa toimintavarma auto. Tähän teräsputkirunko on hyvä ratkaisu ja kolaritilanteessa turvallinen.

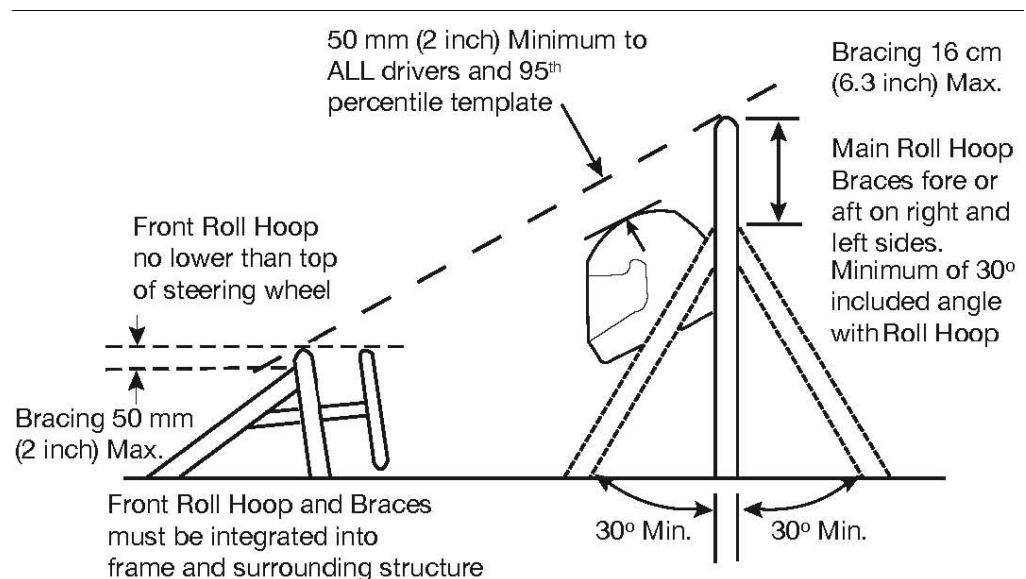
Alumiininen runkorakenne on teräksistä rakennetta kevyempi, mutta alumiinin kimmomoduuli on ainoastaan kolmasosa teräksen kimmomoduulista. Oikeilla suunnitteluperiaatteilla ja suunnitteleamalla rungon rakenne muotoaktiiviseksi, saa alumiinisesta rungosta valmistettua riittävän jäykän Formula Student -käyttöön. Tiimissä ei ollut kuitenkaan kokemusta alumiinin hitsaamisesta ja aikataulu oli tiukka, eli ei ehditty opetella hitsausta, joten idea jouduttiin hylkäämään. Tulevaisuudessa alumiininen runkorakenne otetaan todennäköisesti käyttöön sen hyvien ominaisuuksien takia. Hiilikuitumonokokki hylättiin heti alussa kalliin materiaalin sekä sen vaikean työstettävyyden takia.

Seuraava vaihe oli runkomateriaalin hankinta. Kilpa-auton rungon materiaaliksi ei sovellu tavallinen ns. huonekaluputki, sen alhaisen myötölujuuden takia.

Rautaruukin valikoimista löytyi runkomateriaaliksi sopivaa korkealujuuksista teräsputkea, jossa murtolujuus on aina 1000 MPa:n saakka, ja kuitenkin putken muokattavuus ja hitsattavuus on helppoa. Saimme tehtyä sponsorisopimuksen Ruukin kanssa, jota kautta runkomateriaali saatiin hankittua. Liitteessä 1 on tarkat materiaalitiedot.

4.2 Rungon mallinnus

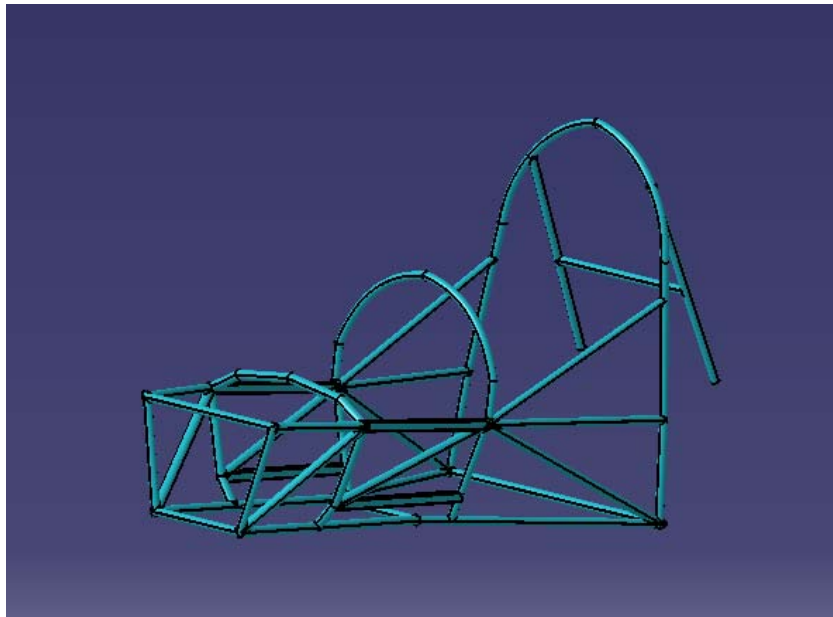
Rungon materiaalin ja saatavissa olevien putkien dimensioiden selvittyä, aloitettiin varsinaisen rungon suunnittelu ohjaamotilasta. Säännöt määräävät tiettyjä rajoitteita ohjaamolle. Uusimpien sääntöjen mukaan auton ohjaamoon täytyy mahtua 90 prosenttia väestön kokoluokasta, eli pienimmästä ja suurimmasta päästä jätetään 5 prosenttia pois. Tiimistä valittiin isokokoisin henkilö, joka täyttää ylärajan vaatimukset. Alkeellinen ohjaamon tilamalli tehtiin puurimasta yksinkertaisen valmistuksen takia. Puumallin ideana oli selvittää kuljettajan tarvitsema tila ja varmistaa hallintalaitteiden esteetön käyttö. Samalla varmistettiin, että kuljettajalle tulee riittävä suoja turvakaarista mahdollisessa ympäriajotilanteessa. Kuvassa 1 on esitetty sääntöjen vaatima kuljettajantila.



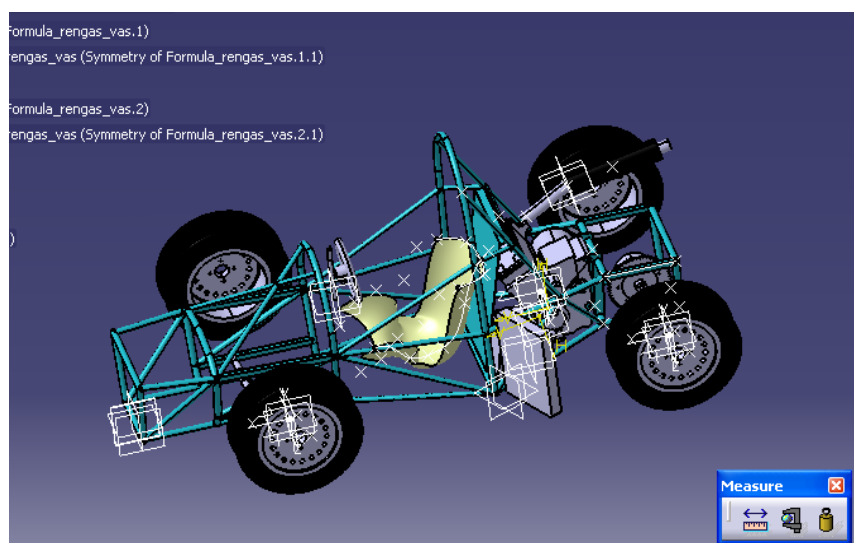
Kuva 1 Sääntöjen vaatima tila kuljettajalle /1/

Kuljettajan tarvitseman tilan sekä pääturvakaarien mittojen selvittyä siirryttiin käyttämään Catia V5R17/18 -mallinnusohjelmaa. Ensimmäisenä mallinnettiin

puurimasta rakennettu ohjaamo. Kuvassa 2 on esitetty ohjaamon ensimmäinen mallinnus. Tämän jälkeen alkoi package layout -suunnitelman teko. Tärkeimmät pääkomponentit sijoitettiin suunnitelluille kiinnityspaikoilleen, ja runko pyrittiin suunnittelemaan luontevaksi kiinnityspaikaksi näille osille. Kuvassa 3 on esitetty alkuvaiheen kokoonpanokuva, jossa tärkeimmät komponentit on sijoitettu paikoilleen.



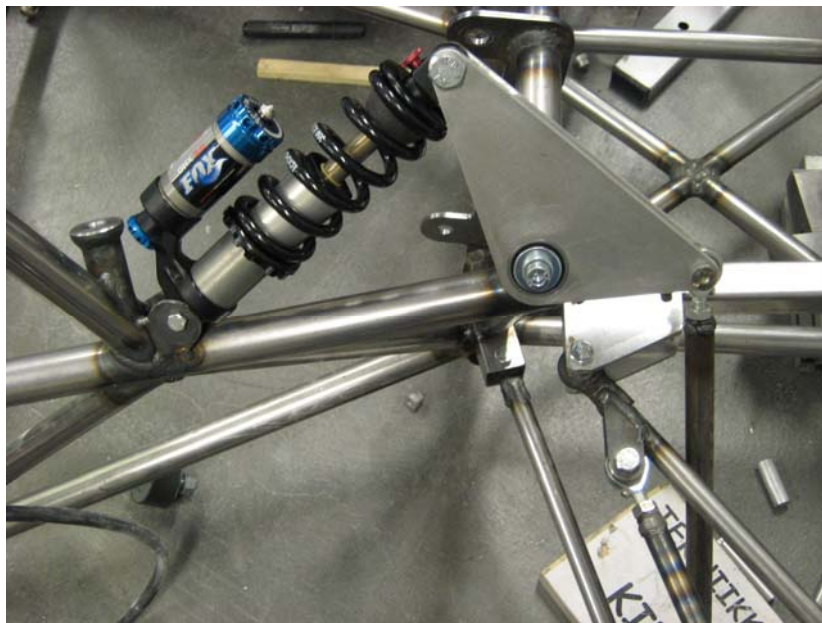
Kuva 2 Ohjaamotilan varhainen mallinnus



Kuva 3 Tärkeimmät komponentit sijoitettuna paikoilleen

Kun tärkeimmät pääkomponentit oli mallinnettu paikoilleen ja rungon muoto alkoi hahmottua, alkoi lopullisen muodon suunnittelu. Alusta-, moottori- ja voimansiirtoryhmien kanssa suunniteltiin rungon yksityiskohdat.

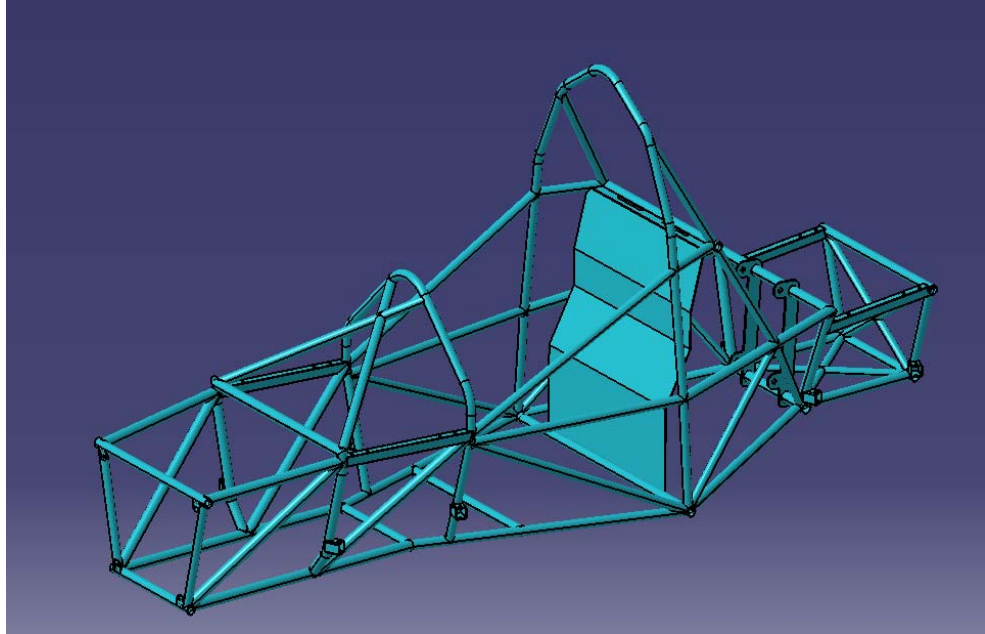
Alustasuunnittelijoiden kanssa varmistettiin, että rungossa on tukivarsille ja jousituksen linkuille kiinnityspaikat, joista tulevat voimat jakautuvat runkoon tasaisesti. Kuvassa 4 on esitetty auton takaosan jousitusosien kiinnityspisteet.



Kuva 4 Jousituksen linkun sekä heilahduksenvaimentimen kiinnityspisteet runkorakenteen solmukohdissa

Voimansiirtovastaavien kanssa suunniteltiin rungon takaosan rakenne tasauspyörästä, voimansiirtoakseleiden ja ketjulinjan mukaan. Moottoripäällikön kanssa suunniteltiin runko siten, että moottori sijoittuu oikeaan asentoon runkorakenteeseen ja moottorin apulaitteet sijoittuvat luontevasti moottorin ympärille. Samanaikaisesti kun muutoksia tehtiin rakenteeseen, suoritettiin lujuuslaskentaa, jotta rakenne säilyisi kestäväenä. Lujuuslaskennasta kerrotaan enemmän luvussa 5.

Mallinnus- ja suunnitteluvaiheessa pyrittiin suunnittelemaan runkoa ja koko autoa hyvin valmiiksi asti, jotta toteutusvaiheessa ei tarvitsisi enää suunnitella. Kuvassa 5 on esitetty valmis mallinnus FS008 -auton rungosta.



Kuva 5 Valmis mallinnus rungosta

5 RUNGON LUJUUSLASKENTA

5.1 Rungon lujuuslaskenta

Kilpa-auton rungon tärkeimpiä ominaisuuksia ovat rungon vääntöjäykkyys, kuljettajan suojaaminen erilaisissa onnettomuustilanteissa ja keveys. Näiden asioiden saavuttamiseen pyrittiin lujuuslaskennan avulla. Kun kyseessä on suhteellisen ohutseinämäisestä (seinämävahvuus 1,0 mm – 2,5 mm) teräsputkesta valmistettu ristikkorakenne, on tärkeää välttää taivutusmomenteja ja välittää voimat rakenteeseen normaalivoimina. Jotta saavutetaan rungolle hyvä vääntöjäykkyys pitämällä rungon massa kohtuullisena, täytyy ristikoista muodostua

kolmioita, eli kyseessä on siis muotoaktiivinen rakenne. Käytännössä ristikoista tehdään neliöitä, joihin lisätään diagonaalinen tuki, joka jäykistää rakenteen. Toinen mahdollisuus on peittää ristikoista muodostuva neliö levyllä, joka jäykistää rakenteen. Näitä molempia tapoja on käytetty tilanteen mukaan rungossa.

Kuljettajan suojaaminen on yksi rungon tärkeimmistä tehtävistä, joten siihen on kiinnitetty erityistä huomiota. Kolaritilanteessa on ratkaisevaa, että kuljettajaan kohdistuvat hidastuvuudet pysyvät matalina ja ohjaamon muodonmuutokset pysyvät kohtuullisina. Lujuuslaskennalla olen pyrkinyt varmistamaan, että runko täyttää kaikki nämä vaatimukset.

Kilpa-autoa suunniteltaessa keveyteen täytyy kiinnittää erityistä huomiota. Kevyen auton kiihdyttäminen ja hidastaminen vaatii vähemmän energiaa kuin painavan. Tällöin erilaisissa ajotilanteissa syntyvät voimat ovat pienempiä ja koko auto voidaan suunnitella valmistettavaksi pienistä ja kevyistä osista. Formula Student -kilpailuluokan säännöissä ei ole ilmoitettu minimipainoa, joten pyrittiin niin kevyeen autoon kuin mahdollista kestävyuden kuitenkin siitä kärsimättä. Rungon osuus koko auton massassa on prosentuaalisesti suuri, eli hyvällä runkosuunnittelulla voidaan auton massaan vaikuttaa paljon. Rungon väsymismitoitus on jätetty lujuuslaskennasta kokonaan pois kilpa-auton rungolle tyypillisen lyhyen käyttöiän takia, mikä mahdollistaa tavallista kevyemmän rakenteen käyttämisen.

Lujuuslaskentaan käytettiin oppilaitoksessa käytettyä LUSAS 14.1 -lujuuslaskentaohjelmistoa. Ohjelman puute on, että se ei laske kuormitustilanteessa jännitystä, vaan palkkia kuormittavat voimat ja momentit. Yhdistetyn jännityksen joutuu laskemaan manuaalisesti. Jännitykset laskettiin Microsoft Excel -laskentaohjelmalla, joka laskee yhdistetyn jännityksen VVEH-lujuushypoteesin mukaan. VVEH-lujuushypoteesi käytetään sitkeiden materiaalien myötämisen tutkimiseen, joten se soveltuu hyvin tarkoitukseen. Kuvassa 6 on Excel-taulukko, jonne voimat sekä momentit on syötetty ja jossa on laskettu yhdistetty jännitys. /2/

Ulko-	Sisä-	Elementti	Solmu	Palkin päissä vaikuttavat voimat ja momentit						Normaalijännitys	Leikkausjännitys	Leikkausjännitys	Vääntöjännitys	Taivutusjännitys	Taivutusjännitys	Yhdistetty jännitys
D	d			Spjotetaan voiman itäisratot	---	ov	varmalla puolen		σx	τy	τz	τx	σy	σz	σv	
				Fx	Fy	Fz	Mx	My	Mz							
25	21	1	1	-4,35E+01	191	-60,7	1,21E+04	9,12E+03	-1,73E+04	-0,3	2,5	-0,8	7,9	11,8	-22,5	20,0
25	21	1	3	-4,35E+01	191	-60,7	1,21E+04	1,18E+01	1,14E+04	-0,3	2,6	-0,8	7,9	0,0	14,8	22,1
25	21	2	7	7,84E+01	135	3,68E+02	1,02E+04	-1,18E+03	-9,52E+03	0,5	1,9	5,1	6,6	-1,5	-12,4	27,0
25	21	2	14	7,84E+01	135	3,68E+02	1,02E+04	5,40E+04	1,07E+04	0,5	1,9	5,1	6,6	70,1	13,9	87,8
25	21	7	3	-8,47E+01	161	-60,7	1,21E+04	1,34E+01	-8,93E+03	-0,6	2,2	-0,8	7,9	0,0	-11,6	20,1
25	21	7	177	-8,47E+01	161	-60,7	1,21E+04	-9,69E+03	1,52E+04	-0,6	2,2	-0,8	7,9	-11,8	19,7	17,6
25	21	13	26	-1,06E+00	21,1	-47,5	1,05E+04	6,99E+03	1,72E+03	0,0	0,3	-0,7	6,8	9,1	2,2	15,9
25	21	13	33	-1,06E+00	21,1	-47,5	1,05E+04	-1,08E+04	9,64E+03	0,0	0,3	-0,7	6,8	-14,0	12,5	11,3
25	21	14	33	-3,22E+03	-66,2	8,55	-1,00E+04	2,84E+03	2,00E+04	-22,3	-0,9	0,1	-6,5	3,7	26,0	14,6
25	21	14	35	-3,22E+03	-66,2	8,55	-1,00E+04	8,39E+03	-2,30E+04	-22,3	-0,9	0,1	-6,5	10,9	-29,9	43,1
25	21	15	1	-3,15E+03	-320	78,2	-1,38E+04	1,90E+04	6,04E+04	-21,8	-4,4	1,1	-9,0	25,7	78,4	85,0
25	21	15	35	-3,15E+03	-320	78,2	-1,38E+04	2,79E+04	2,69E+04	-21,8	-4,4	1,1	-9,0	36,2	34,9	53,8
25	21	21	26	2,50E+01	21,1	47,5	1,05E+04	6,99E+03	1,70E+03	0,0	0,3	0,7	6,8	-9,1	2,2	15,1
25	21	21	177	2,50E+01	21,1	47,5	1,05E+04	1,89E+04	9,63E+03	0,0	0,3	0,7	6,8	14,0	12,5	25,7
25	21	22	25	3,22E+03	-66,2	-8,35	-1,00E+04	-2,88E+03	2,00E+04	22,3	-0,9	-0,1	-6,5	-3,7	26,0	48,4
25	21	22	27	3,22E+03	-66,2	-8,35	-1,00E+04	-8,31E+03	-2,29E+04	22,3	-0,9	-0,1	-6,5	-10,8	-29,7	22,4
25	21	23	177	3,15E+03	-318	-77,2	-1,38E+04	-1,95E+04	6,02E+04	21,8	-4,4	-1,1	-9,0	-35,3	78,2	78,7
25	21	23	27	3,15E+03	-318	-77,2	-1,38E+04	-2,76E+04	2,60E+04	21,8	-4,4	-1,1	-9,0	-34,8	34,8	32,5
25	21	29	7	-4,84E+02	18,7	-3,68E+02	1,02E+04	1,30E+03	6,12E+02	-3,3	0,3	-5,1	6,6	1,8	0,8	3,2
25	21	29	2	-4,84E+02	18,7	-3,68E+02	1,02E+04	-5,30E+04	3,42E+03	-3,3	0,3	-5,1	6,6	-69,8	4,4	68,8
25	21	30	2	2,75E+02	164	19,5	-1,25E+03	7,92E+01	-2,84E+04	1,9	2,3	0,3	-0,8	-0,1	-39,2	36,5
25	21	30	4	2,75E+02	164	19,5	-1,25E+03	5,95E+03	2,13E+04	1,9	2,3	0,3	-0,8	7,7	27,7	37,4
25	21	31	6	-5,12E+01	151	-143	9,42E+03	5,15E+02	8,17E+01	-0,4	2,1	-2,0	6,1	0,7	0,1	10,8
25	21	31	4	-5,12E+01	151	-143	9,42E+03	-3,18E+04	3,41E+04	-0,4	2,1	-2,0	6,1	-41,3	44,3	11,1
25	20	40	27	-1,46E+02	182	-124	9,25E+03	1,63E+04	-9,35E+03	-0,8	2,1	-1,4	5,1	16,9	-10,3	11,5
25	20	40	30	-1,46E+02	182	-124	9,25E+03	6,20E+03	4,00E+03	-0,8	2,1	-1,4	5,1	6,8	4,4	14,4
25	20	41	30	-1,51E+02	178	-124	9,42E+03	5,93E+03	4,00E+03	-0,9	2,0	-1,4	5,2	6,5	4,4	14,3
25	20	41	32	-1,51E+02	178	-124	9,42E+03	-2,16E+04	4,36E+04	-0,9	2,0	-1,4	5,2	-23,8	48,0	25,4
25	20	46	37	-4,50E+02	6,45E+02	4,71E+02	-1,92E+04	7,74E+04	4,00E+04	-2,5	-7,3	5,3	-10,8	-95,5	44,2	49,0
25	20	46	39	-4,50E+02	-6,45E+02	4,71E+02	-1,92E+04	-1,04E+04	-5,18E+04	-2,5	-7,3	5,3	-10,8	-11,5	-57,2	74,5
25	20	47	39	-7,12E+02	-333	4,71E+02	-1,14E+04	-1,86E+04	-5,18E+04	-4,0	-3,8	5,3	-5,3	-20,5	-57,2	82,2
25	20	47	41	-7,12E+02	-333	4,71E+02	-1,14E+04	4,83E+04	-9,93E+04	-4,0	-3,8	5,3	-5,3	53,3	-109,6	60,9
25	20	48	41	-2,07E+02	7,69E+02	-3,21E+02	-1,62E+04	5,01E+04	-1,09E+06	-1,2	8,7	-3,6	-9,9	55,3	-120,4	66,5
25	20	48	43	-2,07E+02	7,69E+02	-3,21E+02	-1,62E+04	4,32E+03	-2,10E+01	-1,2	8,7	-3,6	-9,9	4,8	0,0	7,6
25	20	49	25	1,22E+03	2,92E+00	44,3	4,27E+03	-6,99E+03	-4,69E+03	6,9	0,0	0,5	2,4	-7,7	-5,2	7,8
25	20	49	45	1,22E+03	2,92E+00	44,3	4,27E+03	5,47E+03	-3,88E+03	6,9	0,0	0,5	2,4	6,0	-4,3	10,0
25	21	50	32	8,57E+02	-148	37,1	-1,77E+04	-1,51E+04	4,49E+04	5,9	-2,0	0,5	-11,5	-19,6	-58,2	43,9
25	21	50	45	8,57E+02	-148	37,1	-1,77E+04	8,12E+03	-4,76E+04	5,9	-2,0	0,5	-11,5	10,5	-62,1	50,9

Kuva 6 Excel-taulukkolaskenta ohjelma laskee yhdistetyt jännitykset.

5.2 Kohtisuora törmäystilanne

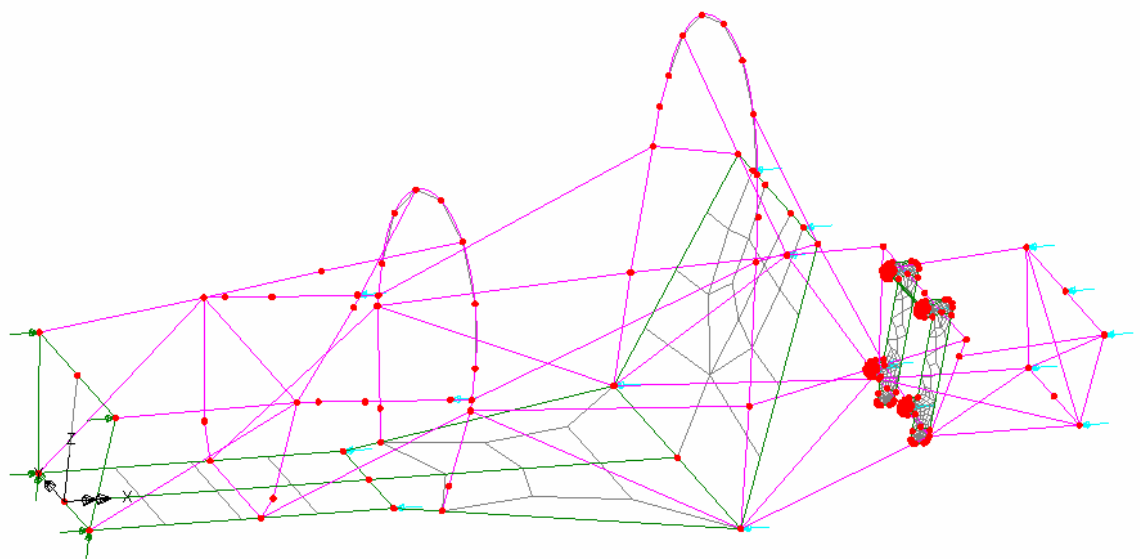
Kohtisuorassa törmäyksessä kuljettajan hengissä säilymisen kannalta on tärkeää, että kuljettajaan kohdistuu mahdollisimman pieniä hidastuvuuksia, ohjaamon muodonmuutokset jäävät pieniksi, turvavöiden kiinnityskohdat kestävät sekä moottorin kiinnikkeet kestävät, eikä moottori törmäyksessä pääse tunkeutumaan ohjaamoon. Formula Student -auton rungon vaaditaan kestävän 20 g:n hidastuvuuden, joten törmäystilanteiden lujuuslaskelmat on tehty tällä hidastuvuudella. Kohtisuoraa törmäystä mallinnettiin tilanteella, jossa auton keula on kiinnitetty ja runkoa kuormitettiin raskaimmista komponenteista syntyvillä voimilla.

Kuljettaja aiheuttaa turvavöiden kiinnityspaikkojen kautta kuormituksen runkoon. Jos kuljettajan massa on 90 kg ja hidastuvuus 20 g:tä. Näistä aiheutuu noin 17 660 N:n voima. Kuljettajan paikallaan pysyminen kolaritilanteessa varmistetaan käyttämällä 6-pisteturvavöitä, joista suurimman kuorman kantavat lantiovyöt ja

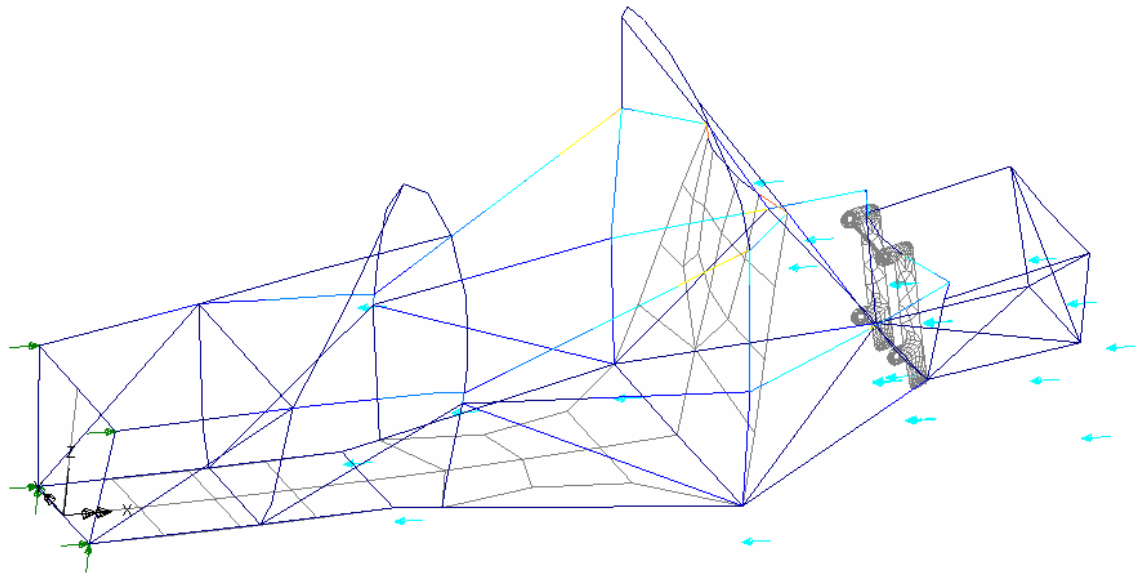
olkavyöt. Kuljettajan painopiste sijaitsee olkavöiden ja lantiovöiden puolessa välissä, joten jokaista vyön kiinnityskohtaa kuormittaa noin 4 410 N:n kuorma. Olkavöiden kiinnityspotkelle ja moottorin kiinnityspotkille kohdistuu taivutusmomentti, mutta ainevahvuus on valittu siten, että rakenne kestää rasitukset.

Moottorin massa käyntikuntoisena on noin 65 kg, mikä aiheuttaa 20 g:n hidastuvuudella 12 750 N:n kuormituksen kiinnityskohtiin. Moottori kiinnitetään teräslevystä valmistettuihin kiinnityslevyihin neljästä kohdasta, lisäksi moottorin etuosassa on kaksi kiinnityskohtaa. Kuormitus jakautuu moottorin painopisteen mukaisesti kiinnityskohtiin. Alakiinnityskohtiin 3 190 N, yläkiinnityskohtiin 2 190 N ja etukiinnityskohtiin 1000 N.

Pyörän ja pyöräntuennanosien massa on noin 17 kg, mikä aiheuttaa 20 g:n hidastuvuudella noin 3 340 N:n voiman. Voima jakautuu tasaisesti molempiin tukivarsien kiinnityskohtiin, koska painopiste sijaitsee pyörän keskellä. Tasauspyörästä on apulaitteinen on noin 8 kg, mistä aiheutuu noin 1 570 N:n kuormitus. Kuvassa 7 on esitetty kuormitustilanteen mallinnus runkorakenteeseen ja kuvassa 8 on esitetty törmäystilanteessa syntyvät siirtymät suurennettuna.



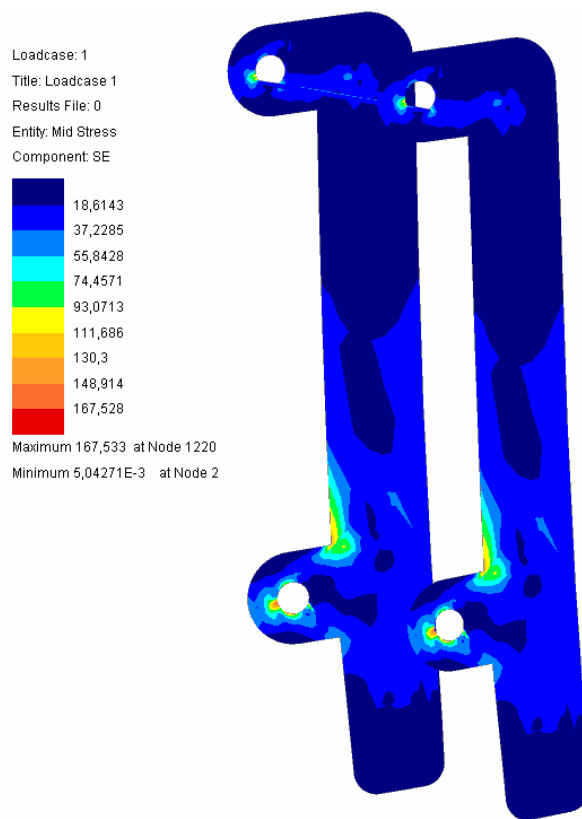
Kuva 7 Rungon kuormitustilanne



Kuva 8 Muodonmuutokset keulatörmäyksessä

Suurin jännitys ja siirtymä syntyy moottorin ylempään kiinnityspotkeen, mutta myötörajaa ei ylitetä. Kuljettajan turvallisuuden kannalta oleellisissa kohdissa, kuten ohjaamossa sekä turvavöiden kiinnityspisteissä jännitykset jäävät selvästi myötörajaa pienemmiksi. Liitteessä 2 on esitetty kaikki törmäystilanteessa runkoon syntyvät jännitykset.

Moottorin kiinnityslevyjen ainevahvuus valittiin siten, että ne kestävät törmäystilanteessa syntyvät kuormitukset. Kuvassa 9 on esitetty moottorin kiinnityslevyihin muodostuva yhdistetty jännitys. Liitteessä 3 on moottorin kiinnityslevyjen piirustukset.



Kuva 9 Moottorin kiinnityslevyihin kohtisuorassa törmäyksessä muodostuvat jännitykset

5.3 Sivutörmäystilanne

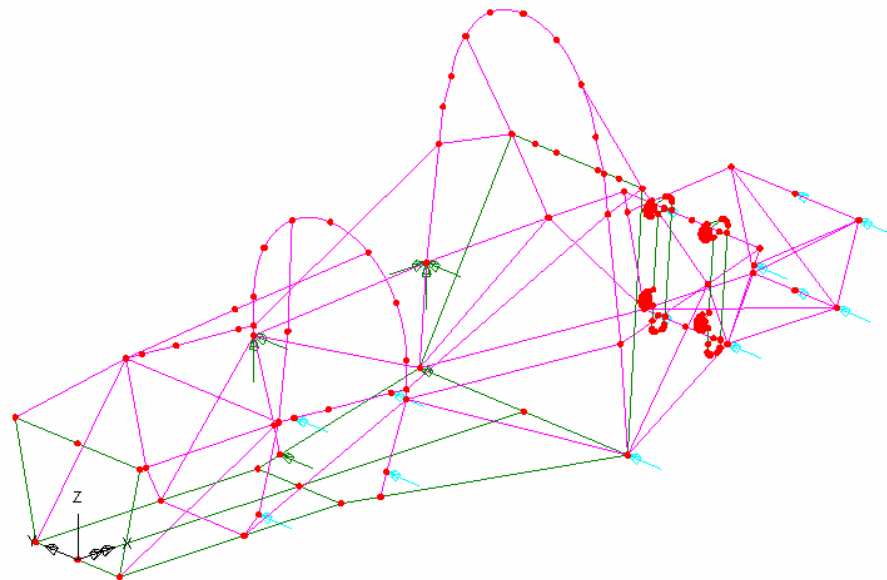
Sivutörmäystilanne on kuljettajan suojaamisen kannalta vaikeampi, kuin kohtisuora törmäys. Sivusuunnassa ei ole mahdollista järjestää niin suurta törmäysvyöhykettä, kuin etu- tai takatörmäyksessä. Sivutörmäystilanteessa on tärkeä tutkia lujuuslaskentaohjelmalla sivutörmäystä suojaavien putkien rasitukset ja mahdolliset muodonmuutokset. Ohjaamo suojaavan rakenteen myötämistä törmäyksessä ei saisi tapahtua, koska silloin runkoputket saattavat tunkeutua liikaa ohjaamotilaan ja voivat vahingoittaa kuljettajaa.

Formula Student -auton todennäköisin sivutörmäystilanne on auton suistuminen radalta kylki edellä rengasvalliin. Sivutörmäystilanteessa on käytetty

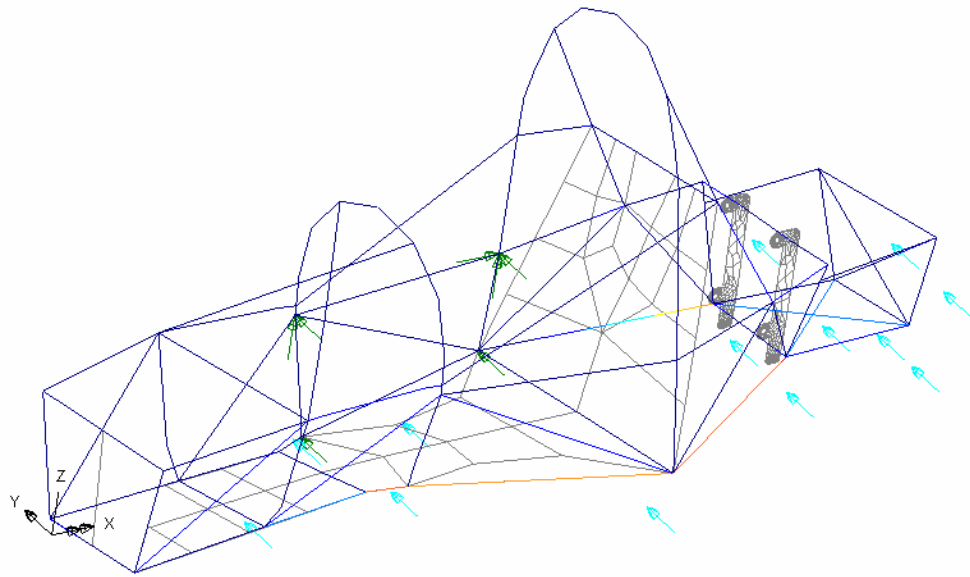
hidastuvuutena myös 20 g. Tilannetta on mallinnettu kiinnittämällä runko ohjaamon kohdalta kiinni ja laittamalla erilaisten komponenttien hidastuvuudesta syntyvät voimat kuormittamaan runkoa.

Arvioimalla kuljettajan massaksi 90 kg, aiheutuu kuljettajasta sivutörmäystilanteessa 17 660 N:n kuormitus. Sivutörmäystilanteessa lannevyö pitää kuljettajan paikoillaan törmäystilanteessa, joten sen kiinnityskohtaan on laitettu vaikuttamaan koko kuormitus.

Moottorin massan ollessa käyntikuntoisena 65 kg, aiheutuu kiinnityslevyihin yhteensä 12 760 N kuormitus. Pyörän ja pyöräntuennan massa on 17 kg ja siitä aiheutuu 3 340 N kuormitus tukivarsien kiinnityskohtiin. Tasauspyörästä ja sen apulaitteiden massa on noin 8 kg ja niistä aiheutuu 1 570 N kuormitus kiinnityspisteisiin. Kuvassa 10 on esitetty kuormitustilanne ja kuvassa 11 syntyvät siirtymät.



Kuva 10 Sivutörmäystilanteen kuormitukset



Kuva 11 Sivutörmäyksessä syntyvät siirtymät

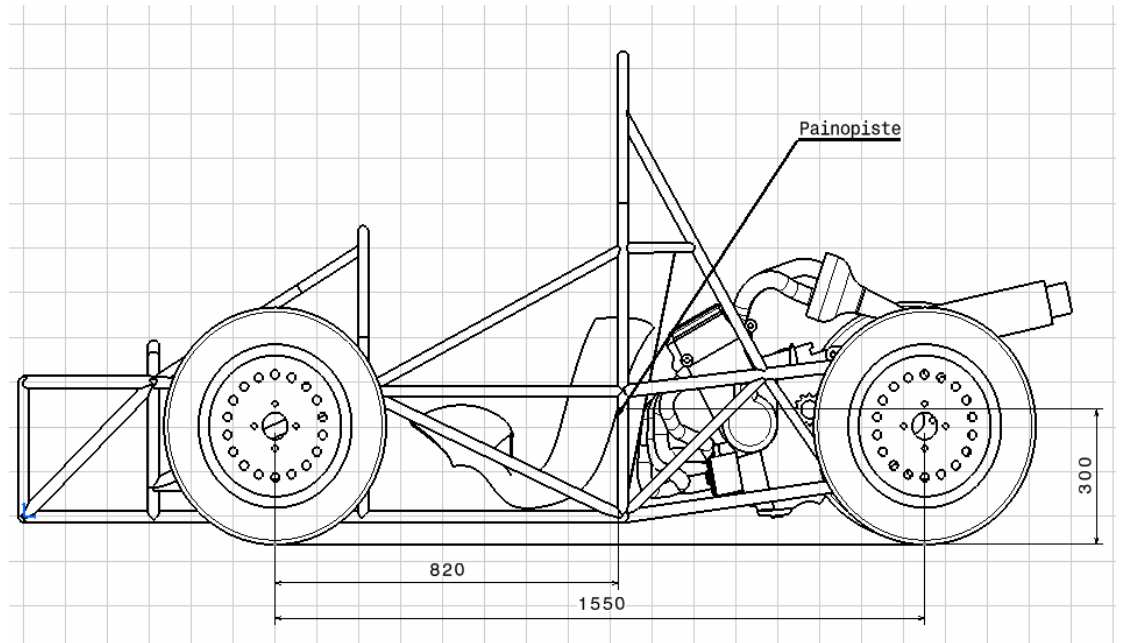
Suurin syntyvä siirtymä on noin 20 mm ja maksimijännitys ylittää myötörajan. Suurin siirtymä ja -jännitys syntyy auton takaosaan, moottoria tukeviin putkiin. Todennäköisesti moottori siirtyy paikaltaan, mutta huomataan kuitenkin, että mallinnuksessa ei oteta huomioon takapyörän osumista törmäyksessä seinään ja siitä seuraavaa tukivarsista aiheutuvaa tukivoimaa rungon takaosalle.

Ohjaamon osalta jännitykset jäävät myötörajan alapuolelle, eikä ohjaamoon synny suuria muodonmuutoksia. Törmäyksessä syntyvät tarkat jännitykset on esitetty liitteessä 4.

5.4 Jarrutustilanne

Jarrutustilanteessa kohdistuu tukivarsien kiinnityskohtiin suuria rasituksia, joten on syytä tutkia rakenteen kestävyys. Koska jarrutustilanteet toistuvat useasti, kyseessä on myös väsyttävä kuormitus, tulee rakenne mitoittaa siten, että jännitykset jäävät mataliksi. Etupäähän kohdistuvat suurimmat rasitukset. Koska takatukivarsien

kiinnityspisteet ja rungon rakenne on vastaavanlainen kuin edessä, riittää etupään kestävyuden tutkiminen. Kilpa-autossa käytettävillä ns. slicks-renkailla kitkakerroin kuivalla asfaltilla voi olla jopa 1,5, joten jarrutusilanteessa voidaan saavuttaa noin 1,5 g:n hidastuvuuksia. Suurempi hidastuvuus täytyy ottaa huomioon voimia laskettaessa. Kuvassa 12 on esitetty auton painopisteen sijainti sekä akseliväli.



Kuva 12 Painopisteen sijainti

Kun painopisteen sijainti tiedetään, saadaan etu- ja taka-akselille jakautuvat tukivoimat selville. Lasketaan etu- ja taka-akselin tukivoimien suuruudet kaavalla 1,

$$T_e = \frac{m \cdot g \cdot l_t}{l} \quad (1)$$

jossa T_e on etupyörään kohdistuva tukivoima, m on auton massa, g putoamiskiihtyvyys, l_t on etäisyys painopisteestä takapyörään ja l on akseliväli.

Etuakseli

$$T_e = \frac{350 \text{ kg} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 0,73 \text{ m}}{1,550 \text{ m}}$$
$$T_e \approx 1617 \text{ N}$$

Taka-akseli

$$T_t = \frac{350 \text{ kg} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 0,82 \text{ m}}{1,550 \text{ m}}$$

$$T_t \approx 1816 \text{ N}$$

Auton massasta 47 prosenttia jakautuu etu-akselille ja 53 prosenttia taka-akselille.

Lasketaan seuraavalla kaavalla jarrutuksessa tapahtuva painonsiirto,

$$\Delta N = m_j \cdot a \cdot \frac{h}{l} \quad (2)$$

jossa ΔN on painonsiirtymä, m_j on jousitettu massa, a on hidastuvuus, h on painopisteen korkeus ja l on akseliväli.

$$\Delta N = 285 \text{ kg} \cdot 14,7 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot \frac{300 \text{ mm}}{1550 \text{ mm}}$$

$$\Delta N \approx 811 \text{ N}$$

Lasketaan etuakselille kohdistuva tukivoima painonsiirtymän kanssa.

$$N_e = T_e + \Delta N$$

$$N_e = 1617 \text{ N} + 811 \text{ N}$$

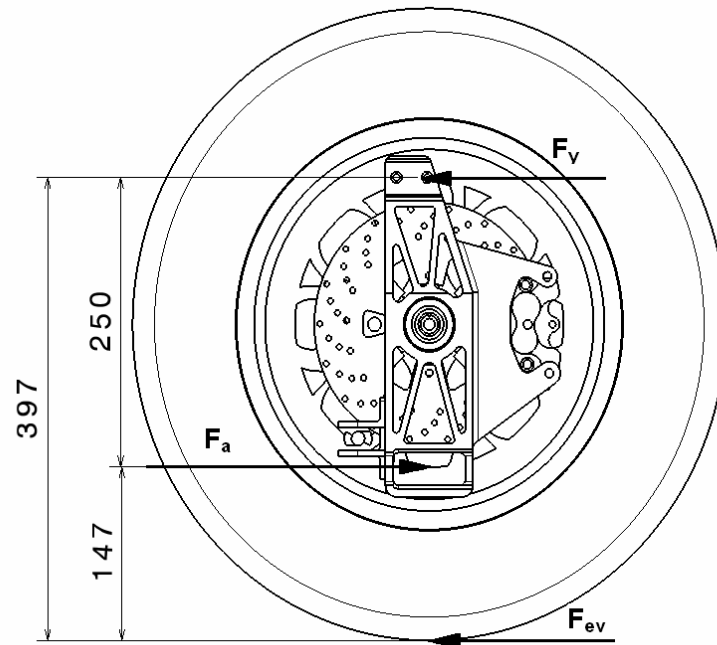
$$N_e \approx 2428 \text{ N}$$

Käyttämällä kitkakertoimena 1,5, saadaan etuakselille tarvittava jarrutusvoima F_e , joka jakamalla kahdella saadaan toiseen etupyörään vaikuttava voima F_{ev} .

$$F_{ev} = \frac{1,5 \cdot 2428 \text{ N}}{2}$$

$$F_{ev} = 1821 \text{ N}$$

Jarruvoima jakautuu voimavarsien suhteen olkavarsille, joissa sijaitsevat tukivarsien kiinnityspisteet. Kuvassa 13 on esitetty tilanne.



Kuva 13 Jarruvoimien jakautuminen

Lasketaan olkavarren ala- ja yläkiinnityskohtiin kohdistuvat voimat F_a ja F_y .

$$F_{ev} \cdot 0,397 \text{ m} - F_a \cdot 0,25 \text{ m} = 0$$

=>

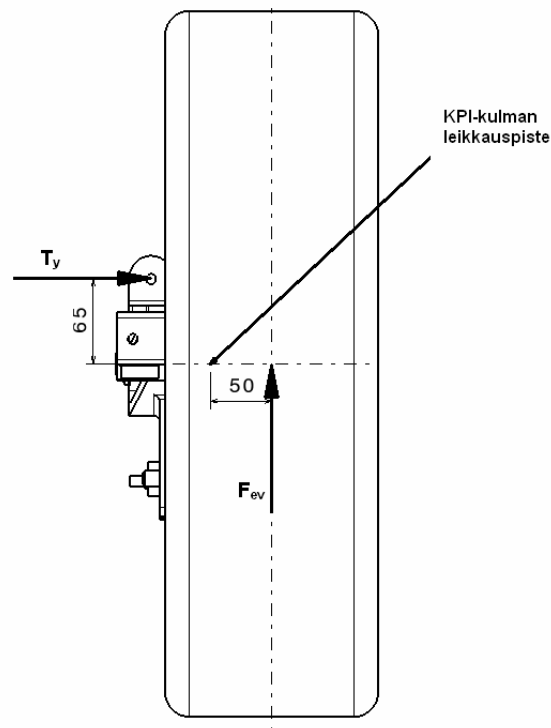
$$F_a \approx 2891 \text{ N}$$

$$F_{ev} \cdot 0,147 \text{ m} - F_y \cdot 0,25 \text{ m} = 0$$

=>

$$F_y \approx 1071 \text{ N}$$

Etupyörissä KPI-trail (kääntösäde) on 50 mm, mikä aiheuttaa jarrutuksessa pyöriä kääntävän momentin. Kuvassa 14 on esitetty tilanne.



Kuva 14 Voimien T_y ja F_{ev} sijainti KPI-kulman leikkauspisteeseen nähden

Lasketaan raidetangon kiinnityspisteeseen kohdistuva tukivoiman T_y :n suuruus.

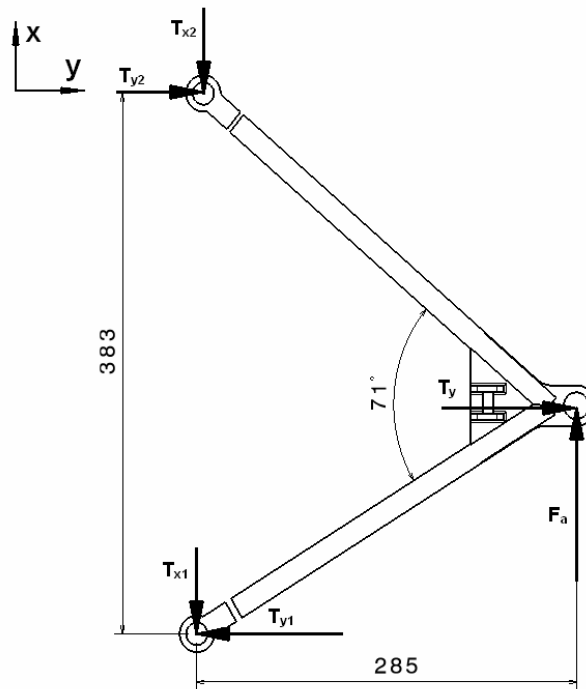
$$T_y \cdot 0,065 \text{ m} - F_{ev} \cdot 0,05 \text{ m} = 0$$

=>

$$T_y \approx 1401 \text{ N}$$

Kuvassa 15 on esitetty alatukivarren geometria ja voimien T_y ja F_a sijainti.

Raidetanko sijaitsee lähes alatukivarren korkeudella, joten raidetankoon kohdistuva tukivoima oletetaan vaikuttavan kokonaan alatukivarteen. Voimat on redusoitu tukivarsien päihin vaikuttaviksi x- ja y-suuntaisiksi komponenteiksi. Ylätukivarren voimat ovat redusoitu vastaavasti. Yllä olevat laskelmat on tehty Excel-taulukkoon, joissa eri suureiden muuttaminen on vaivatonta.



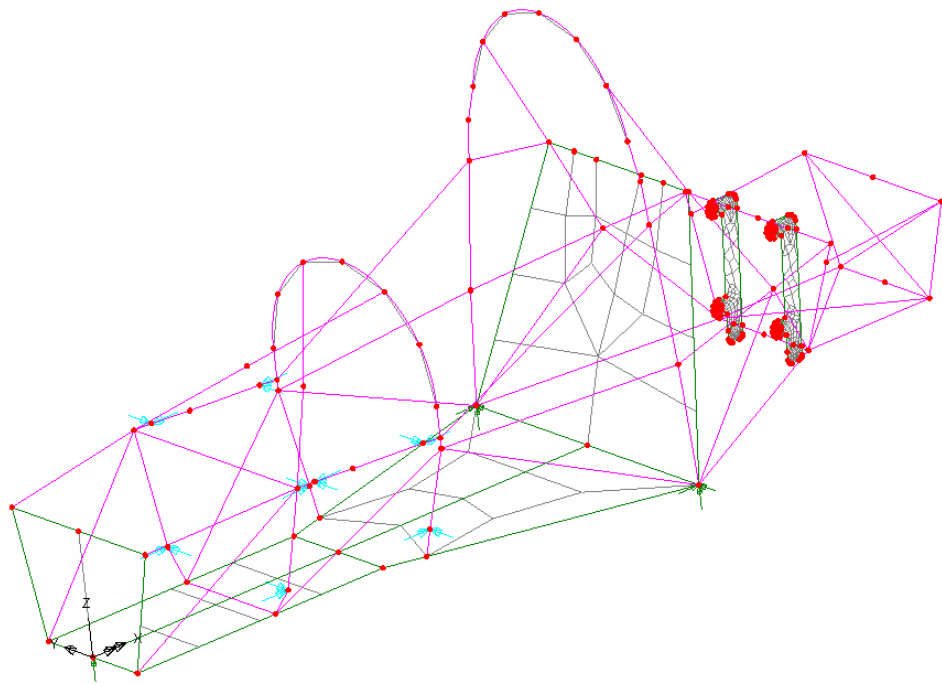
Kuva 15 Voimien redusoituminen alapallonivelen kohdalta tukivarsien päihin

Taulukossa 2 on esitetty lasketut tulokset molemmille tukivarsille, tukivarsien pientä epäsymmetrisyyttä ei ole otettu laskuissa huomioon, sen pienen vaikutuksen takia.

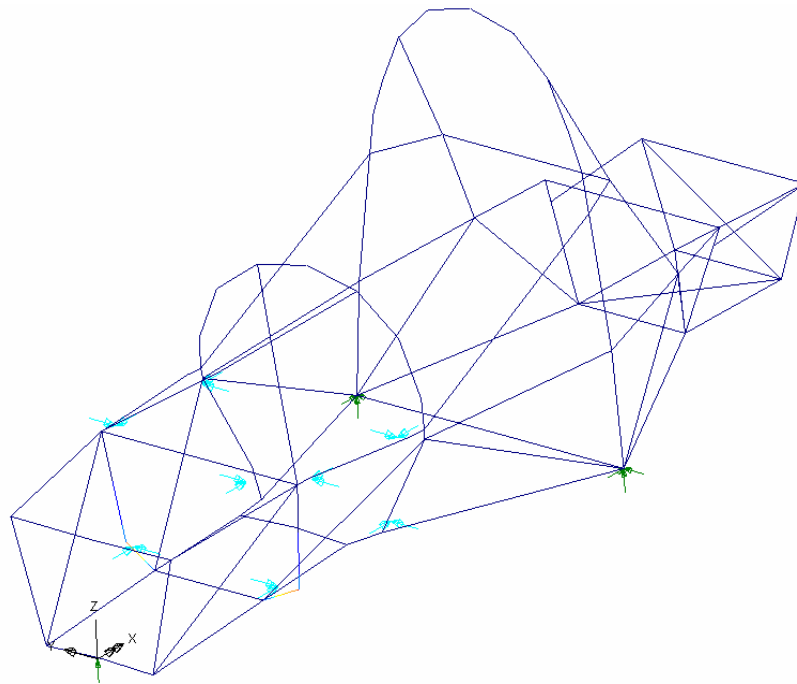
Taulukko 2 Lasketut voimakomponentit

T:n voimakomponentit	Alatukivarret (N)	Ylätukivarret (N)
x1	-1446	536
x2	-1446	536
y1	-3427	616
y2	627	-616

Saadut voimakomponenttien tukivoimat on sijoitettu lujuuslaskentamalliin tukivarsien kiinnityspisteiden kohdalle. Runko on kiinnitetty pääturvakaaren kohdalta, mikä vastannee kohtuullisesti jarrutustilannetta. Kuvassa 16 on esitetty kuormitustilanne ja kuvassa 17 siitä seuranneet muodonmuutokset. Muodonmuutokset ovat suurennettuja selvyyden lisäämiseksi.



Kuva 16 Jarrutustilanteen kuormitukset mallinnettuna rungon etuosaan



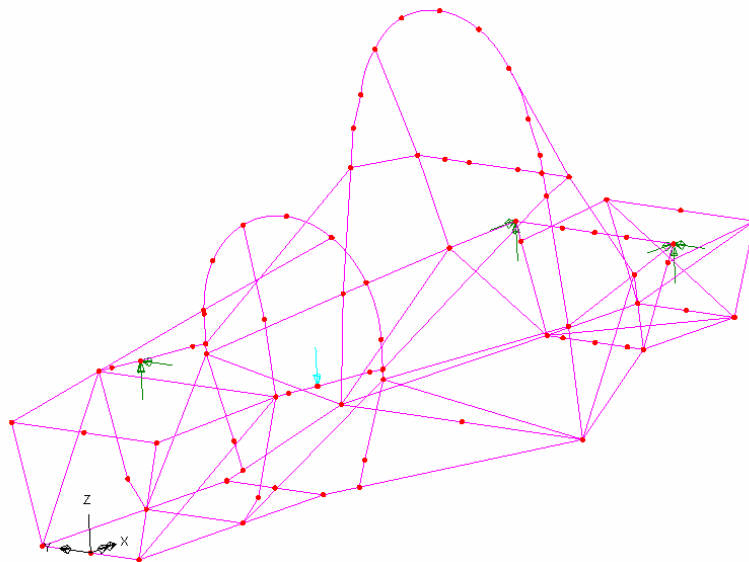
Kuva 17 Jarrutuksessa rungon etuosaan syntyvät siirtymät

Suurin siirtymä on noin 0.4 mm ja suurin jännitys noin 260 MPa, joka on kyseisessä paikassa putken myötö- sekä leikkausjännityksen alapuolella. Tarkat tulokset ovat esitetty liitteessä 5. Tulokset vahvistavat, että runko kestää jarrutustilanteessa syntyvät kuormitukset, ja rungon lyhyen käyttöiän takia rakenteen väsyminen on epätodennäköistä.

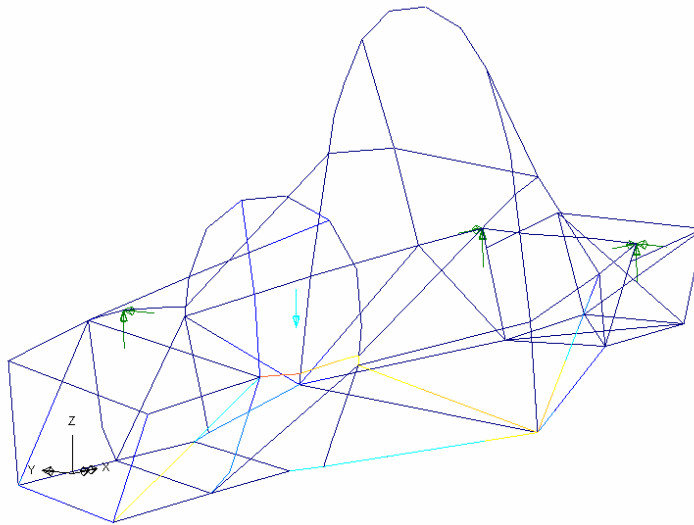
5.5 Rungon vääntöjäykkyys

Kilpa-auton rungon tulee olla riittävän vääntöjäykkä, jotta autoon suunniteltu jousitus toimisi oikein ja pyöränkuorman muutokset pysyisivät pieninä. Liian joustavaksi suunniteltu runko pilaa onnistuneenkin alustasuunnittelun. Rungon vääntymistä aiheuttaa ajotilanteessa radan reunuksen yliajaminen tai radassa olevat suuremmat epätasaisuudet. Rungon vääntöjäykkyyttä arvioidaan tyypillisesti, kuinka suuri momentti rungon yhden asteen vääntymiseen tarvitaan. Rungon vääntöjäykkyyden mittausta voidaan suorittaa monella tavalla. Runko voidaan kiinnittää aivan takaosasta kiinni ja kuormittavat voimat laitetaan vaikuttamaan auton keulaan. Toinen tapa on laittaa voimat vaikuttamaan molemmille puolille autoa, jousen kiinnityskohtaan. Kiinnitys samalla tavalla rungon takaosasta. Tässä työssä runkoa kuormitettiin jousituksen linkun akselin kohdalta.

Kuvissa 18 ja 19 on esitetty kuormitustilanne ja syntyvät siirtymät liioitellun suurina.



Kuva 18 Kuormitustilanteen mallinnus runkoon



Kuva 19 Vääntökuormituksessa syntyvät siirtymät

Runko on kiinnitetty takaosasta, sekä toiselta puolelta etuosaa. Vastakkaiselle puolelle on laitettu 4700 N:n voima kuormittamaan runkoa, mikä aiheutti runkoon yhden asteen vääntymän. Etäisyys kiinnityspisteestä voiman vaikutuspisteeseen on 550 mm, joten rungon vääntöjäykyys on noin 2600 Nm/1 aste. Maksimijännitys kuormitustilanteessa on noin 300 MPa, mikä on alle myötörajan. Liitteessä 6 on esitetty tarkat jännitykset. Runko on riittävän vääntöjäykkä ja jousitus tulee toimimaan suunnitellulla tavalla.

5.6 Rungon ominaistaajuudet

Lujuuslaskentaohjelmalla pystyy laskemaan myös rungon ominaistaajuudet. On tärkeää tutkia, ettei moottorin värähtelyn tai jousituksen sekä pyöräntuennan herätetaajuudet osu rungon ominaistaajuuksille. Taulukossa 3 esitetään viisi ensimmäistä ominaistaajuutta. Ominaistaajuuksien värähtelyt heikkenevät kertaluvun mukaan, joten viiden ensimmäisen ominaistaajuuden tutkiminen riittää. Värähtelyjen muodot esitetään liitteessä 7.

Taulukko 3 Rungon ominaistaajuudet

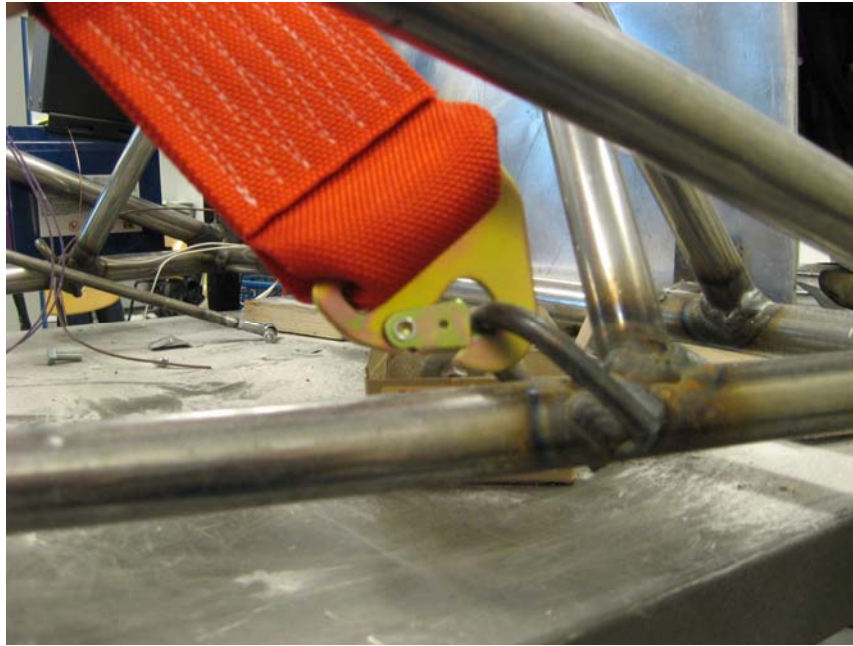
Ominaismuodot	Taajuus (Hz)
1.	10,8
2.	13,6
3.	14,9
4.	15,3
5.	17,4

Moottorin kierrosnopeusalue on noin 1500 kier/min – 13 000 kier/min eli 25 kier/s – 217 kier/s. Kun kyseessä on nelisyylinterinen rivimoottori, tapahtuu kaksi palotapahtumaa yhden kierroksen aikana. Tämä aiheuttaa alimmalla kierrosnopeudella 50 värähdystä sekunnissa, mikä on enemmän kuin ensimmäiset rungongin ominaistaajuudet. Moottori ei aiheuta herätetaajuutta rungolle.

Rengas-jousi -yhdistelmän ominaistaajuus on edessä 15.84 Hz ja takana 16.35 Hz. Epätasapainossa oleva rengas aiheuttaa yhden herätteen kierroksen aikana. Jotta ominaistaajuus saavutetaan, renkaan täytyy pyöriä 16 kierrosta sekunnissa, mikä vastaa noin 100 km/h nopeutta. Rungon ja rengas-jousi -yhdistelmän ominaistaajuudet ovat lähellä toisiaan. Renkaiden tasapainotus tulee tehdä huolellisesti, jotta heräte jää mahdollisimman pieneksi /3/

5.7 Turvavöiden kiinnityslenkit

Turvavyöt on kiinnitetty Formula Student -autossa 8 mm pyörötangosta taivutetuilla u-lenkeillä, jotka hitsattiin runkoputken ympärille. Kiinnityslenkki asennettiin samaan kulmaan turvavyön kanssa, jolloin kuormitustilanteessa lenkkiin ei kohdistu taivutusmomenttia. Kuvassa 20 on esitetty kiinnityslenkki sekä vyön kiinnitys lenkkiin.



Kuva 20 Turvavyön kiinnitys runkoon

Koska kyseessä on kuljettajan turvallisuuteen oleellisesti vaikuttava osa, on sen asennuksen luotettavuuteen ja lenkin kestävyys kiinnitettävä erityistä huomiota.

Turvavyön kiinnityslenkki hitsattiin neljällä 15 mm pitkällä hitsisaumalla, jonka a-mitta on 5 mm. Formula Student -kilpasarjan sääntöjen mukaan, turvavyön lenkin tulee kestää varmasti 10000 N kuorma. Kaavalla 3 on laskettu hitsisaumaan kohdistuvan leikkausjännitys,

$$\tau_{wlask} = \frac{F}{a \cdot l} \quad (3)$$

jossa τ_{wlask} on leikkausjännitys, F on voima, a on hitsin a-mitta, l on hitsin pituus.

$$\frac{10000 \text{ N}}{5 \cdot 4 \cdot 15 \text{ mm}}$$
$$\tau_{wlask} = 34 \text{ MPa}$$

Hitsisauman suurin sallittu leikkausjännitys on 120 MPa, siitä saadaan laskettua varmuusluku hitsisauman kestävyydelle.

$$n = \frac{120 \text{ MPa}}{34 \text{ MPa}}$$
$$n \approx 3,5$$

Hitsisauman kestävyydelle jää riittävä varmuus. Turvavyön kiinnityslenkille tehtiin vielä kuormituskoe, jossa vetokokeella testattiin lenkin kestävyys. Kiinnityslenkki hitsattiin runkoputkena käytettyyn teräsputkeen (mitat 25,4 x 2,0 mm), jota kuormitettiin kuormituskehällä. Kuvasta 21 on esitetty lenkin malli sekä kuormitustilanne.



Kuva 21 Turvavyön kiinnityslenkki kuormituskokeessa

Lenkkiä kuormitettiin 15000 N voimalla, eikä kokeesta tulostuneessa voimavenymä kuvaajassa ollut merkkejä rakenteen myötämisestä. Kuvaaja on liitteenä 8 ja kuvaajassa näkyvät pykälät johtuvat lenkin kiinnityksessä käytetyn ketjun asettumisesta kuormituksen aikana. Onnistuneen kokeen perusteella voidaan todeta, että laskelmat vastasivat hyvin käytännön tilannetta, ja kuormituskoe antoi varmuuden hitsaussaumojen kestävyteen ja hitsauksen onnistumiselle.

6 RUNGON VALMISTUS

6.1 Valmistusmenetelmät

Rungon valmistus aloitettiin joulukuun 7. päivä 2007. Rungon valmistuksessa on tärkeää saada valmis runko vastaamaan mahdollisimman hyvin siitä tehtyä mallinnusta. Tällöin runkoon suunnitellut osat sopivat ja asennusvaihe helpottuu. Rungon valmistuksessa harkittiin jigien rakentamista, mutta siitä luovuttiin, koska jigi soveltuu paremmin sarjatuotantokappaleiden valmistukseen, ei varsinaisesti yksittäiskappaleisiin. Ennen rungon valmistusta suunniteltiin rungon valmistustiimin kanssa valmistusjärjestys, sekä harjoiteltiin hitsausta ja runkoputkien päiden muotoilemista toisiinsa sopiviksi. Putkenpäiden muotoilussa ajateltiin aluksi käyttää tasoajuria, sekä 25 mm:n tappiterää, mutta lähes jokaisen putkenpään muodon ollessa erilainen päädyttiin käyttämään kulmahiomakonetta ja penkkihiomakonetta. Vähän kerralla hiomalla ja sovittamalla, putken päiden muotoilu onnistui helpoiten. Kuvassa 22 on esitetty toisiinsa sovitettut putket. Itse valmistustyö suoritettiin koulun hitsauslaboratoriossa, jossa hitsauksen sekä putkien hiomisen voi suorittaa turvallisesti. Tilassa on myös metallinen pöytä, jonka päällä työ oli helpompi tehdä. Kunnollinen jigipöytä olisi ollut ihanteellinen rakentamisalusta, mutta sellaista ei valitettavasti ollut. Materiaalivarasto ja metallivannesaha sijaitsevat hitsauslaboratorion välittömässä läheisyydessä, joten siitäkin syystä valmistus oli luontevaa suorittaa siellä.



Kuva 22 Runkoputket hiottuna toisiinsa sopiviksi

Runkorakenteessa on runsaasti diagonaalitukia. Tämänkaltainen rakenne toteutettiin käytännössä seuraavasti: Aluksi hitsattiin suorankulman avulla pystyputket, sitten hiottiin diagonaalituki väliin sopivaksi ja lopuksi sovitettiin ylävaakaputki paikoilleen. Valmis rakenne hitsattiin varovasti useasta kohdasta, jotta hitsauksessa syntyvät muodonmuutokset jäisivät pieniksi. Lopulta hitsattiin pienissä pätkissä kohta valmiiksi. Tällöin muodonmuutokset jäivät kohtuullisen pieniksi. Kuva 23 on esitetty valmista ristikkorakennetta.



Kuva 23 Valmista ristikkorakennetta

6.2 Rungon valmistus

Työ aloitettiin ohjaamotilasta tekemällä alakehikko valmiiksi. Alkuvaiheessa suoritettiin lukuisia ristimitoituksia, jotta rungon alaosasta tuli mittatarkka, sillä siinä olevat virheet kertautuvat lopussa rakenteessa. Kuvassa 24 on esitetty rungon ohjaamotilan alaosa. Rakennusta jatkettiin seuraavaksi keulassa olevasta kehikosta, kohti auton takaosaa. Autossa on kaksi turvakaarta, pääturvakaari kuljettajan takana, sekä etukaari ohjaamon etuosassa ohjauspyörän kohdalla. Kaaret

kiinnitettiin paikoilleen ja varmistettiin ristimittauksilla, että ohjaamotila on piirustusten mukainen. Kuvassa 25 on esitetty valmis ohjaamorakenne.



Kuva 24 Rungon alaosa valmiina



Kuva 25 Valmis ohjaamorakenne

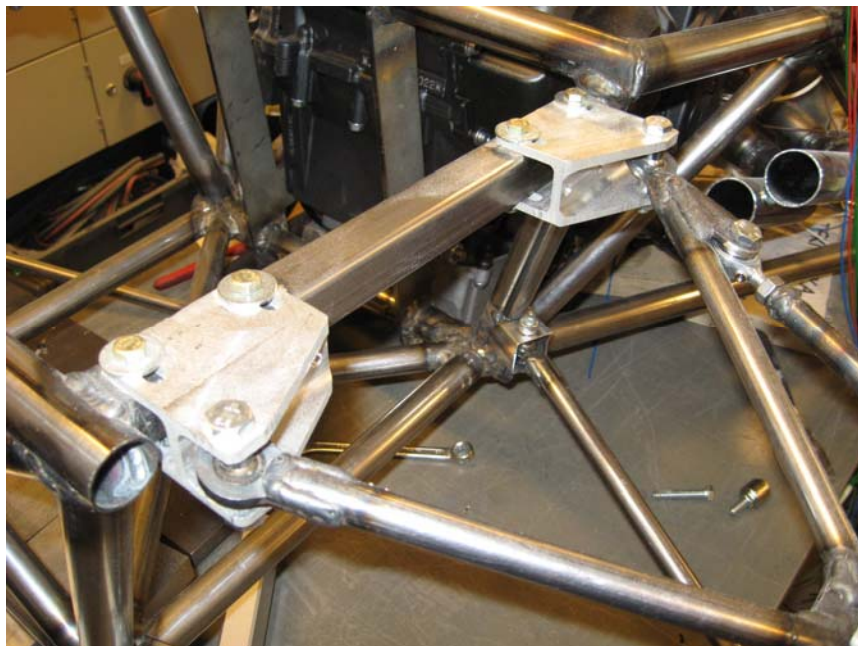
Auton ylätukivarret kiinnitetään vaakatasossa säädettäviin kiinnitysosiin, jotka kiinnitetään rungossa oleviin neliöputkiin (25x25x1.5mm). Säättöosien kiinnitykseen käytetään 6 mm ruuveja, jotka tulevat neliöputkien lävitse. Koska säättöosien kiinni pysyminen on ainoastaan kitkavoiman varassa, hitsattiin

neliöputkiin holkit varmistamaan, että putki ei pääse painumaan kiristyksen voimasta.

Kuvassa 26 on esitetty lähes valmiit holkitettut ylätukivarsien kiinnityspotket ja kuvassa 27 säätöosat kiinnitettyinä runkoon.



Kuva 26 Ylätukivarsien kiinnityspotket holkitettuna



Kuva 27 Ylätukivarsien kiinnityspotket hitsattuna ja ylätukivarsi asennettuna

Kun ohjaamo oli saatu valmiiksi, alettiin valmistamaan auton takaosaa. Takaosassa erityistä huomiota vaativat moottorin kiinnikkeiden paikat, jotta moottori asettuu oikeaan asentoon. Moottorin takakiinnikkeinä käytetään laser-leikattuja teräslevyosia, joihin leikattuihin reikiin runkoputket hitsataan eli kiinnitys on myös muotosulkeinen. Kuvassa 28 on moottorin takakiinnikkeet alustavasti hitsattu.



Kuva 28 Moottorin kiinnikkeiden paikalleen sovitus

Takatukivarsien kiinnityspisteet ovat myös tarkat, joten niiden mittatarkkuuteen kiinnitettiin erityistä huomiota. Jousituksen linkkujen akseleita ei vielä kiinnitetty tässä vaiheessa, sillä niiden tarkka sijainti ei ollut tiedossa. Kiinnitys on järkevää tehdä vasta kun autossa on tukivarret ja olkavarret paikoillaan. Valmistusvaiheessa jouduttiin myös kiinnittämään huomiota tarkkoihin sääntöihin, liittyen turvakaarien tukiputkien asentoihin sekä ohjauspyörän sijaintiin, jotta auto täyttää Formula Student -kilpailuluokan säännöt. Valmis perusrunkorakenne on esitetty kuvassa 29.



Kuva 29 Valmis runkorakenne

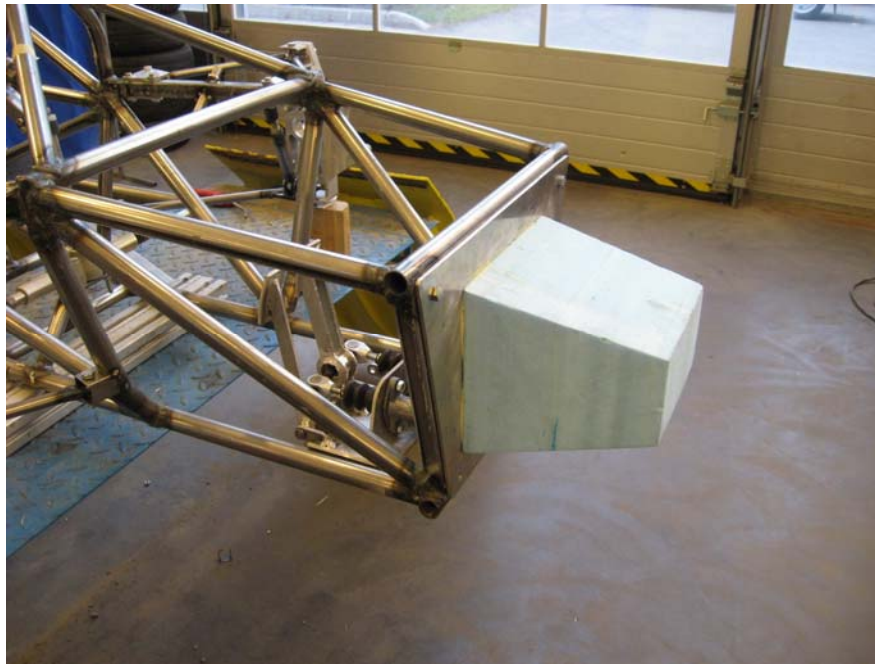
Runkoa punnittiin valmistusvaiheen aikana ja verrattiin saatuja tuloksia mallinnuksesta laskettuun massaan. Punnituksessa kävi ilmi, että mallinnus vastaa massan osalta hyvin valmistettua runkoa. Valmiin perusrungon massa on 30,7 kg, jota voidaan pitää onnistuneena saavutuksena.

6.3 Rungon turvavarusteet

Kuljettajaa passiivisesti suojaavia rakenteita rungossa ovat: keulassa sijaitseva törmäysvaimennin ja ohjaamon ja moottoritilan välissä oleva tulipelti.

Auton keulaan asennetaan ns. crashbox keulatörmäyssuoja, jonka tarkoituksena on pienentää kohtisuorassa törmäyksessä syntyvää hidastuvuutta. Crashboxia suunniteltaessa, tehtiin lukuisia testejä, jotta paras mahdollinen törmäysvaimennin löydettäisiin. Törmäysvaimentimelle on annettu säännöissä vaatimuksia: keskikiihtyvyyden on jätävä alle 20 g:n 7 m/s nopeudella tapahtuvassa törmäyksessä, törmäysvaimentimelle on annettu minimikoko ja

törmäysvaimentimen kiinnitystapa on määritelty. Testauksesta ja muusta siihen liittyvästä asiasta voitaisiin kertoa enemmänkin, mutta sitä ei sisällytetä tähän työhön. Parhaaksi osoittautui crashbox, joka on valmistettu Finnfoam-XPS -levystä. Törmäysvaimennin on liimattu Kiilto Kestopur-kaksikomponentti liimalla 4 mm:n vahvuiseen alumiinilevyyn, joka on kiinnitetty rungon etuosaan ruuviliitoksella. Kuvassa 30 on esitetty crashbox kiinnitettynä runkoon.



Kuva 30 Valmis crashbox asennettuna runkoon

Tulipellin tehtävänä autossa on eristää ohjaamo palavista tai kuumista nesteistä ja estää mahdollisessa moottoripalossa tulen leviäminen ohjaamoon. Kuljettajan taakse tehtiin kolmiosaisen tulipelti. Keskiosassa käytettiin 3 mm:n alumiinilevyä, jotta esimerkiksi törmäyksen voimasta irtoavat komponentit eivät lävistä tulipeltiä ja pääse tunkeutumaan ohjaamoon. Varsinaisen tulipellin reunoille tehtiin 1 mm:n alumiinilevystä sivuosat. Sivuosissa käytettiin ohuempaa levyä, koska levyn muoto oli haasteellinen ja riittävien taitosten tekeminen ohuempaan levyyn oli helpompaa. Kuvassa 31 on esitetty valmis tulipeltikokonaisuus. Tulevaisuudessa lienee helpointa tehdä tulipelti hiilikuidusta, koska sitä on helpompi muotoilla, lisäksi rakenteen voisi yhdistää suoraan kuljettajan istuimeksi.



Kuva 31 Valmis tulipelti

Rungon viimeistely tullaan tekemään kesäkuussa 2008, joten se ei aivan ehdi tähän työhön. Rungon maalaus kuitenkin todennäköisesti suoritetaan pulverimaalauksella, jolla saadaan hyvä ja kestävä maalipinta. Kuvassa 32 on autoon kiinnitetty kaikki jousituksen osat ja auto on pyörillään.



Kuva 32 Auto pyörillään

7 PÄÄTELMÄT

Kaiken kaikkiaan projekti on ollut erittäin opettavainen ja antanut tarvittavia valmiuksia erilaisten projektien läpivientiin. Projektin alkuvaiheen suunnitelmat ovat muuttuneet paljon ja suunnittelun työmäärän paljous yllätti koko tiimin. Alussa päätettiin heti, että auto pyritään suunnittelemaan mahdollisimman valmiiksi asti, jotta varsinaisessa valmistusvaiheessa ei suunnittelutyötä tarvitse tehdä. Mielestäni tässä onnistuttiin varsin hyvin ja se on helpottanut runsaasti auton valmistusvaihetta. Kokonaisuudessaan rungon suunnittelu ja valmistusprosessissa on ollut hienoa yhdistää koulussa opittuja asioita konkreettisesti. Rungolle asetetut tavoitteet on mielestäni saavutettu ja työn tuloksena syntyi tarkoituksen täyttävä kilpa-auton runko.

Projektin yksi tavoitteista oli myös toiminnan jatkaminen tulevaisuudessa, joka on jo osittain toteutunut uusien jäsenten mukaan ottamisen myötä. Projekti on toivottavasti lisännyt Tampereen ammattikorkeakoulun kiinnostavuutta uusien hakijoiden näkökulmasta.

LÄHTEET

1. Formula SAE Rules. [www-sivu]. [viitattu 23.4.2008] Saatavissa:
<http://students.sae.org/competitions/formulaseries/rules/rules.pdf>
2. Matti Lähtenmäki. [www-sivu]. [viitattu 15.5.2008] Saatavissa:
http://www.tamk.fi/~mlahten/arkistot/luj2_pdf/hypot_2.pdf
3. Esa Huhtamäki, alustavastaava, Haastattelu 29.5.2008. Tampereen ammattikorkeakoulu

LIITTEET

1. Materiaalitiedot
2. Keulatörmäyksessä syntyvät jännitykset
3. Moottorin kiinnityslevyjen piirrustukset
4. Sivutörmäyksessä syntyvät jännitykset
5. Jarrutustilanteessa syntyvät jännitykset
6. Vääntökuormituksesta syntyvät jännitykset
7. Rungon ominaistuuksien muodot
8. Turvayön kiinnityslenkin kuormituskokeen kuvaaja