



FORMULA STUDENT –AUTON RUNGON SUUNNITTELU

Toni Kosonen

Opinnäytetyö

Kesäkuu 2011

Auto- ja kuljetustekniikka

Auto- ja työkonetekniikka

Tampereen ammattikorkeakoulu

TAMPEREEN AMMATTIKORKEAKOULU

Tampere University of Applied Sciences

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Auto- ja kuljetustekniikka
Työkonetekniikan suuntautumisvaihtoehto

KOSONEN, TONI: Formula Student -auton rungon suunnittelu

Opinnäytetyö, 36 sivua
Kesäkuu 2011

Insinööriyössä suunniteltiin Formula Student -auton runko. Tavoitteena oli suunnitella rungosta vääntöjäykkä, kevyt, turvallinen ja sarjavalmistukseen soveltuva. Tällaisia asioita Formula Student -kilpailuissa arvostetaan.

Suunnitteluohjelmanä käytettiin Catia V5R18 mallinnus ja lujuuslaskenta -ohjelmaa, jonka käyttöön raportissa myös perehdytään. Rungon tyyppiä ja materiaaliksi valittiin muotoaktiivista rakennetta noudattava teräsputkirunko. Suunnittelun tärkein asia oli muotoaktiivisen rakenteen noudattaminen, jonka ansiosta päästiin hyvään jäykkyyden ja massan suhteeseen. Teräsputki soveltuu hyvin materiaalina sarjavalmistukseen, hintansa ja työstettävyytensä vuoksi.

Rungon vääntöjäykkyydeksi tuli 3755 Nm/°. Runko kestää nokkakolarin, jossa syntyy 20 g:n hidastuvuus. Suuri vääntöjäykkyys on muotoaktiivisen rakenteen ansiota. Yhteistyö alustan suunnittelun kanssa onnistui hyvin ja komponentit (tukivarret, jousitus jne.) saatiin sijoiteltua hyvin. Tämä takaa, että suuresta vääntöjäykkyydestä on myös radalla hyötyä.

Työtä voidaan pitää hyvänä pohjana tuleville Formula Student -auton rungon suunnittelijoille, mutta myös muut muotoaktiivisista, lujista, jäykistä, mutta suhteessa keveistä rakenteista kiinnostuneet voivat hyötyä raportin lukemisesta.

Hakusanat: Formula Student, suunnittelu, teräsputkirunko, lujuuslaskenta, FEM, muotoaktiivisuus

ABSTRACT

Tampere University of Applied Sciences
Automobile and Transport Engineering
Automobile and Industrial Vehicle Engineering

KOSONEN, TONI: Formula Student Cars Frame Designing

Final Thesis, 36 pages
June 2011

In this thesis was designed Formula Student car frame. Goal was to design frame that would be; torsion stiff, light, safe and suitable for series production. These kind of things are appreciated at the Formula Student competition.

Catia V5R18 CAD and FEM program was used in designing. How to use this program in the designing process is also told in this report. For frame type and material was chosed steeltubular space-frame which follows triangulation strictly. Following triangulation was the most important thing in desingning, which enabled good stiffness to weight ratio. Steeltube is good material for series production, because of its price and workability.

Frames torsion stiffness is 3755 Nm/°. Frame endure head-on collision with 20 g acceleration. High torsion stiffness is because of carefully designed triangulation. This enables that stresses are formed evenly to the structure. Well managed cooperation with chassis designing guaranteed that high torsion stiffness is useful at track, because components (A-arms, suspension etc.) are in right places.

Thesis is good base for future Formula Student car frame designers, but also others that are intrested from triangulated, strong, stiff, but still light structures can benefit from reading this thesis.

Key words: Formula Student, designing, space frame, strength of materials, FEM, triangulation

Sisällys

TIIVISTELMÄ.....	2
ABSTRACT.....	3
1 ESIPUHE.....	5
2 JOHDANTO.....	7
3 SUUNNITTELUN TAVOITTEET.....	8
3.1 Formula Student -säännöt.....	8
3.2 Massa ja jäykkyys.....	9
3.3 Ajettavuus.....	11
3.4 Valmistettavuus.....	11
3.5 Valmistuskustannukset.....	12
3.6 Tavoitteiden yhteenveto.....	12
4 SUUNNITTELU.....	13
4.1 Perusrakenne ja materiaali.....	13
4.2 Tukivarsien, moottorin ja kuljettajan paikka.....	16
5 SUUNNITTELUVAIHEET CATIA V5R18 -OHJELMALLA.....	19
5.1 Johdanto ohjelmaan.....	19
5.2 Mallin luominen.....	19
5.2.1 2D-pohja (ZX_Base).....	21
5.2.2 Solmut (Nodes).....	22
5.2.3 Skeleton-viivaverkko (Skeleton).....	23
5.2.4 Tasot (Planes).....	24
5.2.5 Mallineet (Templates).....	25
5.2.6 Putkien jiraustasot (Split_Geometry).....	26
5.2.7 Osien pursottaminen.....	27
5.2.8 Koosteet (Joins).....	28
6 LUJUUSLASKENTA.....	29
6.1 Sivuttaiskuormitustapaus.....	29
6.2 Jarrutuskuormitustapaus.....	30
6.3 Törmäyskuormitustapaus.....	31
6.4 Vääntökuormitustapaus.....	33
7 PÄÄTELMÄT.....	35
LÄHTEET.....	36

1 ESIPUHE

Opiskelujeni käännekohta oli vuonna 2009 syksyllä, istuessani Tampereen ammattikorkeakoulussa kurssilla, missä opeteltiin Catia CAD-ohjelman käyttöä (CAD = Computer Aided Design). Siellä istuessani, mallinnellessani erilaisia osia ohjelmalla, mieleeni juolahti idea. Idea moottoripyörän suunnittelemisesta kyseisellä ohjelmalla. Hetken pohdittuani uskalsin onnekseni sanoa idean ääneen ystävälleni ja luokkakaverilleni Kimmo Karille. Tämä tapahtuma oli huikean tapahtumaketjun aloittaja, jonka loppua ei näy. Moottoripyörällä kävimme ajamassa Kaanaan mikroautoradalla kesän 2010 päätteeksi ja samoihin aikoihin sovin kauden 2011 Formula Student -tiimipäällikön Petri Vulon kanssa, että olisin seuraavan Formula Student -auton rungon pääsuunnittelija. Tämä oli luonteva jatkumo, koska olin juuri ollut moottoripyörän rungon pääsuunnittelijana ja kiinnostukseni runkojen suunnittelua kohtaan ei ollut lainkaan laantunut.

Innostukseni moottoripyöräilyyn avasi, idean avulla, oven projektiin, joka sai minut innostumaan runkosuunnittelusta. Innostukseni myötä, motivoituneena kehityin runkosuunnittelijana huimaa vauhtia ja tämäkin osaltaan synnytti, upean moottoripyörän ohella, varmuutta suunnitella Formula Student -auton runko ja kehittyä edelleen. Voidaankin sanoa, että moottoripyöräprojekti sai minut todella innostumaan oppimisesta ja olen huomannut, että mitä motivoituneempi olet oppimaan, sen mukavampi sinun on elää nykyajan informaatioyhteiskunnassamme. Olen innostunut niinkin paljon, että haen opiskelemaan filosofiaa Tampereen yliopistoon tänä keväänä.

Moottoripyöriin liittyy vauhti, testosteroni ja hieman erikoinen ajamisen vaativuus. Ajaminen kovaa synnyttää alkukantaisia tunteita, joiden lomassa taitojensa hiominen voi olla todella hyvän tuntuista. En, 1,5 vuotta sitten, osannut kuvitella parempaa huomista, kuin että olisin ollut viemässä tätä eteenpäin. Moottoripyöräinsinööri, kehittämässä uusia hedonismitehtaita. Moottoripyörät tuntuivat niin "siisteiltä".

Formulan rungon suunnittelua motivoi enemmänkin se, että halusin kehittyä runkosuunnittelijana ja näyttää taitoni. Tämä oli vahvana taustalla myös moottoripyörässä, mutta ei alulle panevana voimana. Ross Brawn on muun muassa nähty usein Saksan Formula Student -kilpailujen, meidänkin tiimin kauden päätapauksen, varikolla katselemassa kilpa-autoja ja mahdollisesti etsimässä uusia huippuosaajia.

Se miten näistä syistä, motivaatioista, olen muuttanut ja motivoitunut opiskelemaan filosofiaa jätetään toiseen kirjoitukseen. Mainitaan vain, että kysyin niin kauan miksi, että insinöörin työt alkoivat tuntumaan puuhun keskittymiseltä, metsän sijasta. Ja ei, raha ei riitä palkkioksi, paikkani määrittäjäksi.

Insinööriyön aiheesta tein, koska aihe kattaa asiat joista tulevana insinöörinä olen eniten kiinnostunut ja mistä olen ammattikorkeakoulussa opiskellessani täten myös paljon oppinut. Toivotaan, että kirjoitukseni inspiroisi muita opiskelijoita ja osaltaan auttaisi heitä ällistyttyviin tekoihin elämässään.

Kiitokset rakkaalle avopuolisolleni Teea Åmanille, tuesta ja ymmärryksestä. Kiitokset koko Tampere UAS Motorsport Formula Student -tiimille, erityisesti Petri Vaulolle. Kiitokset myös opinnäytetyön ohjauksesta vastanneelle yliopettajalle Tauno Kulojärvelle, hyvästä ohjauksesta prosessin aikana.

2 JOHDANTO

Formula Student -järjestö on perustettu, jotta opiskelijat pääsisivät suunnittelemaan ja valmistamaan formulaa muistuttavan kilpa-auton ja kilpailemaan niillä vuosittain erilaisissa tapahtumissa ympäri maailmaa. Tämä muun muassa opiskelijoiden oppimisen parantamiseksi ja ehkä myös kanavaksi työllistymiseen, esimerkiksi moottoriurheilun pariin. TAMK on ollut mukana sisäisen yrityksensä, Tampere UAS Motorsportin, kautta kilpailussa vuodesta 2008 asti. Tiimi ja kilpailu yleensä on loistava tapa kehittää insinööritaitoja opiskeluiden ohella. Auton täytyy olla joka vuosi tietyllä tavalla erilainen niin sanottu prototyyppi.

Tavoitteena on suunnitella vääntöjäykkä, kevyt, turvallinen ja sarjavalmistukseen soveltuva Formula Student -auton runko. Rungon tulee olla myös kyseisten kilpailuiden sääntöjen mukainen. Työssä tehdään tiivistä yhteistyötä alustan suunnittelun kanssa. Tarkoitus ei ole suunnitella alustaa eli esimerkiksi tukivarrien kiinnityspisteiden tai jousituksen sijaintia, vaan yhdessä mietitään kokonaisuuden kannalta parhaat ratkaisut. Projektissa rungon suunnittelijan tärkein vastuualue on liittää auton eri komponentit edellä mainittujen tavoitteiden mukaisesti toisiinsa ja taata alustalle riittävän vääntöjäykkä pohja.

3 SUUNNITTELUN TAVOITTEET

3.1 Formula Student -säännöt

Formula Studentin keskusjärjestö (students.sae.org) on laatinut kilpailusäännöt joiden pohjalta kilpailujärjestäjillä on omat sääntönsä. Kilpa-auton täytyy olla kaikkien niiden järjestäjien sääntöjen mukainen joiden järjestämiin kilpailuihin halutaan osallistua.

Keskusjärjestön säännöissä on annettu rungon suunnittelulle kaksi erilaista vaihtoehtoa, perinteiset säännöt ja tälle kaudelle (2011) uudistuksena tulleet vaihtoehtoiset säännöt. Keskusjärjestön säännöt on osoitteessa: students.sae.org/competitions/formulaseries/rules/ (17.5.2011). Sääntöjen osan 2 artikkelit 1 – 12 käsittelevät suurimman osan kummastakin vaihtoehdosta suunnitella runko. Vaihtoehtoista runkoa koskevat muutokset on sääntöjen liitteessä AF.

Kauden pääkilpailussamme Saksassa (formulastudent.de) ei hyväksytä vaihtoehtoisia rungon sääntöjä vielä vuonna 2011. Syyksi ilmoitetaan, että säännöt ovat vielä kehitysvaiheessa.

Säännöt ovat olemassa monesta eri syystä. Tärkein on turvallisuus. Säännöillä pyritään myös muun muassa tasoittamaan kilpailua, arvostamalla pisteytyksessä myös valmistuskustannuksia, nopean kilpa-auton lisäksi. Pyrkimyksenä on myös ohjata kilpailevien tiimien toimintaa siten, että tiimien insinööriopiskelijat oppisivat asioita, jotka vastaavat autoteollisuuden tarpeita.

3.2 Massa ja jäykkyys

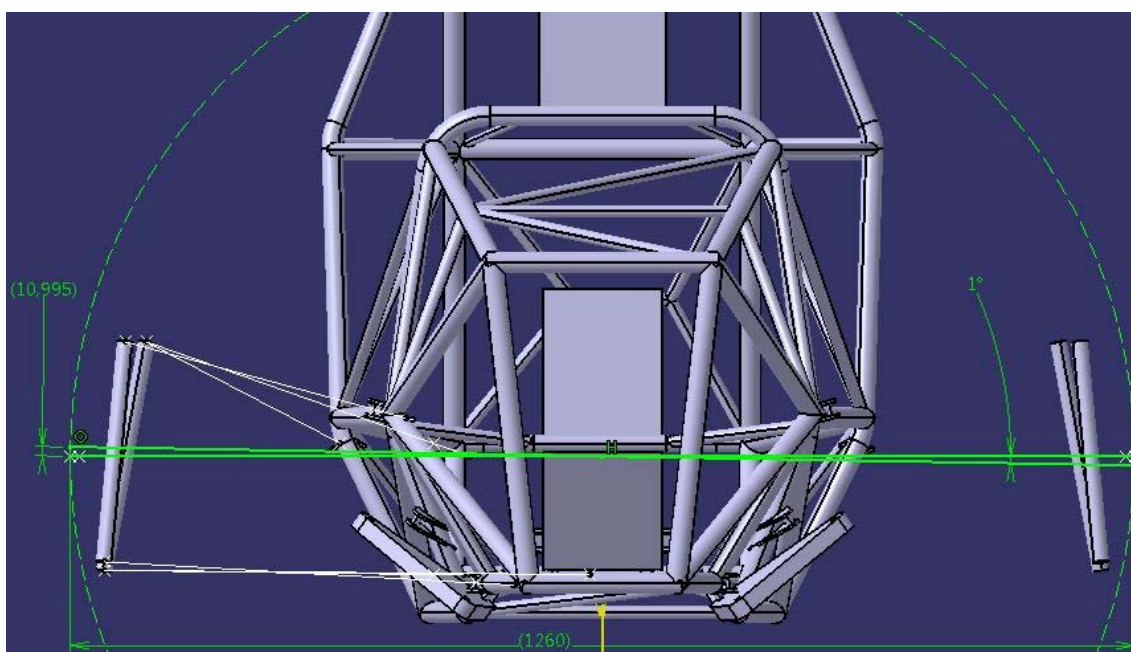
Massa ja jäykkyys ovat saman otsikon alla, koska ne ovat helppo ymmärtää toisiinsa vaikuttavina tavoitteina. Massalla tarkoitetaan rungon kokonaismassaa ja jäykkyydellä sitä kuinka paljon runko vastustaa liikettä kun siihen muodostuu rasituksia, esimerkiksi ajotilanteessa radasta, pyörien, pyörien ripustusten ja jousitusten kautta. Massa tulisi olla niin pieni kuin mahdollista ja jäykkyys riittävästi, jotta jousituksella on mahdollisuus toimia hyvin. Nämä tavoitteet ovat osin toisiaan poissulkevia, jos massaa vähentää on vaarana, että rungosta tulee joustavampi ja toisinpäin.

Ajonopeudet, jousituksen aiheuttamat rasitukset ja kaarrekiiktyvyudet ovat kilpa-auton optimaalista rungon jäykkyyttä määritettäessä tärkeimmät reunaehdot. Ajonopeuksiin vaikuttavat merkittävimmin auton teho, ajettavuus ja aerodynaamiikka. Jousituksen välittämiin rasituksiin vaikuttaa merkittävimmin ratojen kunto ja suunniteltu jousitus. Kaarrekiiktyvyyksiin vaikuttaa merkittävimmin downforce ja pito yleensä (esimerkiksi renkaiden laatu).

Säännöt määrittelevät runkoa ja jousitusta niin, että voidaan tehdä johtopäätös; rungosta on hyvä tehdä niin kevyt kuin sääntöjen puitteissa on mahdollista jos *vääntöjäykkyyden* suhde massaan pysyy hyvänä. Vääntöjäykkä runko takaa tasaiset pyöräkuormat epätasaisellakin tiellä ja näin antaa paremmat mahdollisuudet jousitukselle toimia suunnitellulla tavalla.

Hyvä vääntöjäykkyyden suhde massaan tarkoittaa tässä käsiteltävän *putkirungon* tapauksessa *muotoaktiivisuutta*. Putkirungon vääntöjäykkyys perustuu siihen, että putkia on riittävästi ja ne on asetettu niin, että ne muodostavat riittävästi kolmioita, nämä kolmiot tekevät rungosta muotoaktiivisen rakenteen. Säännöt edellyttävät tietyn määrän, tietyn painoisia (halkaisija ja seinämävahvuus on määrätty), tiettyihin paikkoihin tulevia putkia. Jos näiden putkien luomaa rakennetta ei vahvisteta riittäväällä kolmioinnilla, tulee jäykkyyden ja massan suhteesta huono.

Vääntöjäykkyys kuvastaa kuinka runko vastustaa kiertymistä. Arvo ilmoitetaan yksikössä Nm/° eli kuinka monta newtonia voimaa tarvitaan metrin momentilla, jotta runko kiertyy yhden asteen. Vääntöjäykkyyttä voidaan tarkastella tilanteessa (kuva 1), missä auton takapyörien liike on lukittu x-, y- ja z-akselilla ja toista etupyörää nostetaan ylöspäin samalla voimalla kuin toista painetaan alaspäin eli kierretään runkoa. Pyörien ripustukset ovat jäykkiä ja nivelöityjä, iskunvaimentimet ja jouset ovat jäykkiä. Painovoimaa ei oteta huomioon. Kuvassa 1 olevat vihreät viivat esittävät raidevälejä, vaakatasossa oleva on takapyörien raideväli ja yhden asteen kiertymässä siihen nähden oleva viiva on etupyörien raideväli.



KUVA 1. Vääntöjäykkyyden (Nm/°) määrittäminen.

Alla on esitetty kaava siitä miten etupyöriin asetetuista voimista saadaan lasketua vääntömomentin arvo, Nm. Vääntöjäykkyyden arvo on se vääntömomentin arvo, jolla runko kiertyy yhden asteen, Nm/°.

F = Etupyöriin asetettu joko nostava tai laskeva voima
b = Raideväli
T = Vääntömomentti

$$T = 2F * b$$

3.3 Ajettavuus

Ajettavuudella tarkoitetaan sitä kuinka nopeasti rataa kilpa-autolla on mahdollista kiertää. Kuinka hyvin auto ja kuljettaja toimivat yhteen nopean kierrosajan saavuttamiseksi.

Rungon suunnittelussa tämä täytyy ottaa huomioon. Tukivarret ja jousitus kokonaisuudessaan täytyy olla kiinni hyvässä, vääntöjäykässä rungossa, jotta niiden toiminta olisi mahdollisimman optimaalista. Massakeskipiste, erityisesti kuljettajan ja moottorin sijoittelussa on syytä ottaa myös tärkeänä asiana huomioon. Polttoainetankki, moottorin jäähdytysjärjestelmä ja akkukin painavat. Kuljettajan ergonomia on myös tärkeä seikka, auto olisi hyvä käsittää kuljettajan jatkeena, työkaluna, hämmästyttävän tekemisen mahdollistajana.

3.4 Valmistettavuus

Formula Student -kilpailussa runko on myös tarkoitus valmistaa (muiden auton osien ohella), jotta autolla voidaan ottaa kilpailutapahtumiin osaa, jotta todistetaan, että suunnitelmat ovat olleet toteuttamiskelpoisia. Tiimien konkreettisten asioiden valmistaminen myös konkretisoi koko Formula Student -ilmiötä, mistä on sille ja tiimeille hyötyä esimerkiksi sponsorien hankinnassa. Tämä saattaa myös motivoida joitakin osallistuvia opiskelijoita. Abstraktimmat, esimerkiksi tietoverkoissa toteutetut Formula Student -kilpailut voisivat olla nekin mielenkiintoinen tapa oppimiseen, helpommin kontrolloitavissa ja kustannuksiltaan huomattavasti edullisemmat ainakin.

Valmistus täytyy siis huomioida suunnittelussa. Valmistettavuus on yhtenä oleellisena syynä siihen, että rungon tyypiksi on valittu teräspuutkirunko. Toisena mainitsemisen arvoisena syynä voidaan pitää saatavilla olleen suunnittelun osaaminen juurikin teräspuutkirungoissa. Hiilikuituepoksikomposiitista valmistettu monokokkirunko olisi ollut toinen vaihtoehto. Hiilikuituepoksikomposiittimonokokilla olisi mahdollista päästä parempaan jäykkyyden ja massan suhteeseen, mutta valmistusprosessi ei sovellu yhtä hyvin sarjavalmistukseen sekä se on hieman kalliimpaa.

Tavoitteeksi asetettiin, että jäykkyyden ja massan suhde on tärkeämpää kuin helppo valmistettavuus. Tässä tapahtui virhe. Formula Student -tuomarit arvostavat myös sarjatuotettavuutta ja tätä olisi ollut syytä huomioida enemmän. Eli vaikka monimutkaisemmalla rakenteella päästäisiin *vähän* parempaan lopputulokseen, kilpa-auton reunaehtoja ajatellen, niin Formula Student -kilpailussa merkitsee myös autoteollisuuden reunaehdot, muun muassa juurikin hyvä sarjatuotettavuus.

3.5 Valmistuskustannukset

Laatuhintasuhde on myös tärkeä Formula Student -kilpailuissa. Suunnittelussa on tärkeää miettiä valmistuskustannuksia, jotka sarjatuotannossa tulevat helposti suurimmaksi osaksi kokonaiskustannuksista ja määräävät merkittävästi tuotteen myyntihintaa.

Valmistuskustannuksiin vaikuttaa kuinka nopea ja yksinkertainen runko on valmistaa. Tähän taas vaikuttaa se, kuinka hyvin valmistusprosessi on suunniteltu. Rungon suunnittelijan on syytä tehdä yhteistyötä tiiviisti myös valmistusprosessin suunnittelijan kanssa, ellei itse vastaa siitä.

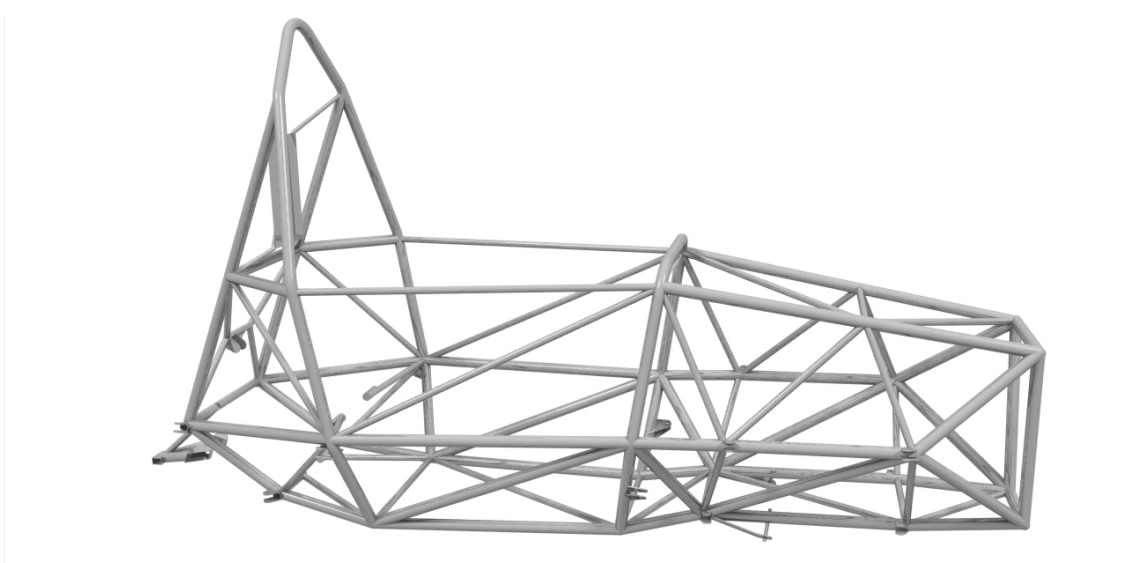
3.6 Tavoitteiden yhteenveto

Kevyt ja jäykkä runko, joka toimii kuljettajan ergonomisena työkaluna, jossa on ajateltu myös sarjavalmistusta eli on kohtuullisen yksinkertainen valmistaa ja valmistuskustannuksiltaan edullinen. Tällaiset tavoitteet Formula Student -auton rungon osalta ovat hyvät Tampere UAS motorsport tiimille, kaudelle 2011.

4 SUUNNITTELU

4.1 Perusrakenne ja materiaali

Perusrakenteeksi ja materiaaliksi valittiin muotoaktiivista rakennetta noudatteleva teräsputkirunko (kuva 2). Syynä se, että teräs on halpaa ja muotoaktiivisen rakenteen avulla siitä on mahdollista suunnitella ja valmistaa jäykkä sekä kevyt runko.



KUVA 2. Tampere UAS Motorsportin vuoden 2011 Formula Student -auton runko.

Teräkseksi on valittu Rautaruukin Form-suurlujuusteräs. Tämä on laatuhihtasuhteelta hyvä valinta, koska omaa hyvän hitsattavuuden ja vähintään 500 MPa:n myötölujuuden sekä on halpaa. Teräksen kimmokerroin ollessa 210 GPa soveltuu se senkin puolesta hyvin käyttötarkoitukseen, suhteellisen vähän joustavana materiaalina, verrattuna esimerkiksi alumiiniin, jonka kimmokerroin on n. 70 GPa.

Muita vartenotettavia vaihtoehtoja rungon materiaaliksi ja tyyppiä on yksi; hiilikuituepoksikomposiittimonokokki. Tämä on yksiosainen hiilikuituepoksikomposiittista valmistettu runko. Etuna on mahdollisesti parempi lujuuden ja massan suhde. Materiaalina tämä on kalliimpaa. Nämä asiat eivät ole esteitä, päinvastoin, jos kiinnostusta on.

Teräs kestää vetoa ja puristusta tasaisesti joka suuntaan (isotrooppinen materiaali). Hiilikuituepoksikomposiitin lujuus on suurempi vedettäessä tai puristettaessa (vedettäessä lujuus on suurin) epoksissa olevien kuitujen pituussuuntaan (ortotrooppinen materiaali). Muotoaktiivisuus mahdollistaa sen, että rasitukset aiheuttavat rungon putkiin lähinnä veto- tai puristusjäännityksiä, ei leikkaus- tai vääntöjäännityksiä.

Teräsputkirunko on opetuksellisesti hyvä, koska muotoaktiivisuus auttaa hyvin ymmärtämään mihin erilaisten rakenteiden lujuus perustuu. Pat Clarke kirjoittaa Formula Student Germany:n sivuilla kolumnissaan asiasta näin:

”The thing I like most about a space-frame structure is that it really educates the designer in management of the load paths! It is an educational tool par excellence. Some professors will not permit their teams to consider any other structure for this very reason.” (Pat Clarke, 2009).

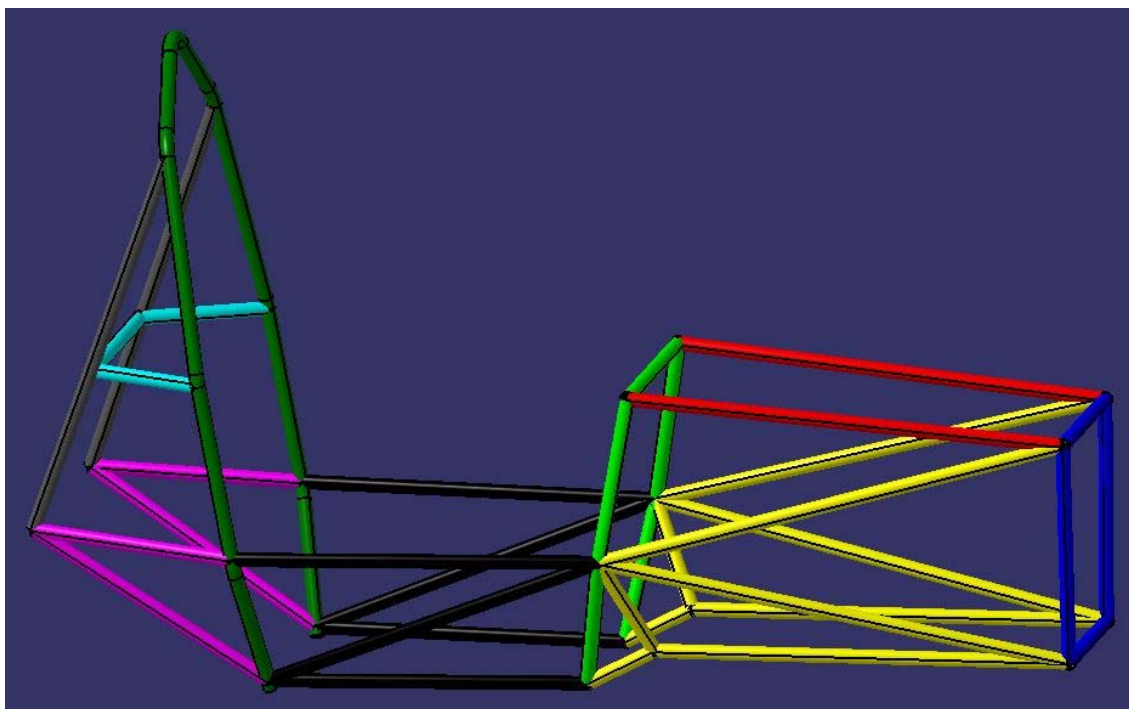
Suomennos:

Asia josta eniten pidän putkirungossa on, että se todella opettaa suunnittelijalle voimien kulkureittien hallintaa! Se on opetuksellisena työvälineenä lähes täydellinen. Tästä syystä jotkut professorit eivät anna heidän tiimiensä harkita muuta rungon tyyppiä.

Koko artikkeli internetosoitteessa:

<http://www.formulastudent.de/academy/pats-corner/advice-details/article/pats-column-space-frame-chassis/>

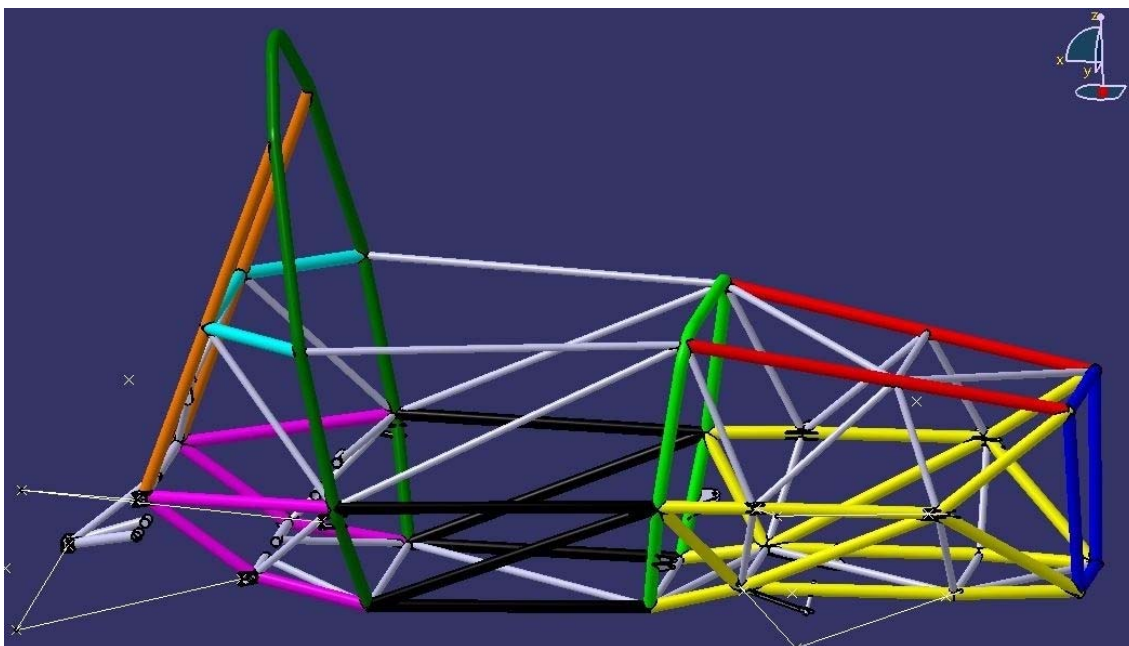
Kuvassa 3 on esimerkki siitä, mitä putkia perinteiset säännöt edellyttävät putkirungolta. Värit esittävät mitä sääntöjen termejä, mitkäkin putket vastaavat. Eli rungosta voisi tehdä kyseisen kuvan kaltaisen. Järkevää on lisätä sääntöjen kannalta ylimääräisiä putkia, muun muassa jäykkyyden ja tukivarsien kiinnityspisteiden vuoksi.



KUVA 3. Esimerkki sääntöjen vaatimista putkista, perinteisiä rungon sääntöjä noudattaen ja putkirunkoa suunniteltaessa.

Tumman vihreä = Main Hoop
 Vihreä = Front Hoop
 Harmaa = Main Hoop Bracings
 Turkoosi = Shoulder Harness Bar & Bracings
 Pinkki = Main Hoop Bracing Supports
 Musta = Side Impact Structures
 Punainen = Front Hoop Bracing
 Keltainen = Front Bulkhead Support
 Sininen = Front Bulkhead

Kuvassa 4 valmis runko. Kuvasta nähdään miten sääntöjen vaatimat ja lisätyt putket siinä ovat.



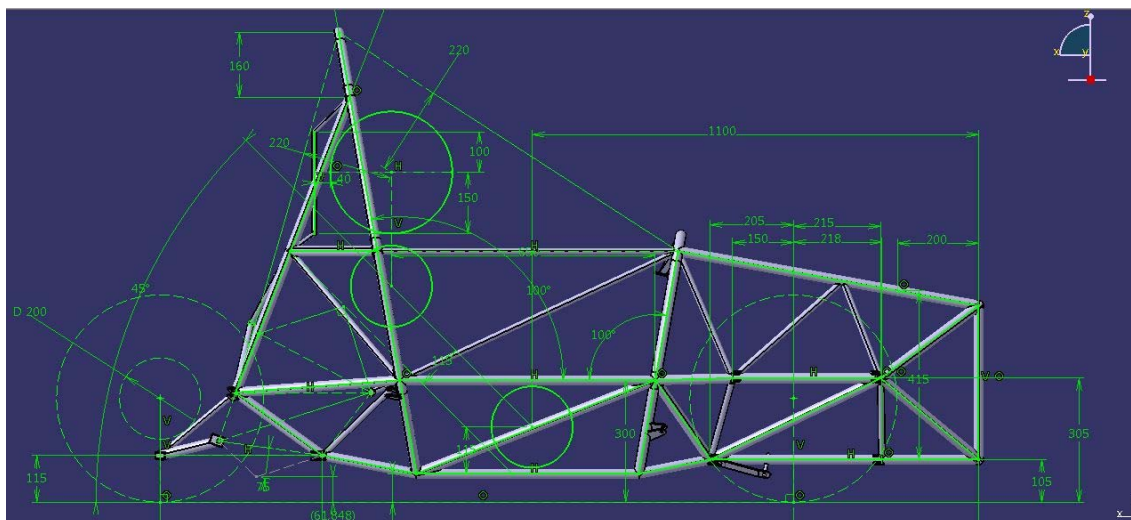
KUVA 4. Valmis runko.

4.2 Tukivarsien, moottorin ja kuljettajan paikka

Kilpa-auton suunnittelu alkaa pyöristä, radan ja renkaiden kosketuksesta, koska tämä määrää miten auton on mahdollista radalla liikkua, joten runko suunnitellaan pyörien suunniteltujen asentojen ehdoilla. Pyörien paikkoihin ja asentoihin taas vaikuttaa merkittävimmin massa ja sen sijainti (massakeskipiste) tai massakeskittymien sijainti neljän tukipisteen (pyörien) suhteen.

Yksinkertaisemmin ajateltuna massakeskipiste on hyvä saada kulkusuuntaan keskelle ja mahdollisimman matalalle. Kaarrekäyttäytymisen kannalta ideaali olisi pyörien ja tien kitkapinnan taso (mahdoton), jolloin täysin tasaisella tiellä auto ei kallistelisi kaarteessa lainkaan. Toisaalta tämä ei olisi ideaali kiihdytystilanteessa, missä takavetoiselle autolle on edullista jos massakeskipiste on korkeammalla, koska tämä siirtää painoa takapyörille kiihdytyksessä nostaen pitoa, kun taas etuvetoisella massapisteen pitäisi olla tien alapuolella (mahdoton). On myös huomioitava etu- ja takapainoisuus, joka vaikuttaa esimerkiksi yli- ja aliohjaavuuteen. Projektissamme alustan ja ajettavuuden suunnittelija vastasi näistä asioista, jonka kanssa tein yhteistyötä. Hän ajatteli nämä asiat, minä rungon asiat ja yritimme löytää yhdessä parhaan lopputuloksen.

Kuvasta 15 nähdään, että runko on täysin muotoaktiivinen sivustapäin katsottaessa. Moottori toimii takana osana runkoa. Tukivarsien kiinnityspisteet ovat solmukohdissa, kolmioiden päissä.



KUVA 15. Runko ja sen geometriaa, oikea sivu.

Ohuemmat putket, joita säännöt eivät vaadi, ovat halkaisijaltaan 15 mm x 1,25 mm, sääntöjen määräämien putkien ollessa 25 mm x 1,5...2,5 mm. Tämä, koska muotoaktiivisuudella saavutetaan tarvittava jäykkyys ohuemmillakin putkilla, mutta sääntöjen pakottamana on käytettävä tietyissä paikoissa paksumpia. Moottorin tuennassa on käytetty 20 mm x 1,25 mm putkea.

Suunnittelussa lähdettiin liikkeelle siitä, että moottori laitetaan niin taakse kuin moottorin yhteydessä olevalta vaihdelaatikolta takapyörille momentin siirtävät osat antavat myöden. Istuin asetetaan niin, että kuljettajan selkä on 45 asteen kulmassa vaakatasoon nähden ja niin lähellä moottoria kuin mahdollista. Sääntöjen vaatimat mallineet täytyy myös mahtua rungon sisälle, mikä alustavasti jo takaa kuljettajalle tilat. Kuljettajien kanssa mietittiin tarkemmin esimerkiksi jalkatilojen tilavuus. Kuljettaja ja moottori täytyy myös saada mahdollisimman alas, maavara huomioiden. Näin autosta saadaan lievästi takapainoinen ja massakeskipisteeltään matala. Rungon tehtävänä on liittää kaikki osat ja kuljettaja luja, turvallisesti ja kevyesti toisiinsa.

Ensimmäinen ehto on kestävyys, mutta hyvässä rungossa tärkeää on, että *käytössä* tulevien rasiusten synnyttämät jännitykset ilmenevät rungossa mahdollisimman tasaisesti, tätä muotoaktiivinen rakenne edesauttaa. Tärkeää on tietää minkälaisia rasiustilanteita käytössä tulee. Suunnittelua ohjaavaan lujuuslaskentaan valitaan näistä tilanteista ne joissa tulee suurimmat rasitukset. Näitä tilanteita varten suunnitellaan runko siten, että tilanteissa rasitukset synnyttävät runkoon jännityksiä mahdollisimman tasaisesti. Näin ei tule ylimääräistä massaa, johon rasiustilanteissa ei merkittäviä jännityksiä synny.

5 SUUNNITTELUVAIHEET CATIA V5R18 -OHJELMALLA

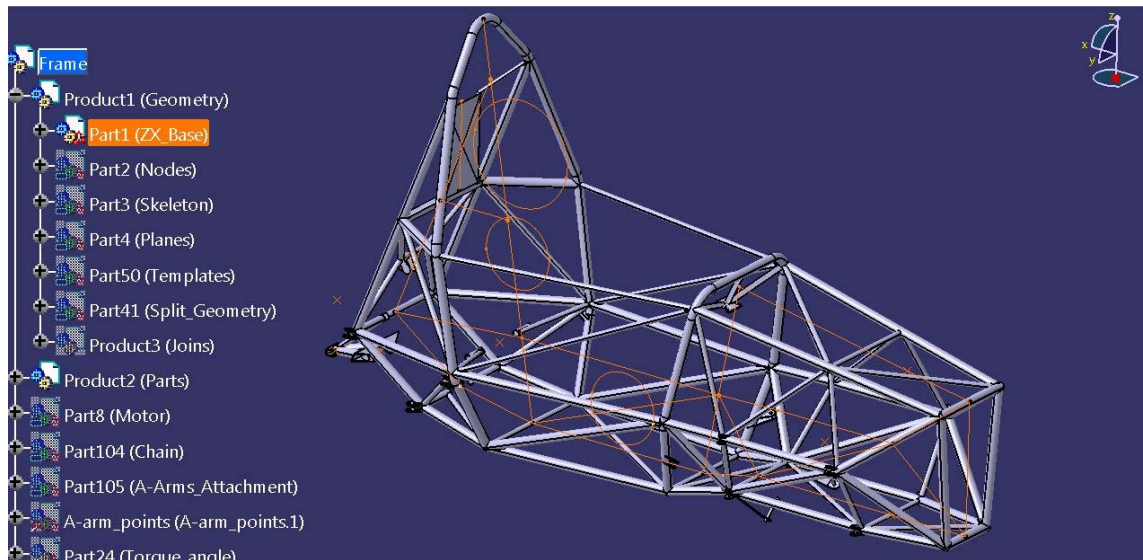
5.1 Johdanto ohjelmaan

Suunnittelutyökaluna oli Catia V5R18 -ohjelma. Putkirunkoa suunniteltaessa on hyvä käyttää niin sanottua skeleton-periaatetta. Avaruuteen luodaan solmuja, jotka ovat putkien liitospisteitä ja niiden väliin luodaan viivoja, jotka toimivat putkien keskiviivoina. Viivat muodostavat ”skeleton-verkon”. Viivojen puoliväliin normaaliin kulmaan viivaan nähden luodaan tasot, joille putkien ulkohalkaisijan poikkileikkausprofiili piirretään. Tästä pursotetaan itse osa, eli putki. Lopuksi vielä leikataan putken päät siten, että ne sopivat yhteen. Tämä on laserleikkauksen kannalta todella tärkeää.

Miten tämä teoria käytännössä toteutetaan riippuu suunnittelijan mieltymyksistä järjestää asiat. Tee hierarkiasta niin selkeä ja toimiva kuin osaat, tämä kustautuu positiivisesti kuitenkin jossain vaiheessa, *kun* mallia tarvitsee muuttaa. Suunnitelmat kannattaa tehdä niin, että niitä on helppoa kehittää. Kaikki ideat eivät kuitenkaan tule heti. Tässä esitän yhden vaihtoehdon.

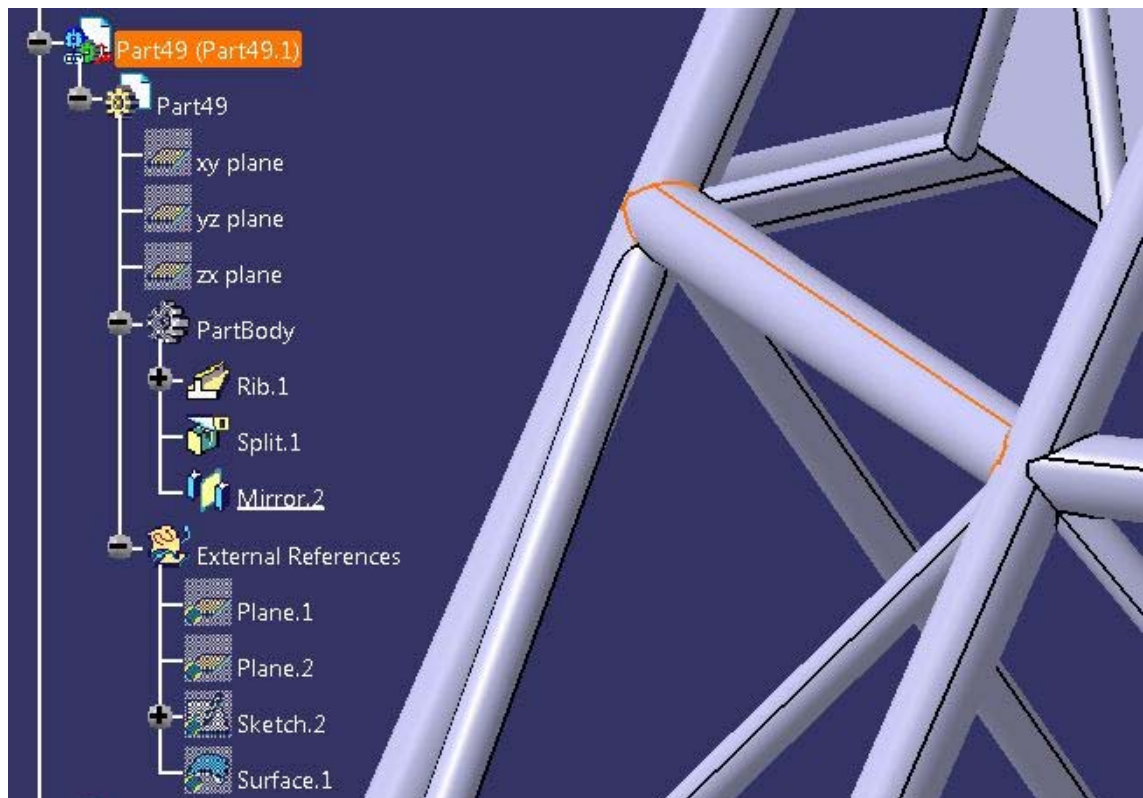
5.2 Mallin luominen

Tässä osiossa esitetään mallinnusvaiheet kohta kerrallaan. Kuva 5 osien hierarkiapuusta ohjelmassa selventää suunnittelulogiikkaa. Product1 (Geometry) alla kaikki perustuu Part1 (ZX_Base) osaan, joka on rungon 2D-pohja. Part2 (Nodes), solmut, perustuu 2D-pohjaan. Part3 (Skeleton), solmujen väliset viivat, perustuu solmuihin. Part4 (Planes), poikkileikkaustasot, perustuu solmujen väliin viivoihin. Näille tasoille Product2 (Parts) alla olevien osien sisällä olevat putkien poikkileikkausprofiilit ovat piirretty ja näistä profiileista pursotetut konkreettiset osat, joista valmiit kappaleet muodostuu, sijaitsevat.



KUVA 5. Osahierarkiapu Catiassa ja 2D-pohjan (ZX_Base) asettuminen mallissa.

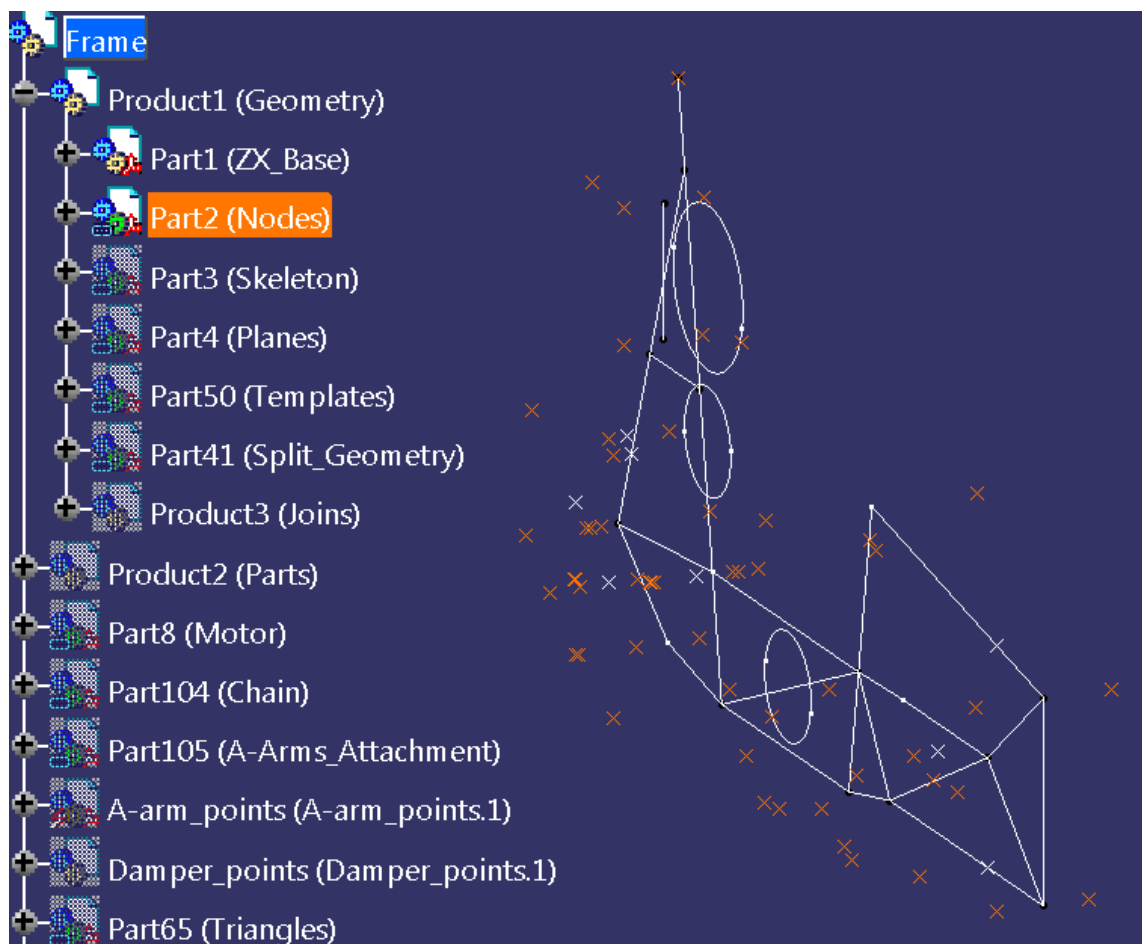
Product1 (Geometry) pitää sisällään kaiken geometrian mitä konkreettisten osien luominen tarvitsee. Product2 (Parts) sisällä on ainoastaan pursotusgeometriat ja niistä pursotetut osat sekä näiden viimeistely (esimerkiksi putken pään leikkaukset). Katso kuva (kuva 6).



KUVA 6. Esimerkki Product2 (Parts) alla olevan osan sisäisestä hierarkiasta.

5.2.2 Solmut (Nodes)

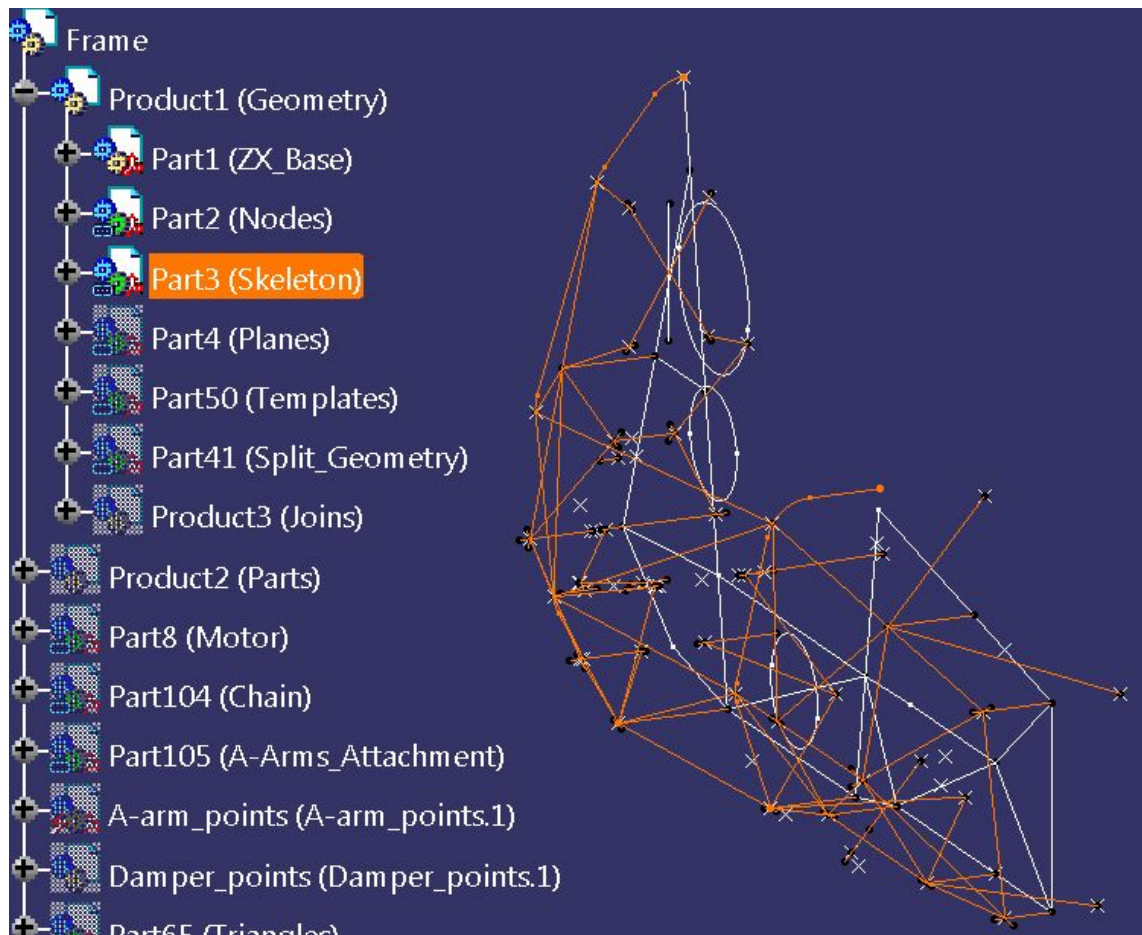
Solmut ovat pisteitä joissa putket liittyvät toisiinsa. Kuvassa 8 nähdään kuinka solmut ovat avaruudessa. Solmut laajentavat 2D-pohjan 3D-malliksi. Solmut ovat pisteitä ja ne ovat tyypiltään koordinaatistoon perustuvia, origon ollessa 2D-pohjan tietty piste. Solmujen tarkoitus on ainoastaan ”laajentaa” malli, tehdä siitä kolmiulotteinen. Muiden dimensioiden muutokset tehdään 2D-pohjaan, näin malli pysyy selkeänä ja toimivana. 2D-pohjassa on solmupisteen x- ja z-koordinaatti ja solmupisteen luomisen yhteydessä syötetään paljonko 2D-pohjaa halutaan ”laajentaa”, eli y-koordinaatti. Runko on suurelta osin symmetrinen 2D-pohjaan nähden, näiltä osin solmuja on ainoastaan toisella puolella, kuten geometriaa yleensä. Valmiista osista luodaan peilikuvia tarvittaessa.



KUVA 8. 2D-pohjaan perustuvat solmut (Nodes) oranssilla ja 2D-pohja.

5.2.3 Skeleton-viivaverkko (Skeleton)

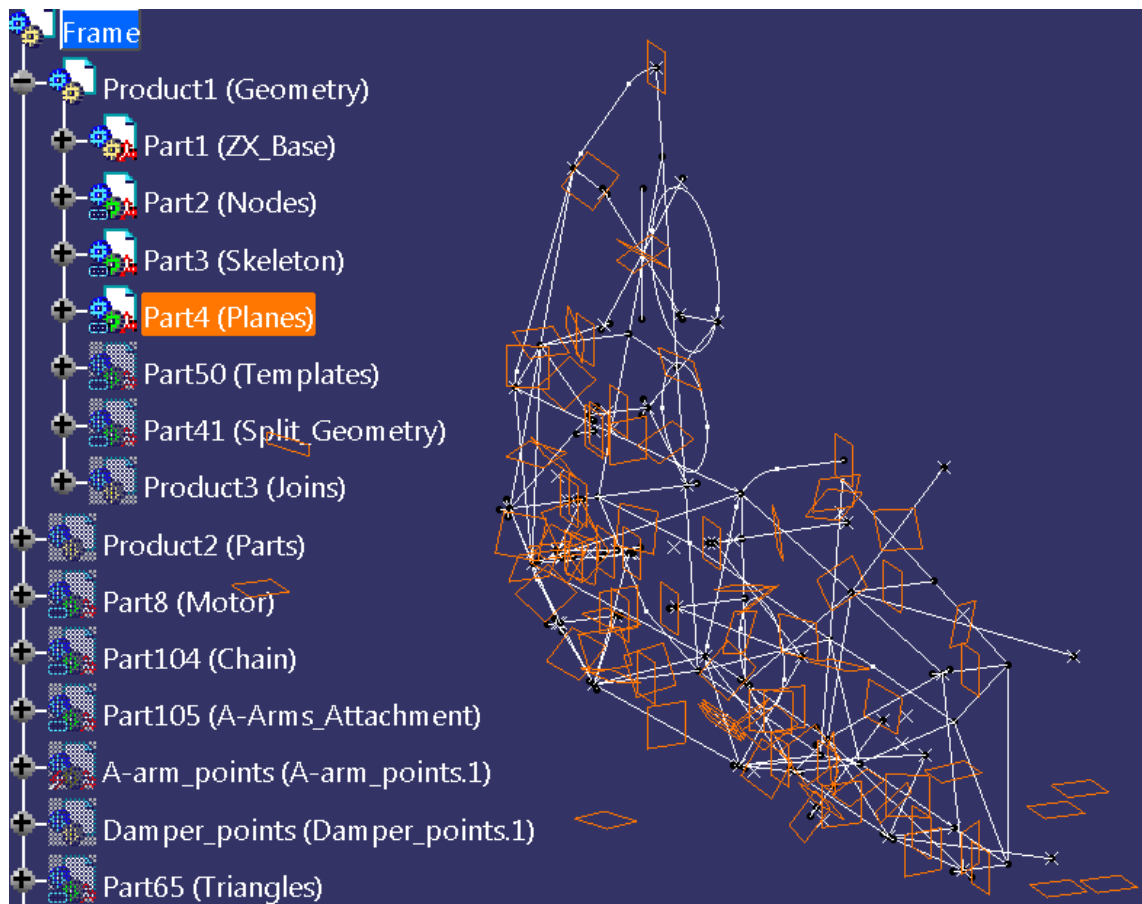
Seuraavaksi luodaan putkien keskiviivat solmupisteiden välille. Taivutettujen Front ja Main -Hoop putkien keskiviivat sisältyvät Part3 (Skeleton) osan alle myös, ne piirretään tasolle, jotka perustuvat solmuihin (luodaan taso kolmeen eri pisteeseen perustuen). Muut, suurin osa, viivoista on siis yksinkertaisia point-to-point-tyyppisiä, solmupisteestä toiseen. Suurin osa putkista on 2D-pohjan suhteen symmetrisiä, joten niille ei tarvitse luoda keskiviivaa. Katso kuva 9.



KUVA 9. Solmuihin perustuva skeleton-viivaverkko (Skeleton) oranssilla.

5.2.4 Tasot (Planes)

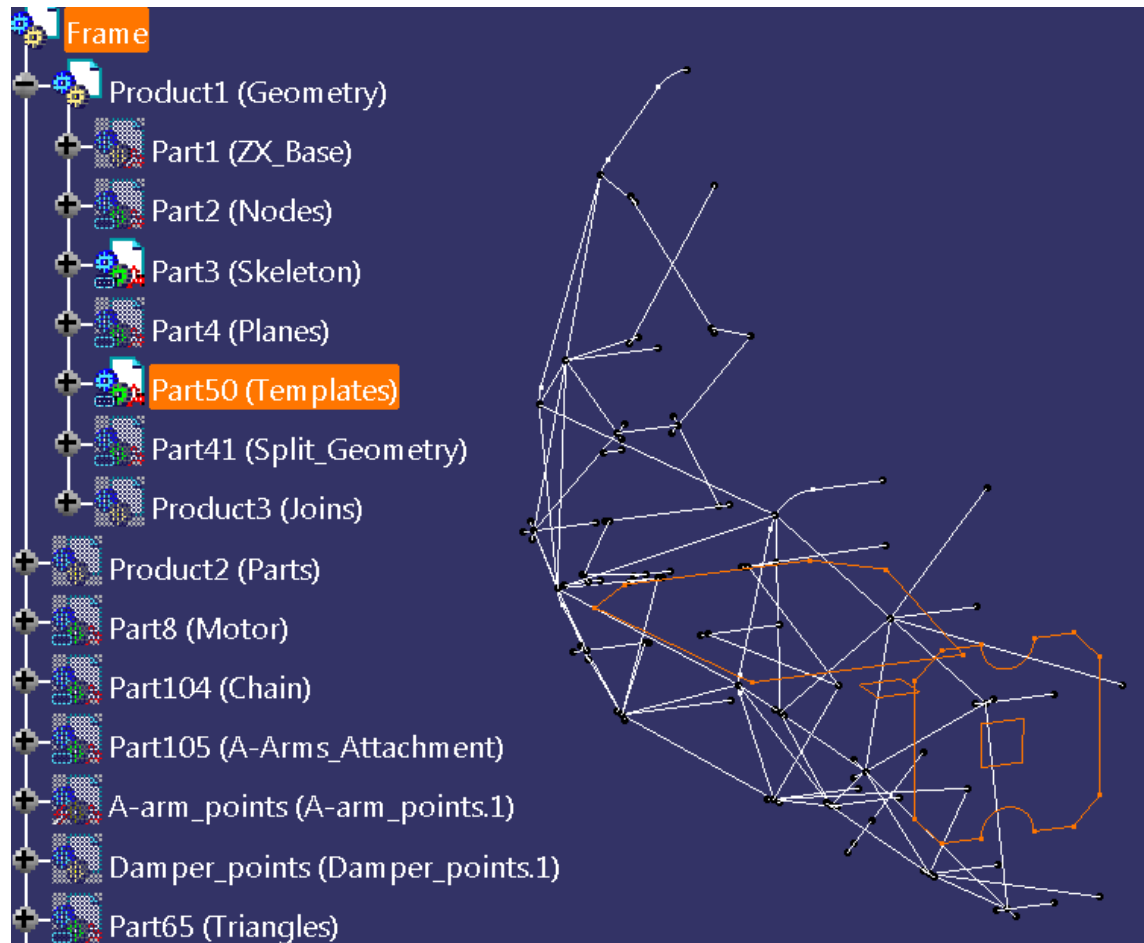
Putkien poikkileikkausprofiilien tasot perustuvat skeleton-verkon viivoihin. Näille tasoille putkien ulkohalkaisijoiden poikkileikkausprofiili piirretään ja näistä profiileista itse putket myöhemmin pursotetaan. Tässä osassa on muitakin tasoja, esimerkiksi Front ja Main -Hoop putkien keskiviivojen piirtämistä varten luodut tasot, jotka perustuvat solmuihin. Katso kuva 10.



KUVA 10. Tasot (Planes), joille putkien ulkohalkaisijoiden poikkileikkausprofiilit piirretään.

5.2.5 Mallineet (Templates)

Sapluunat, mallineet (Templates) ovat sääntöihin perustuvia ja määräävät merkittävästi kuljettajalle varattua tilaa. Mallissa ne auttavat hahmottamaan putkien asettelua. Ensin on luotu tasot koordinaatistoon perustuen ja sitten mallineet niille. Katso kuva 11.



KUVA 11. Mallineet (Templates).

5.2.6 Putkien jiirautasot (Split_Geometry)

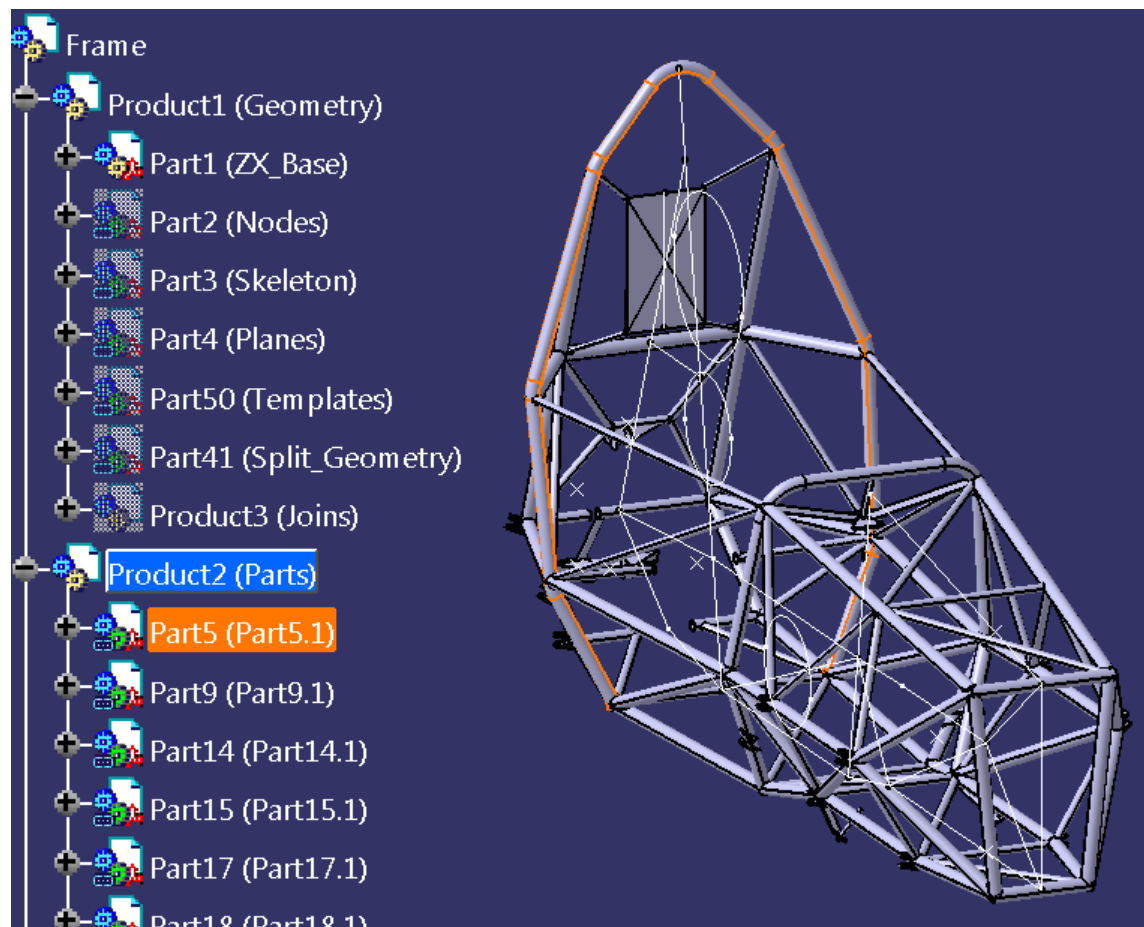
Putkien jiirautasot ovat tasoja, jotka ovat luotu, jotta pursotettujen osien, eli putkien päät saadaan jirattua toisiinsa. Tasojen luominen onnistuu hyvin bisectin -periaattella skeleton-viivoihin perustuen. Katso kuva 12.



KUVA 12. Jiirausgeometriat (Split_Geometry).

5.2.7 Osien pursottaminen

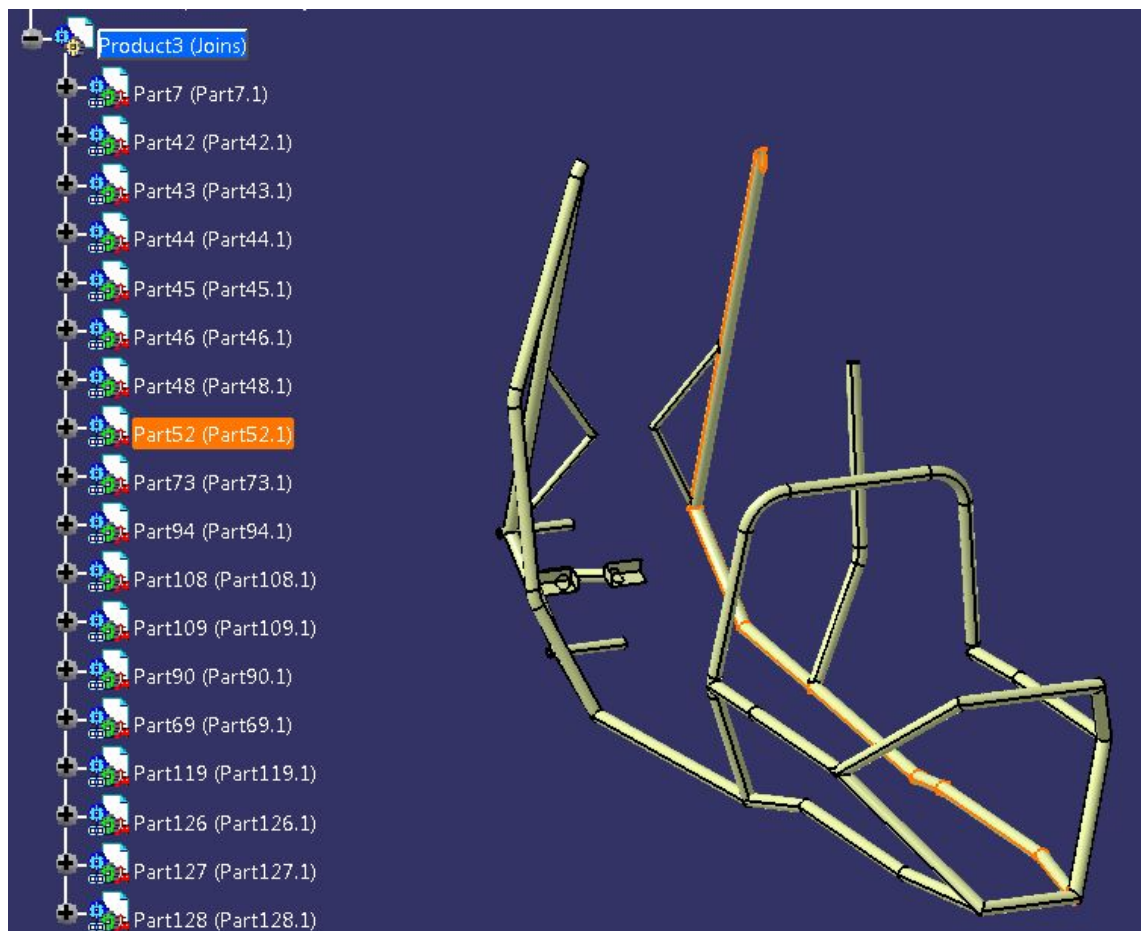
Kuvasta 13 nähdään, että jokaisella, muulla tavoin kuin peilikuvamaisuudella erilaisella putkella on oma ohjelman osansa Product2 (Parts) alla. Siellä ovat myös kaikki muut rungon osat, mallit, jotka ovat luotu valmistusta varten. Jos putkella on peilikuva 2D-pohjaan nähden on se mallinnettu peilikuvatyökalulla saman ohjelman osan sisään.



KUVA 13. Product2 (Parts) alta löytyvät putket. Oranssilla Main Hoop -putki.

5.2.8 Koosteet (Joins)

Koosteet luodaan pursotettujen, jiirastasoilla jiirattujen, putkien ulkopinnoista, jotta voitaisiin tehdä leikkaukset putkiin, jotka liittyvät solmukohtiin joissa tasojii-
rauksia on. Näitä tehdessä on hyvä huomioida, että mallissa ei saa olla para-
doksaalisia silmukoita. Tällä tarkoitetaan esimerkiksi tilannetta, jossa 1. putki on
leikattu 2. putken perusteella ja 3. putki leikattu 2. putken perusteella, tästä seu-
raa, että ei voida leikata 1. putkea vielä 3. putken perusteella. 3. putki saa muo-
tonsa 1. putkelta, 2. putken kautta. 1. putki ei voi antaa ja samalla ottaa muotoa
3. putkelle/putkelta. Tämä pätee myös putkien pinnoista luotuihin koosteisiin.
Selkeyden vuoksi ja paradoksien välttämiseksi on lähes jokaiselle tarvittavalle
koosteelle oman osansa. Katso kuva 14.



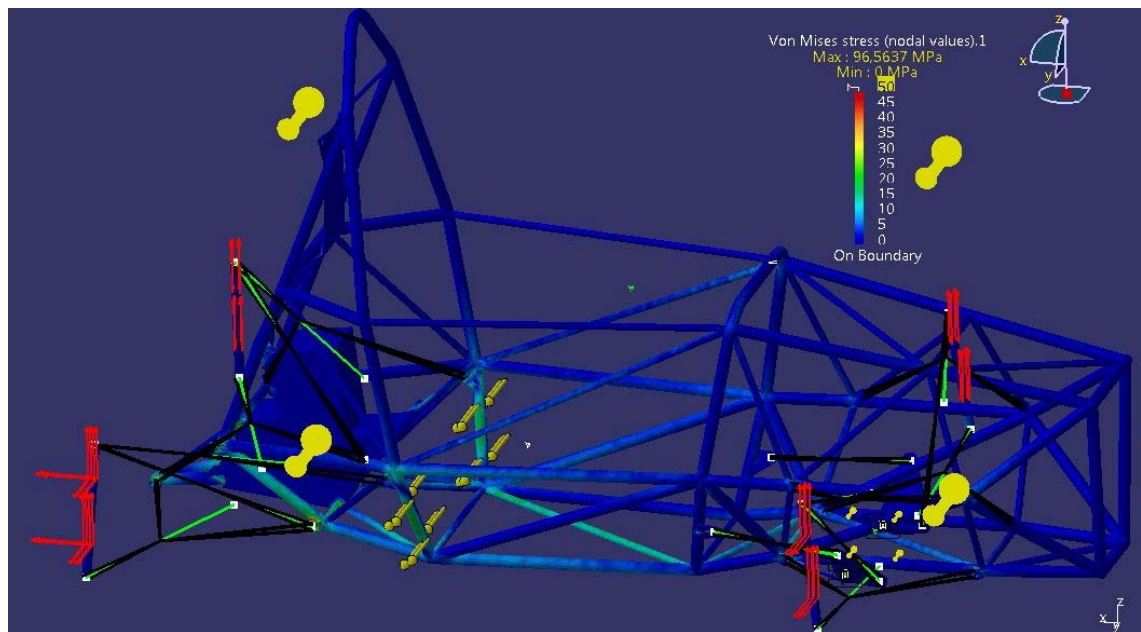
KUVA 14. Putkien pinnoista luodut koosteet (Joins). Yksittäinen kooste oranssil-
la.

6 LUJUUSLASKENTA

Sääntöjen määräämiä putkia on käytettävä mahdollisimman hyvin hyödyksi, rungon lujittamiseksi, pyöräkuormia ja vääntöjäykkyyttä ajatellen. Lujuuslaskentatarkastelut ovat rajattu neljään tärkeimpään tilanteeseen. Tilanteet tarkastelevat jännityksiä, jotka syntyvät; rengaspidon rajoilla kaarteessa ajettaessa, maksimihidastuvuudella tapahtuvan jarrutuksen aikana, rungon etupää edellä seinään törmätessä sekä tilanteessa, missä runko kiertyy (esimerkiksi epätasaisella tiellä ajettaessa).

6.1 Sivuttaiskuormitustapaus

Kuvassa 16 on sivuttaiskuormitustapaus. Tilanteessa on simuloitu kaarteessa syntyviä sivuttaiskiihtyvyyksiä. Rungosta ja moottorista aiheutuvat voimat on asetettu kiihtyvyydyökalun avulla, koska ne ovat mallissa massaltaan todelliset. Muita auton osia ei laskennassa ole huomioitu, koska ne eivät vaikuta tilanteessa merkittävästi. Massaltaan 100 kg kuljettajan 2 g:n kiihtyvyydellä aiheuttama 2000 N:n voima on asetettu Main Hoop -putken alaosiin, istuimen kiinnityskohtiin.

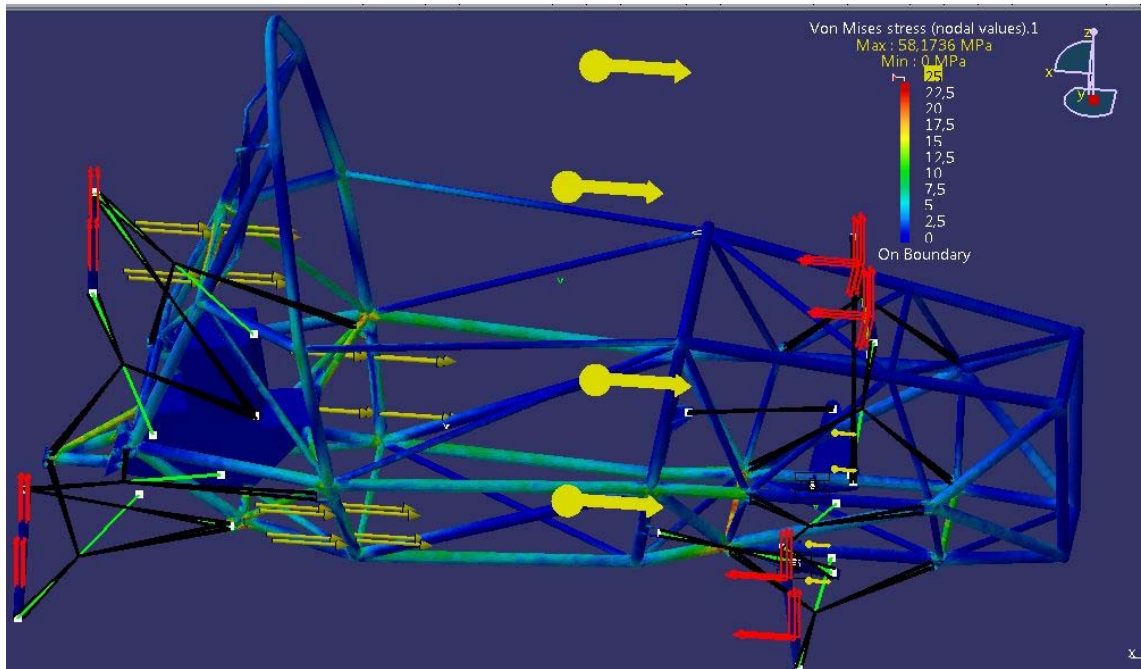


KUVA 16. Sivuttaiskuormitustapaus 2 g:n kiihtyvyydellä, von Mises -jännitystarkastelu, tapauksessa vaikuttavat voimat esitetty keltaisina nuolina, tuennat punaisella ja tukivarret sekä juositus mustilla viivoilla.

Oikean takapyörän liike on lukittu x-, y- ja z-akselilla, oikean takapyörän liike on lukittu y- ja z-akselilla. Tukivarret ovat jäykkiä, mutta päistään joka suuntaan nivelöityjä. Jousituksen iskunvaimentimet ja jouset ovat jäykkiä, mutta nivelpisteet oikein nivelöityjä. Kulkusuuntaan nähden vasemman puolen pyörien liike on lukittu z-akselilla.

6.2 Jarrutuskuormitustapaus

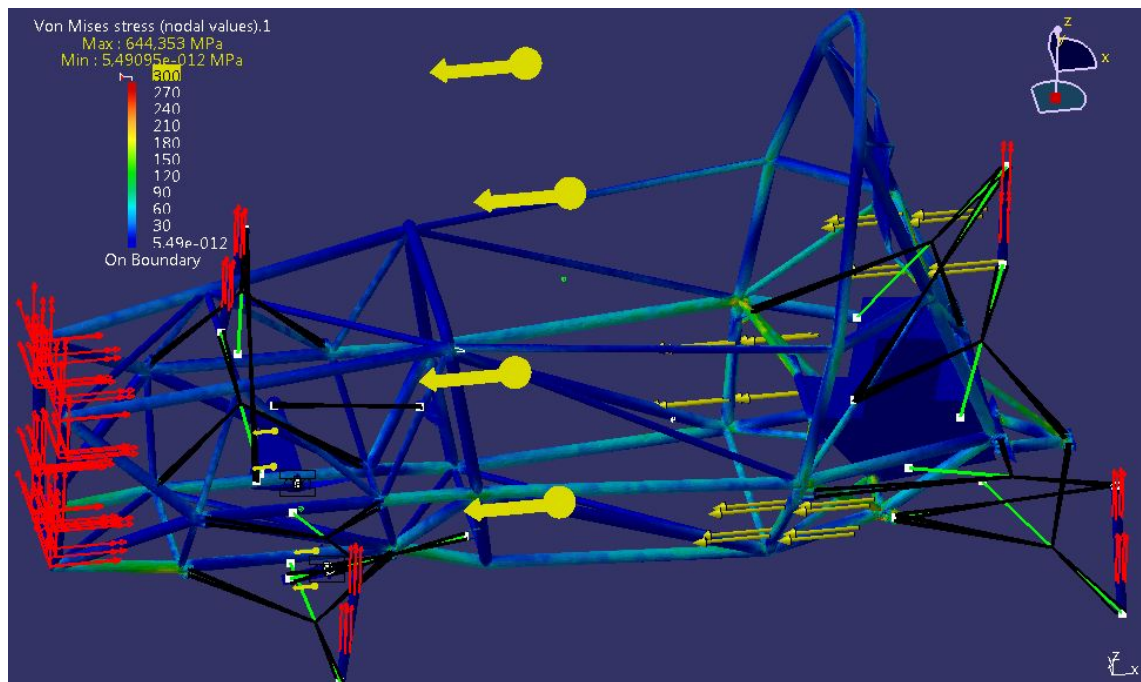
Kuvassa 17 on jarrutuskuormitustapaus 2 g:n hidastuvuudella. Kuljettaja on huomioitu turvavöiden kiinnityksissä yhteensä 2000 N:n voimana. Voimat ovat suunnattu kulkusuuntaan (x-akselille), hidastuvuutta vastaan. Vasemman etupyörän liike on lukittu x-, y- ja z-akselilla. Oikean etupyörän liike on lukittu x- ja z-akselilla. Takapyörien liike on lukittu z-akselilla. Kuvasta nähdään, että jännitykset syntyvät hyvin tasaisesti.



KUVA 17. Sivuttaiskuormitustapaus, 2 g:n hidastuvuudella, von Mises -jännitystarkastelu, tapauksessa vaikuttavat voimat esitetty keltaisina nuolina, tuennat punaisella ja tukivarret sekä juositus mustilla viivoilla.

6.3 Törmäyskuormitustapaus

Kuvassa 18 on törmäyskuormitustapaus eli seinään törmäys 20 g:n hidastuvuudella. Rungon etuosan Front Bulkheadin putkien liike on lukittu x-, y- ja z-akselilla ja kuljettajasta aiheutuvat voimat ovat asetettu samoin kuin jarrutuskuormitustapauksessa, mutta ovat suuruudeltaan kymmenkertaisia (20 kN).



KUVA 18. Törmäyskuormitustapaus, 20 g:n hidastuvuudella, von Mises -jännitystarkastelu, tapauksessa vaikuttavat voimat esitetty keltaisina nuolina, tuennat punaisella ja tukivarret sekä juositus mustilla viivoilla.

Kuormitustapauksessa on 645 MPa:n maksimijännitys, mutta mallia tarkastelemalla huomaa, että se on terävässä kulmassa mihin todellisuudessa tulee pyöreä hitsaussauma. Jos mallinnusvaiheessa ei pyöristä kulmaa, ohjelma pyrkii laskemaan sen niin terävänä, kuin ohjelmaan asetettu mesh-verkon koko antaa myöden. Tarkkaa mesh-verkkoa käytettäessä, kuten tässä tapauksessa, kulmasta ei tule laskentaan realistisen pyöreää, mikä suurentaa (teoreettisesti ja virheellisesti) tuloksissa jännityksiä tällaisissä paikoissa.

Eulerin nurjahdusjännityksen laskentakaavalla tarkastetaan, että kuljettajan molemmilla puolilla olevat putket eivät nurjahda.

$$\sigma = \frac{\pi^2 EI}{AL^2}$$

σ = nurjahdusjännitys

E = putken materiaalin kimmokerroin

I = putken neliömomentti

A = putken poikkileikkauksen pinta-ala

L = putken nurjahduspituus

$$I = \frac{\pi D^4}{32} \left(1 - \left(\frac{d}{D}\right)^4\right)$$

D = putken ulkohalkaisija
d = putken sisähalkaisija

Nurjahduspituudeksi tulee puolet putken pituudesta, koska putken päät ovat hitsattu muuhun runkoon. Putken neliömomentiksi ja nurjahdusjännitykseksi saadaan:

$$I = 2573,252772 \text{ mm}^4$$

$$\sigma = 960 \text{ MPa}$$

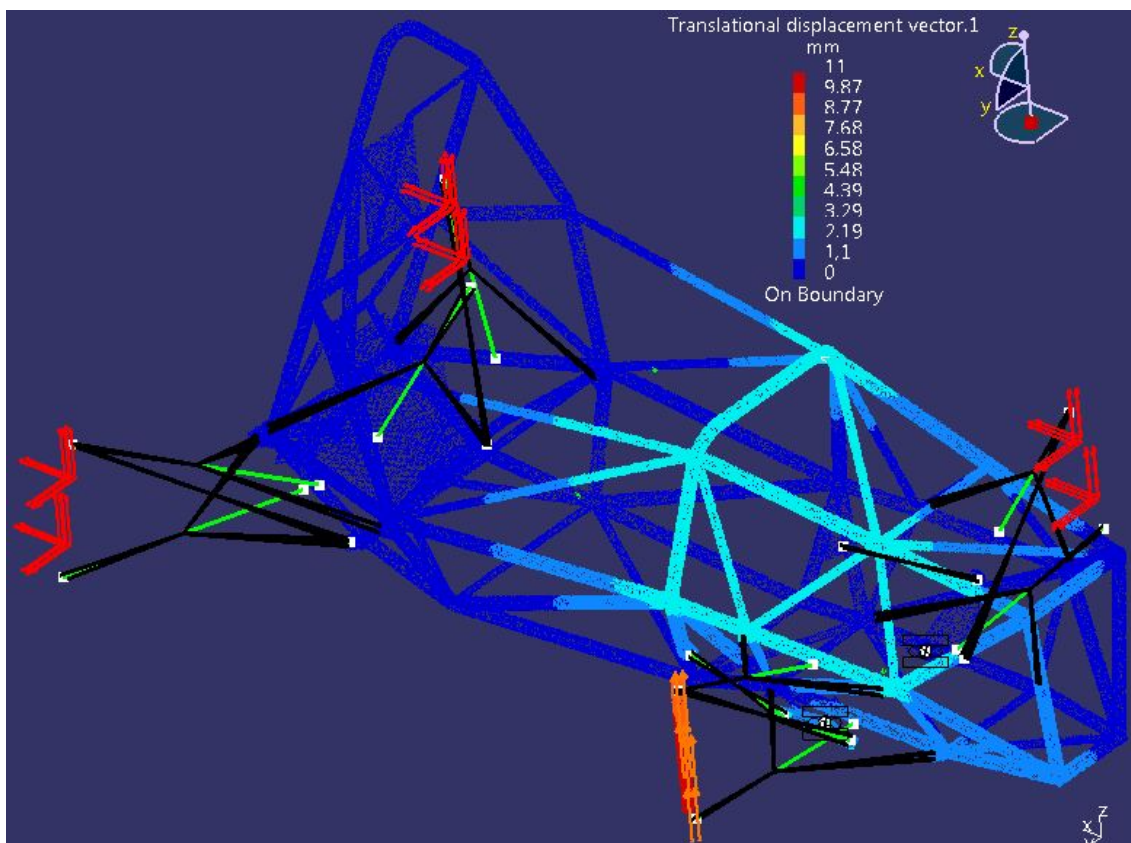
Eulerin kaavalla laskettaessa, suositellaan vähintään kahden varmuuskerrointa, jolloin nurjahdusjännitykseksi saadaan:

$$\sigma = 480 \text{ MPa}$$

Kuvastakin (kuva 18) voidaan todeta, että putkiin ei synny kuin noin 150 MPa:n jännityksiä, joten voimme olettaa, että putket eivät nurjahda.

6.4 Vääntökuormitustapaus

Kuvassa 19 vääntökuormitustapaus. Kolmen pyörän liike on lukittu x-, y- ja z-akselilla. Neljättä nostetaan ylöspäin 2982 N:n voimalla, jolloin runko kiertyy yhden asteen. Tästä voidaan laskea, että rungon vääntöjäykkyys on noin 3755 Nm/°, koska raideväli on 1260 mm. Kuvasta nähdään, että siirtymä on oikean eturenkään kohdalla n. 11 mm. Tämä tarkoittaa 1260 mm raidevälillä yhden asteen kiertymää.



KUVA 19. Vääntökuormitustapaus, siirtymätarkastelu, 2982 N:n voimanuoli oranssilla ja tuennat punaisella.

Rungosta olisi hyvä saada pyöreäprofiilista putkea muistuttava, suorakulmaprofiilisen sijaan. Pyöreä profiili kestää vääntöä massaansa nähden huomattavasti paremmin, koska ei omaa suorakulmaisen teräviä kulmia. Tästä syystä rungon pohja ja ”päällinen” (kuskin jalkojen päällä) ovat niin kapeita kuin kuljettajan tiloja säännöissä rajoittavat mallineet antavat myöden. Ylempien tukivarsien ollessa alempia lyhyempiä, mahdollistuu putkimaisuus paremmin.

Kuljettajan aukko, josta kuljettaja kulkee autoon ja autosta on välttämätön geometria jota ei voi tehdä muotoaktiiviseksi. Aukon edessä ja takana ovat rungon painavimmat putket Main Hoop ja Front Hoop (säännöt vaatii putkikoon 25 mm x 2,5 mm). Nämä lisäävät vääntöjäykkyyttä, vähän kuin avoauton vääntöjäykkyyttä voidaan lisätä laittamalla pohjarakenteeseen ison halkaisijan omaava poikkipalkki.

7 PÄÄTELMÄT

Tavoitteena oli suunnitella runko josta tulee jäykkä, kevyt, turvallinen sekä sarjavalmistukseen soveltuva. Hyvä alusta on erittäin tärkeä kilpa-autossa ja tämä oli tavoitteena ottaa myös suunnittelussa huomioon. Tällaisia asioita Formula Student -kilpailut arvostavat (turvallisuuteen liittyen määräävät), joten tavoitteet palvelevat kisoissa menestymistä.

Oikein Formula Student -säännöt huomioiden suunniteltu muotoaktiivinen rakenne mahdollisti, että rungosta tuli jäykkä (vääntöjäykkyys 3755 Nm/°) ja jäykkyyteensä nähden kevyt. Rungossa on ergonomiset kuljettajan tilat ja alhainen massakeskipiste. Kuljettajan makaava asento ja moottorin paikka myös laskee kilpa-auto-kuljettaja-yhdistelmän kokonaismassakeskipistettä ja vie sitä halutulla tavalla hieman taakse. Runko tarjoaa hyvän perustan nopealle kilpa-autolle. Pienenä virheenä voidaan pitää hieman monimutkaista rakennetta Formula Student -kilpailujen arvostamaa sarjavalmistettavuutta ajatellen.

Form-suurlujuusteräsputki on halpa ja luja materiaali sekä soveltuu erinomaisesti hitsattavaksi, tämän vuoksi se on hyvä rungon valmistusmateriaali. Hiilikuituepoksikomposiittirunko alkaa kohta olla varteenotettava vaihtoehto Formula Student -auton rungoksi, materiaali- ja valmistuskustannusten alentuessa.

LÄHTEET

Pat's Column, Space-frame Chassis, 2009, Luettu 1.1.2011

<http://www.formulastudent.de/academy/pats-corner/advice-details/article/pats-column-space-frame-chassis/>