



TAMPEREEN
AMMATTIKORKEAKOULU

FORMULA STUDENT RUNGON VÄÄNTÖ- JÄYKKYYDEN JA PAINON OPTIMOINTI

Aki Koskinen

Opinnäytetyö
Kesäkuu 2018
Ajoneuvotekniikan koulutus
Auto- ja korjaamotekniikka



TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Ajoneuvotekniikan koulutus
Auto- ja korjaamotekniikka

KOSKINEN AKI:

Formula Student rungon vääntöjäykkyyden ja painon optimointi

Opinnäytetyö 53 sivua, joista liitteitä 0 sivua
Kesäkuu 2018

Tämä opinnäytetyö tehtiin vuoden 2018 Tampere UAS Motorsportin Formula Student-kilpa-autoon liittyen. Opinnäytetyön tarkoituksena oli optimoida putkirunkoisen kilpa-auton rungon vääntöjäykkyyttä ja painoa. Tavoitteeksi asetettiin, että optimoidun rakenteen vääntöjäykkyys kasvaisi ja paino samalla kevenisi alkuperäiseen rakenteeseen verrattuna. Formula Student säännöt asettavat omat reunaehdonsa rakenteelle. Sääntöjä käytiin läpi tarvittavin osin. Lisäksi reunaehdoksi asetettiin rungon viivageometrian pitäminen muuttumattomana, jolloin optimointi tuli toteuttaa pelkästään putkien profiilien muutoksilla. Alkuperäisen rungon kaikki putket olivat poikkileikkaukseltaan pyöreitä ja optimoidussa rakenteessa pitäydettiin myös profiililtaan pyöreissä putkissa.

Työssä käydään aluksi läpi ajoneuvojen runko- ja korisuunnittelun perusteita. Korin kokemat kuormitusmuodot esitellään. Rungoille asetettuja vaatimuksia ja määritelmiä käydään läpi, kuten esimerkiksi vääntö- ja taivutusjäykkyys. Putkirungon lujuuslaskentaa käydään läpi palkkiteorian pohjalta, jotta saadaan käsitys putkirungon vääntöjäykkyyteen ja painoon liittyvistä suureista ja niiden optimoinnista.

Alkuperäiselle ja optimoidulle rungolle suoritettiin FEM-simulointi. Simulointi dokumentoitiin ja laskentatulokset analysoitiin. Tulosten perusteella määritettiin runkorakenteiden painot ja vääntöjäykkyydet. Kaikki analyysit suoritettiin Ansys-ohjelman 18.2 versiolla. Simuloinnin dokumentoinnissa esitetään valitut elementtityypit ja mallinnustavat, sekä miksi kyseisiin valintoihin päädyttiin. Mallinnustavasta johtuvat edut sekä rajoitukset esitetään ja käydään läpi toimenpiteet, joilla mallin tarkkuutta saataisiin paremmaksi. Lisäksi esitetään muut toimenpiteet, jotka tarvitaan optimoidun rakenteen käyttöönottamiseksi (testit, rakenteen lujuuden verifiointi).

Lähdekirjallisuuden perusteella riittävä arvo FS rungon vääntöjäykkyydelle on noin 2200 Nm/°, kunhan alustan rakenteellinen jäykkyys on samaa luokkaa. Suuremmilla jäykkyyden arvoilla ei ole merkittävää vaikutusta auton suorituskykyyn ja paino kasvaa tarpeettoman suureksi. Alkuperäisen rakenteen vääntöjäykkyys on laskentatuloksien perusteella määritettynä 1648,2 Nm/° ja paino 31,31 kg. Optimoidun rakenteen vääntöjäykkyys on 1661,3 Nm/° ja paino 30,96 kg. Optimoinnin tuloksena vääntöjäykkyys saatiin 0,8% suuremmaksi ja painon säästöä kertyi 1,1 %. Tulosten perusteella voidaan todeta alkuperäisen rakenteen olleen jo varsin hyvä, eikä pelkkien putkikokojen optimoinnilla saada suuria muutoksia aikaan. Rakennetta voitaisiin vielä keventää, mutta vääntöjäykkyyden arvo laskisi hieman. Saavutettua tehokkaampaan optimointiin vaaditaan jo viivageometrian muutoksia. Parantamisen varaa kuitenkin on, jotta riittävä 2200 Nm/° arvo saavutettaisiin.

Asiasanat: Formula Student, FEM-analyysi, vääntöjäykkyys, painon säästö, putkirunko, optimointi, lujuuslaskenta

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Vehicle Engineering
Garage Engineering

KOSKINEN AKI:

Formula Student Frame Torsional Stiffness and Weight Optimization

Bachelor's thesis 53 pages, appendices 0 pages

June 2018

This Bachelor's thesis was made relating to the 2018 Tampere UAS Motorsport Formula Student racing car. The purpose of the thesis was to optimize the torsional stiffness and weight of a tube frame race car. The goal was set to increase the torsional stiffness and reduce weight compared to original structure. Formula Student rules set limitations regarding to the frame structure. The necessary rules were explained. Limit condition was set to keep the line geometry of the frame unchanged and therefore optimization should only be carried out with changes in the tube profiles. All the profiles in the original frame were circular in cross section. Circular cross sections were chosen also for optimized structure.

The theory part of the thesis discusses principles of frame design. The loading modes of a frame are presented. The requirements and definitions for frames are examined, such as torsional and bending stiffness. The strength analyses regarding to beam structures are studied to gain knowledge which physical quantities affect to torsional stiffness and weight optimization.

FEM simulation was performed on the original and optimized frame. The simulation was documented and the calculation results were analyzed. Based on the results, weights and torsional stiffnesses were determined. All analyzes were carried out with Ansys program version 18.2. The simulation documentation shows the selected element types and modeling methods, and why these choices were made. The advantages and limitations resulting from the modeling methods are presented. Methods to improve mathematical model and accuracy are discussed. In addition, other measures that are required before the optimized structure can be utilized, are presented (tests, structural strength verification).

Based on the source literature, a sufficient value for the torsional stiffness of a FS frame is about 2200 Nm/°, if stiffness of the suspensions is about equal. Higher stiffness doesn't have a significant effect to the performance and the weight grows unnecessarily high. The torsional stiffness of the original structure is 1648.2 Nm/° and weight 31.31 kg according to the calculation results. The optimized structure has a torsional stiffness of 1661.3 Nm/° and a weight of 30.96 kg. As a result of the optimization, the torsional stiffness was 0.8% better and the weight loss was 1.1%. The results show that the original structure has already been quite good and optimization of the tube sizes can't make major changes. The structure could still be lightened, but the torsional stiffness would decrease slightly. More effective optimization requires changes in line geometry. However, there is more way to go to achieve the sufficient 2200 Nm/° value.

Key words: Formula Student, FEM-analysis, torsional stiffness, weight reduction, optimization, strength analysis

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	7
2	AUTON RUNKO- JA KORISUUNNITTELU	8
2.1	Runkoon kohdistuvat kuormat.....	8
2.1.1	Pitkittäissuuntainen vääntö	8
2.1.2	Pystysuuntainen vääntö.....	8
2.1.3	Sivusuuntainen vääntö	9
2.1.4	Horisontaalinen vinoutuminen.....	9
2.2	Rakenteelle asetetut vaatimukset.....	10
2.2.1	Korin jäykkyys	10
2.2.2	Korin värähtelyominaisuudet.....	12
2.2.3	Korin väsymislujuus	12
2.2.4	Korin kolariturvallisuus	12
2.2.5	Korin korjausystävällisyys	12
2.3	Korityypit.....	13
2.3.1	Itsekantava kori	13
2.3.2	Rungollinen kori	14
2.3.3	Putkirunkoinen kori.....	15
2.3.4	Monokokkikori.....	19
3	PUTKIRUNGON LUJUUSLASKENTA	21
3.1	Taivutetun palkin normaalijännitykset	21
3.2	Poikkileikkaukseltaan pyöreän sauvan vapaa vääntö	22
4	PUTKIRUNGON FEM-MALLI.....	24
4.1	Materiaalit.....	24
4.1.1	SSAB Form Tube 420.....	24
4.1.2	SSAB Hardox 400@.....	24
4.1.3	Alumiini 7075-T6	25
4.2	Koordinaatistot.....	25
4.3	Geometria ja elementtiverkko.....	26
4.4	Reunaehdot ja kuormitukset	28
5	RAKENTEEN OPTIMOINTI.....	33
5.1	Optimoitavat suureet ja parametrit	33
5.2	Sääntöjen asettamat rajoitukset.....	33
5.3	Käytettävissä olevat putkikoot.....	34
5.4	Geometria ja rungon massa.....	36
5.4.1	Alkuperäinen rakenne	36
5.4.2	Optimoitu rakenne.....	37

5.5	Laskentatulokset	40
5.5.1	Alkuperäinen rakenne	40
5.5.2	Optimoitu rakenne.....	45
5.6	Vääntöjäykkyydet	50
5.6.1	Alkuperäinen rakenne	50
5.6.2	Optimoitu rakenne.....	51
6	POHDINTA.....	52
	LÄHTEET.....	53

LYHENTEET JA TERMIT

FEM	Finite element method
FS	Formula Student
HAZ	Heat affected zone, hitsin lämpötilavaihteluista muuttunut alue
MIG	Metal inert gas
MPC	Multipoint constraint
TIG	Tungsten inert gas

1 JOHDANTO

Opinnäytetyön tarkoituksena on optimoida Tampereen ammattikorkeakoulun Formula Student tiimin vuoden 2018 kilpa-auton vääntöjäykkyys ja paino. Mallin viivageometria pidetään muuttumattomana, mutta putkikokoja muutetaan sääntöjen asettamien reunaehdojen puitteissa parhaiksi mahdollisiksi. Optimoidun rungon vääntöjäykkyys tulee olla suurempi ja painon pienempi alkuperäiseen rakenteeseen verrattuna.

Teoriaosiossa käydään läpi auton runko- ja korisuunnittelua yleisesti. Runkoon kohdistuvat eri kuormitusmuodot esitellään. Korirakenteelle asetettuja vaatimuksia tutkitaan, sekä käydään läpi tarpeelliset määritelmät, suureet ja mittausmenetelmät (esimerkiksi vääntöjäykkyys). Eri korityypit esitellään yleisellä tasolla ja putkirunkoista koria tutkitaan erityisesti FS kilpa-autoa silmällä pitäen. Lujuuslaskentaosiossa esitetään vääntöjäykkyyteen vaikuttavat suureet palkkiteorian pohjalta.

Rakenteesta muodostetaan FEM-malli käyttämällä palkki- ja kuorielementtejä. Mallissa käytettyjen elementtityyppien valinta perustellaan, sekä käydään läpi niihin liittyvät rajoitteet. Malli luodaan käyttämällä Ansys 18.2 ohjelmistoa. Ohjelmassa käytettyjä mallinnuskeinoja ja määritelmiä käydään läpi sen verran kuin on tarpeellista (esimerkiksi etäpisteet ja kaukosiirtymät, palkkien yhdistetyt jännitykset).

Alkuperäisen ja optimoidun rakenteen painot määritetään sekä lasketaan FEM-tuloksista rungon vääntöjäykkyys molemmille rakenteille. Mikäli optimoitua rakennetta halutaan käyttää tulevien vuosien FS kilpa-autoissa, esitetään mitä toimenpiteitä tulee tehdä liittyen FEM-laskentaan ja auton testaamiseen.

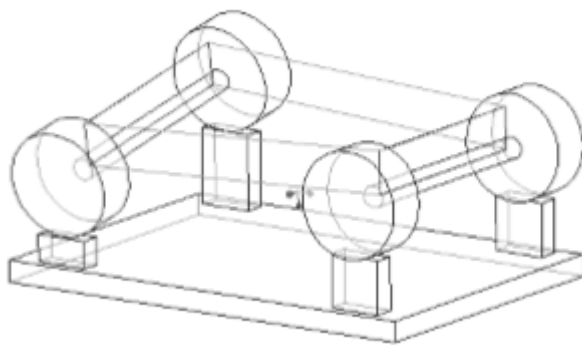
2 AUTON RUNKO- JA KORISUUNNITTELU

2.1 Runkoon kohdistuvat kuormat

Mietittäessä runkorakenteen suunnittelua on ensin ymmärrettävä, millaisia kuormia rakenteeseen kohdistuu. Auton korin kuormitukset voidaan jakaa seuraaviin pääkomponentteihin: Pitkittäissuuntainen vääntö, pystysuuntainen vääntö, sivusuuntainen vääntö ja horisontaalinen vinoutuminen. (Riley & George 2002, 3)

2.1.1 Pitkittäissuuntainen vääntö

Pitkittäissuuntaisen väännön aiheuttama kuormitusmuoto on esitetty kuvassa 1. Vääntökuorma aiheutuu voimasta joka vaikuttaa ajoneuvon yhteen kulmaan tai vastakkaisiin kulmiin vaikuttavista voimista. Runko voidaan ajatella vääntäjouseksi, joka yhdistää pisteet joihin alustan voimat vaikuttavat. Pystysuuntainen vääntö ja siitä aiheutuvat alustan sekä rungon deformaatiot voivat vaikuttaa merkittävästi auton ajettavuuteen sekä suorituskykyyn. Auton kykyä vastustaa väännön aiheuttamia deformaatioita kutsutaan vääntöjäykkyydeksi, jota käydään tarkemmin läpi kappaleessa 2.2.1. Vääntöjäykkyys on FS kilpa-auton rungon merkittävin suorituskykyyn vaikuttava tekijä. (Riley & George 2002, 3)

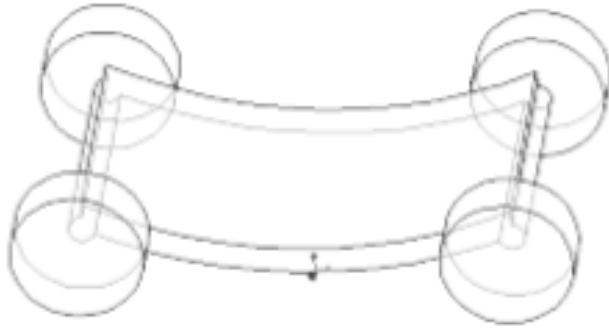


KUVA 1. Pitkittäissuuntaisen väännön kuormitusmuoto (Riley & George 2002, 3)

2.1.2 Pystysuuntainen vääntö

Pystysuuntaisen väännön aiheuttama kuormitusmuoto on esitetty kuvassa 2. Runko kantaa taivutusmomenttina kuljettajan sekä koriin kiinnitettyjen komponenttien (esimerkiksi

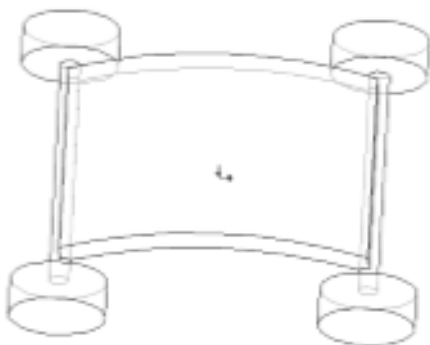
moottori ja vaihteisto) painon. Reaktiivoimat otetaan vastaan auton akseleilla. Pystysuuntaiset kiihtyvyydet voivat nostaa tai laskea näiden reaktiivoimien suuruutta. Auton kykyä vastustaa taivutuksen aiheuttamia deformaatioita kutsutaan taivutusjäykkyydeksi, jota käydään tarkemmin läpi kappaleessa 2.2.1. (Riley & George 2002, 4)



KUVA 2. Pystysuuntaisen väännön kuormitusmuoto (Riley & George 2002, 4)

2.1.3 Sivusuuntainen vääntö

Sivusuuntaisia vääntökuormia voivat runkoon aiheuttaa useat tekijät, kuten tien kallistuma, sivuttaiset tuulivoimat ja kääntymisessä syntyvät keskeisvoimat. Sivuttaisvoimat synnyttävät vääntöä auton pituusakselin ympäri ja tukireaktiot otetaan vastaan renkailla. Sivusuuntaisen väännön kuormitusmuoto on esitetty kuvassa 3. (Riley & George 2002, 4)

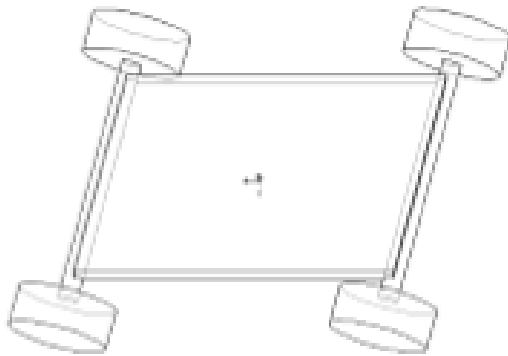


KUVA 3. Sivusuuntaisen väännön kuormitusmuoto (Riley & George 2002, 4)

2.1.4 Horisontaalinen vinoutuminen

Tämän kuormitusmuodon aiheuttavat vastakkaisiin renkaisiin kohdistuvat suunnaltaan eteen ja taaksepäin vaikuttavat voimat, jolloin kori deformoituu suunnikkaan muotoiseksi

kuvan 4 mukaisesti. Voimat voivat syntyä tien pinnan korkeussuuntaisista vaihteluista tai autoa eteenpäin vievistä reaktivoimista.



KUVA 4. Horisontaalisen vinoutumisen kuormitusmuoto (Riley & George 2002, 4)

2.2 Rakenteelle asetetut vaatimukset

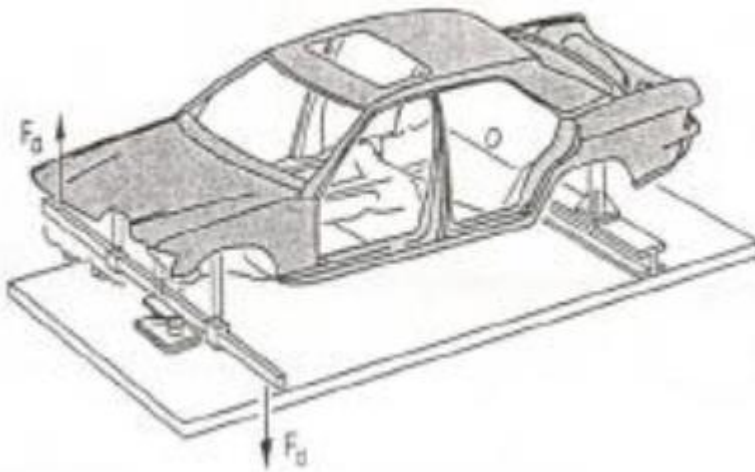
Korikehikolle asetettavia vaatimuksia ovat: suuri jäykkyys, hyvät värähtelyominaisuudet, hyvä väsymislujuus, kolariturvallisuusvaatimukset ja korjausystävällisyys. Hyvän polttoainetaloudellisuuden ja suorituskyvyn saavuttamiseksi pyritään myös mahdollisimman keveään rakenteeseen. (Haapaniemi 2003, 796)

Hyötysuhteen, ajo-ominaisuuksien, mukavuuden ja turvallisuuden parantaminen tuo ajoneuvojen koritekniikkaan koko ajan uusia innovaatioita. Korilta vaaditaan keveyden lisäksi monimutkaisia rakenteita törmäyksissä syntyvien voimien hallitsemiseksi. Tämä tuo mukanaan uusia haasteita korien suunnitteluun. Ajoneuvovalmistajat joutuvat siirtymään perinteisistä teräsrakenteista eksoottisempiin materiaaleihin ja liitostekniikoihin täyttääkseen kuluttajien ja lainsäätäjien asettamat vaatimukset. (Pasanen 2017, 34)

2.2.1 Korin jäykkyys

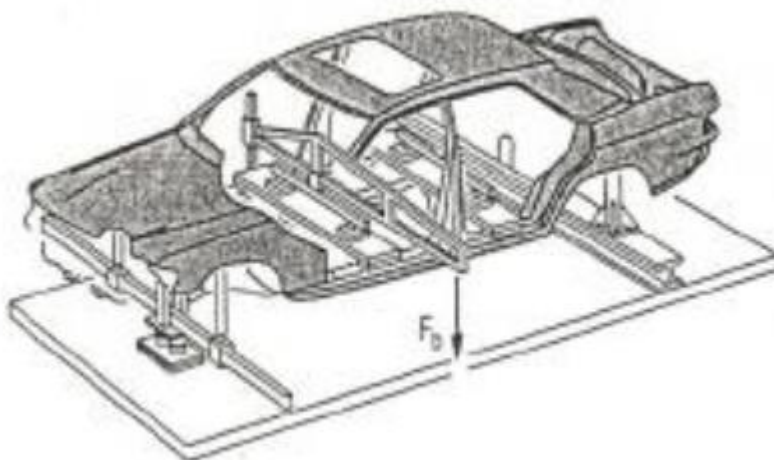
Korin on oltava mahdollisimman jäykkä kiertymistä ja taipumista vastaan. Koriin kohdistuvat siirtymät halutaan minimoida kuvissa 5 ja 6 esitetyissä vääntö- ja taivutusjäykkyysskoikeissa. Korin jäykkyydellä on suora vaikutus rakenteen värähtelyominaisuuksiin ja ajokäyttäytymiseen. Vääntöjäykkyys on tärkein tekijä, koska yhteenlaskettu kääntymispito riippuu sivusuuntaisesta painon siirtymisestä. Luukkujen ja ovien kohdalla ei saa

esiintyä isoja siirtymiä, koska tällöin saranoiden ja kiinnityspisteiden väsyminen on mahdollista. Lisäksi osat voivat ottaa toisiinsa kiinni. (Haapaniemi 2003, 796, Peltonen 2015, 13-15, Riley & George 2002, 4)



KUVA 5. Korin vääntöjäykkyysskoe (Peltonen 2015, 14)

Vääntöjäykkyysskoeksessa korin takapää on kiinteästi tuettu taka-akselin kiinnityspisteistä. Etupäätä väännetään etuakselin kiinnityspisteisiin tuetusta jäykästä palkista. Voimat F_a ja F_b ovat yhtä suuria, mutta vastakkaisuuntaisia, ja sijaitsevat symmetrisesti pituusakselin suhteen. Kokeessa mitataan korin kiertymää pitkittäisakselin ympäri. Vääntöjäykkyyden yksikkö on $\text{Nm}/^\circ$.



KUVA 6. Korin taivutusjäykkyysskoe (Peltonen 2015, 15)

Taivutusjäykkyyskokeessa kori tuetaan jäykästi etu- ja taka-akselien kiinnityspisteistä. Koria taivutetaan voimalla F_a akselivälin keskikohdalta kuvan 6 mukaisesti ja mitataan siirtymää voiman F_a kohdalta.

2.2.2 Korin värähtelyominaisuudet

Värähtelyjen herätelähteinä voivat toimia muun muassa renkaiden epätasapaino, tien pinnan epätasaisuudet, moottori ja voimansiirto. Värähtelyistä voi aiheutua huomattavasti haittaa ajomukavuudelle. Korin komponenttien ominaistajuuksiin ja -muotoihin voidaan vaikuttaa jäykistepoimuilla sekä seinämäpaksuuksien ja poikkipinta-alojen muutoksilla. Resonanssi-ilmiöiden vaikutus pyritään minimoimaan. (Haapaniemi 2003, 796)

2.2.3 Korin väsymislujuus

Ajoneuvoon vaikuttavat kuormitukset ovat tyypiltään hyvin usein väsyttäviä, jotka voivat aiheuttaa rakenteeseen repeytymiä ja hitsikohtien rikkoutumisia. Erityisen kriittisiä kohtia ovat akselistojen, ohjauksen ja voimansiirtolaitteiden kiinnityskohdat. (Haapaniemi 2003, 796)

2.2.4 Korin kolariturvallisuus

Kolariturvallisuuden kannalta on tärkeää, että henkilötilat säilyttävät törmäyksessä muotonsa. Jäljelle jäävän rakenteen tulee sitoa muodonmuutostyönä mahdollisimman paljon liike-energiaa. Lisäksi matkustajiin kohdistuvat hidastuvuudet ovat pysyttävä sallituissa rajoissa. (Haapaniemi 2003, 796)

2.2.5 Korin korjausystävällisyys

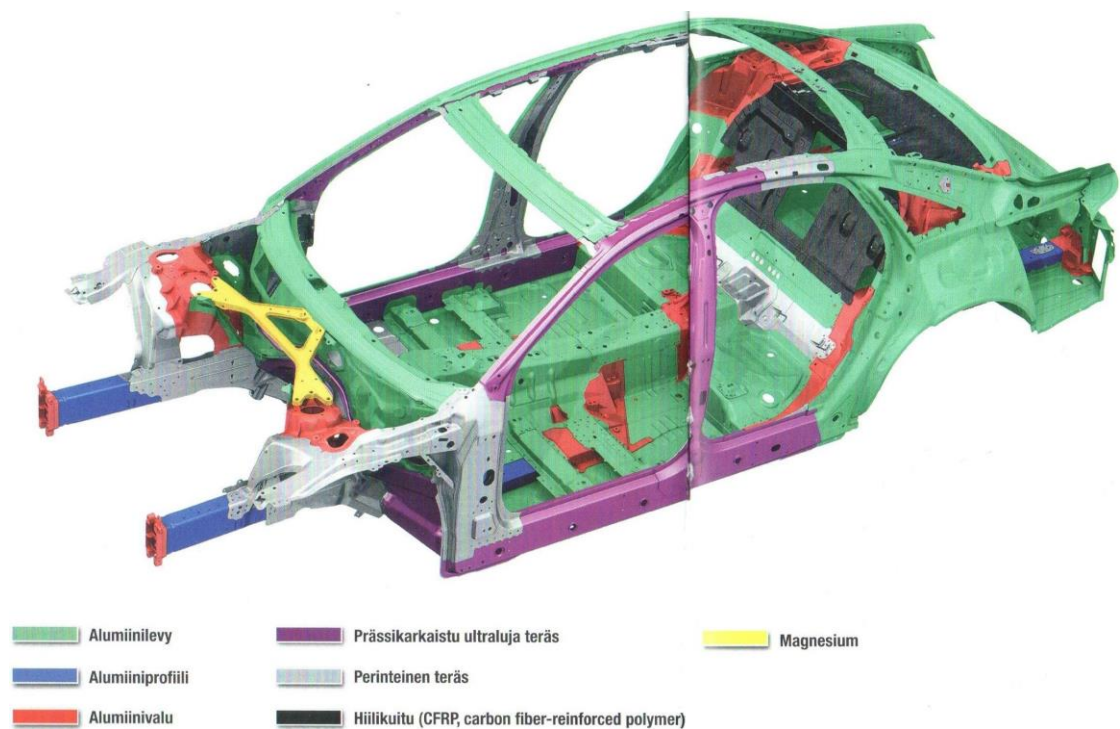
Pienissä kolareissa yleisimmin vaurioituvat komponentit on suunniteltava siten, että ne on helppo korjata tai vaihtaa. Huomioon otettavia asioita ovat muun muassa esteetön pääsy korin pintalevyihin ajoneuvon sisältä päin, ruuvien ja liitoskohtien sijoitukset sekä rajauskohdat osamaalauksien tekemiseen. (Haapaniemi 2003, 796)

2.3 Korityypit

Ajoneuvon korikehikko voidaan valmistaa pääasiassa neljällä tavalla ja näin syntyvät korityypit ovat: itsekantava kori, rungollinen kori, putkirunkoinen kori ja monokokkikori. Lisäksi kori voidaan valmistaa yhdistelemällä edellä mainittuja korityyppejä. Henkilöautojen valmistuksessa yleisin korityyppi on itsekantava kori. (Haapaniemi 2003, 796, Reif & Dietsche 2014, 1024, 1027)

2.3.1 Itsekantava kori

Perinteinen teräksinen itsekantava korirakenne koostuu muotoon puristetuista levyosista ja levyistä valmistetuista kotelopalkeista. Nämä osat liitetään toisiinsa yleensä pistehitsein, joita tarvitaan noin 5000 kappaletta 120-200 mm liitospituudelle mallista riippuen. Asennettavat osat eli lokasuojat, luukut ja ovet kiinnitetään muuhun rakenteeseen ruuvi-liitoksilla. (Haapaniemi 2003, 796)



KUVA 7. Audi A8 korirakenne (Pasanen 2017, 34-35)

Kuvassa 7 on esitetty moderni itsekantava korirakenne, jota käytetään Audi A8 mallin neljännessä sukupolvessa. Korin materiaaleina käytetään alumiinia, terästä, magnesiumia

ja hiilikuitua. Korissa käytetään peräti 14 erilaista liitostekniikkaa. Etu- ja takaoviaukkojen ympärillä peltien liitokset tehdään rullavalssaamalla. Tällä kylmällä liitostekniikalla saadaan alumiiniosat yhdistettyä ultralujiin prässikarkaistuihin teräsosiin.

Muita kylmiä liitostapoja ovat niittaaminen ja liimaaminen. Lämpöä käyttäviä liitostekniikoita ovat perinteisen MIG-hitsauksen lisäksi modernit alumiinin etälaserhitsaus ja vastuspistehitsaus. Etälaserhitsauksella voidaan tehokkaasti ehkäistä lämmön aiheuttamien murtumien syntyä hitseissä. (Pasanen 2017, 34-37)

2.3.2 Rungollinen kori

Ajoneuvo voidaan rakentaa käyttämällä erillistä runkoa, johon kiinnitetään akselistot, moottori ja voimansiirto. Itse kori kiinnitetään tähän runkoon ruuviliitoksien avulla. Esimerkki rungollisesta korista on esitetty kuvassa 8. Runko koostuu pitkittäis- ja poikittaispalkkien muodostamasta tikapuurakenteesta, joka toimii auton kantavana osana. Rungon profiilien muoto määrittää rungon vääntöjäykkyyden. Rungollista koria käytetään erityisesti keskiraskaissa ja raskaissa kuorma-autoissa. Henkilöautopuolella rakennetta käytetään enää lähinnä maasto- ja lava-autoissa, mutta rungollinen korirakenne oli aiemmin yleinen muissakin henkilöautoissa. Linja-autot rakennetaan yleensä käyttämällä itsekantavan ja rungollisen korin yhdistelmä-rakennetta. (Haapaniemi 2003, 808)



KUVA 8. Toyota Land Cruiser J200 korimallin rungollinen kori. (Keohane 2007)

Kuorma-autoissa käytetään väännön suhteen joustavia runkoja, jolloin jousituksen ei tarvitse pelkästään sopeutua maaston epätasaisuuksiin. Vääntöjäykkä runko soveltuu lä-

hinnä henkilöautoihin. Runkorakenteen kriittiset kohdat ovat ne kohdat, joista akselistoihin kohdistuvat voimat johdetaan runkoon (jousen korvat, telikeinun kiinnike) sekä näitä kohtia lähimpänä olevat poikittaispalkkien liitokset pitkittäispalkkeihin. Erityisesti tähän tarkoitukseen muotoillut liitoslevyt ja poikittaispalkkiprofiilit jakavat voimat laajalle alalle. Liitokset tehdään niittaamalla, ruuveilla tai hitsaamalla. Esimerkkejä käytetyistä profiileista ja poikittaispalkkien liitoksista on esitetty kuvassa 9. (Haapaniemi 2003, 808)



KUVA 9. Tikapuurunkorakenne ja poikittaispalkkien liitosmuotoja (Haapaniemi 2003, 808)

2.3.3 Putkirunkoinen kori

Putkirungon etuina ovat helppo valmistettavuus, rakenteiden korjaus ja modifiointi sekä pääsy auton komponentteihin. Putkirungolla pystytään toteuttamaan kustannustehokkaasti riittävän jäykkä ja kevyt rakenne. Suunnitteluun ja valmistukseen kuluva aika on usein paljon lyhyempi verrattuna esimerkiksi monokokkikoriin. (Clarke 2009)

Kuvassa 10 on esimerkki putkirunkoisesta FS autosta. Kokemuksesta tiedetään, että putkirunkoisilla autoilla on kyetty voittamaan tai sijoittumaan kolmen parhaan joukkoon vuodesta toiseen FS kisoissa. (Clarke 2009)



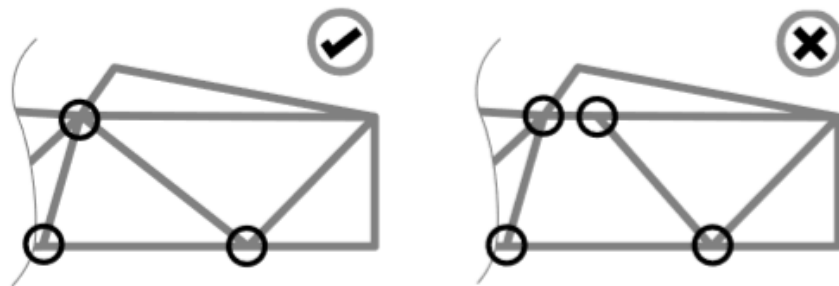
KUVA 10. Putkirunkoinen FS kilpa-auton runko (Clarke 2009)

Putkirunkoinen kori valmistetaan yleensä pyöreästä tai neliskanttisesta putkesta ja liitokset tehdään hitsaamalla. Pyöreä putki kantaa useimmiten paremmin vääntökuormia, mutta taivutuskuormituksessa neliskanttinen profiili voi olla optimaalisempi. Neliskanttisesta putkesta valmistettu runko on helpompi valmistaa, koska siinä ei synny ”kalan suu”-mallisia liitoksia (fish mouth) kuten pyöreän putken tapauksessa. Neliskanttinen putki deformoituu kuormituksessa kuitenkin vinoutumalla ja tämä voi aiheuttaa väsymismurtumia. Pyöreä putkiprofiili on useimmiten parempi vaihtoehto. Rungossa on kuitenkin tiettyjä kohtia, missä kannattaa käyttää neliskanttista profiilia. (Clarke 2009)

Neliskanttisten putkiliitosten esivalmistelu on yksinkertaista, eikä siihen tarvita muita työkaluja kuin rautasahaa. Pyöreiden putkien esivalmistelu on ”kalan suu”-mallisten putken päiden vuoksi paljon hankalampaa, varsinkin kun putkien väliset raot pyritään pitämään minimissään. Näin menetellessä tarvitaan hitsatessa mahdollisimman vähän täyteainetta ja lämmöntuontia liitokseen. Nykyaikainen tapa on käyttää automatisoitua laserleikkausta ja sopivaa CAD-ohjelmistoa, joka laskee liitosten muodon. Mikäli laserleikkausta ei ole käytettävissä useimmat CAD-ohjelmistot osaavat avata liitoksen ja piirtää putken pään 2D-profiilina. Tämä profiili leikataan saksilla paperista ja kääritään putken ympärille, jonka jälkeen putken pää voidaan viimeistellä peltisaksia ja viilaa apuna käyttäen. Rungon valmistamisessa tarvittavia muita työkaluja ovat laadukas magneettisella

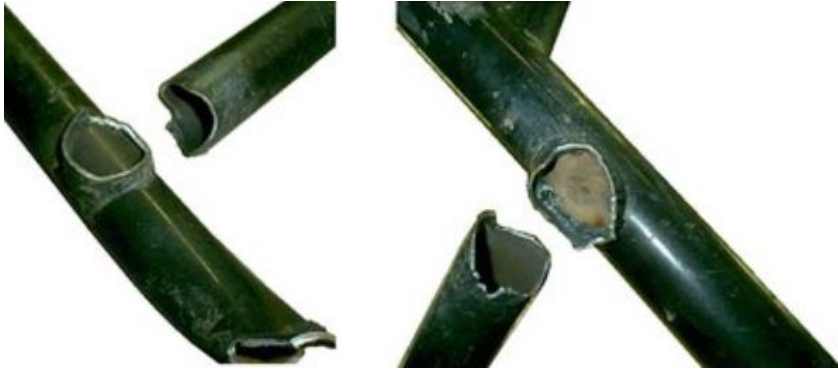
jalustalla oleva kulmamitta, magneettiset putken pitimet ja putken keskiviivan merkkaustryökalu. Myös hitsausjigin käyttö helpottaa rungon valmistusta. (Clarke 2009)

Putkirunko on trussimainen rakenne (space-frame), joka ei yleensä sisällä taivutettuja putkia. FS kilpa-autossa kuitenkin pääkaari ja etukaari ovat valmistettu taivutetusta putkesta. Taivutettujen putkien laatuun tulee kiinnittää huomiota, eikä niissä saa esiintyä veyneisyyttä, puristuneisuutta tai ryppyjä. Myöskään liiallinen ovalisoituminen ei ole sallittua. Edellä luetellut virheet aiheuttavat rungon hylkäämisen kisojen teknisessä tarkastuksessa. Pääkaarelle ja etukaarelle on säännöissä määritetty minimi ainevahvuus, joka pienenee taivutettaessa taivutuksen ulkoreunalla. Putkien oikeaoppinen taivuttaminen on haastavaa ja se kannattaa yleensä jättää siihen erikoistuneen ammattilaisen tehtäväksi. Rakenteessa käytetään solmusta solmuun kolmiointeja kuvan 11 mukaisesti, jolloin kuormat välittyvät putkissa vain veto tai puristuskuormina. (Clarke 2009, FS rules 2018, 26)



KUVA 11. Sallittu ja kielletty kolmiointi FS rungossa (FS rules 2018, 26)

Valitusta materiaalista riippuen, voidaan hitsauksen jälkeen joutua suorittamaan lämpökäsittelyitä. Esimerkiksi 4130 kromimolybdeeni putkea käytettäessä, täytyy suorittaa normalisointihehkus hitsauksen jälkeen. Muuten HAZ-alueella voi esiintyä katastrofaalisia vaurioita, joista on esimerkki kuvassa 12. Merkille pantavaa on, että vaurio ei esiinny hitsin kohdalla vaan 4-6 mm liitoskohdasta. (Clarke 2009)



KUVA 12. Normalisointihehkutuksen puutteesta johtuva vaurio HAZ-alueella (Clarke 2009)

Hitsausmenetelmistä TIG-hitsaus ja nikkeli-pronssi-hitsaus ovat suositeltavia menetelmiä. Putkena kannattaa käyttää kylmävedettyä saumatonta putkea, joka on edullista, helposti työstettävää eikä se tarvitse hitsauksen jälkeisiä lämpökäsittelyjä. Kun lämpökäsittelyitä ei tarvita, runkoa on tarvittaessa helppo muuttaa ja korjata jälkikäteen. Saumallista sähkövastushitsaamalla valmistettua putkea ei kannata käyttää. (Clarke 2009)

Kylmävedetyn saumattoman putken myötölujuus on yleensä noin 430 MPa ja 4130-Cro-Moly putkella vastaavasti noin 650 MPa. Myötölujuuksien ero on siis verrattain pieni ja molemmat teräkset ovat painoltaan sekä jäykkyydeltään samoja (kimmokerroin on sama). Mikäli putken ulkohalkaisija pidetään muuttumattomana, on lujempaa terästä käyttämällä mahdollista pienentää putken seinämävahvuutta ja siten myös painoa. Lujempi teräs myös vastustaa pysyviä muodonmuutoksia paremmin. (Clarke 2009)

FS putkirungon riittävää vääntöjäykkyyttä ovat tutkineet William Riley ja Albert George (2002, 17-18). Rungon vääntöjäykkyyden lisäksi yhtä merkittävä tekijä ajettavuuteen, ellei jopa merkittävämpi, on alustan / jousituksen linkkien ja komponenttien jäykkyys. Niiden jäykkyys sisältyy navasta napaan vääntöjäykkyyteen, mutta ne voivat vaikuttaa merkittävästi renkaan kinemaattiseen käyttäytymiseen. Alustan komponenttien muodonmuutokset täytyvät olla pieniä verrattuna alustan kinemaattisiin siirtymiin, jotta suunniteltu käyttäytyminen toteutuu aurauksen sekä camber- ja caster kulmien osalta. Laskennallisen ja kokeellisen tiedon perusteella Riley ja George ovat tulleet tulokseen, että rungon vääntöjäykkyyden arvoksi riittää $2200 \text{ Nm}/^\circ$, kunhan alustan rakenteellinen jäykkyys on samaa luokkaa. Tätä suuremmilla jäykkyyden arvoilla ei saavuteta merkittävää hyötyä ja paino kasvaa liikaa. (Riley & George 2002, 17-18)

2.3.4 Monokokkikori

Monokokilla tarkoitetaan komposiittimateriaaleista valmistettua koria. Tyypillinen rakenne on sandwich-palkki/paneeli, jossa kuoret ovat hiilikuitua ja keskiosa alumiinista hunajakennoa. Kuorilevyt voivat olla myös alumiinia, jolloin materiaali on halvempaa. Paneelilla on erittäin suuri jäykkyys sitä kohtisuoraan olevassa tasossa. Kuorilevyjen tehtävä on kantaa levyn tasossa esiintyvät leikkaus- sekä veto- ja puristusvoimat. Liitosmenetelminä käytetään liimaamista, niittaamista sekä ruuviliitoksia. (Berkum 2006, 29)

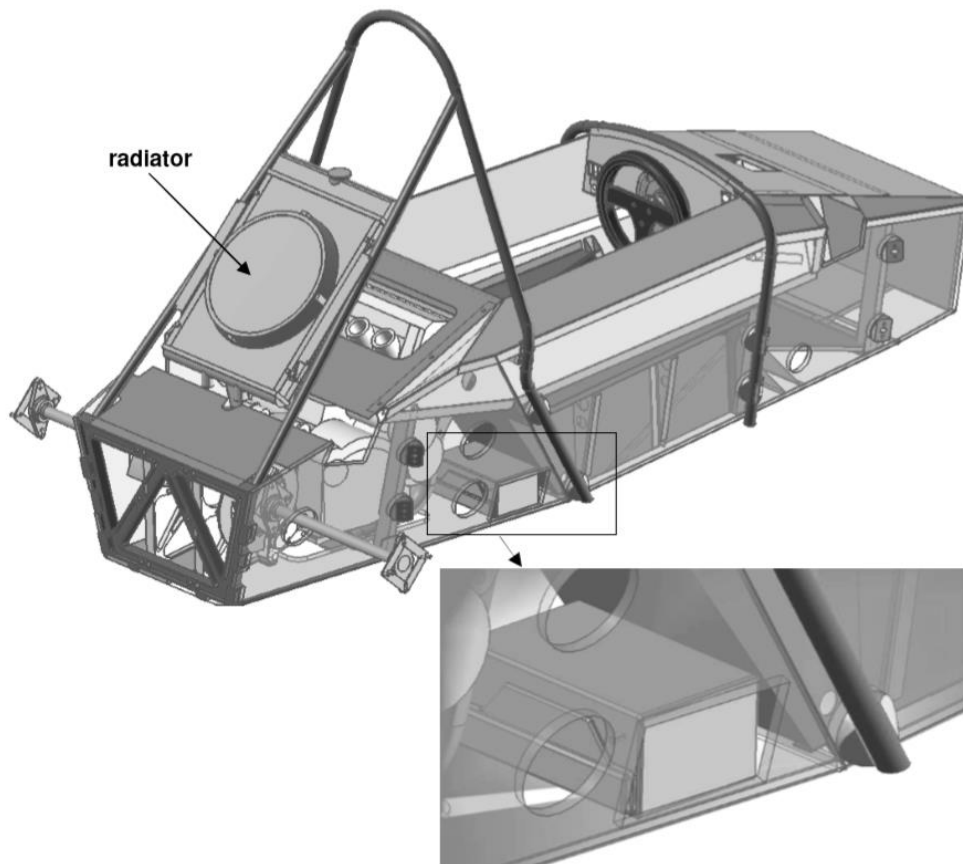
Komposiittien käytöllä saavutetaan erittäin kevyt ja jäykkä korirakenne. Jos paino pidetään vakiona, pystytään monokokkikorista tekemään jäykempi putkirunkoon verrattuna. Komposiittimateriaalien käytöllä on kuitenkin haittapuolensa, niiden suunnittelu ja valmistaminen ovat haastavaa. Lisäksi komposiitit ovat materiaalikuluiltaan kalliita. Monokokin suunnitteluun ja valmistukseen tarvitaan paljon aikaa verrattuna putkirunkoiseen koriin. Rakenteiden muuttaminen jälkikäteen on vaikeaa ja huollettavuus kärsii, koska komponentteihin käsiksi pääsy vaikeutuu suljettujen paneelirakenteiden johdosta. (Clarke 2009)

Monokokkikori sallii vain vähän vapauksia suunnittelussa. Erityisen ongelmallista on alustan komponenttien liittäminen monokokkiin. Monokokkia on vahvistettava lisämateriaalilla liitoskohdissa, jotta saavutetaan riittävä jäykkyys ja lujuus. Vahvikkeista kertyvä paino ja materiaalikustannukset osin kumoavat keveistä komposiiteista saatavan hyödyn. Lisämateriaali myös nostaa auton painopistettä ja heikentää siten ajettavuutta. (Kerkhoven 2008, 2)

Mikäli moottorin ympärillä oleva rakenne tehdään komposiittipaneeleista, on huollettavuuden lisäksi ongelmana moottorin ylikuumentuminen, koska lämpö ei pääse kunnolla siirtymään pois. Tämän vuoksi monet FS tiimit, jotka haluavat käyttää monokokkia, ovat päätyneet hybridikorirakenteeseen. Hybridikorin etuosa tehdään komposiiteista ja takiosa on putkirunkoa. Esimerkit hybridikorirakenteesta ja pelkästä monokokkikorista on esitetty kuvissa 13 ja 14. (Kerkhoven 2008, 2)



KUVA 13. Hybridikorirakenne (alumiinihunajakennopaneelit) (Kerkhoven 2008, 2)



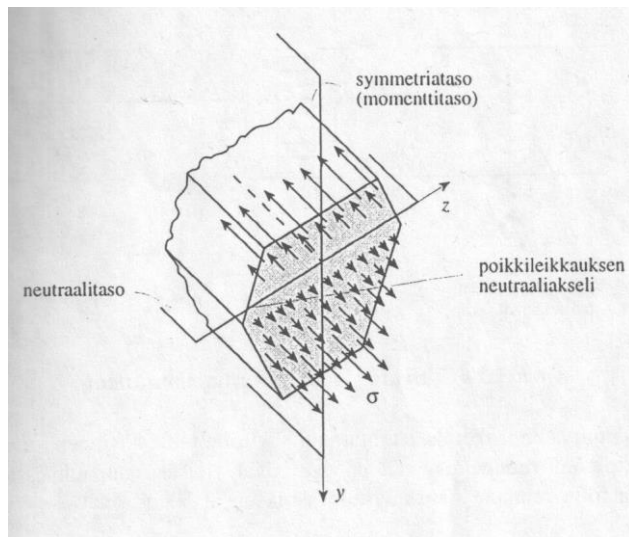
KUVA 14. Monokokkikorirakenne (Berkum 2006, 69)

3 PUTKIRUNGON LUJUUSLASKENTA

Putkirunko on palkkirakenne, joka kantaa kuormaa pääasiassa taivutus- ja vääntömomentteina. Lisäksi rungon palkit kantavat kuormaa aksiaali- ja leikkausvoimina. (Pennala 1999, 10-11)

3.1 Taivutetun palkin normaalijännitykset

Tarkastellaan kuvan 15 mukaista poikkileikkausta, jota kuormittaa taivutusmomentti M_z ja normaalivoima N .



KUVA 15. Palkin poikkileikkauksen normaalijännitys σ sekä neutraalitaso ja y -akseli (Pennala 1999, 51)

Poikkileikkauksen normaalijännitys voidaan laskea yhtälöstä (Pennala 1999, 50)

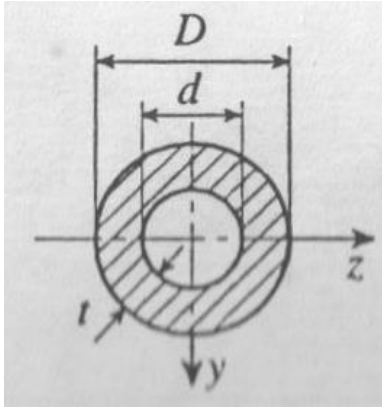
$$\sigma = \frac{N}{A} + \frac{M_z}{I_z} \cdot y, \quad (1)$$

jossa A on poikkileikkauksen pinta-ala ja I_z poikkileikkauksen jäyhyysmomentti z -akselin suhteen.

Koska putkiprofiili on pyörähdyssymmetrinen, voidaan jäyhyysmomentit laskea yhtälöstä (Pennala 1999, 62)

$$I_z = I_y = \frac{\pi}{64} \cdot (D^4 - d^4) = \frac{\pi}{64} \cdot (D^4 - (D - 2t)^4), \quad (2)$$

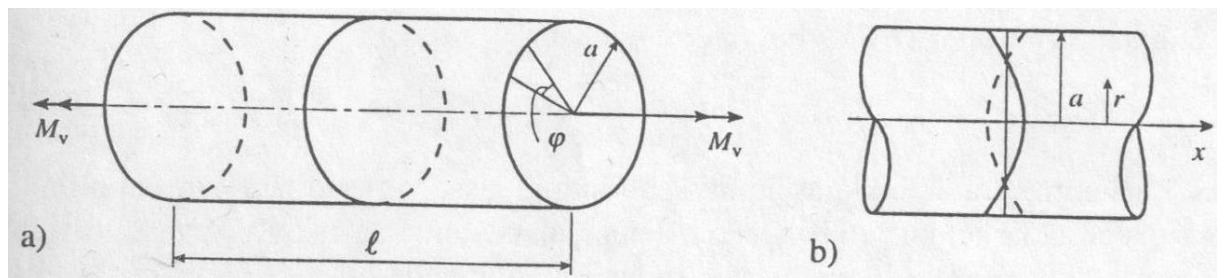
jossa D on putken ulkohalkaisija, d on putken sisähalkaisija ja t on putken seinämäpaksuus (KUVA 16).



KUVA 16. Putken poikkileikkauksen suuret (Pennala 1999, 62)

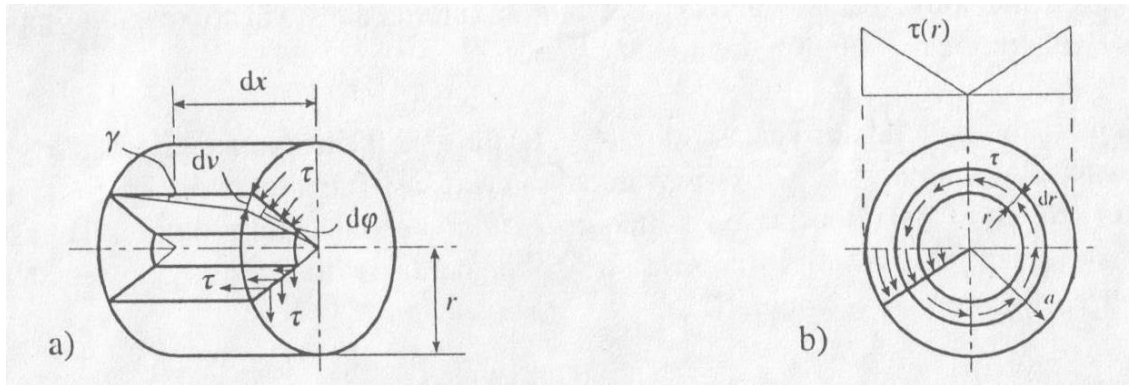
3.2 Poikkileikkaukseltaan pyöreän sauvan vapaa vääntö

Tarkastellaan kuvan 17 mukaista vääntömomentin kuormittamaa isotrooppista sauvaa ja siihen syntyviä jännityksiä sekä muodonmuutoksia. Sauva on vapaassa väännössä, jolloin siirtymät saavat vapaasti tapahtua eli niitä ole estetty. Pyöreän sauvan poikkileikkauksen vääntökeskiö yhtyy painopisteeseen, koska poikkipinnalla on kaksi symmetria-akselia, ja vääntöakseli pituusakseliin (KUVA 17 a)). Väännössä jokainen poikkileikkauksen halkaisija pysyy säteen suunnassa suorana. Halkaisija ei myöskään voi käyristyä pituusakselin suunnassa, koska minkä tahansa ajatellun katkaisukohdan leikkauspinnoina poikkipinnan käyristymisen tulisi tapahtua vastakkaisiin suuntiin (KUVA 17 b)). Tästä seuraa että sauvan poikkileikkaustasot säilyvät pyöreän sauvan väännössä tasoina. (Pennala 1999, 193)



KUVA 17. Pyöreän sauvan vääntö (Pennala 1999, 193)

Kuvassa 18 on esitetty kuvan 17 a) sauvasta irtileikatuksi ajateltu dx :n pituinen ja r -säteinen osa ja vääntösauvan leikkausjännitysjaakauma.



KUVA 18. Vääntösauvan alkion deformaatiot ja leikkausjännitysjakauma (Pennala 1999, 194)

Vääntösauvan leikkausjännitykselle voidaan johtaa yhtälö (Pennala 1999, 195)

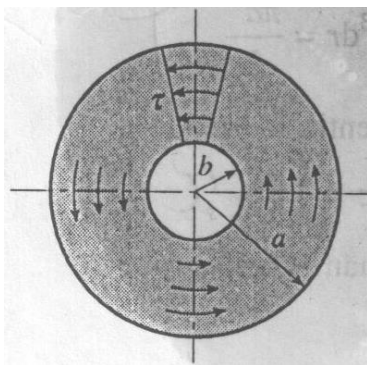
$$\tau = \frac{M_V \cdot r}{I_p}, \quad (3)$$

jossa M_V on vääntömomentti, r on radiaalikoordinaatti ja I_p polaarinen jäyhyysmomentti.

Polaarinen jäyhyysmomentti lasketaan yhtälöstä (Pennala 1999, 196)

$$I_p = \frac{\pi}{2} \cdot (a^4 - b^4) = \frac{\pi}{32} \cdot (D^4 - d^4) = \frac{\pi}{32} \cdot (D^4 - (D - 2t)^4) = 2 \cdot I_z, \quad (4)$$

jossa a on putken ulkosäde, b on putken sisäsäde. Kuva 19 selventää tilannetta.



KUVA 19. Leikkausjännitys väännetyin putken poikkileikkauksessa (Pennala 1999, 196)

4 PUTKIRUNGON FEM-MALLI

Tässä kappaleessa käydään läpi, miten rakenne on mallinnettu ja miksi on valittu tietyt menetelmät / elementtityypit. Laskennat suoritettiin käyttämällä Ansys-ohjelman 18.2 versiota.

4.1 Materiaalit

4.1.1 SSAB Form Tube 420

Putket ovat SSAB:n Form Tube 420 materiaalia, joka on erikoisluja muovattava ohutseinäputki. Putket valmistetaan kylmämuovaamalla ja suurtaajuushitsaamalla laadukkaasta teräksestä. Materiaalilla on hyvät hitsattavuusominaisuudet sekä mittatarkkuustoleranssit. Mekaaniset ominaisuudet on esitetty taulukossa 1. Tiheydelle, kimmokertoimelle ja poissonin luvulle käytettiin teräkselle ominaisia arvoja, muut arvot ovat SSAB:n ilmoittamia minimiarvoja. Mekaaniset ominaisuudet vastaavat EN 10305 (+CR2) -standardin vaatimuksia tai ylittävät ne. (www.ssab.fi Form Tube 420, 2018)

TAULUKKO 1. SSAB Form Tube 420 mekaaniset ominaisuudet (www.ssab.fi Form Tube 420, 2018)

Tiheys ρ	7850 kg/m ³
Kimmokerroin E	200 GPa
Poissonin luku ν	0,3
Myötölujuus $R_{p0,2}$	420 MPa (min)
Murtolujuus R_m	490 MPa (min)

4.1.2 SSAB Hardox 400®

Etutörmäyssuoja on 2 mm vahvuista teräslevyä, jonka materiaali on SSAB:n Hardox 400® kulutusterästä. Hardox 400® nimelliskovuus on 400 HBW ja tyypillinen myötölujuus 1100 MPa (ei taattu). Tällä materiaalilla on erinomainen sitkeys sekä hyvät taivutettavuus- ja hitsausominaisuudet. Materiaalille käytettiin samoja arvoja kuin taulukossa 1. Teräksien murtolujuudella ei tässä tapauksessa ole laskennan kannalta merkitystä, koska

jännitykset pysyivät alle 420 MPa myötölujuuden, jolloin laskenta oli lineaarisella alueella. (www.ssab.fi Hardox 400®, 2018)

4.1.3 Alumiini 7075-T6

Rungon takalevy on tehty 7075-T6 alumiinista, jonka levyn paksuus on 15 mm. Tällä alumiinilaadulla on erittäin suuri lujuus ja taulukossa 2 on esitetty materiaalille käytetyt mekaaniset ominaisuudet. (www.matweb.com, 2018)

TAULUKKO 2. Alumiini 7075-T6 mekaaniset ominaisuudet (www.matweb.com, 2018)

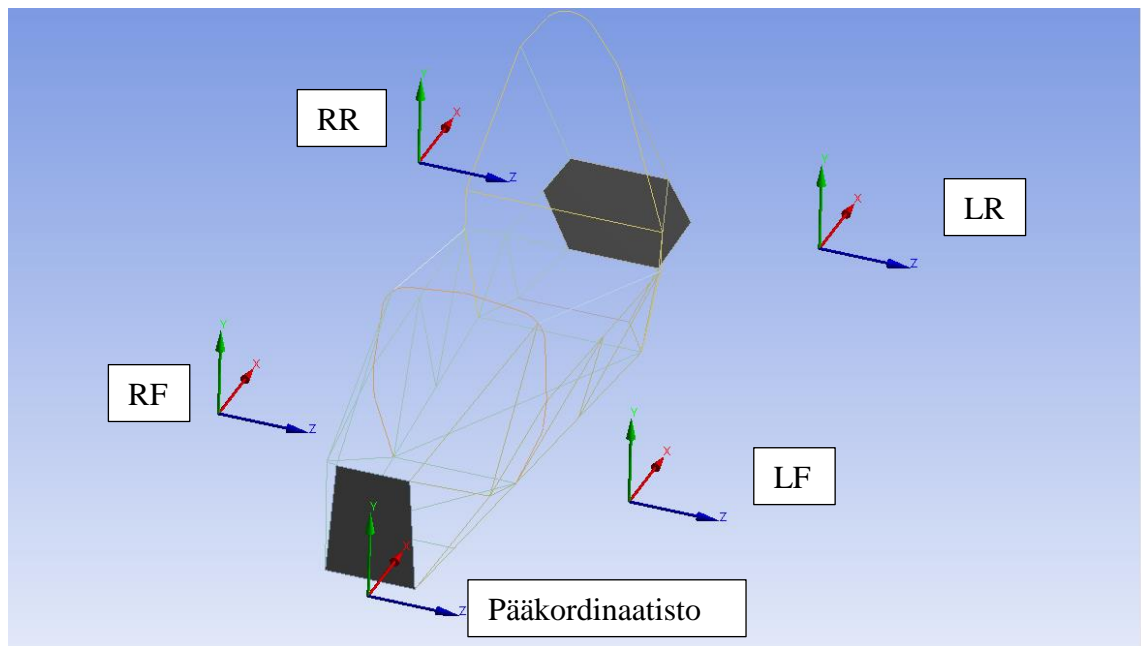
Tiheys ρ	2810 kg/m ³
Kimmokerroin E	71,7 GPa
Poissonin luku ν	0,33
Myötölujuus $R_{p0,2}$	469 MPa (levyn paksuus 12,7-25,4 mm)
Murtolujuus R_m	538 MPa (levyn paksuus 12,7-25,4 mm)

4.2 Koordinaatistot

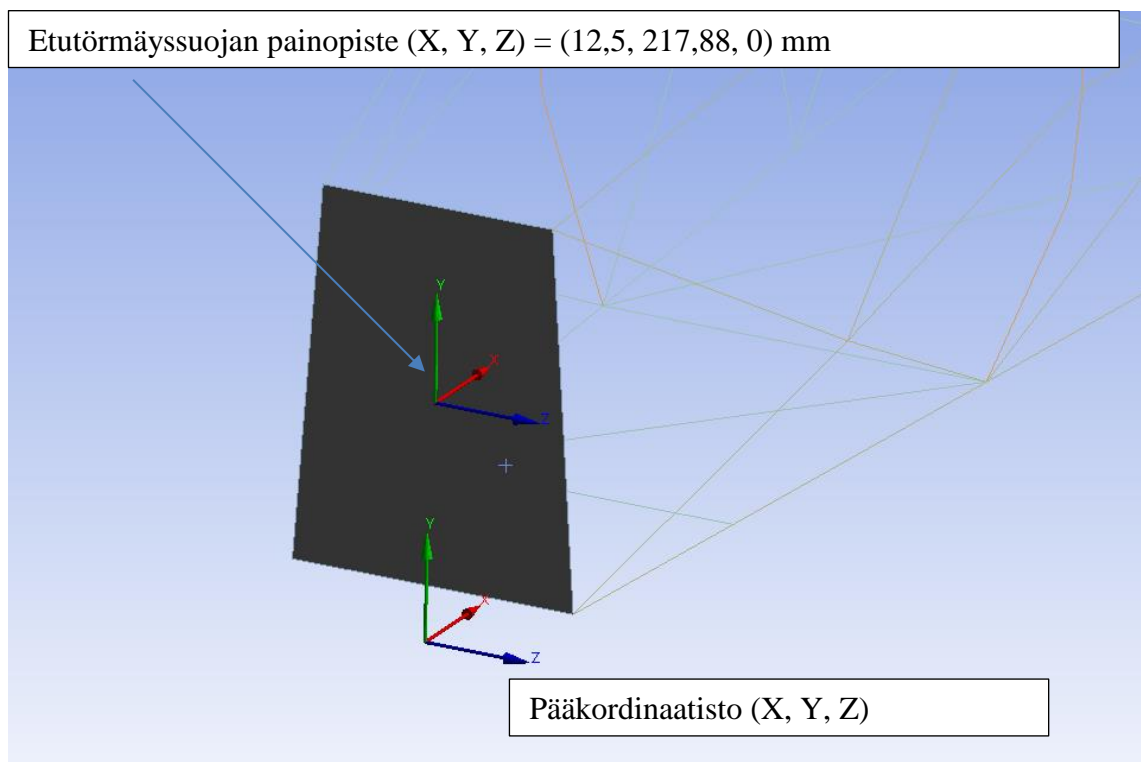
Mallissa käytetyt koordinaatistot on esitetty kuvassa 20. Koordinaatistot LF, LR, RF ja RR sijaitsevat renkaiden painopisteissä ja niiden koordinaatit pääkoordinaatiston suhteen on esitetty taulukossa 3. Kuvassa 21 on esitetty runkogeometrian sijainti pääkoordinaatistoon nähden.

TAULUKKO 3. Apukoordinaatistojen sijainti pääkoordinaatistoon nähden

Koordinaatisto	(X, Y, Z) [mm]
LF	(430, 228,6, 630)
LR	(1990, 228,6, 615)
RF	(430, 228,6, -630)
RR	(1990, 228,6, -615)



KUVA 20. Mallissa käytetyt koordinaatistot



KUVA 21. Rungon geometrian sijainti pääkoordinaatistoon nähden

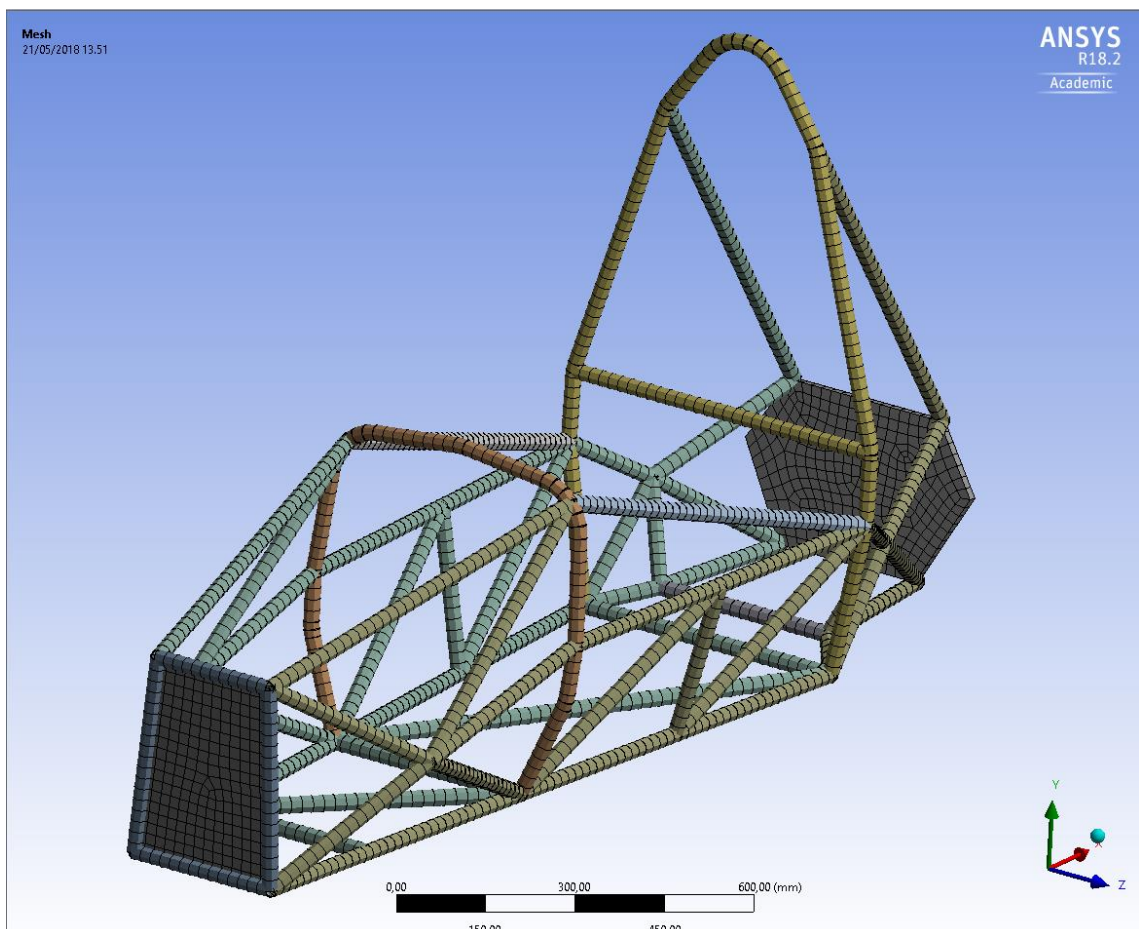
4.3 Geometria ja elementtiverkko

Putkirungon alkuperäinen geometria sekä optimoitu rakenne on esitetty kappaleissa 5.4.1 ja 5.4.2.

Rakenne mallinnettiin palkki- ja kuorielementeillä. Putkien mallintamiseen käytettiin palkkielementejä ja etutörmäyssuoja sekä takalevy on mallinnettu kuorielementeillä. Takalevyn geometria pelkistettiin laskennassa umpinaiseksi levyksi, todellisessa rakenteessa on keskelle jyrsky reikä. Tämän vuoksi malli on todellista rakennetta jäykempi. Näitä elementtityyppejä käyttämällä saatiin matemaattisesti kevyt ja tehokas malli, jolloin laskenta-ajat pysyivät lyhyinä. Malli pystyy kuvaamaan suhteelliset erot vääntöjäykkyydessä eri putken paksuusvaihtoehdoilla ja rakenteen massan vaihtelut tarkasti. Valitun mallinnustavan etuna on, että putkien profiilien muuttaminen mallissa on helppoa ja nopeaa.

Palkki- ja kuorielementtien käyttö kuitenkin yksinkertaistaa matemaattista mallia, eikä se pysty näin ollen kuvaamaan jännityksiä tarkasti putkien liitoskohdissa ja hitseissä. Malli ei myöskään anna tarkkaa arvoa vääntöjäykkyyden todelliselle arvolle. Mikäli edellä mainittuja asioita halutaan tutkia, kannattaa rakenne mallintaa 3D-elementeillä.

Rakenteen mallintamiseen käytetty elementtiverkko on esitetty kuvassa 22. Malli sisältää 3439 solmua ja 2005 elementtiä.

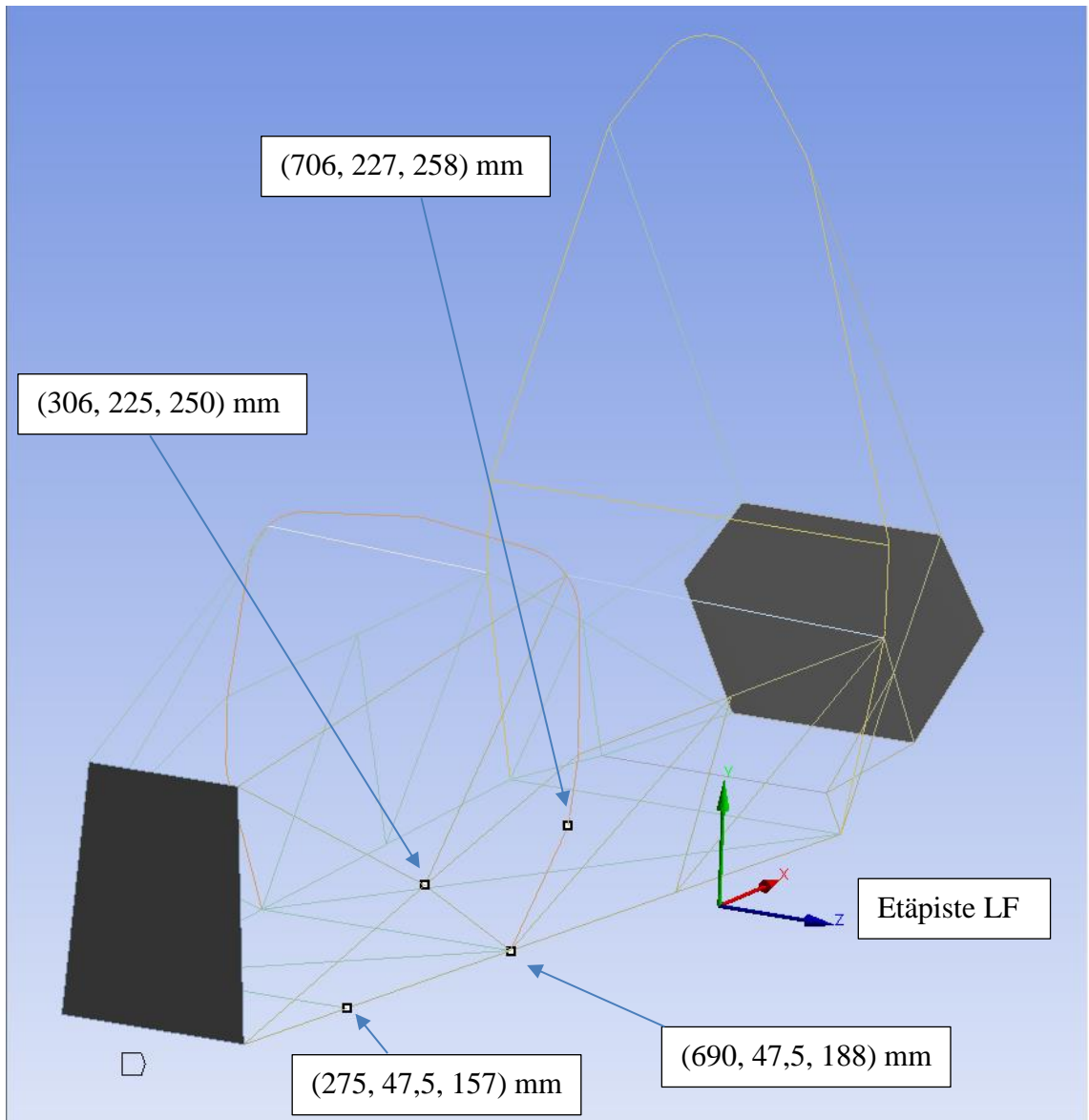


KUVA 22. Rakenteen mallintamiseen käytetty elementtiverkko

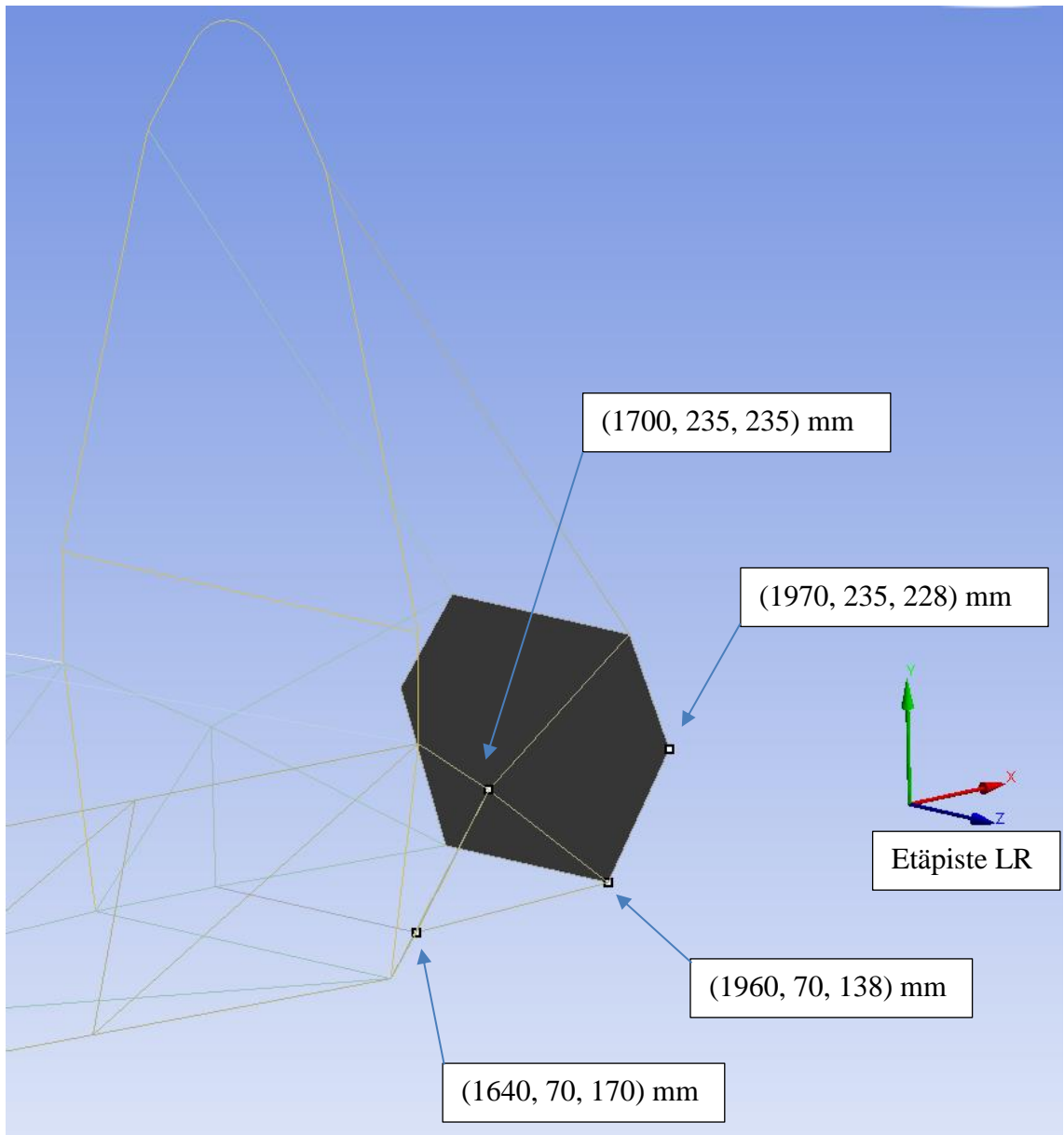
4.4 Reunaehdot ja kuormitukset

Renkaiden painopisteisiin (koordinaatit LF, LR, RF ja RR) luotiin etäpisteet (Remote point) LF, LR, RF ja RR, jotka kiinnitettiin runkoon jousituslinkkien kiinnityspisteisiin. Kiinnityspisteitä on neljä kappaletta rengasta kohden. Etäpisteiden LF ja LR kiinnityspisteet runkoon on esitetty kuvissa 23 ja 24. Etäpisteiden RF ja RR kiinnityspisteet ovat peilikuvia tason XY-suhteen kiinnityspisteistä LF ja LR.

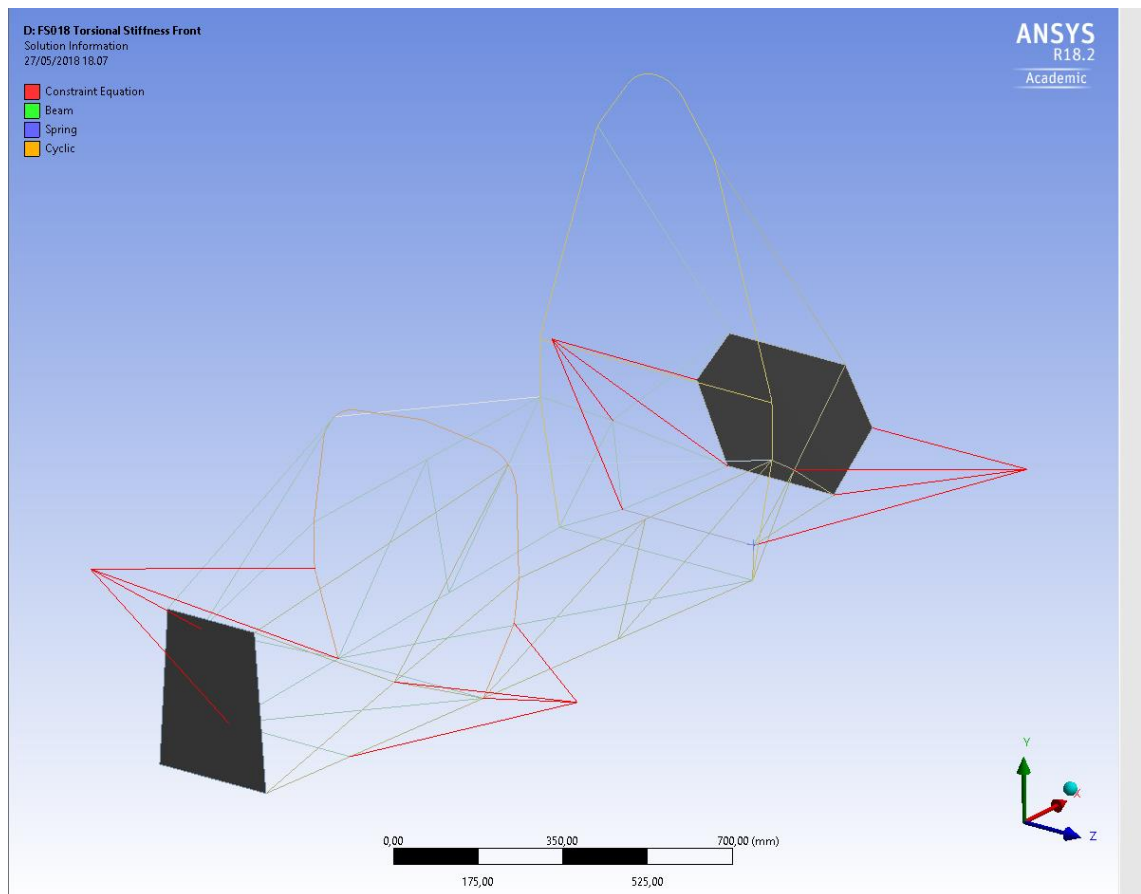
Kun käytetään etäpisteitä, Ansys-ohjelma muodostaa MPC-sidosyhtälöitä (multipoint constraint), joilla solmut ja vapausasteet liitetään toisiinsa. Määriteltyjen solmujen/geometrioiden väliin muodostuu käytännössä äärettömän jäykkiä rigid-elementtejä. Kuvassa 25 on esitetty punaisilla viivoilla malliin muodostuvat sidosyhtälöt. (Ansys 18.2 Help 2017: Remote Points)



KUVA 23. Etäpiste LF:n kiinnityspisteet runkoon



KUVA 24. Etäpiste LR:n kiinnityspisteet runkoon



KUVA 25. Etäpisteiden käytöstä muodostuvat sidosyhtälöt

Reunaehtoina etäpisteisiin LR ja RR asetettiin kaukosiirtymät (Remote displacement), joiden translaatiot lukittiin ja rotaatiot pidettiin vapaina. Rotaatiot jätettiin vapaaksi, koska näin ne kuvaavat jousituslinkkien nivelöintejä. Kuvassa 26 reunaehdot ovat kaukosiirtymät A ja B.

Etäpisteiden ja kaukosiirtymien käyttö on hyödyllistä erityisesti silloin, kun tiedetään kuormituksen vaikutuspiste ja kiinnittyminen rakenteeseen, mutta osa välissä olevaa geometriaa halutaan jättää mallintamatta.

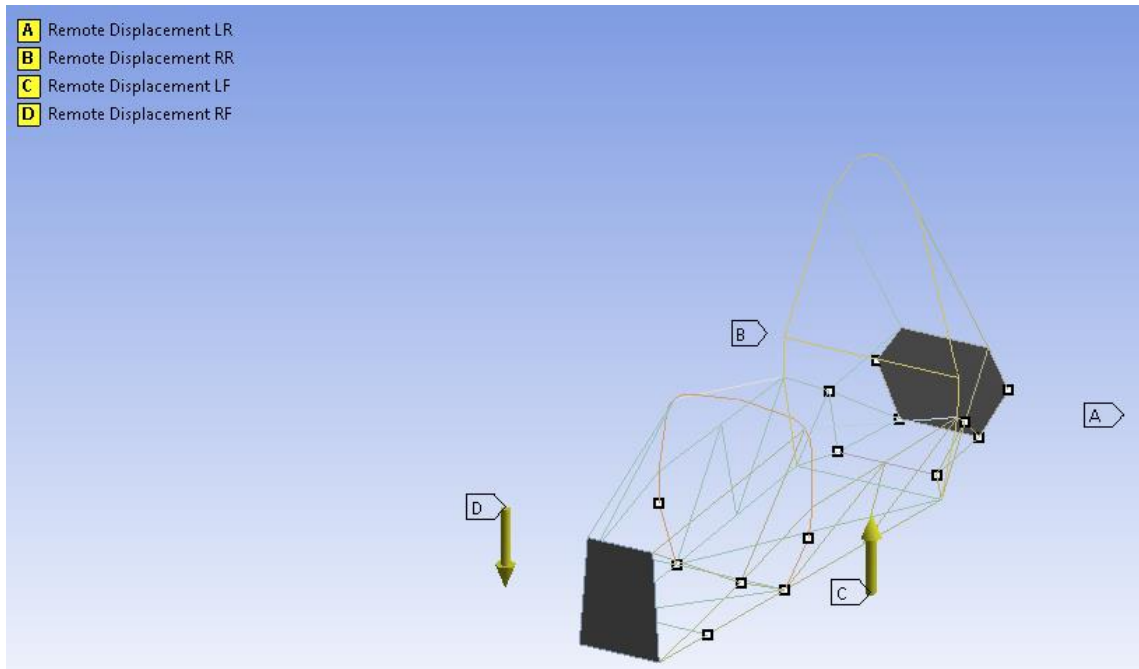
Kuormituksina malliin asetettiin etäpisteisiin LF ja RF kaukosiirtymät Y-suunnassa, jotka vastaavat yhden asteen kiertymistä rungon pituusakselin suhteen (X-akseli). Kuvassa 26 kuormitukset ovat kaukosiirtymät C ja D. Kiertymiskulmalle α voidaan johtaa yhtälö

$$\tan \alpha = \frac{Y}{L/2}, \quad (5)$$

jossa L on akseliväli. Sijoittamalla yhtälöön (5) lukuarvot ja ratkaisemalla Y saadaan:

$$Y = \frac{L}{2} \cdot \tan \alpha = \frac{1260 \text{ mm}}{2} \cdot \tan 1^\circ = 11 \text{ mm.}$$

Taulukkoon 4 on koottu asetetut reunaehdot ja kuormitukset.



KUVA 26. Reunaehdot ja kuormitukset

TAULUKKO 4. Reunaehdot ja kuormitukset

Kaukosiirtymä	Vapausasteet (X, Y, Z, Rot X, Rot Y, Rot Z) [mm] / [°]
LF	(Vapaa, 11, Vapaa, Vapaa, Vapaa, Vapaa)
RF	(Vapaa, -11, Vapaa, Vapaa, Vapaa, Vapaa)
LR	(0, 0, 0, Vapaa, Vapaa, Vapaa)
RR	(0, 0, 0, Vapaa, Vapaa, Vapaa).

5 RAKENTEEN OPTIMOINTI

5.1 Optimoitavat suureet ja parametrit

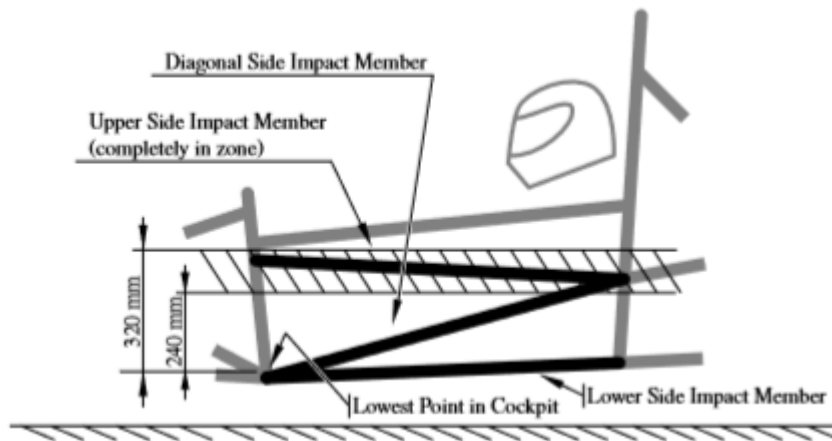
Tarkastelemalla yhtälöitä (1) sekä (3) ja (4) havaitaan, että jännitykset ovat kääntäen verrannalliset jäyhyysmomenttiin I_z sekä pinta-alaan A . Pienet siirtymät syntyvät minimoimalla jännitykset (Hooken laki $\sigma = E \cdot \epsilon$), kun lisäksi paino halutaan pitää minimissään, optimoitaviksi parametreiksi tulee etsiä mahdollisimman suuren jäyhyysmomentin ja pienimmän metripainon yhdistelmä.

5.2 Sääntöjen asettamat rajoitukset

Sääntöjen asettamat rajoitukset putkirungolle on esitetty sääntöjen kappaleessa T 2 (General Chassis Design). Tässä kappaleessa käydään läpi optimointiin oleellisesti vaikuttavat sääntöjen kohdat ja määritelmät. (FS rules 2018, 25-27)

Pääkaarella (Main hoop) tarkoitetaan kuljettajan kohdalla tai välittömästi sen takana olevaa turvakaarta. Etukaarella (Front hoop) tarkoitetaan kuljettajan jalkojen yläpuolella olevaa turvakaarta, joka sijaitsee ohjauspyörän läheisyydessä. Turvakaaria on rungossa näin ollen kaksi kappaletta. Turvakaaret tulee kolmioida. (FS rules 2018, 25-26)

Etutörmäyssuoja (Front bulkhead) on kuljettajan jalkojen edessä oleva tasomainen rakenne, joka määrittelee rungon etusuunnan. Rungon kolmioinneilla (Bracing) tarkoitetaan etutörmäyssuojan ja turvakaarien välisiä kolmiointi rakenteita (katso kuva 11). Sivutörmäyssuojalla tarkoitetaan kuvan 27 mukaista rakennetta. Kuvassa 27 on myös esitetty sivutörmäyssuojan ylimmän putken etäisyys vaatimukset. Merkille pantavaa on, että rungon pohjatasossa sijaitsevia leveyssuuntaisia putkia ja diagonaaliputkia ei lasketa kolmiointi putkiksi, jolloin niiden minimi paksuutta ja jäyhyysmomenttia ei ole rajoitettu yhtä paljon. (FS rules 2018, 25-26, 33-34)



KUVA 27. Putkirungon sivutörmäyssuojan määritelmiä ja etäisyys rajoitukset (FS rules 2018, 33)

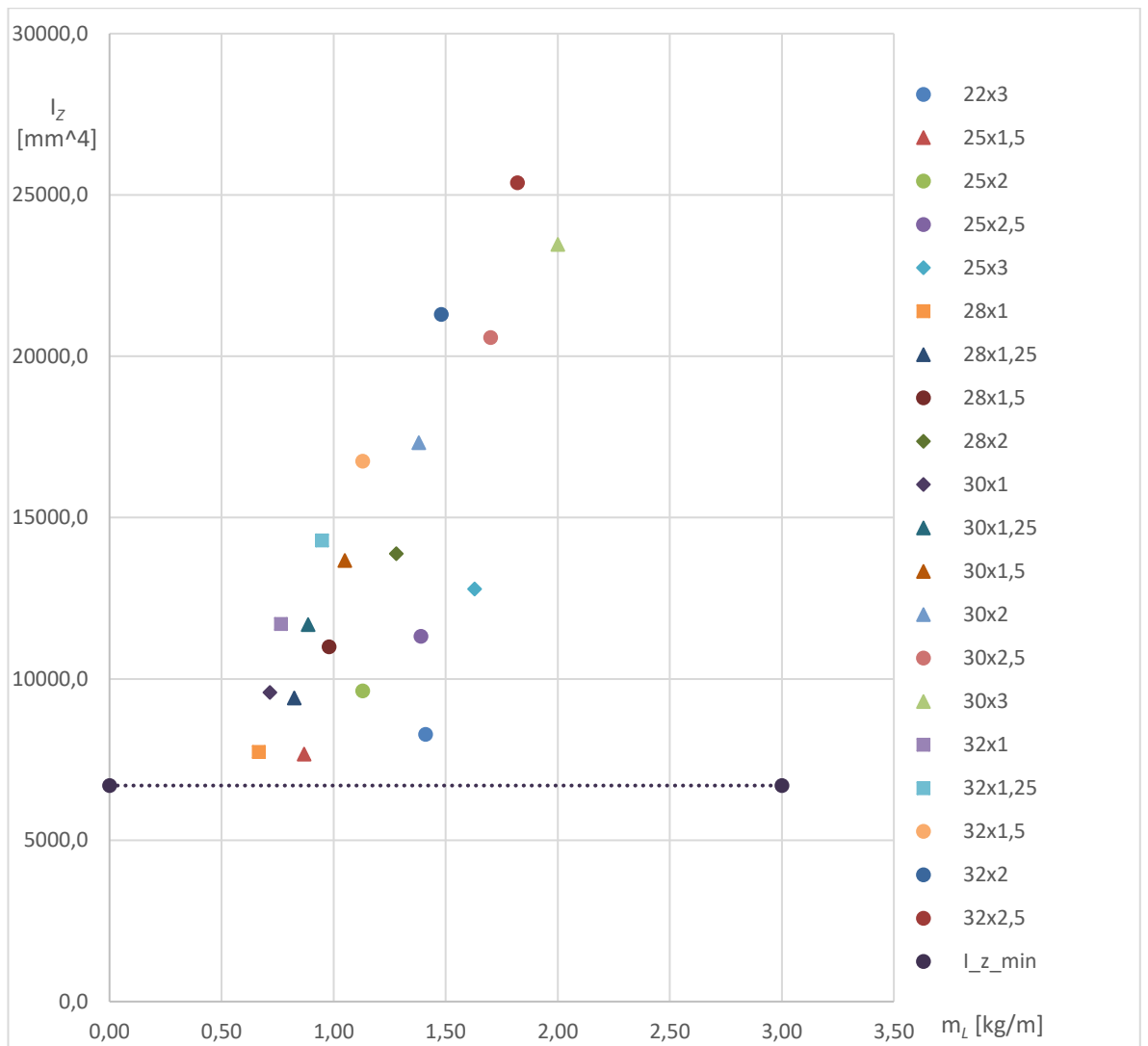
Kaikki edellä määritellyt rakenteet ovat pakollisia ja niitä koskee taulukon 5 mukaiset rajoitukset. Lisäksi kaikkien rungon putkien tulee olla seinämäpaksuudeltaan vähintään 1,2 mm tai jäyhyysmomentin on oltava vähintään 6695 mm^4 , jotta ne lasketaan kantavaksi rakenteeksi. (FS rules 2018, 26-27)

TAULUKKO 5. Rungon rakenteiden rajoitukset (FS rules 2018, 27)

Rakenne	Minimi seinämäpaksuus [mm]	Minimi jäyhyysmomentti [mm^4]
Etu- ja pääkaari, olkapää-turvavöiden kiinnitysputki	2,0	11320
Sivu- ja etutörmäyssuojat, turvakaarien väliset kolmioinnit, muut turvavöiden kiinnityspisteet	1,2	8509
Etutörmäyssuojan kolmioinnit, pääkaaren takana sijaitsevat kolmioinnit	1,2	6695

5.3 Käytettävissä olevat putkikoot

Käytettävissä olevat putkikoot (keveimmät ja sääntöjen asettamien minimi rajoitusten mukaan soveliaimmat) ja niiden metripainot sekä jäyhyysmomentit on esitetty kuviossa 1 ja taulukossa 6.



KUVIO 1. Käytettävissä olevat putkikoot metripainon ja jäyhyysmomentin suhteen

TAULUKKO 6. Käytettävissä olevat putkikoot metripainon ja jäyhyysmomentin suhteen

Putkikoko ($D_{ulko} \times t$) [mm]	I_z [mm ⁴]	m_L [kg/m]
22x3	8282,0	1,41
25x1,5	7675,7	0,87
25x2	9628,2	1,13
25x2,5	11320,8	1,39
25x3	12777,6	1,63
28x1	7740,1	0,67
28x1,25	9416,5	0,83
28x1,5	10997,1	0,98
28x2	13885,8	1,28
30x1	9588,9	0,72
30x1,25	11687,0	0,89
30x1,5	13673,7	1,05
30x2	17329,0	1,38
30x2,5	20586,0	1,70
30x3	23474,8	2,00
32x1	11711,1	0,77
32x1,25	14296,3	0,95
32x1,5	16753,3	1,13
32x2	21300,0	1,48
32x2,5	25384,8	1,82

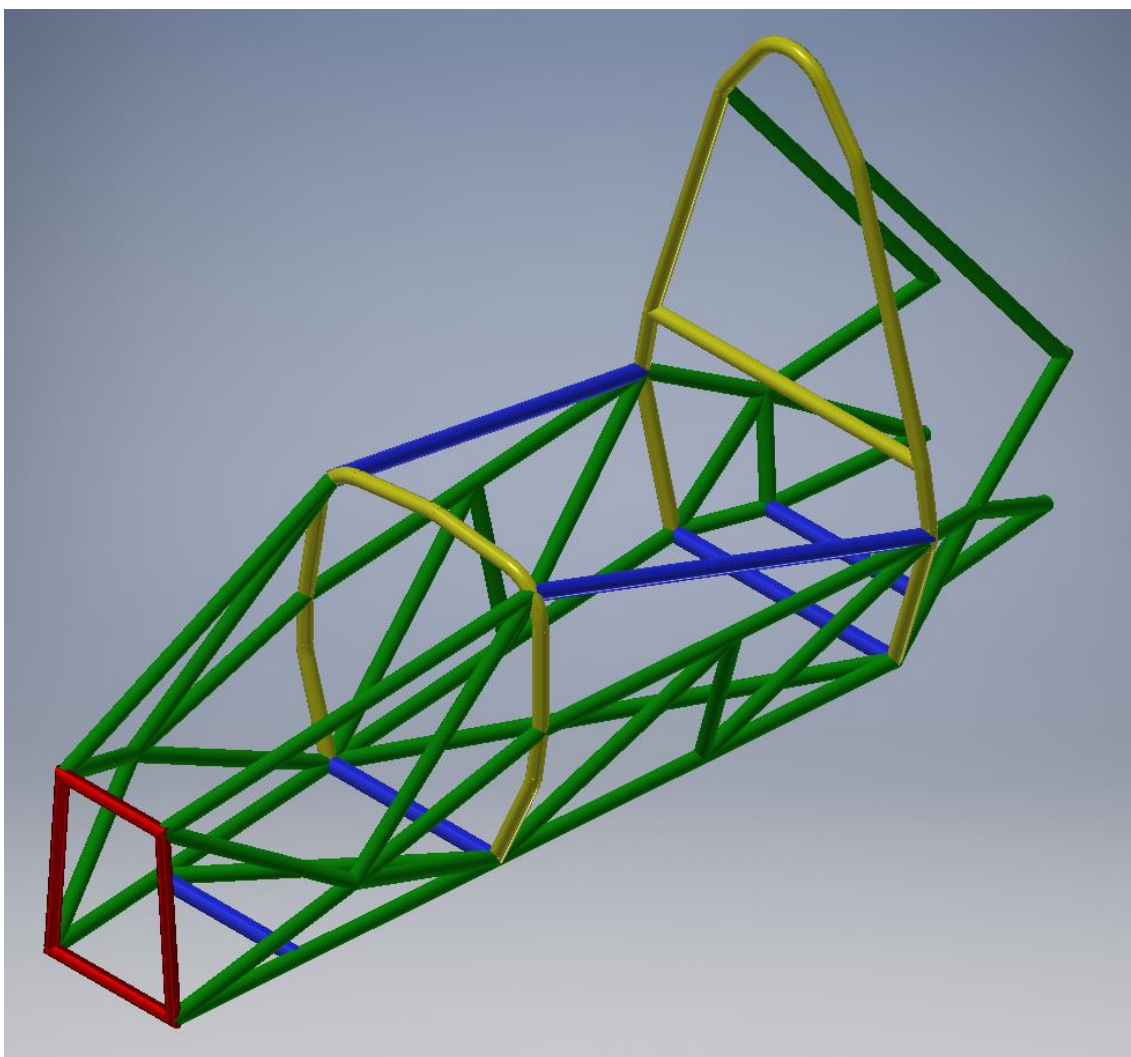
5.4 Geometria ja rungon massa

5.4.1 Alkuperäinen rakenne

Alkuperäisessä geometriassa käytetyt putkikoot on esitetty taulukossa 7 ja kuvassa 28. Alkuperäisen rungon paino etutörmäyssuoja ja takalevy mukaan luettuna on 31,31 kg. Kuvassa 28 sivutörmäyssuojien yläpuolella olevat pitkittäiset 30x1 putket tulkitaan sääntöjen mukaan ”ylimääräisiksi”, jolloin niitä ei koske kolmioinneille asetettu 1,2 mm seinämepaksuuden minimi vaatimus.

TAULUKKO 7. Alkuperäisessä geometriassa käytetyt putkikoot

Putkikoko ($D_{ulko} \times t$) [mm]	Väri
25 x 2	Punainen
28 x 1,25	Vihreä
28 x 2	Keltainen
30 x 1	Sininen



KUVA 28. Alkuperäisen geometrian putkikoot

5.4.2 Optimoitu rakenne

Tarkastellaan etu- ja pääkaarien sekä olkapääturvavöiden kiinnityspotkien mahdollisia kokoja. Sääntöjen asettama minimi seinämäpaksuudelle on 2 mm ja minimi jäyhyysmomentti 11320 mm^4 . Taulukosta 6 nähdään että 25x2 putken jäyhyys ei täytä minimi vaatimusta ja putken 30x2 metripaino on suurempi kuin 28x2 putken. Näin ollen 28x2 putkikoko on jo optimaalisin vaihtoehto.

Tarkastellaan sivu- ja etutörmäyssuojien, turvakaarien välisien kolmiointien ja muiden turvavöiden kiinnityspisteiden mahdollisia putkikokoja. Sääntöjen asettama minimi seinämäpaksuudelle on 1,2 mm ja minimi jäyhyysmomentti 8509 mm^4 . Taulukosta 6 ja kuvioista 1 nähdään että 28x1,25 on metripainoltaan pienin putkikoko, joka täyttää jäyhyysmomenttiehdon. Seuraava 30x1,25 putkikoko on metripainoltaan suurempi. Turvakaarien sekä etutörmäyssuojan väliset kolmioinnit ovat jo optimaalisessa 28x1,25 putkikoossa. Etutörmäyssuojan putkikoko 25x2 voidaan vaihtaa kevyempään ja jäyhyysmomentiltaan suurempaan 28x1,5 putkikokoon.

Tarkastellaan etutörmäyssuojan ja pääkaaren takana olevia kolmiointeja. Sääntöjen asettama minimi seinämäpaksuudelle on 1,2 mm ja minimi jäyhyysmomentti 6695 mm^4 . Taulukosta 6 ja kuvioista 1 nähdään, että putkikoko 28x1,25 on jo optimaalinen vaihtoehto (muut ehdot täyttävät putkikoot metripainoltaan suurempia).

Sääntöjen mukaan muille putkille on putken seinämävahvuus oltava minimissään 1,2 mm tai jäyhyysmomentin vähintään 6695 mm^4 . Jäyhyysmomentiltaan suurin ja kevein putkikoko on kuvion 1 mukaan 30x1. Rungon pohjatasossa sijaitsevat leveysuuntaiset putket ja sivutörmäyssuojien yläpuolella olevat pitkittäiset putket ovat jo tätä optimaalista putkikokoja, mutta pohjatasossa sijaitsevat kaksi diagonaaliputkea voidaan vaihtaa tähän 30x1 kokoon. Putkikoko 30x1 on metripainoltaan kevyempää ja jäyhyysmomentiltaan suurempaa kuin putkikoko 28x1,25.

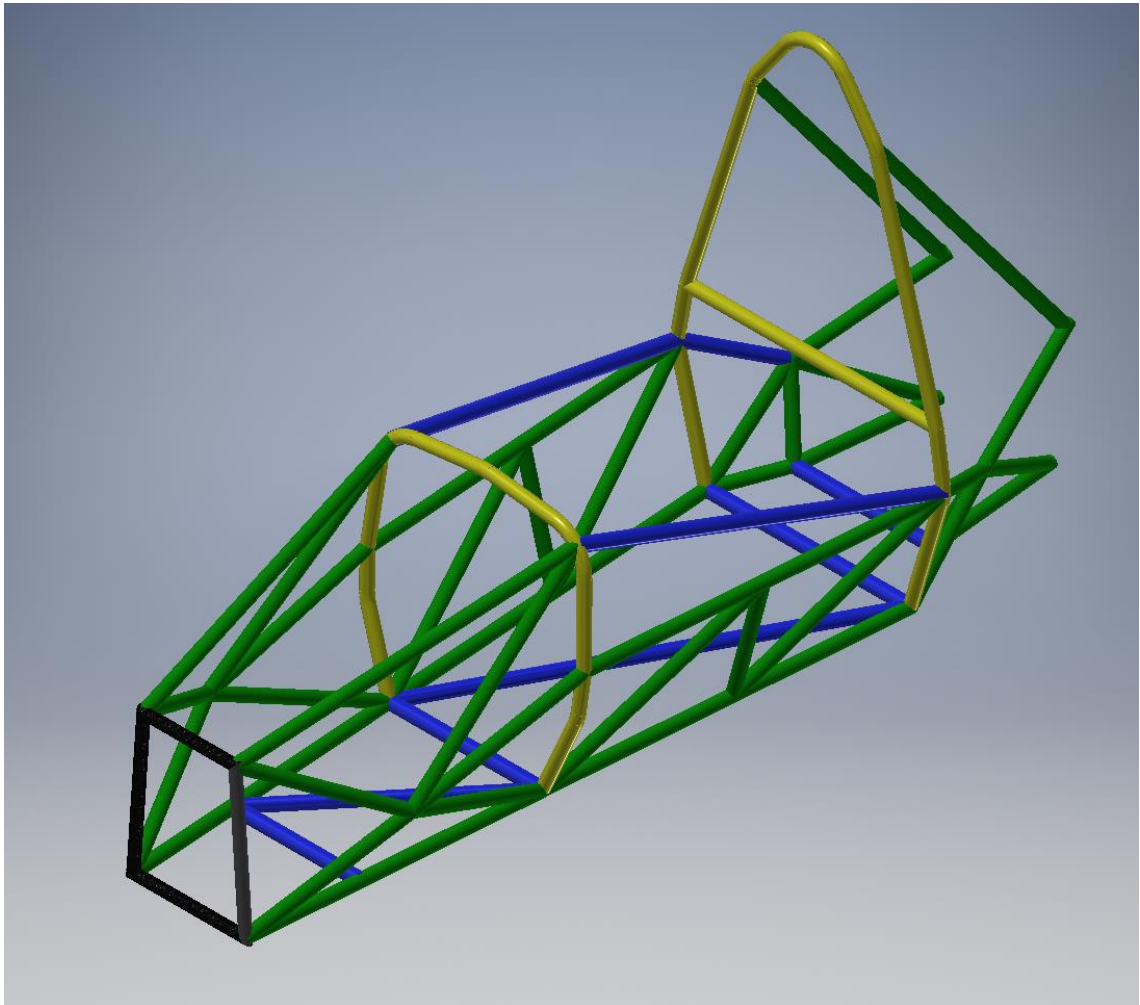
Putkikokoihin tehdyt muutokset on koottu taulukkoon 8. Muutosten sijainti geometriassa on esitetty taulukossa 9 ja kuvassa 29. Optimoidun rungon paino on 30,96 kg.

TAULUKKO 8. Rakenteeseen tehdyt muutokset

Osa	Alkuperäinen putkikoko	Optimoitu putkikoko
Etutörmäyssuoja	25x2	28x1,5
Pohjan diagonaali 1	28x1,25	30x1
Pohjan diagonaali 2	28x1,25	30x1

TAULUKKO 9. Optimoidussa rakenteessa käytetyt putkikoot

Putkikoko ($D_{ulko} \times t$) [mm]	Väri
25 x 2	Punainen
28 x 1,25	Vihreä
28 x 1,5	Musta
28 x 2	Keltainen
30 x 1	Sininen



KUVA 29. Optimoidun rakenteen putkikoot

5.5 Laskentatulokset

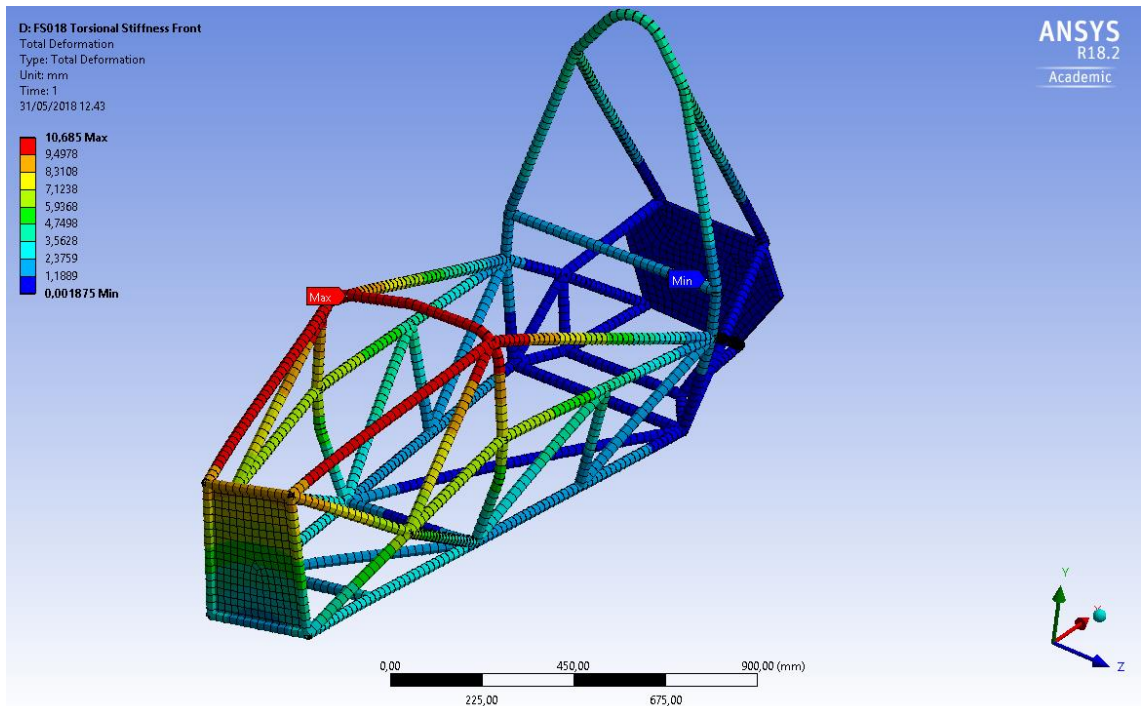
Laskentatulokset alkuperäiselle ja optimoidulle rakenteelle on esitetty kappaleissa 5.5.1 ja 5.5.2. Palkkielementtien taivutusjännityksiä esiintyy tavutuskuormasta johtuen palkkielementin paikallisessa koordinaatistossa Y- ja Z-suunnissa (X-suunta on palkkielementin pituusakseli). Tämä johtaa neljään taivutusjännityksen arvoon eli Y-suunnassa ylä- ja alapinta sekä Z-suunnassa ylä- ja alapinta. Minimi taivutusjännitys on näistä neljästä taivutusjännityksestä pienin arvo. Maksimi taivutusjännitys on vastaavasti suurin jännitys näistä neljästä arvosta. Minimi yhdistettyjännitys on lineaarikombinaatio aksiaalijännityksestä ja minimi taivutusjännityksestä. Maksimi yhdistettyjännitys on lineaarikombinaatio aksiaalijännityksestä ja maksimi taivutusjännityksestä. (Ansys 18.2 Help 2017: Beam Tool)

5.5.1 Alkuperäinen rakenne

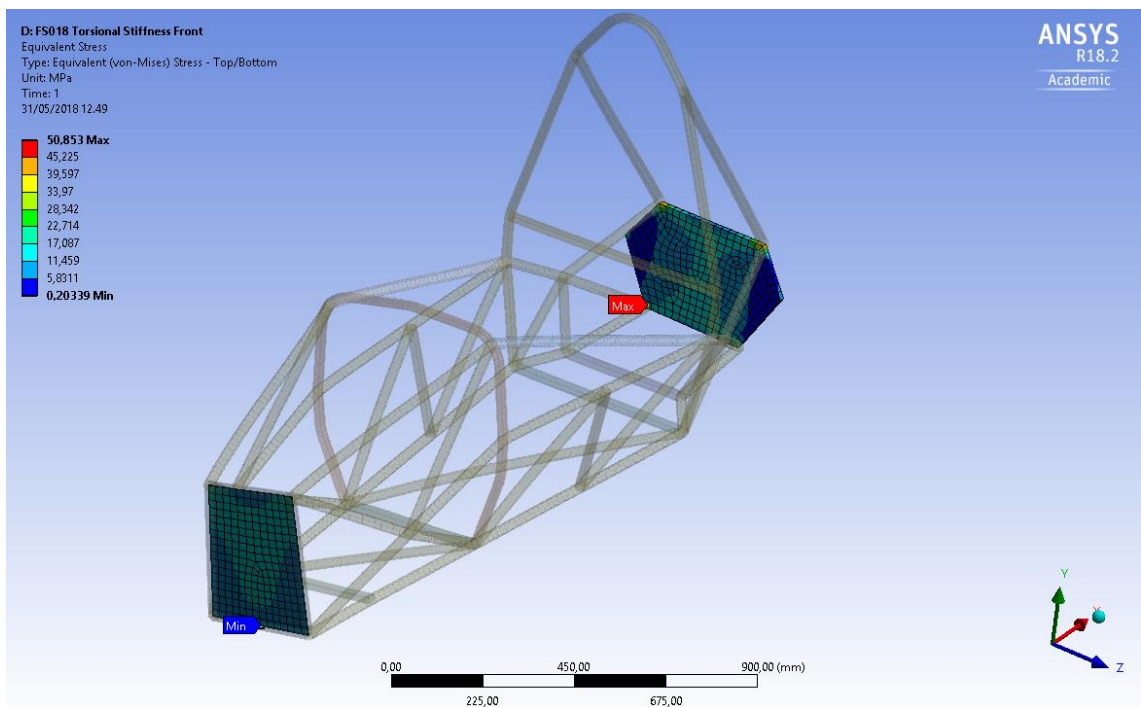
Rakenteen kokonaissiirtymät on esitetty kuvassa 30 ja maksimiarvo on 10,69 mm. Etutörmäyssuojan ja takalevyn Von Misesin jännitykset on esitetty kuvassa 31 ja maksimijännitys on 50,9 MPa.

Palkkielementtien aksiaalijännitykset on esitetty kuvassa 32 ja maksimiarvo on 52,6 MPa sekä minimiarvo -53,1 MPa. Palkkielementtien minimi yhdistettyjännitys on esitetty kuvassa 33 ja suurin arvo on 50,6 MPa sekä pienin arvo -325,9 MPa. Palkkielementtien maksimi yhdistettyjännitys on esitetty kuvassa 34 ja suurin arvo on 341,7 MPa sekä pienin arvo -50,5 MPa. Kaikki jännityskomponentit pysyvät rakenteessa reilusti alle myötörajojen.

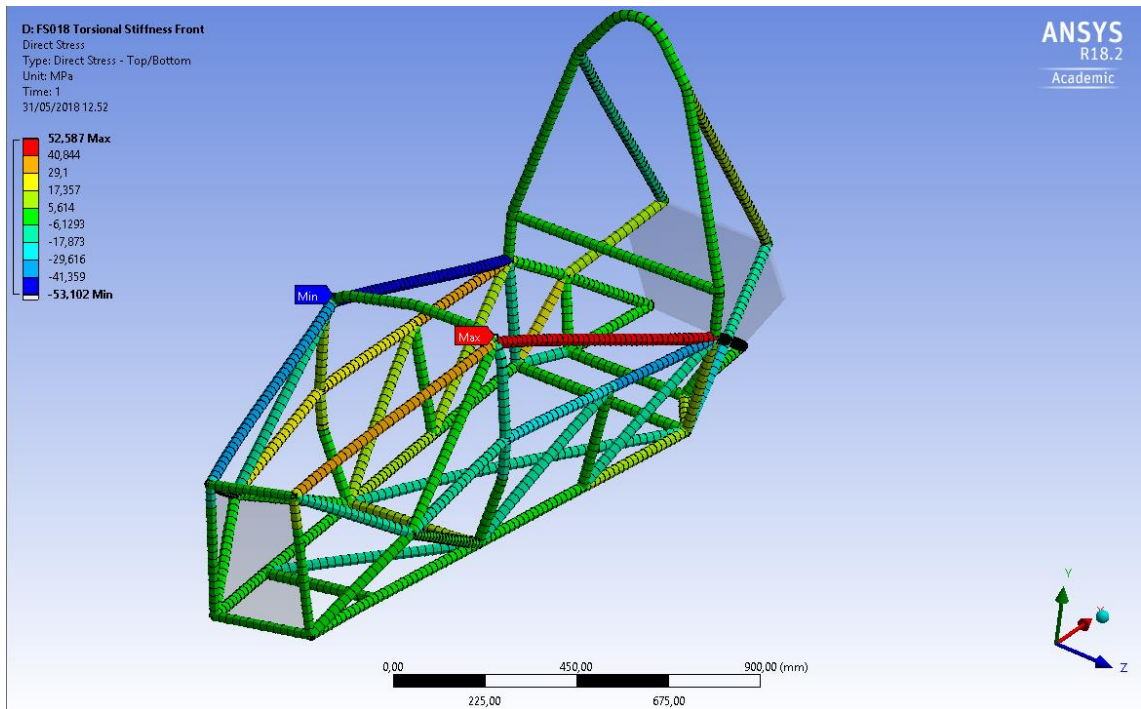
Kaukosiirtymien LF, RF, LR, RR tukireaktiot ja niiden arvot on esitetty kuvissa 35-38. Etuakselin yhden asteen kiertymiseen tarvittava voima on pisteessä LF 1308,1 N ja pisteessä RF -1308,1 N.



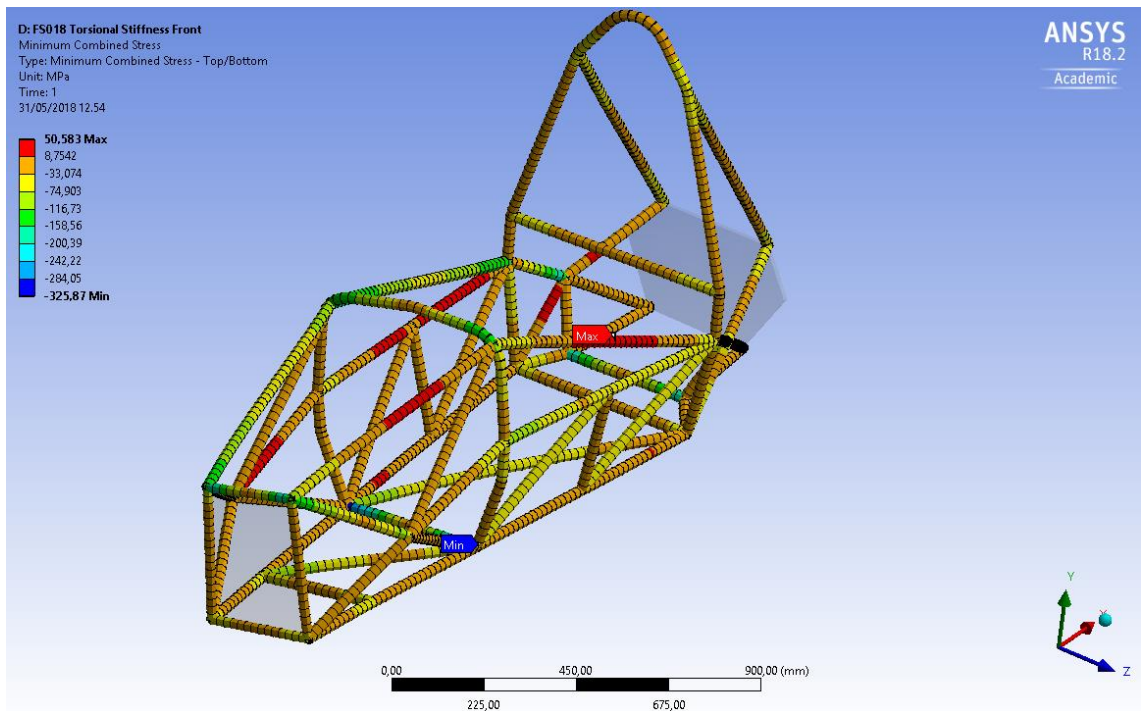
KUVA 30. Alkuperäisen rakenteen kokonaissiirtymä



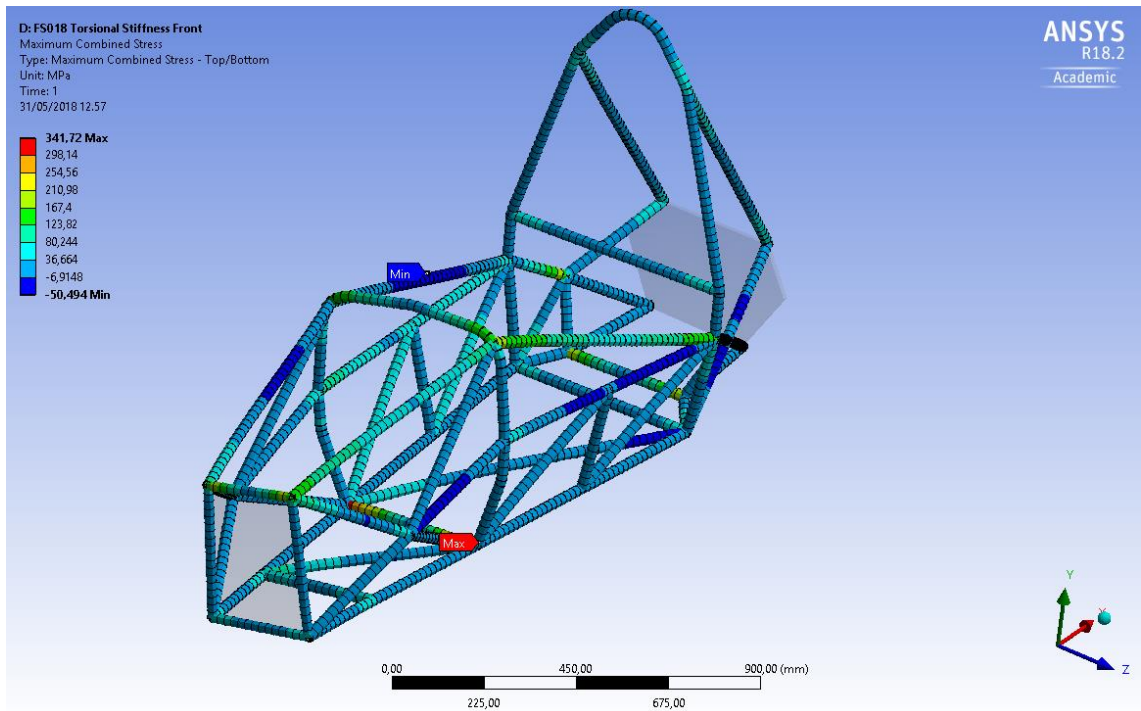
KUVA 31. Alkuperäisen rakenteen Von Misesin jännitykset



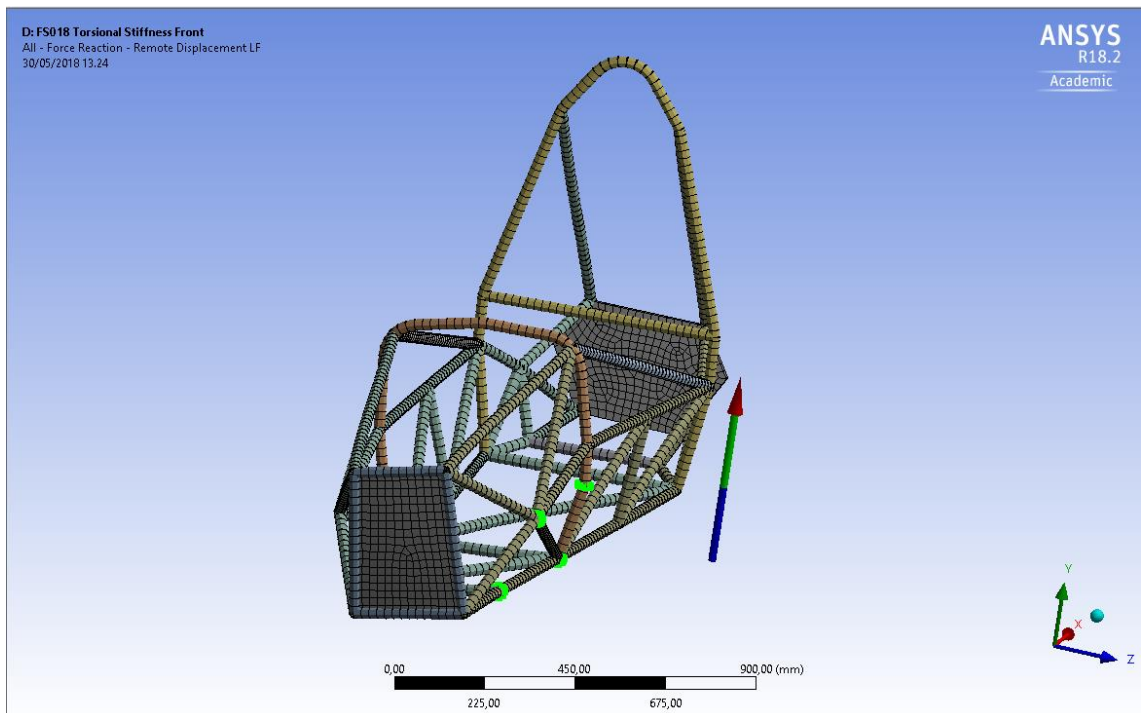
KUVA 32. Alkuperäinen rakenne: Palkkielementtien aksiaalijännitykset



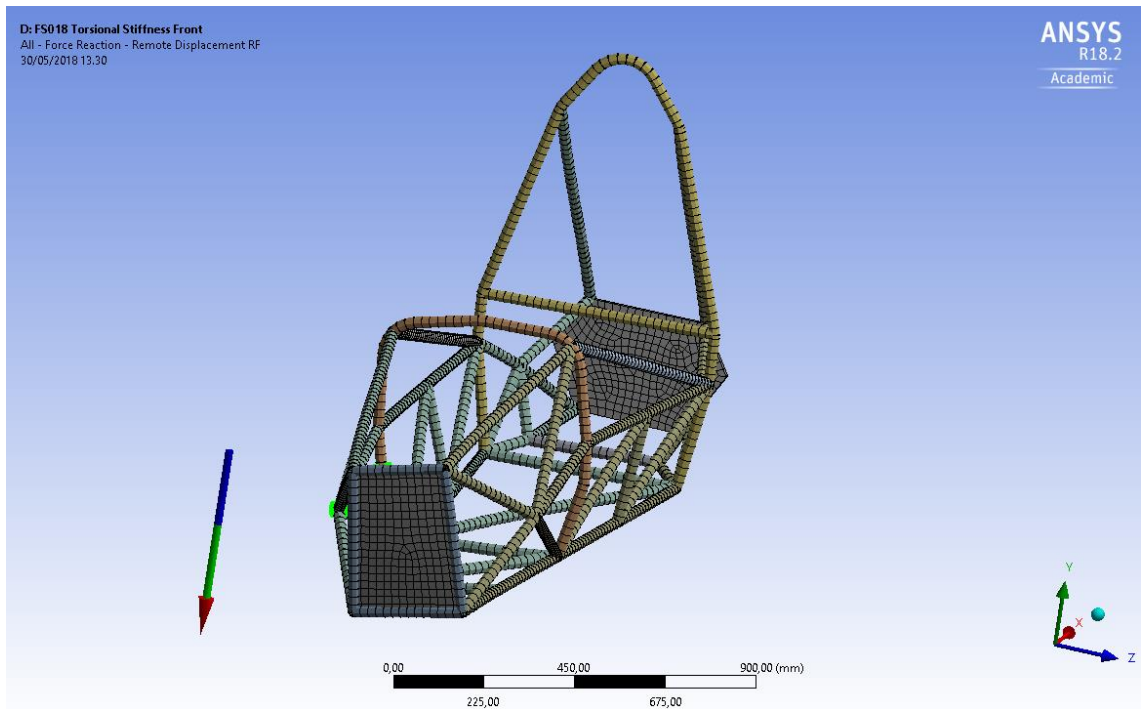
KUVA 33. Alkuperäinen rakenne: Palkkielementtien minimi yhdistettyjännitys



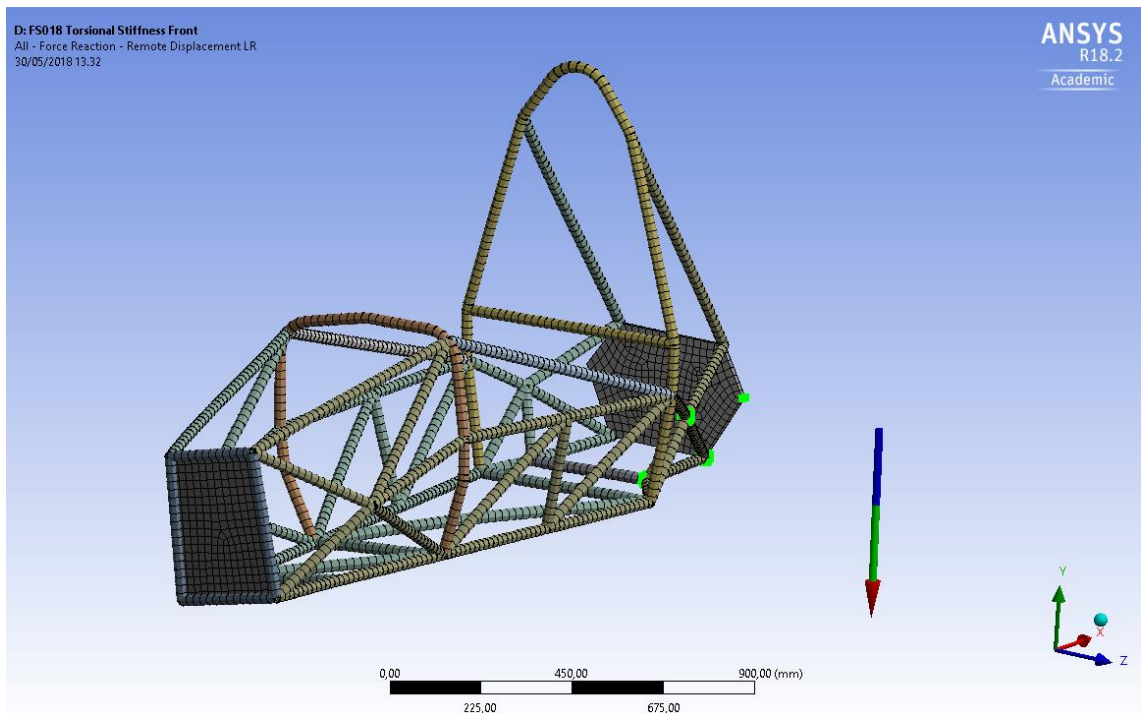
KUVA 34. Alkuperäinen rakenne: Palkkielementtien maksimi yhdistettyjännitys



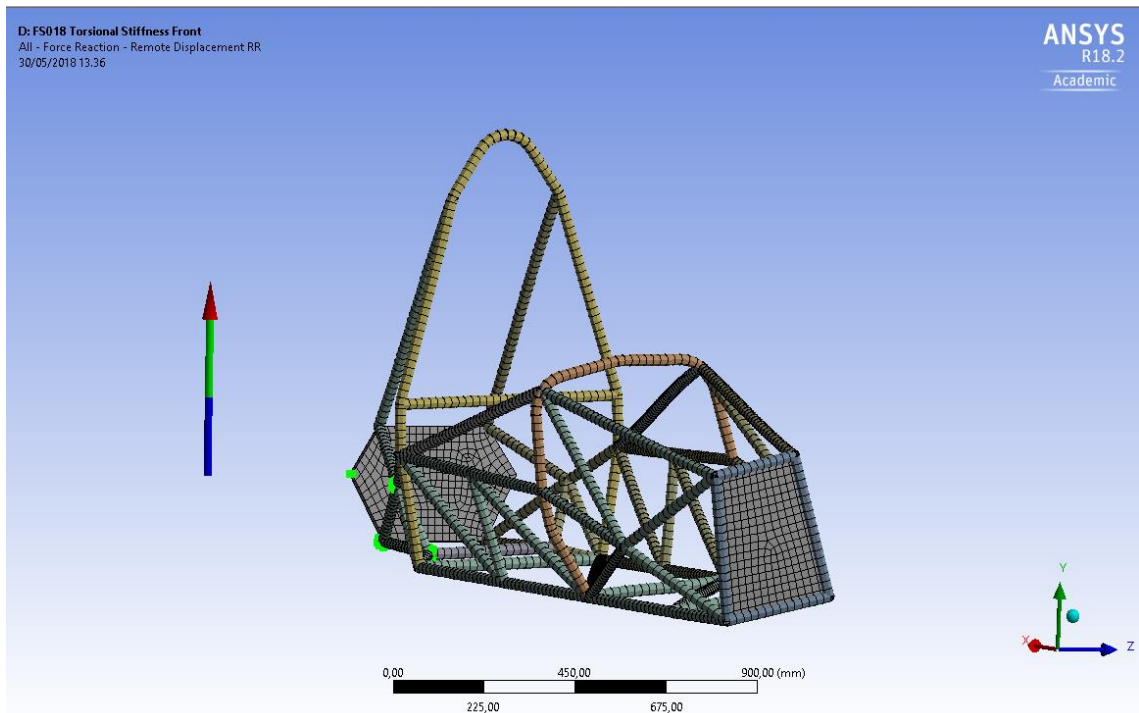
KUVA 35. Alkuperäinen rakenne: Kaukosiirtymä LF reaktiivoima $F = (0, 1308, 1, 0) \text{ N}$



KUVA 36. Alkuperäinen rakenne: Kaukosiirtymä RF reaktiovoima $F = (0, -1308,1, 0)$ N



KUVA 37. Alkuperäinen rakenne: Kaukosiirtymä LR reaktiovoima $F = (0, -1340, 31,9)$ N



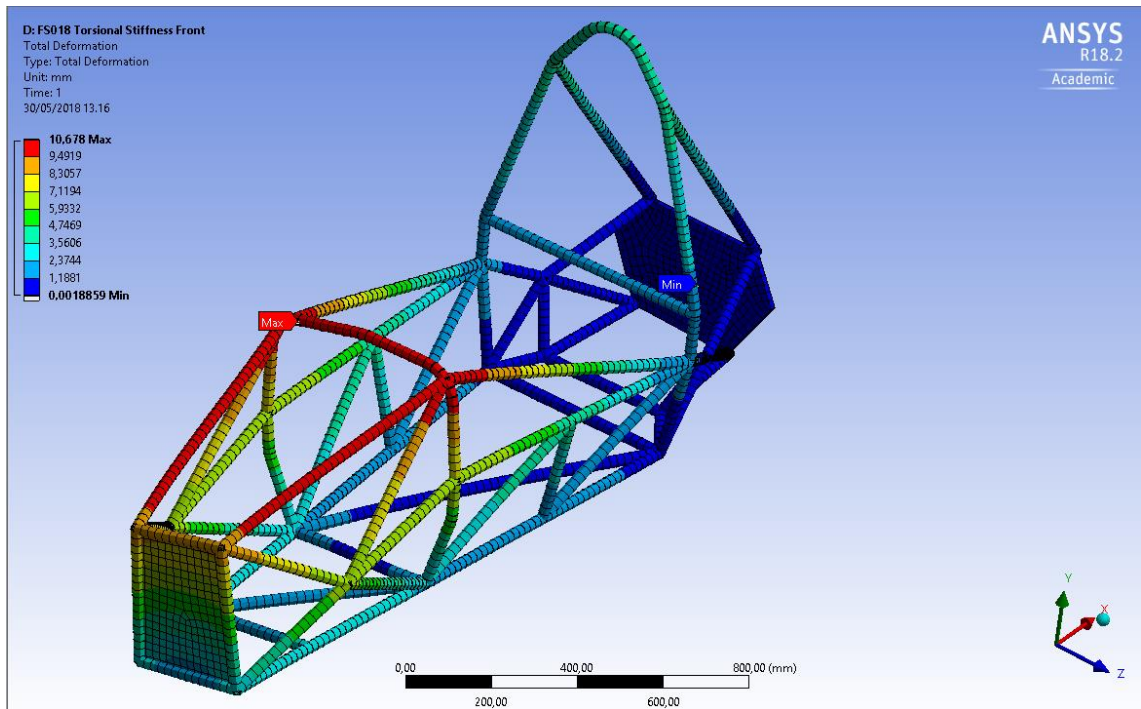
KUVA 38. Alkuperäinen rakenne: Kaukosiirtymä RR reaktiovoima $F = (0, 1340, -31,9)$ N

5.5.2 Optimoitu rakenne

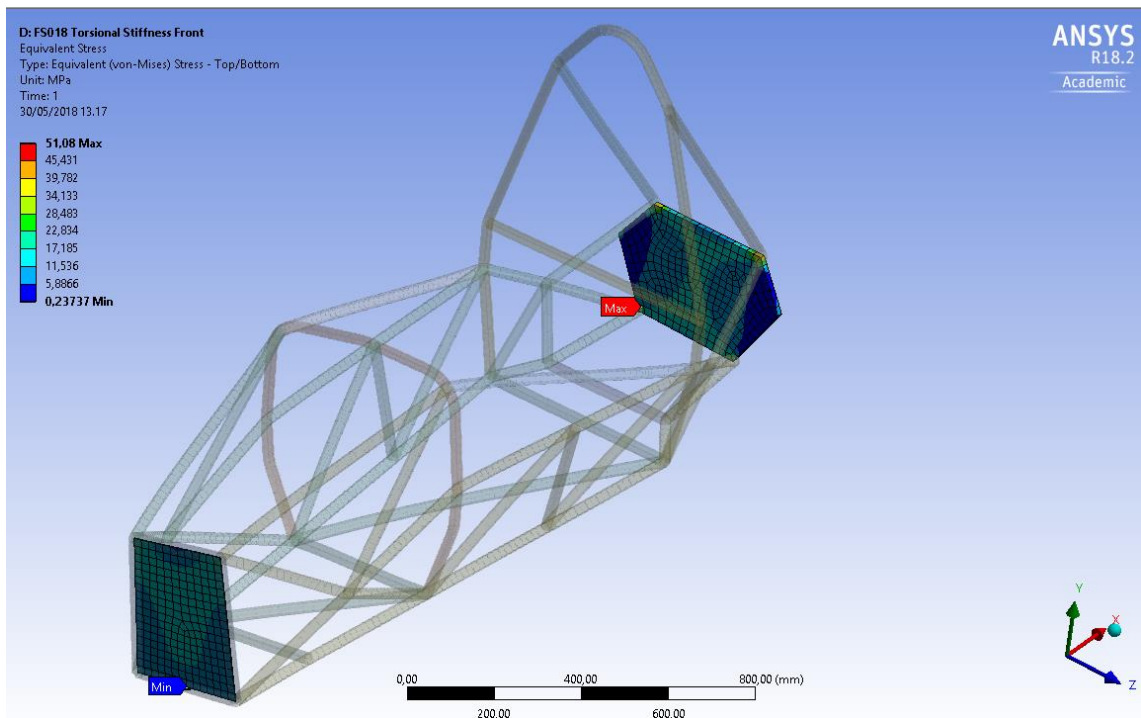
Rakenteen kokonaissiirtymät on esitetty kuvassa 39 ja maksimiarvo on 10,68 mm. Etutörmäyssuojan ja takalevyn Von Misesin jännitykset on esitetty kuvassa 40 ja maksimijännitys on 51,1 MPa.

Palkkielementtien aksiaalijännitykset on esitetty kuvassa 41 ja maksimiarvo on 53 MPa sekä minimiarvo -53,5 MPa. Palkkielementtien minimi yhdistettyjännitys on esitetty kuvassa 42 ja suurin arvo on 51 MPa sekä pienin arvo -292 MPa. Palkkielementtien maksimi yhdistettyjännitys on esitetty kuvassa 43 ja suurin arvo on 308 MPa sekä pienin arvo -51 MPa. Kaikki jännityskomponentit pysyvät rakenteessa reilusti alle myötörajojen.

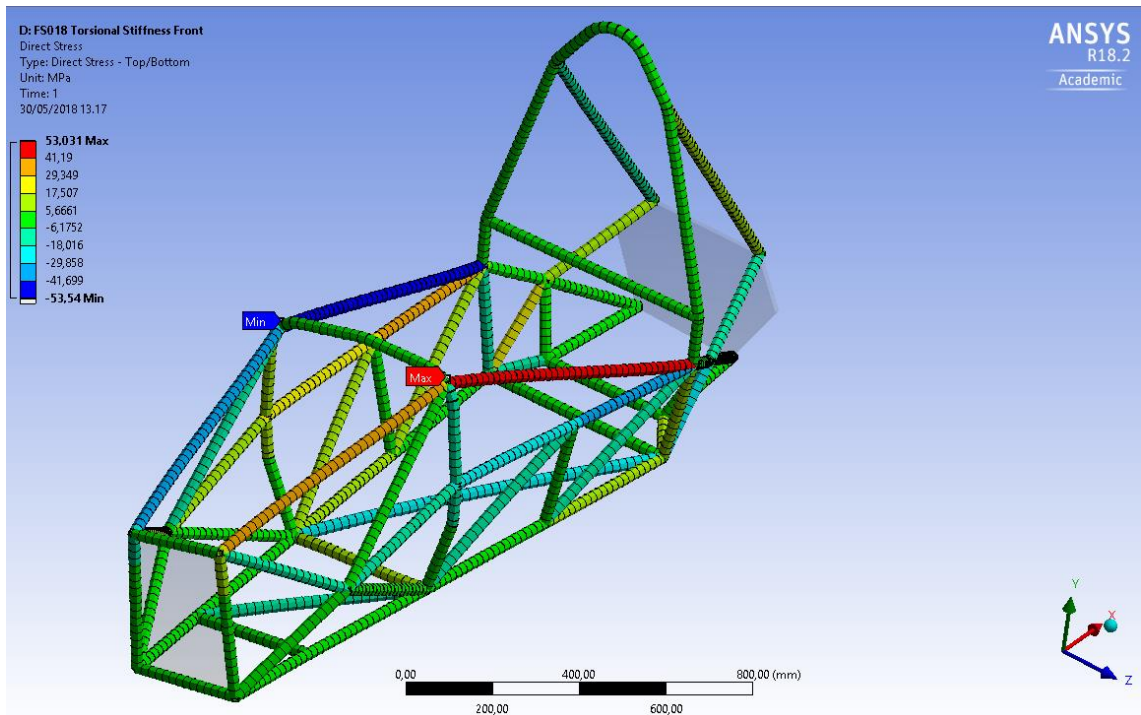
Kaukosiirtymien LF, RF, LR, RR tukireaktiot ja niiden arvot on esitetty kuvissa 44-47. Etuakselin yhden asteen kiertymiseen tarvittava voima on pisteessä LF 1318,5 N ja pisteessä RF -1318,5 N.



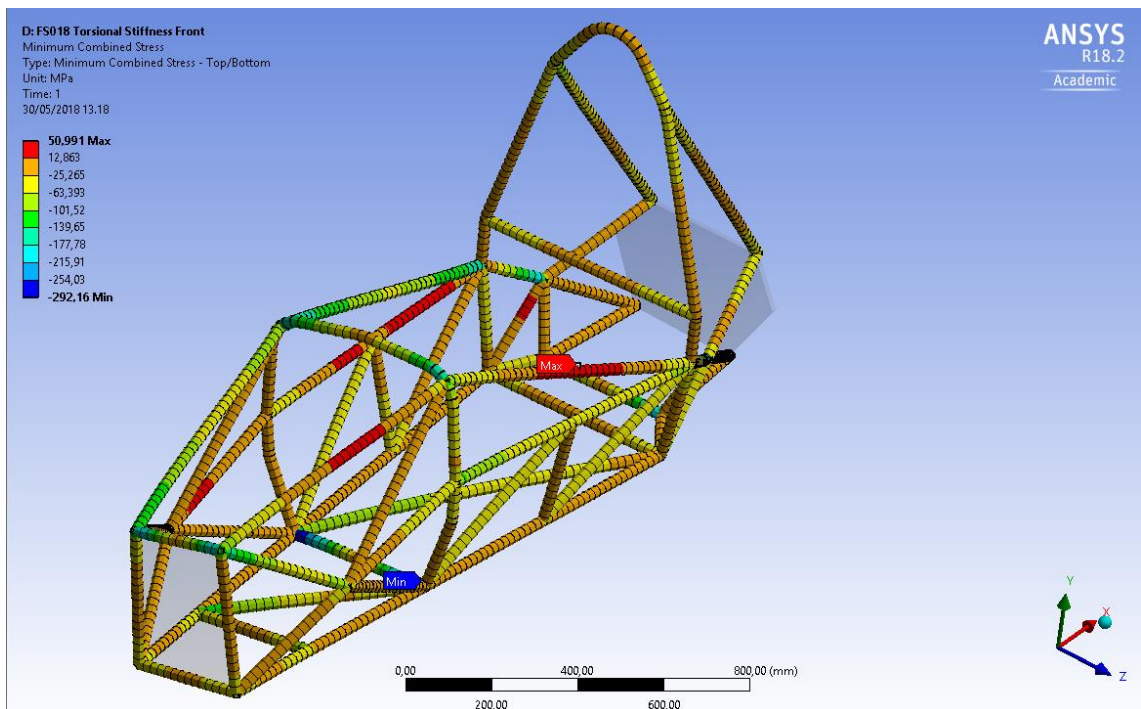
KUVA 39. Optimoidun rakenteen kokonaissiirtymä



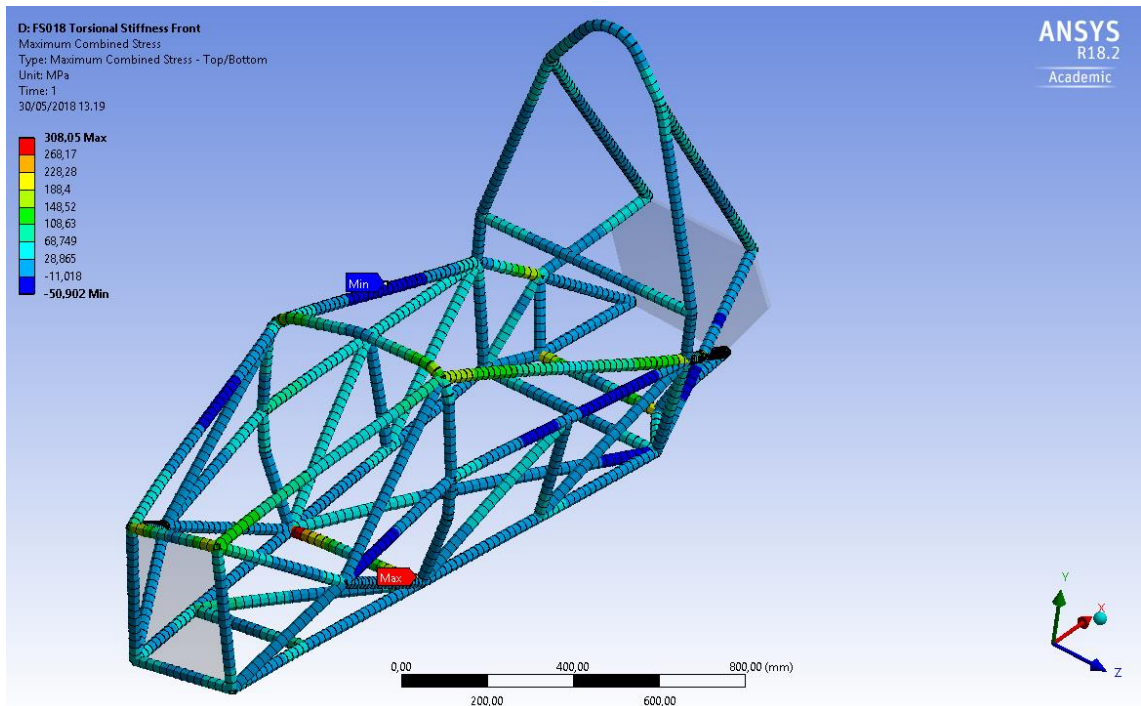
KUVA 40. Optimoidun rakenteen Von Misesin jännitykset



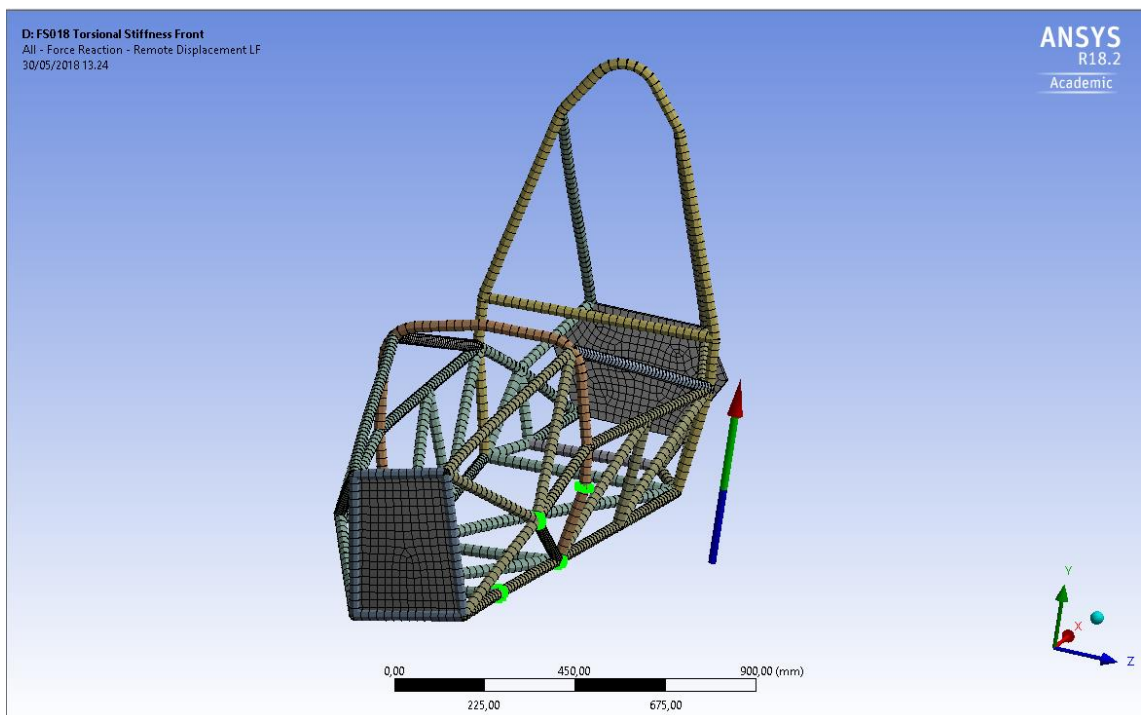
KUVA 41. Optimoitu rakenne: Palkkielementtien aksiaalijännitykset



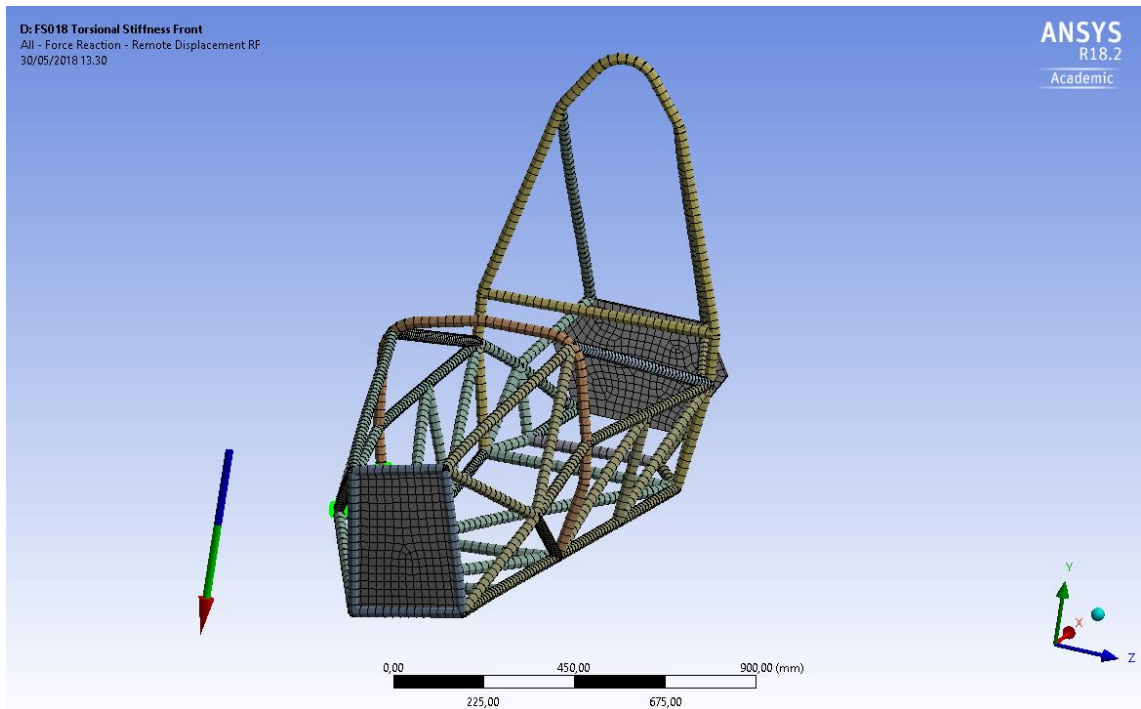
KUVA 42. Optimoitu rakenne: Palkkielementtien minimi yhdistettyjännitys



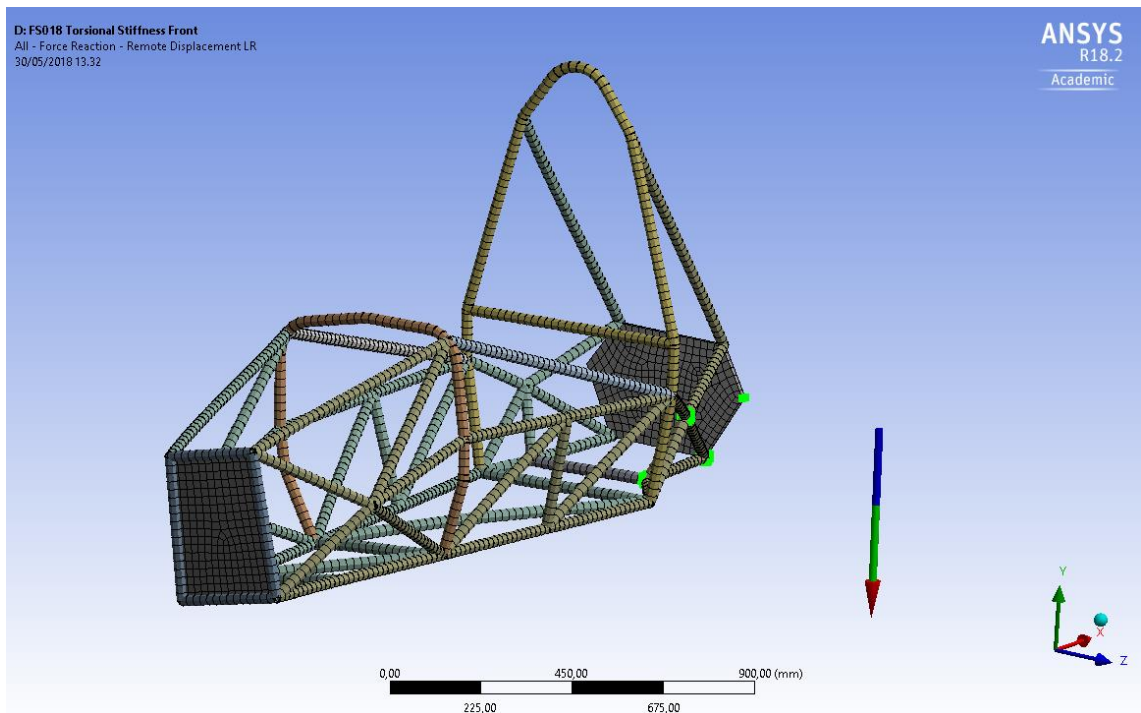
KUVA 43. Optimoitu rakenne: Palkkielementtien maksimi yhdistettyjännitys



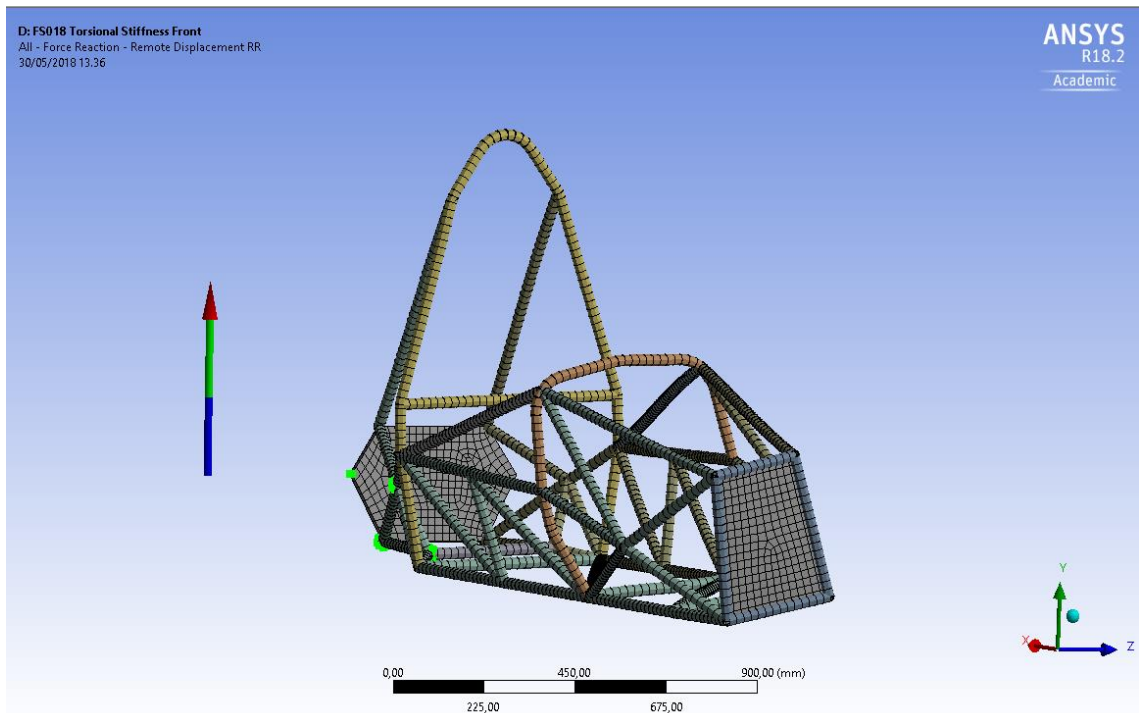
KUVA 44. Optimoitu rakenne: Kaukosiirtymä LF reaktiovoima $F = (0, 1318,5, 0) N$



KUVA 45. Optimoitu rakenne: Kaukosiirtymä RF reaktiovoima $F = (0, -1318,5, 0)$ N



KUVA 46. Optimoitu rakenne: Kaukosiirtymä LR reaktiovoima $F = (0, -1350,6, 32,1)$ N



KUVA 47. Optimoitu rakenne: Kaukosiirtymä RR reaktiovoima $F = (0, 1350,6, -32,1)$ N

5.6 Vääntöjäykkyudet

Rakenteen vääntöjäykkyys lasketaan yhtälöstä

$$k_{rot} = \frac{M}{\alpha} = \frac{2 \cdot \left(\frac{L}{2} \cdot F_{reaktio} \right)}{\alpha} = \frac{L \cdot F_{reaktio}}{\alpha}, \quad (6)$$

jossa M vääntömomentti sekä $F_{reaktio}$ reaktiovoima.

5.6.1 Alkuperäinen rakenne

Sijoittamalla laskentatuloksena saatu reaktiovoima sekä muut lukuarvot yhtälöön (6), saadaan optimoidun rakenteen vääntöjäykkyudeksi:

$$k_{rot} = \frac{M}{\alpha} = \frac{1,26 \text{ m} \cdot 1308,1 \text{ N}}{1^\circ} = 1648,2 \frac{\text{Nm}}{^\circ}.$$

5.6.2 Optimoitu rakenne

Sijoittamalla laskentatuloksena saatu reaktivoima sekä muut lukuarvot yhtälöön (6), saadaan optimoidun rakenteen vääntöjäykkyydeksi:

$$k_{rot} = \frac{M}{\alpha} = \frac{1,26 \text{ m} \cdot 1318,5 \text{ N}}{1^\circ} = 1661,3 \frac{\text{Nm}}{^\circ}.$$

6 POHDINTA

Alkuperäisen rakenteen vääntöjäykkyys on laskentatuloksien mukaan määritettynä 1648,2 Nm/° ja paino 31,31 kg. Optimoidun rakenteen vääntöjäykkyys on 1661,3 Nm/° ja paino 30,96 kg. Optimoinnin tuloksena vääntöjäykkyys saatiin 0,8% suuremmaksi ja painon säästöä kertyi 1,1 %. Putkikokojen muutoksilla saavutetut optimoinnin tulokset ovat melko vaatimattomia, joten alkuperäinen rakenne oli jo jäykkyydeltään sekä painoltaan varsin hyvä. Runkoa voisi vielä keventää esimerkiksi muuttamalla etutörmäyssuojan putket kokoon 28x1,25, mutta vääntöjäykkyys laskisi tällöin hieman alkuperäisestä. Myös geometriaa pitäisi muuttaa, jos haluttaisiin tehokkaampaa optimointia. Lisäksi kannattaisi tutkia neliskanttisten putkiprofiilien käyttöä kohdissa, joissa taivutuskuormat ovat hallitsevia.

Vääntöjäykkyyyslaskelmissa jännitykset pysyivät reilusti alle materiaalien myötörajojen. Palkki- ja kuorielementtien rajoituksista johtuen kannattaa lopullinen rakenne mallintaa 3D-elementeillä, jotta voidaan varmistua rungon täyttävän FS säännöt lujuuslaskelmien osalta (putkien liitoskohdat, hitsit). Vääntöjäykkyydelle saadaan myös tarkempi arvio 3D-elementtejä käyttämällä. Myös etutörmäyssuojalle tulee suorittaa sääntöjen määräämät testit uudelleen ja varmistua sen täyttävän kriteerit, koska putkikokoa muutettiin.

On myös muistettava, että ajettavuuteen vaikuttaa rungon vääntöjäykkyyden lisäksi myös yhtä paljon, ellei jopa enemmän, alustan komponenttien jäykkyys. Alustan komponenttien muodonmuutokset täytyy olla pieniä verrattuna alustan kinemaattisiin siirtymiin, jotta suunniteltu käyttäytyminen toteutuu aurauksen sekä camber- ja caster kulmien osalta.

Tutkittujen lähteiden perusteella rungon vääntöjäykkyyden arvoksi riittää 2200 Nm/°, kunhan alustan rakenteellinen jäykkyys on samaa luokkaa. Tätä suuremmilla vääntöjäykkyyden arvoilla ei ole ajettavuuteen juuri merkitystä ja paino kasvaa liikaa. Laskelmien perusteella vääntöjäykkyydessä on siis edelleen parantamisen varaa. Rungon vääntöjäykkyys kannattaa myös mitata kokeellisesti, jotta voidaan verrata laskentamallien (palkki- ja solidi-malli) paikkaansa pitävyyttä ja tarvittaessa korjata niitä vastaamaan paremmin todellisuutta.

LÄHTEET

Ansys Inc. 2017, Ansys Documentation: 18.2 Help (Ohjelman sisäinen). Yhdysvallat. Julkaistu 08/2017. Luettu 27.5.2018.

Berkum, A. 2006, Chassis and suspension design FSRTE02. Eindhovenin teknillinen yliopisto. Koneenrakennustekniikan laitos. Diplomityö.

Clarke, P. 2009. Space-frame Chassis. Artikkelit putkirunkoisesta formula student kilpautosta. Julkaistu 6.5.2009. Luettu 26.4.2018. <https://www.formulastudent.de/pr/news/details/article/pats-column-space-frame-chassis/>

Formula Student Rules 2018. Saksan / Euroopan kilpailujen formula student säännöt. Luettu 8.5.2018. https://www.formulastudent.de/fileadmin/user_upload/all/2018/rules/FS-Rules_2018_V1.1.pdf

Haapaniemi, H. (toim.) 2003. Autoteknillinen käsikirja. 6. painos. Jyväskylä: Gummerus Oy:n kirja-paino.

Keohane, E. 2007. Toyota Land Cruiser. Ajoneuvo arvostelu. Julkaistu 4.12.2007. Luettu 20.3.2018. <https://www.autocar.co.uk/car-review/toyota/land-cruiser/first-drives/toyota-land-cruiser>

Kerkhoven, J. 2008, Design of a Formula Student race car chassis. Eindhovenin teknillinen yliopisto. Koneenrakennustekniikan laitos. Diplomityö.

MatWeb: Material property data. 2018. Alumiini 7075-T6 mekaaniset ominaisuudet. Luettu 17.5.2018. <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=4f19a42be94546b686bbf43f79c51b7d>

Pasanen, L. 2017, Monen materiaalin kori: Turvallinen ja jäykkä. Suomen autolehti 10/2017, 34-37.

Peltonen, J. 2015. Ajoneuvojen korirakenteet: Korikehikko. Luentokalvot. TAMK. Luettu 14.3.2018.

Pennala, E. 1999. Lujuusopin perusteet. 9. korjattu painos. Helsinki: Hakapaino Oy.

Reif, K. & Dietsche K-H. 2014. Automotive Handbook. 9. painos. Saksa: Robert Bosch GmbH.

Riley, W. & George, A. 2002. Design, Analysis and Testing of a Formula SAE Car Chassis. Proceedings of the 2002 SAE Motorsports Engineering Conference and Exhibition 2-5.12.2002. Indianapolis.

SSAB Europe Oy. 2018. SSAB Form Tube 420 tuotetietosivu. Luettu 17.5.2018. https://www.ssab.fi/tuotteet/terasluokat/ohutseinaputket/tuotteet/ssab-form-tube-420?accordion=shape_dimensions

SSAB Europe Oy. 2018. SSAB Hardox 400® tuotetietosivu. Luettu 17.5.2018. <https://www.ssab.fi/tuotteet/brandit/hardox/tuotteet/hardox-400>