



Osaamista
ja oivallusta
tulevaisuuden
tekemiseen

Joonas Ikonen

Kilpa-auton turvakaarien suunnittelu ja valmistus

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Ajoneuvotekniikan tutkinto-ohjelma

Insinöörityö

19.11.2019

Tekijä Otsikko	Joonas Ikonen Kilpa-auton turvakaarien suunnittelu ja valmistus
Sivumäärä Aika	44 sivua + 31liitettä 19.11.2019
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	Ajoneuvotekniikan tutkinto-ohjelma
Ammatillinen pääaine	Ajoneuvosuunnittelu
Ohjaajat	Lehtori Heikki Parviainen Insinööri Mikko Ahola, Revision Tech Oy
<p>Revision Tech Oy antoi toimeksiannon suunnitella Audi R8 -kilpa-autoon turvallisuutta lisäävät turvakaaret. Tässä insinööryössä kuvataan kilpa-auton turvakaarien valmistuksen suunnittelua sekä valmistustekniikkaa. Työ osoittaa, miten kilpa-auton rungon suunnittelussa voidaan käyttää hyödyksi 3D-nivelvarsimittalaitetta turvakaarien 3D-mallinnuksessa sekä laadunvalvonnassa.</p> <p>Suunnittelutyössä käytettiin hyväksi 3D-nivelmittavarren tuottamaa pistepilviedostomuotoa, jonka pohjalta suunniteltiin kilpa-autoon sääntöjen määrittämät turvakaaret. Työn alussa mitattiin riisuttu Audi R8 -kilpa-auto projektin suunnittelutöitä varten. Mittauksissa käytettiin Innovmetricin valmistamaa Polyworks-ohjelmistoa sekä 3D-suunnittelussa Dassault Systemsin CATIA-ohjelmistoa. Turvakaarien valmistuksessa käytetään NC-ohjattuja putkentaivuttimia sekä laserleikkauslaitteistoa. Turvakaarien on noudatettava kansainvälisiä sääntöjä, jotka esitellään työssä yhtenä turvakaarien suunnitteluperusteena.</p> <p>Työn tuloksena syntyi valmiit kilpa-auton turvakaaret sekä itse työn valmistukseen liittyviä mittauksia.</p>	
Avainsanat	turvakaari, kilpa-auto, 3D-mittaus, valmistustekniikka

Author Title	Joonas Ikonen Design and Manufacturing of roll cages for a race car
Number of Pages Date	44 pages + 31 appendices 19 November 2019
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Automotive Engineering
Professional Major	Automotive Design Engineering
Instructors	Mikko Ahola, CEO, BSc, Revision Tech Oy Heikki Parviainen, Senior Lecture, Metropolia University of Applied Sciences
<p>This Bachelor's thesis was commissioned by Revision Tech Oy. The aim was to design roll cages to improve safety in an Audi R8 racing car. This thesis describes the design of the roll cages and their manufacturing technology. It also demonstrates how the use of a 3D measuring arm in 3D modeling and quality control in racing car body design can be utilized.</p> <p>The design utilized a point cloud file format produced by the 3D measuring arm, which was used as the basis for designing the roll cages defined by the rules for the race car. At the beginning for the project design work a stripped-down Audi R8 racing car was measured. Polyworks software from Innovmetric was used for the measurements and CATIA software from Dassault Systems for 3D -modelling. NC-controlled pipe benders and laser cutting equipment were used when manufacturing the roll cages. The roll cages had to comply with international regulations that were reviewed at work and their impact as a design basis for designing the roll cages.</p> <p>As a result of the thesis, the roll cages for the race car were manufactured and measurements related for the production of the work itself were created.</p>	
Keywords	Roll Cage, Race car, 3D-measuring, Manufacturing

Sisällys

1	Johdanto	1
2	Mittauslaitteisto	3
2.1	Mittalaitteen jalusta	4
2.2	Hexagon Romer Absolute Arm 7535 SI	5
3	Ohjelmistot	8
3.1	Innovmetric Polyworks	8
3.2	Dassault System CATIA V5-6R2014	9
4	Reunaehdot suunnittelulle	9
4.1	Kilpailusarjan asettamat säännöt	10
4.1.1	Turvakaarien perusvaatimus	10
4.1.2	Perusrakenne	12
4.1.3	Kulmavahvike	13
4.1.4	Pääkaaren tuenta	13
4.1.5	Sivutörmäyssuoja	14
4.1.6	Kattorakenteen tuenta	15
4.1.7	Tuulilasipilarin vahvistus	16
4.1.8	Turvakaarien ääriimitat	16
4.1.9	Turvakaarien kiinnitys	17
4.2	Valmistusmenetelmät	17
5	Suunnittelu	18
5.1	Referenssit	18
5.2	Putkikoon valinta	19
5.3	Perusrakenteen valinta	21
5.4	Sivutörmäysrakenteen valinta	21
5.5	Tuulilasipilarinvahvistuksen valinta	22
5.6	Kattoristikon sekä takatuennan rakenteen valinta	22
5.7	Korin skannaus	23
5.8	Koordinaatiston valinta	24

5.9	Geometrian suunnittelu	24
5.10	Kokoonpanon mallintaminen	27
5.11	Takarungon kiinnitys	30
6	Turvakaarien valmistus	32
6.1	Puolikaarien valmistus	33
6.2	Pääkaaren valmistus sekä sovitus puolikaariin	36
6.3	Turvakaarien asennus koriin	38
7	Mittatuloksia	41
8	Loppusanat	43
	Lähteet	44
	Liitteet	
	Liite 1. Turvakaarien mittatulokset	
	Liite 2. Roll Cage´s side impact structure FEM-Analysis for R8 1:1 Race car	

1 Johdanto

Tämän insinööriyön aiheena on kilpa-auton turvakaarien valmistuksen suunnittelu sekä valmistustekniikka. Työssä kuvataan, miten kilpa-auton rungon suunnittelussa voidaan käyttää hyödyksi 3D-nivelvarsimittalaitetta turvakaarien 3D-mallinnuksessa sekä laadunvalvonnassa. Toimeksianto työlle saatiin Revision Tech Oy:ltä.

Pohjana opinnäytetyölle on Audi R8, jolla kilpaillaan maailmanlaajuisessa World Time Attack -kilpailussa, ja tavoite on kilpailla 2019 lokakuussa Australiassa. Tiimi osoittautui kaudella 2017 World Time Attack -kilpailussa hyvinkin kilpailukykyiseksi ja auto nopeaksi; sijoitus kilpailussa oli kolmas Pro Am -luokassa. Kuitenkin vuonna 2018 Suomen Time Attack -sarjassa autolla ajettiin rajuja kolareita, mikä johti auton uudelleen rakentamiseen kaudelle 2019.

Pohjana kilpa-autolle (kuva 1) toimii Audi R8. Auto on varustettu V10-moottorilla, joka on jälkikäteen ahdettu kahdella pakokaasuahdintamalla. Auton korirakenne on alumiinia, ja korin sisällä oli alkutilanteessa teräksestä valmistetut turvakaaret. Jousituksessa on käytetty Öhlinsin valmistamia iskunvaimentimia, joissa on lukuisia säätömahdollisuuksia. Rengastus on Suomen sarjassa sileä pintainen slicksi (engl. slick) - ja Australiassa kuviollinen semi-slicksi (engl. semi-slick). Auto on varustettu GT3-luokan kilpa-auton vastavalla muokatulla aerodynamiikkapaketilla. Tehoa kaudella 2018 oli 1300 hevosvoimaa ja painoa 1378 kg kuljettajan kanssa.



Kuva 1. Audi R8 1:1 vuonna 2018 Motoparkin moottoriradalla

Alkuperäinen Audin alumiinikori vaurioitui pahasti takaosasta kolareiden seurauksena kaudella 2018. Tällöin tehtiin päätös, että korista käytetään ainoastaan sääntöjen määräämä kuljettajan ympäröimä runkorakenne. Turvakaaret korin sisälle päätettiin tehdä uusiksi. Myös auton sekä etu- että takarunko tehdään uusiksi suurlujuusterästä hyödyntäen. Auton jousitusgeometria kokee suuria muutoksia, sekä aerodynamiikkapakettia kehitetään sääntöjen sen salliessa.

Rungon valmistuksessa on otettava huomioon kilpailusarjan asettamat säännökset sekä kansainvälisten FIA- sekä CAMS-sääntökirjojen sisältö. Sarjassa on kuitenkin kyse hyvin nopeista kilpa-autoista, jolloin kuljettajan turvallisuudesta ei haluta tinkiä. Rungon valmistuksessa on otettava huomioon myös kokonaissuorituskykyyn vaikuttava paino.

Auto valmistettiin Revision Tech Oy:n tiloissa, jotka sijaitsevat Helsingissä. Yrityksen erikoisalaa on haastavien geometrioiden mittaaminen sekä todentaminen sekä suunnittelu- ja valmistustyö. Yrityksellä on myös vahva kokemus moottoriurheilusta.

Lopputyö toteutettiin Revision Tech Oy:n tiloissa ja käytettävissä on Hexagon Romer-nivelmittavarsikoordinaattimittakone. Nivelmittavarrella pystytään mittaamaan kontaktilla pisteitä sekä skannaamaan pistepilveä. Mittausdataa käsiteltiin Polyworks-ohjelmistolla. 3D-mallinnus suoritettiin CATIA-3D-mallinnusohjelmistolla. Insinööriyön tavoitteena on kuvata, miten turvakaaret on valmistettu, sekä mitata lopputulos ja esittää mitatut tulokset visuaalisena sekä numeerisena tietona. Insinööriyön osoittaa, miten mittalaitetta voidaan käyttää apuna kilpa-auton turvakaarien ja rungon suunnittelussa.

2 Mittauslaitteisto

Tässä luvussa kuvataan työssä käytettyä mittalaitteistoa, joka koostuu Romerin mittalaitteen jalustasta, Hexagon Romer Absolute Arm 7535 SI -mittalaitteesta sekä tietokoneesta, johon on asennettu Innovmetricin valmistama Polyworks-mittaohjelma (kuva 2). Laitteistoa hyödynnettiin kilpa-auton lähtökohdan tarkistukseen, valmistettujen osien välimittaukseen sekä lopputuloksen mittojen todentamiseen.



Kuva 2. Projektissa käytettävä mittalaitteisto

2.1 Mittalaitteen jalusta

Mittalaite on mittauksen ajaksi kiinnitettävä tukevasti, jotta mittaustulokset olisivat luotettavia. Tässä projektissa oli käytettävissä Hexagonin valmistama kolmijalkainen jalusta (kuva 2). Jalustassa on säädettävä korkeus, mikä mahdollistaa eri mittaustarkoituksiin mahdollisuuksia parempiin mittauksiin.

Jalustan jalat on valmistettu hiilikuidusta, jotta mittauksen aikana vaikuttavat lämpötilamuutokset eivät vaikuttaisi mittatuloksiin. Jalustan jalat ovat hyvin pitkät, jolloin mahdollinen lämpölaajeneminen olisi huomattavaa tämän mittatarkkuuden omaavalla mittalaitteella. Hiilikuituisilla jaloilla mittauksien aikana tapahtuvat värinät vaimentuvat paremmin kuin metallisissa. Myös hiilikuituiset jalat ovat kevyemmät, jolloin jalustan siirtäminen on helpompaa. Mittalaite kierretään jalustan päällä olevaan kierteeseen.



Kuva 3. Hexagonin valmistama mittalaitteen jalusta

2.2 Hexagon Romer Absolute Arm 7535 SI

Projektissa oli käytössä Hexagon Romerin valmistama 3D-nivelmittavarsikordinaattilaite (kuva 4). Tämän laitteen toiminta perustuu nivelissä oleviin absoluuttiasentoantureiden antamaan nivelien asemaan sekä niiden arvojen laskettuun position. Mittalaitteella pystytään mittaamaan erillisillä mittakärjillä kappaleiden pinnasta pisteitä sekä laserskanerilla skannaamaan pintoja. Laite on seitsemänakselinen, mikä tarkoittaa, että mittalaitteen käyttö perustuu seitsemän akselin koordinaattiasentotietoon. Tämänkaltainen mittalaite on yleisesti käytössä teollisuuden laadunvalvonnassa.



Kuva 4. Hexagon Romer Absolute Arm 7535 SI -mittalaite sekä lisävarusteet

Mittalaitteen ulottuvuus on 3,5 metriä. Tämän ulottuvuuden rajallisuuden takia mittalaitetta jouduttiin koko auton skannauksessa siirtämään useaan kertaan. Tätä kutsutaan position muuttamiseksi. Tämä ei ole kuitenkaan millään tavalla este, mutta eri paikoista skannattujen mittadatojen oikeellisuus sekä sovittaminen keskenään yhdeksi skannaukseksi vaatii huolellista jälkityötä. Kuvassa 5 on esitetty valmistajan ilmoittamat tekniset tiedot sekä mittatarkkuudet.

7-AXIS PROBING AND SCANNING SPECIFICATIONS								
	Model ^a	Measuring range	Probing point repeatability ¹	Probing volumetric accuracy ²	Scanning system accuracy SI ³ (with RS2)	Scanning system accuracy SE ⁴ (with HP-L-20.8)	Arm weights SI	Arm weights SE
73 series	7320SI/SE	2.0 m / 6.6 ft.	0.044 mm 0.0017 in.	± 0.061 mm 0.0024 in.	0.079 mm 0.0031 in.	0.075 mm 0.0030 in.	8.3 kg 18.3 lbs	7.9 kg 17.4 lbs
	7325SI/SE	2.5 m / 8.2 ft.	0.049 mm 0.0019 in.	± 0.069 mm 0.0027 in.	0.084 mm 0.0033 in.	0.080 mm 0.0031 in.	8.6 kg 19.0 lbs	8.2 kg 18.1 lbs
	7330SI/SE	3.0 m / 9.8 ft.	0.079 mm 0.0031 in.	± 0.100 mm 0.0039 in.	0.119 mm 0.0047 in.	0.113 mm 0.0044 in.	8.9 kg 19.6 lbs	8.5 kg 18.7 lbs
	7335SI/SE	3.5 m / 11.5 ft.	0.099 mm 0.0039 in.	± 0.125 mm 0.0049 in.	0.147 mm 0.0058 in.	0.140 mm 0.0055 in.	9.2 kg 20.3 lbs	8.8 kg 19.4 lbs
	7340SI/SE	4.0 m / 13.1 ft.	0.115 mm 0.0045 in.	± 0.151 mm 0.0059 in.	0.181 mm 0.0071 in.	0.172 mm 0.0068 in.	9.5 kg 20.9 lbs	9.1 kg 20.1 lbs
	7345SI/SE	4.5 m / 14.8 ft.	0.141 mm 0.0056 in.	± 0.179 mm 0.0070 in.	0.214 mm 0.0084 in.	0.203 mm 0.0080 in.	9.8 kg 21.6 lbs	9.4 kg 20.7 lbs
75 series	7520SI/SE	2.0 m / 6.6 ft.	0.023 mm 0.0009 in.	± 0.033 mm 0.0013 in.	0.058 mm 0.0023 in.	0.053 mm 0.0021 in.	8.6 kg 19.0 lbs	8.2 kg 18.1 lbs
	7525SI/SE	2.5 m / 8.2 ft.	0.027 mm 0.0011 in.	± 0.038 mm 0.0015 in.	0.063 mm 0.0025 in.	0.058 mm 0.0023 in.	8.9 kg 19.6 lbs	8.5 kg 18.7 lbs
	7530SI/SE	3.0 m / 9.8 ft.	0.042 mm 0.0017 in.	± 0.058 mm 0.0023 in.	0.083 mm 0.0033 in.	0.078 mm 0.0031 in.	9.2 kg 20.3 lbs	8.8 kg 19.4 lbs
	7535SI/SE	3.5 m / 11.5 ft.	0.055 mm 0.0022 in.	± 0.081 mm 0.0032 in.	0.101 mm 0.0040 in.	0.096 mm 0.0038 in.	9.5 kg 20.9 lbs	9.1 kg 20.1 lbs
	7540SI/SE	4.0 m / 13.1 ft.	0.067 mm 0.0026 in.	± 0.098 mm 0.0039 in.	0.119 mm 0.0047 in.	0.114 mm 0.0045 in.	9.8 kg 21.6 lbs	9.4 kg 20.7 lbs
	7545SI/SE	4.5 m / 14.8 ft.	0.084 mm 0.0033 in.	± 0.119 mm 0.0047 in.	0.138 mm 0.0054 in.	0.133 mm 0.0052 in.	10.1 kg 22.3 lbs	9.7 kg 21.4 lbs

All specifications in relation to B89.4.22.

Kuva 5. Mittalaitteen mittatarkkuus (ROMER Absolute Arm overview brochure)

Kuvassa 6 on selvitettyä valmistajan toimesta, mihin kuvan 5 esitetyn mittalaitteen tarkkuus perustuu.

¹ The **Point Repeatability Test** is the reference test to determine measurement arm repeatability with ball probe. The cone is in front of the machine. Points are measured from multiple approach directions. The average point and the deviation of each point to the average center are calculated. The result is the maximum range divided by two.

² The **Volumetric Accuracy Test** most accurately represents the reasonable expectations for machine performance in practical measuring applications since it involves measuring a certified length standard many times in several locations and orientations and compares the resultant measurements to the actual length. The Volumetric Length Accuracy Test is the most appropriate test for determining machine accuracy and repeatability. The result is the maximum deviation of the measuring distance less the theoretical length.

Ambient conditions

Working temperature: 0°C – 50°C (32°F – 122°F)
 Storage temperature: -30° – 70° C (-22°F – 158°F)
 Relative humidity: 10% – 90% non-condensing
 Operational elevation: 0 – 2000 m (0 – 6600 ft)

Marks of conformity

CE Compliance: Yes

Power requirement

Universal worldwide voltage: 110V – 240V

³ **SI** designates the ROMER Absolute Arm with integrated scanner, **SE** designates the ROMER Absolute Arm with external scanner.

⁴ The **Scanning System Accuracy Test** most accurately represents the reasonable expectations for machine performance in practical measuring applications while using the laser scanning method. The test consists of measuring a matte grey sphere with 5 different arm articulations. In each articulation of the arm the sphere is scanned from 5 different directions such that the majority of the sphere is scanned. The result is the maximum 3D center to center distance of the 5 spheres.

All probing specifications are achieved with a ROMER Absolute Arm mounted on a ROMER base plate or magnetic base and using a 15 mm steel ball probe with a length of 50 mm under stable environmental conditions.

Kuva 6. Valmistajan selvitys mittalaitteen tarkkuudesta (*ROMER Absolute Arm overview brochure*)

3 Ohjelmistot

3.1 Innovmetric Polyworks

Mittadatojen sovittaminen eri mittalaitteen positiosta yhteen suoritetaan niin, että pistepilvestä etsitään kahden eri position väliltä samoja piirteitä mitattavasta kappaleesta. Piirteitä pystytään valitsemaan ja tarpeeksi laajalta alalta, kun valitsee samoja piirteitä referenssiksi eli ns. samoja epätäydellisyyksiä, pystyy Polyworks-ohjelmisto yhdistämään eri positioiden mittadatat yhteen. Hyviä piirteitä referenssipisteiksi ovat esimerkiksi hitsausaumamat, naarmut, kolhut tai jokin muu epätäydellisyys, jota ei muualla mitattavassa kappaleessa esiinny. Asetuksista pystytään asettamaan, miten isolta alueelta ohjelmisto etsii näitä esivalittuja referenssipisteitä. Mitattavasta kappaleesta pystyy tekemään useita mittauksia eri positiosta, mutta mitä vähemmän positiota, sitä vähemmän tulee mittaheittoja.

Lähtökohtaisesti mittalaitetta käytettäessä ohjelmiston alkuperäinen koordinaatin nollapiste on mittalaitteen kiinnityspisteen keskellä. Tämän kuitenkin pystyy muuttamaan, kunhan mitattavasta kappaleesta on mitattu hyvälaatuisia geometrioita.

Mittadatojen yhdistämistä voidaan myös helpottaa etukäteen asettamalla erillisiä referenssipisteitä eri puolelle mitattavaa kappaletta. Nämä erilliset referenssipisteet voivat olla esimerkiksi teipinpalasia tai magneetilla kiinnitettäviä kuulia. Näissä pitää kuitenkin ottaa huomioon, että niiden kiinnityksen pitää olla niin tukevat, etteivät ennakkoon määritetyt referenssipisteet pääse siirtymään.

Mittaustuloksia pystytään eksportoimaan (engl. export) joko mitattuja geometrisiä piirteitä tai sitten pistepilveä. Mittaohjelmaan pystytään importoimaan (engl. import) 3D-malleja, joihin mittauksia pystytään vertailemaan myös reaaliaikaisesti. Mittaustuloksista pystytään tekemään raportteja sekä raportteihin pystytään lisäämään visuaalisia kuvia.

3.2 Dassault System CATIA V5-6R2014

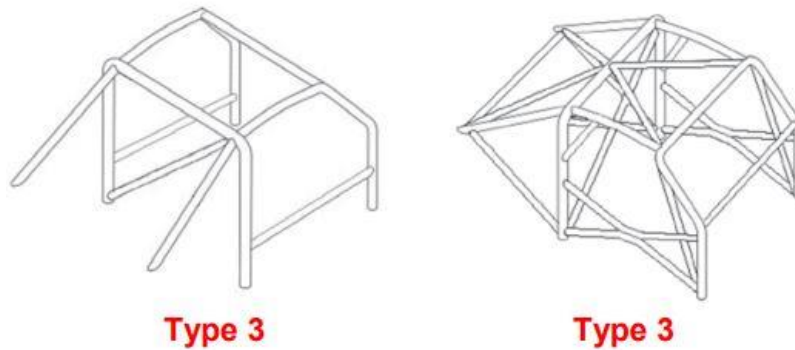
Suunnitteluohjelmanä projektissa käytettiin Dassault Systemsin valmistamaa CATIA V5-6 R2014 -mallinnusohjelmistoa. Ohjelmalla on hyvin laajat ominaisuudet suunnitteluun. Turvakaarien suunnittelussa käytettiin pintamallinnusta ja solid-mallinnusta sekä kokoonpanon hallinnassa tuotteen hallintaa. Ohjelmistolla suunniteltaessa voi samaan lopputulokseen päästä monella eri tyylillä.

Pintamallinnus on 3D-mallintamista, jossa kappaleelle ei aseteta materiaalin tiheyttä eikä paksuutta. Pintamallinnus tarkoittaa käytännössä pintojen piirtämistä esimerkiksi viivoja, tasoja, sylintereitä, kaaria, pisteitä käyttäen. Pinnan ollessa ehjä ja muotojen jatkuvia, niistä pystytään muuttamaan solid-malleja, joille voidaan erikseen asettaa materiaalin paksuuksia sekä materiaalin tiheys.

CATIA-3D-suunnitteluohjelmalla saadaan käsiteltyä skannauksista saatua pistepilvitiedostomuotoa. Kokonaisen auton suunnittelussa on erittäin tärkeitä sulava kokoonpanojen hallinta ja tekeminen, jotka tällä ohjelmistolla onnistuvat hyvin. Kuitenkin 3D-mallintamisessa on olla hyvä ja selkeä koordinaatisto, jota kaikki kokoonpanot sekä niiden alikokoonpanot noudattavat.

4 Reunaehdot suunnittelulle

Turvakaarien suunnittelussa ja valmistuksessa on määritetty ehtoja, jotka pitää täyttää. Australian World Time Attack -kilpailu määrittelee säännöt turvakaarien osalta niin että niiden pitää täyttää CAMS Schedule J:n Type 3 -vaatimukset (kuva 7). Sääntöihin on lisätty, että katsastaja voi myös omalla päätöksellään todeta, täyttyvätkö sääntöjen asetamat ehdot. Kuitenkin on huomioitava, että autolla tullaan kilpailemaan tulevaisuudessa myös Euroopassa, joten sääntöjä joudutaan tulkitsemaan niin, että ne menisivät läpi eri kilpailuluokissa. Euroopassa käytetään FIA:n julkaisemia Appendix J -sääntöjä.



Kuva 7. CAMS-säännön turvakaarivaatimus (CAMS Schedule J)

Projektin suunnittelussa on myös otettava huomioon käytettävissä olevat valmistusmenetelmät.

4.1 Kilpailusarjan asettamat säännöt

4.1.1 Turvakaarien perusvaatimus

Pääkohdat ovat turvakaarissa käytettävä materiaali sekä putkien koko (taulukko 1). FIA- sekä CAMS-säännöt vastaavat pääsääntöisesti toisiaan. Kuitenkin sivutörmäyssuojan toteutuksessa oli eroa samoin kuin siinä, miten mahdollinen apukuljettaja vaikuttaa turvakaarien rakenteeseen. Auto on alkujaan tehtaalta tullessaan ollut siviilikäytössä ja jälkeinpäin rakennettu kilpailukäyttöön. Suomessa ensimmäinen luokitus tapahtui vuonna 2016. Sääntökohtia tarkastellessa täytyy ottaa huomioon, milloin auto on luokiteltu.

Teräsputki pitää valita pitäen silmällä putken hitsaus- ja taivutusominaisuuksia. Putken taivutussäde saa olla minimissään kolme kertaa käytettävän putken halkaisijasta. Taivuttaessa putken halkaisija saa muuttua enintään 0,9 kertaa pienemmäksi alkuperäisestä halkaisijasta taivutuskohdasta mitattuna.

Taulukko 1. Teräsputken vaatimukset AKK-säännöstä, jotka vastaavat FIA-sekä CAMS-sääntöä (AKK Liite J)

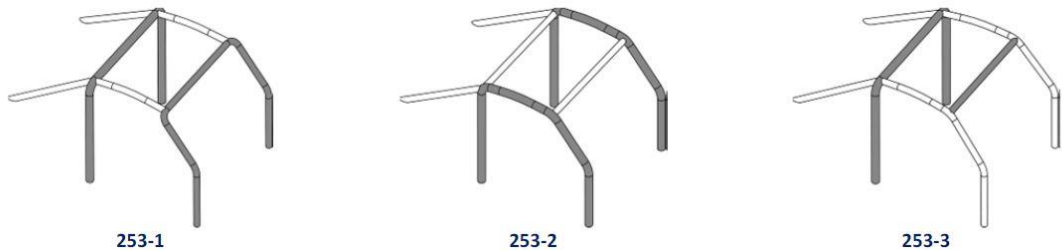
Materiaali	min veto/murto-lujuus	Minimimitat	Käyttökohde
Kylmävedetty, saumaton puhdas hiiliteräs, hiilen enimmäismäärä 0.3 %	350 N/mm ²	45 x 2.5 (1.75"x0.095") tai 50 x 2.0 (2.0"x0.083")	Pääkaari (piirroset 253-1 ja 253-3) tai sivukaaret ja taka- poikittaistuki (piirros 253-2)
		38 x 2.5 (1.5"x0.095") tai 40 x 2.0 (1.6"x0.083")	Puolisivukaaret ja kehikkorakenteen muut osat (ellei aiemmissa kohdissa ole toisin määritelty)

Kilpa-autoon on mahdollista toteuttaa omavalintaisella rakenteilla olevia turvakaaria, mutta nämä kaaret täytyy luokitella oma valmistaiseksi. Tässä vertailukohtana toimii ns. sääntökirjan mukaiset turvakaaret. Oman luokituksen omaavien turvakaarien pitää olla turvallisuudeltaan vastaavalla tasolla tai parempia kuin sääntömääräiset turvakaaret. Sääntökirjan mukaan tehdyt kaaret eivät vaadi erillistä luokitusprosessia, kunhan jokainen sääntökohta täyttyy. Tämä tarkastetaan kilpailujen katsastuksen yhteydessä. On myös olemassa turvakaarien valmistajia, esimerkiksi Custom Cages Ltd, jotka ovat erikoistuneet tiettyjen autojen erikoiskaariin, jolloin niillä on valmiina mallisto omavalmisteturvakaariin ja niiden tarvittavat luvat.

4.1.2 Perusrakenne

Turvakaarien perusrakenne on jaettu kolmeen eri pääpiirteeseen FIA:n määrittelemässä *Appendix J*-säännöissä (kuva 8). Näiden piirteiden erona on auton pakollisten kaarien putkien perusrakenne sekä putkikoko. Alla olevassa luettelussa on esitetty pääpiirteet. Suluisissa oleva ensimmäinen luku on putken ulkohalkaisija millimetreinä ja toinen luku on putken seinämävahvuus millimetreinä.

- 253-1
 - 1 x pääkaari (D50x2,5 tai D45x2,5)
 - 1 x etukaari (D50x2,5 tai D45x2,5)
 - 2 x pitkittäistuki (D38x2,5 tai D40x2)
 - 2 x takatuki (D38x2,5 tai D40x2)
 - 6 x kiinnityspistelevy
- 253-2
 - 2 x puolikaari (D45x2,5 tai D50x2)
 - 2 x poikittaistuki (D38x2,5 tai D40x2)
 - 2 x pitkittäistuki (D38x2,5 tai D40x2)
 - 6 x kiinnityspistelevy
- 253-3
 - 2 x puolikaari (D38x2,5 tai D40x2)
 - 2 x takatuki (D38x2,5 tai D40x2)
 - 1 x pääkaari (D45x2,5 tai D50x2)
 - 1 x poikittaistuki (D45x2,5 tai D50x2)
 - 6 x kiinnityspistelevy



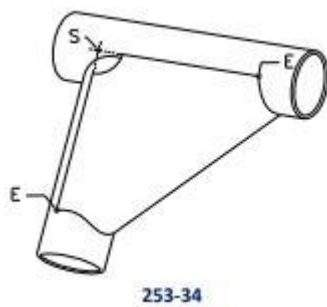
Kuva 8. Perusrakenteet FIA-säännön 8.3.1.mukaan (FIA Appendix J)

4.1.3 Kulmavahvike

Turvakaarissa on oltava säännöissä ennalta määrätyissä paikoissa FIA-säännön 8.2.14 mukaisia kulmavahvikkeita (kuva 9). Kulmavahvikkeiden tarkoitus on nimensä mukaisesti vahvistaa taivutettuja putkia tai kahden putken liitoskohtaa.

Kulmavahvikkeiden mitat vastaavat FIA- ja CAMS-säännöissä toisiaan. Ainoana erona on turvakaarien rakenteiden välisissä eroavaisuuksissa ja vahvikkeiden tarve.

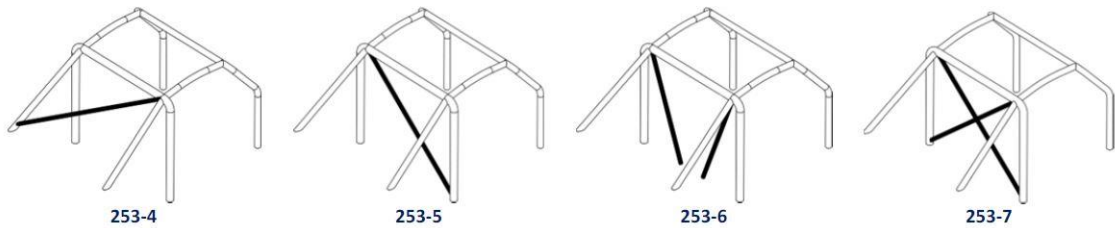
Kulmavahvikkeen pitää olla vähintään 1 mm:n paksuisesta teräslevystä valmistettu U-muotoinen vahvike. Kulmavahvikkeen sivun E-pituuden pitää olla 2–4 kertaa vahvistettavan putken halkaisija S-pisteestä mitattuna. Kulmavahvikkeessa saa olla 1,5 kertaa putken säteen kokoinen kevennys putkien liitoskohdan S kohdalla. Tasaisella osuudella saa myös olla alle suuremman halkaisijan oleva kevennysreikä.



Kuva 9. FIA-säännön 8.2.14 mukainen kulmavahvike (FIA Appendix J)

4.1.4 Pääkaaren tuenta

Pääkaaren tuenta on selostettu FIA:n sääntökohdassa 8.3.2.1 (kuva 10).Pääkaari on tuettava kahdella putkella ristiin kuvan 253-7 mukaisesti, jos kilpa-auto on luokiteltu 1.1.2002 jälkeen. Putkikooksi on valittavissa joko D38x2,5 tai D40x2. 253-7-tyylinen pääkaaren tuenta vaatii kaksi sääntömääräistä kulmavahviketta putkien risteämiskohtaan.

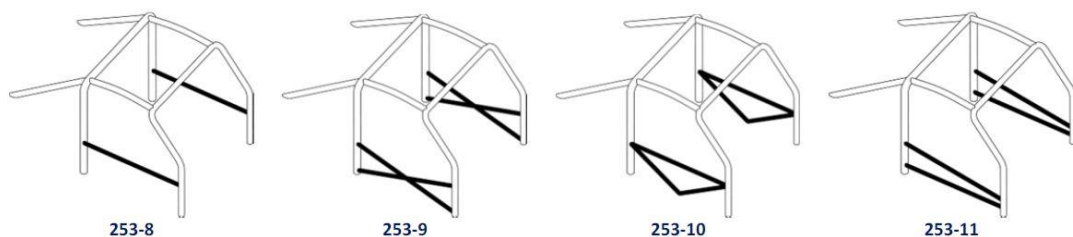


Kuva 10. Pääkaaren tuenta FIA-säännön 8.3.2.1 mukaan (FIA Appendix J)

4.1.5 Sivutörmäyssuoja

Sivutörmäyssuoja on määritetty FIA:n sääntökohdassa 8.3.2.1.2 (kuva 11). Koska auton luokitus on vuodelta 2016, on tässä projektissa valittava vaihtoehtojen 253-9- ja 253-11-rakenteiden väliltä. Näiden rakenteiden luokitus tuli voimaan 1.1.2007. Tässä sääntökohdassa on huomattu eroavaisuutta CAMS:n kirjoittamaan sääntöön 12.3 B 6. FIA:n säännössä, jos käytetään 253-9-rakennetta sivutörmäyssuojana, on suositus käyttää rakenteessa yhtä täyden mitan putkea ja kahta ns. puolikasta. CAMS:n säännön mukaan on suositeltavaa käyttää kahta taivutettua täyden mitan putkea, jotka liitetään keskenään yhtymäkohdasta hitsaamalla. Molemmissa säännöissä on mainittu, että sivutörmäyssuojassa pitää olla kaksi kulmavahvistusta.

Sivutörmäyssuojassa rakenteiden pitäisi olla vasemmalla ja oikealla samankaltaiset, mutta jos autossa ei ole apukuljettajaa, se ei ole välttämätöntä. Kuvat itsessään ovat samankaltaisia. Ainoa ero kuvissa on rakenteiden nimeäminen. Näissä säännöissä kuitenkin oli mainittu sivutörmäyssuojien konstruktioiden toteutuksen olevan suosituksia.



Kuva 11. Sivutörmäyssuoja FIA-sääntö 8.3.2.1.2 (FIA Appendix J)

4.1.6 Kattorakenteen tuenta

Kattorakenteen tuenta on määritetty FIA:n säännössä 8.3.2.1.3. Tämä sääntö on voimassa 1.1.2005 jälkeen luokitelluissa autoissa. Sääntö käsittää kolme erilaista rakennetta. Tässä kuitenkin on poikkeuksena 253-12: geometrian rakenteessa on sallittua käyttää vain yhtä putkea, jos autossa ei ole apukuljettajaa. Tässä tapauksessa putken pitää kulkea kuljettajan etummaisesta kulmasta oikean puolen takakulmaan. Jos käyttää 253-13- tai 253-14-rakenteen geometriaa, voivat putkien risteyskohdat olla maksimissaan 100 mm:n etäisyydellä solmukohdasta.

Jos käytetään kuvassa 12 esitettyä 253-14-tyylistä kattotuentaa, on takatuennan ristikon solmukohdan kohdattava kattotuennan solmukohdan kanssa.

Jos kilpa-auton kyydissä on apukuljettaja ja käytetään 253-12 X -tyyppistä rakennetta, on rakenne tuettava kahdella sääntömääräisellä kulmavahvikkeella.

Molemmissa säännöissä on sallittua taivuttaa putket myötäilemään kattolinjaa.

Putkikooksi on valittavissa D38x2,5 tai D40x2.

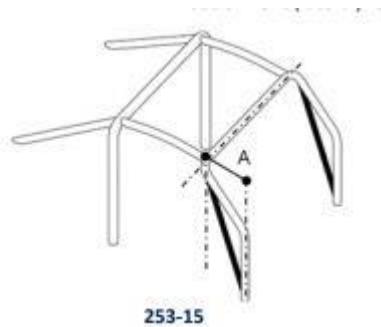


Kuva 12. kattorakenteen tuenta FIA sääntö 8.3.2.1.3 (FIA Appendix J)

4.1.7 Tuulilasipilarin vahvistus

Tuulilasipilarin vahvistus on määritetty FIA-säännössä 8.3.2.1.4 (kuva 13). Tämä sääntö on voimassa 1.1.2006 jälkeen luokitelluissa autoissa. Tämä tuki vaaditaan, jos turvakaarissa taivutetun etukaaren etummaisesta linjasta etukaaren poikittaisen tuen välinen mitta A on enemmän kuin 200 mm.

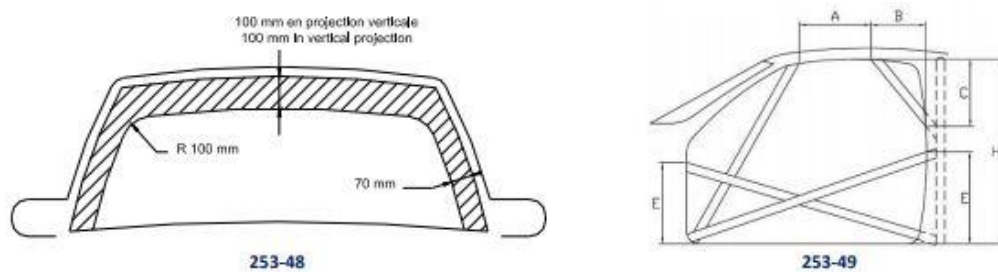
Putken saa taivuttaa yhdessä tasossa, kunhan taivutuskulma ei ylitä 20:tä astetta.



Kuva 13. Tuulilasipilarin vahvistus FIA-sääntö 8.3.2.1.4 (FIA Appendix J)

4.1.8 Turvakaarien äärimitat

Turvakaarien äärimitat on asetettu FIA:n sääntökohdassa 8.3.2.5 (kuva 14). Säännön mukaan turvakaarien on sallittua kulkea tuulilasin alueella suoraan edestä katsottuna alla olevassa kuvassa merkityllä alueella. Lisäksi siinä on annettu äärimitat sivuprojektiossa.



Kuva 14. Turvakaarien äärimitat FIA sääntö 8.3.2.5 (FIA Appendix J)

4.1.9 Turvakaarien kiinnitys

Turvakaarien kiinnitys koriin on määritetty FIA-säännössä 8.3.2.6 (FIA Appendix J), ja se on toteutettava minimissään kuudesta pisteestä. Etukaaresta sekä pääkaaren putkien alapinnoista sekä pääkaaren taakse vinosti kulkevien tukiputkien alapinnoista.

Säännöissä on määritelty, että pääkaareen ja etukaareen pitää olla hitsattuna minimissään 3 mm paksut teräslevyt, joiden pinta-ala on vähintään 120 cm² ja jotka kiinnitetään koriin vähintään kolmella M8-pultilla.

Takatukiin on hitsattava minimissään 3 mm paksut teräslevyt, joiden pinta-ala on vähintään 60 cm² ja jotka kiinnitetään koriin vähintään kahdella M8-pultilla.

Säännöissä on myös mainittu, ettei teräksestä valmistettuja turvakaaria saa hitsata auton koriin, etenkin jos ajoneuvon kori on jotakin muuta materiaalia kuin terästä. Turvakaaret tulee pultata sääntömääräisen kokoisilla pulteilla, jotka on mainittu yllä.

4.2 Valmistusmenetelmät

Turvakaariputkien leikkauksissa on käytetty yleensä perinteisiä leikkausmenetelmiä vanesahoista kulmahiomakoneisiin. Suorien leikkauksien sekä tiettyyn astekulmaan tehdyt leikkaukset onnistuvat helposti perinteisillä menetelmillä, mutta monimutkaisten solmu-kohtien putkenpäiden valmistaminen perinteisillä menetelmillä vaatii ammattitaitoa ja aikaa. Näiden menetelmien valmistustoleranssi riippuu tekijästä. Ilman kunnollista suunnittelua ei kuitenkaan aina voida välttyä ongelmilta, joita rakennusvaiheessa voi ilmetä.

Tässä projektissa oli mahdollista käyttää putkien leikkauksessa laserleikkauslaitteistoa sekä taivutuksissa NC-ohjattua putkentaivutinta. Näiden laitteiden ansiosta valmistustoleranssit pysyivät erinomaisina. Putkien leikkauksien sekä taivutuksien ulkoistaminen on järkevää, kun pohditaan projektin kokonaisresursseja myös suunnittelun osalta. Valmistuksen osittainen ulkoistaminen lisää suunnittelu-aikaa muun projektin osalta. Haittapuolena perinteisiin valmistusmenetelmiin verrattuna tietokoneohjatuissa valmistusmenetelmissä on se, että valmistettavista kappaleista vaaditaan 3D-mallit tai niihin pohjautuvia työkuvia.

5 Suunnittelu

5.1 Referenssit

Tärkeimpänä osana turvakaarien suunnittelussa sekä valmistuksessa on tiedostaa, min-kälaiset valmistusmenetelmät sekä projektissa ovat käytettävissä. Isossa roolissa on myös projektille asetettu aikataulu. Perinteisesti turvakaarien valmistuksessa ei käytetä kovin erikoisia työkaluja eikä yksittäisiä turvakaarien valmistusta etukäteen suunnitella 3D-suunnitteluohjelmistoilla.

Turvakaarien suunnittelussa suurimpana suunnitteluperusteena on yksinkertainen valmistettavuus, putkien leikkauksien ulkoistaminen sekä hitsausasentojen helpottaminen. Auton turvakaarien valmistuksessa ei kuitenkaan koskaan pystytä välttämään epämukavia hitsausasentoja, koska putket on hitsattava ympäriinsä sauman maksimaalisen lujuuden varmistamiseksi.

Yksinkertaisuutta haettiin sillä, että auton turvakaareissa on kolme taivutettua putkea. Taivutuksien tarkkuus riippuu aina niiden tekijästä sekä laitteistosta. Taivutetuissa putkissa materiaalin myötölujuus on jo ylitetty, jolloin mahdollisissa kolaritilanteissa putken ominaisuuksia on jo heikennetty. Tämä kuitenkin ei ole niin yksiselitteinen asia, sillä myös esimuotoon taivutettu putki ottaa vastaan enemmän iskuenergiaa. Tämä kuitenkin riippuu siitä, miten rakenne on suunniteltu. Taivutetuissa putkissa hyvänä puolena on vähäisempi hitsaamisen tarve.

On kuitenkin huomioitava, että hitsattujen rakenteiden valmistaminen vaatii paljon pohdintaa hitsausjärjestyksillä. Hitsatessa hitsausaumassa oleva sula metalliseos kutistuu jäähtyessään, mikä aiheuttaa rakenteissa jännityksiä, jotka ilmenevät vääntymisinä. Oikein suunnitellulla hitsausjärjestyksellä vääntymiä pystyy ennakoimaan ja sitä kautta suunnittelemaan, minne rakenne vääntyy. Vääntymisiltä on mahdotonta välttää, joten osana suunnittelua on otettava huomioon mittatoleranssit. Käytännössä hitsattu teräsrakenne aina kutistuu, joten se on ratkaistava joko ylipitkillä rakenteilla, tai sitten väljemmillä mittatoleransseilla käyttökohteen mukaan. Jännityksien poisto teräsrakenteissa on mahdollista, mutta tässä projektissa sen ei todettu olevan tarpeellista eikä tarpeeksi isoa lämmitysunia ollut saatavilla.

Apukuljettajaa kilpa-autossa ei ole, joten apukuljettajan tilalle tulee auton polttoainetankki sekä muita apulaitteita. Tämä antaa mahdollisuuksia myös sääntöhelpotuksiin turvallisuuden kannalta.

Kuljettajan pääsemistä kuljettajan paikalle helpotettiin miettimällä väljemmäksi turvakaaria ovien kohdilta kuitenkin turvallisuudesta tinkimättä.

Projektissa riittäväksi valmistustoleranssiksi putkien paikoituksen suhteen todettiin ± 10 mm.

5.2 Putkikoon valinta

Putkikoon valinnassa verrattiin sääntömääräisten putkien painoa, jäyhyysmomenttia sekä saatavuutta. Alla olevasta vertailutaulukossa (taulukko 2) selviää putkien geometrisiä ominaisuuksia. Myös yhtenä valintaperusteena toimi putkien taivutustyökäly, joita on mahdollista käyttää.

Putkikokoja vertaillessa on myös huomioitava se, että putken poikkipinta-ala vaihtelee. Voiman tullessa putken suuntaisesti poikkipinta-alaltaan isommalla putkella voima jakaantuu isommalle pinta-alalle, jolloin jännitykset ovat pienemmät. Kuitenkin tässä tapauksessa, kun auton turvakaaria suunnitellaan, on hyvin harvinaista, että mahdollisessa törmäystilanteessa putkien suuntaisia voimia esiintyisi. Käytännössä kolaritilanteissa aiheutuvat voimat ovat enemmän tai vähemmän putken poikkisuuntaisia, mikä taivuttaa putkea. Halkaisijaltaan suuremmalla putkella taipumisen riski on pienempi kuin pienemmän halkaisijan putkella. Putken taivutukseen vaikuttaa putken jäyhyysmomentti, joka on suurempi D50x2-koon putkessa, mutta D40x2:ssa aavistuksen pienempi.

Projektiin valittiin käytettäväksi putkia D50x2 sekä D40x2 kevyen painon sekä saatavuuden takia. Putkien taivutuksiin löytyi myös alihankkijalta oikeanlaiset lestit.

Taulukko 2. Putkikokojen vertailuun tehty laskuri.

Laskuri			Laskuri		
Ulkohalkaisija	45	mm	Ulkohalkaisija	50	mm
Seinämä	2,5	mm	Seinämä	2	mm
Putken pituus	1	m	Putken pituus	1	m
Materiaalin tiheys	7870	kg/m ³	Materiaalin tiheys	7870	kg/m ³
E=young modulus	210	Gpa	E Young modulus	210	Gpa
Tulokset			Tulokset		
Poikkileikkauksen pinta-ala	333,79	mm ²	Poikkileikkauksen pinta-ala	301,59	mm ²
Poikkileikkauksen pinta-ala	0,00033	m ²	Poikkileikkauksen pinta-ala	0,00030	m ²
Putken materiaalin tilavuus	0,00033	m ³	Putken materiaalin tilavuus	0,00030	m ³
Massa	2,63	kg	Massa	2,37	kg
Massa	2626,96	gr	Massa	2373,54	gr
Jäyhysmomentti	75625,25	mm ⁴	Jäyhysmomentti	87009,55	mm ⁴
EI (kimmokerroin * jäyhyys)	15881303096,98	Nmm ²	EI (kimmokerroin * jäyhyys)	17401910026,76	Nmm ²
EI (kimmokerroin * jäyhyys)	15881,30	Nm ²	EI (kimmokerroin * jäyhyys)	17401,91	Nm ²
Laskuri			Laskuri		
Ulkohalkaisija	38	mm	Ulkohalkaisija	40	mm
Seinämä	2,5	mm	Seinämä	2	mm
Putken pituus	1	m	Putken pituus	1	m
Materiaalin tiheys	7870	kg/m ³	Materiaalin tiheys	7870	kg/m ³
E=young modulus	210	Gpa	E Young modulus	210	Gpa
Tulokset			Tulokset		
Poikkileikkauksen pinta-ala	278,82	m ²	Poikkileikkauksen pinta-ala	238,76	m ²
Poikkileikkauksen pinta-ala	0,00028	mm ²	Poikkileikkauksen pinta-ala	0,00024	mm ²
Putken materiaalin tilavuus	0,00028	m ³	Putken materiaalin tilavuus	0,00024	m ³
Massa	2,19	kg	Massa	1,88	kg
Massa	2194,28	gr	Massa	1879,05	gr
Jäyhysmomentti	44140,11	mm ⁴	Jäyhysmomentti	43215,75	mm ⁴
EI (kimmokerroin * jäyhyys)	9269423749,68	Nmm ²	EI (kimmokerroin * jäyhyys)	9075307193,98	Nmm ²
EI (kimmokerroin * jäyhyys)	9269,42	Nm ²	EI (kimmokerroin * jäyhyys)	9075,31	Nm ²

Taulukon 2 laskurin putkien jäyhysmomentti on laskettu seuraavalla kaavalla:

$$\frac{\pi(D^4 - d^4)}{64}$$

jossa D on putken ulkohalkaisija sekä d on putken sisähalkaisija

Putken poikkipinta-ala on laskettu seuraavalla kaavalla:

$$\frac{\pi(D^2 - d^2)}{4}$$

E young moduluksena eli materiaalin kimmokerroimena käytetään arvoa 210 Gpa. Te-räksellä käytetään kimmokerroinarvoa 200 Gpa sekä 210 Gpa:n väliltä.

5.3 Perusrakenteen valinta

Turvakaarien FIA-säännön 8.3.1 mukaisen perusrakenteen valinnassa tehtiin vertailumalleja kolmen eri rakenteen välillä (taulukko 3). Näistä rakenteista päädyttiin kohdan 253-3 rakenteeseen. Rakenteiden välillä eroavaisuutena on putkien koot sekä taivutettavien putkien geometria. 253-3-perusrakenteessa on suhteessa vähemmän painavaa putkea kuin muissa rakenteissa. Näin kokonaisuudessaan perusrakenteesta tulee kevyempi. Muissa perusrakenteissa rakenteen jäykkyys on suurempi mitoiltaan suurempien putkien takia. Kuitenkin 253-3-rakenne on täysin sääntömääräinen ja kevyin. Myös valmistuksessa tämän rakenteen todettiin olevan helpoin toteuttaa vähäisemmän taivutuksen tarpeen sekä hitsausjärjestyksien takia. Painot ja pituudet on poimittu CATIalla tehdystä 3D-mallista. Materiaalina käytettiin ohjelmiston kirjastossa löytyvän teräksen arvoja, jolloin painot rakenteelle saadaan oikeaksi. Teräksen tiheydestä käytettiin arvoa 7870kg/m^3

Taulukko 3. Turvakaarien perusrakenteiden painoverailu

Rakenne	253-1	253-2	253-3
D40 pituus (mm)	1457,9	1910,9	3936,5
D50 pituus (mm)	6301,9	5772,8	3940,5
Paino (kg)	17,64	17,25	16,69

5.4 Sivutörmäysrakenteen valinta

Sivutörmäysrakenteen suunnittelussa on mahdollista käyttää useampaa vaihtoehtoista geometriaa sääntöjen puitteissa.

Tässä projektissa päädyin kuitenkin käyttämään erilaista rakennetta helpomman valmistuksen takia. Vertailua myös tehtiin rakenteiden välillä vertaillen painoa sekä rakenteen jäykkyyttä. Tästä vertailusta (liite 2) pystyin toteamaan oman konstruktion olevan sekä

kevyempi että jäykempi eri törmäystilanteissa. Sivutörmäyssuojassa päädyttiin käyttämään FIA:n määrittelemän 253-9 x -tyyppistä rakennetta. Tämä sen takia, että x-tyyppinen rakenne jäykistää kokonaisuudessaan turvakaaria verrattuna muihin vaihtoehtoihin. Rakenteen nurjahtamisen taipumus on pienempi tällä rakenteella kuin pitkillä erillisillä putkilla. Yksittäisen putken pituus lisää putken nurjahtamisriskiä. Turvakaarien muodolla ja rakenteella pystytään vaikuttamaan hyvin paljon koko auton rungon jäykkyyteen.

5.5 Tuulilasipilarinvahvistuksen valinta

Tuulilasipilarinvahvistuksen toteutuksessa on muutamia variaatioita: taivuttamalla, osittain hitsaamalla yhteen sivutörmäysputken kylkeen tai suorana putkena etukaaren alakiinnityspisteeseen. Säännöt sallivat enintään 20 asteen taivutuksen yhteen tasoon putkessa. Siihen, minkä takia tätä putkea mahdollisesti taivutettaisiin, olisi yksi syy lisätilan tarve kilpa-auton ohjainlaitteisiin. Kuitenkin on muistettava, että tämän putken tarkoitus on jäykistää sekä tukea puolikaarta taivutuksen kohdalta ja täten parantaa turvallisuutta katolleen ajon yhteydessä. Valmiiksi taivutettu putki nurjahtaa helpommin, mikä ei ole lähtökohtaisesti toivottavaa tällaisessa kolaritilanteessa.

Tässä projektissa hallintalaitteille oli hyvin tilaa, joten tämän putken pystyi toteuttamaan suorana. Tämä myös helpotti turvakaarien valmistusta vähentämällä työmenetelmiä taivutuksien verran. Putki tuetaan sivutörmäysristikkoon sääntömääräisillä vahvikkeilla. Lisätuennalla saadaan tuettua sekä tuulilasipilarinvahvistus sekä sivutörmäyssuoja toisiinsa.

5.6 Kattoristikon sekä takatuennan rakenteen valinta

Tässä kilpa-autossa ei ole suunniteltu olevan apukuljettajaa, vaan apukuljettajan paikalle asennetaan auton muita varusteita. Käytännössä FIA säännön 8.3.2.1.3 mukaan riittäisi yksi viistoputki, mutta lisäturvallisuuden ja korin jäykkyyden kannalta haluttiin käyttää ristikköä kahdella putkella. Tämä myös sen takia, että koska kilpa-auton takarunko on osittain turvakaarissa kiinni, haluttiin lisätä turvakaariin jäykkyyttä. Tämä päätös vaikuttaa niin ikään auton takatukiristikon valintaan myös kahdeksi risteäväksi putkeksi, mikä lisää rungon jäykkyyttä.

5.7 Korin skannaus

Projektin alkaessa oli kilpa-auton kori riisuttu kokonaisuudessaan skannausta varten (kuva 15). Jo aiempina vuosina autoa on skannattu, joten tapahtuneen kolaritilanteen jälkeen oli helppo todentaa takarungon vauriot. Kuitenkin nyt korista oli poistettu vanhat turvakaaret, joten mittalaitteen kanssa oli helpompi työskennellä auton korin sisällä. Korista skannattiin sisätilat, joihin turvakaaret sovitetaan. Skannauksesta saadusta piste-pilvestä saadaan mallinnusvaiheessa hyvät äärimitat. Aikaisemmista skannauksista on otettu talteen myös kuljettajan ohjauspyörän sekä penkin asento, jotta myöhemmässä vaiheessa saadaan hienosäädettyä ajoasento kuljettajalle sopivaksi. Hyvä on myös huomioida kuljettajan tilantarve turvakaarissa.

Kun autosta on mitattu entuudestaan jo ulkokorin pintoja sekä alustakomponentteja, voidaan vanhoja sekä uusia skannauksia yhdistellä.



Kuva 15. Audin korin skannaus

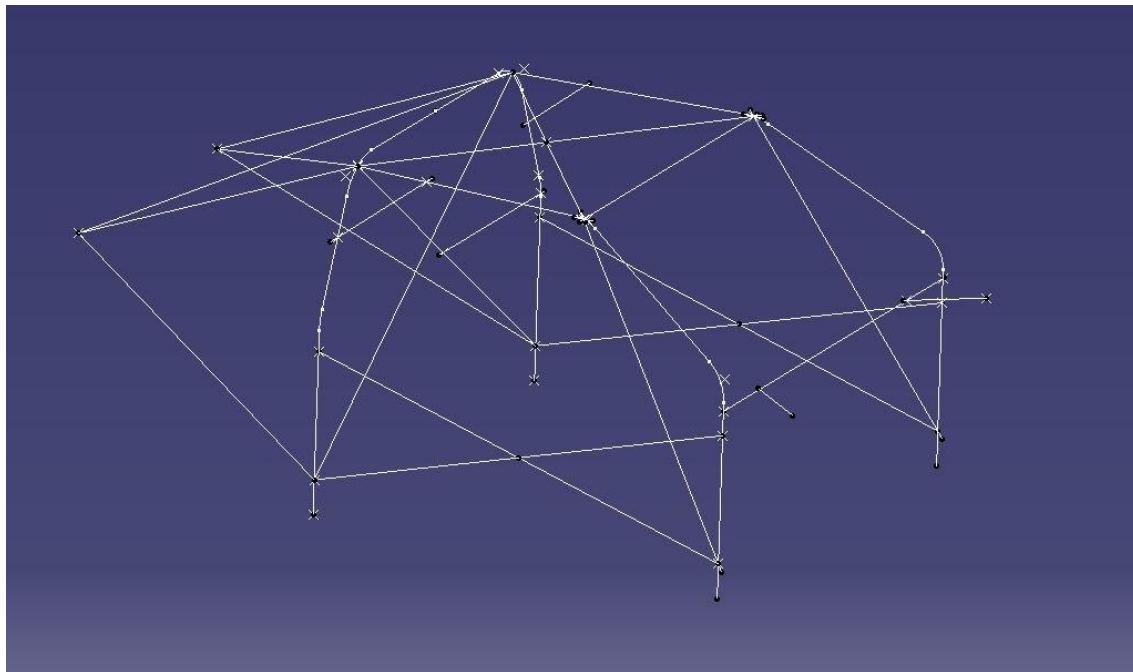
5.8 Koordinaatiston valinta

Kokonaisen kilpa-auton uusiksi suunnitteleminen vaatii 3D-mallinnuksen osalta toimivan koordinaatiston, minkä jälkeen on paremmat edellytykset sovitella pääkokoontanossa alikokoontanpanoja. Auton origoksi eli nollapisteeksi valittiin auton pituussuunnasta keskilinjasta pitkittäisien runkopalkkien tasoja ja niiden keskiarvolla keskilinjan auton etuakselin pyörännapojen puoliväli. Tämä nollapiste toteutettiin auton skannausdatan pohjalta ja asetettiin mittausvaiheessa Polyworks-mittausohjelmistossa mittausdataan. Koordinaatiston akselisto asetettiin niin, että X-akseli on auton pituussuunta, Y-akseli auton poikittaissuunta ja Z-akseli on auton korkeussuunta. Kun nollapiste on asetettu mittausohjelmistoon, mittausdatan eksportauksella (engl. export) saadaan CATIAN kokoontanpanoon oikea nollapiste, jonka jälkeen on helpompi lähteä rakentamaan kokoontanpanoja. Tämä toimii mallinnuksen ajan pääkoordinaatistona.

5.9 Geometrian suunnittelu

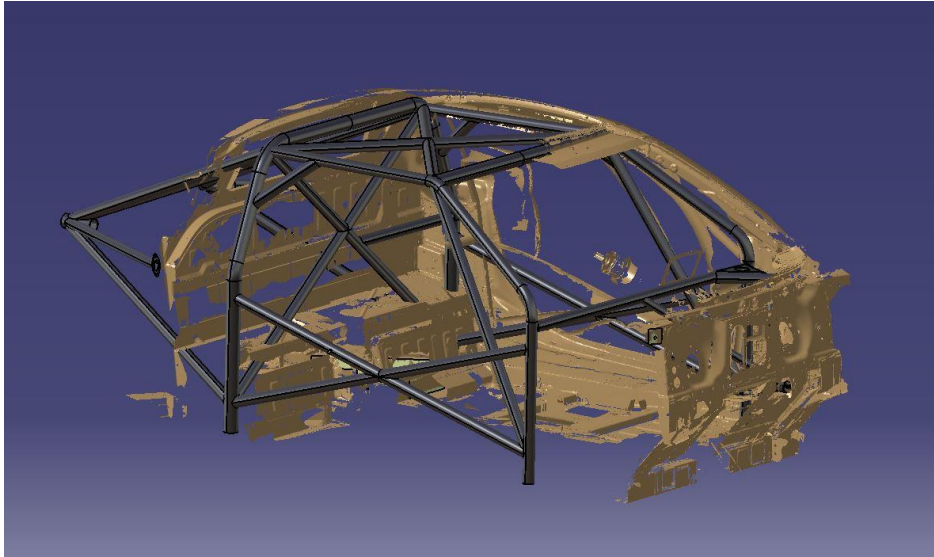
Turvakaarien geometrian suunnittelun ensimmäisissä vedoksessa haetaan karkeitä muotoja turvakaariin asettamalla koordinaatistoon pisteitä. Pisteistä asetettiin viivoja, jolloin luonnoksesta tulee ns. luurankorakenne (kuva 16). Viivoista voidaan muuttaa vielä CATIAN pintapuolen suunnittelumoduulilla sweepejä (engl. sweep) eli putkimuotoja tietyllä säteellä. Pisteiden koordinaatteja muuttamalla saadaan muutettua luurankorakenteen mittoja. Pisteiden ja putkien lisääminen vedokseen onnistuu myös jälkeenpäin. Viivoilla ja pisteillä mallintaessa pystytään helposti todentamaan esimerkiksi pisteiden välisiä keskipisteitä ja etäisyyksiä solmukohdista. Tässä vaiheessa on hyvä myös lisätä ylimääräistä aihiota jokaiseen viivaan, jotta myöhemmässä vaiheessa putkien erillinen mallinnus helpottuu. Viivojen päitä ei ole hyvä käyttää referenssipisteinä, vaan turvakaarien solmukohdissa on hyvä olla kiinteitä pisteitä, joiden koordinaatteja muutetaan tarvittaessa. Tämä sen takia, että jos viivan pituutta muutetaan pisteestä ja mahdollisesti jokin muu geometria on mitoitettu viivan pään suhteen, voi geometria muuttua kokonaisuudessaan hyvinkin radikaalisti ja huomaamatta.

Taivutettavien putkien mallintaminen toteutettiin pisteillä ja multiline-viivatyökalulla. Tällä viivatyökalulla saadaan asetettua taivutusmenetelmässä toteutuva taivutussäde. Vaihtoehtoisesti jos putken taivutukset tehdään yhdessä tasossa, onnistuu putken mallintaminen myös sketchillä (engl. sketch) yhdellä tasolla. Tässä projektissa pääkaari on taivutettu yhdessä tasossa ja puolikaaret kolmessa tasossa.



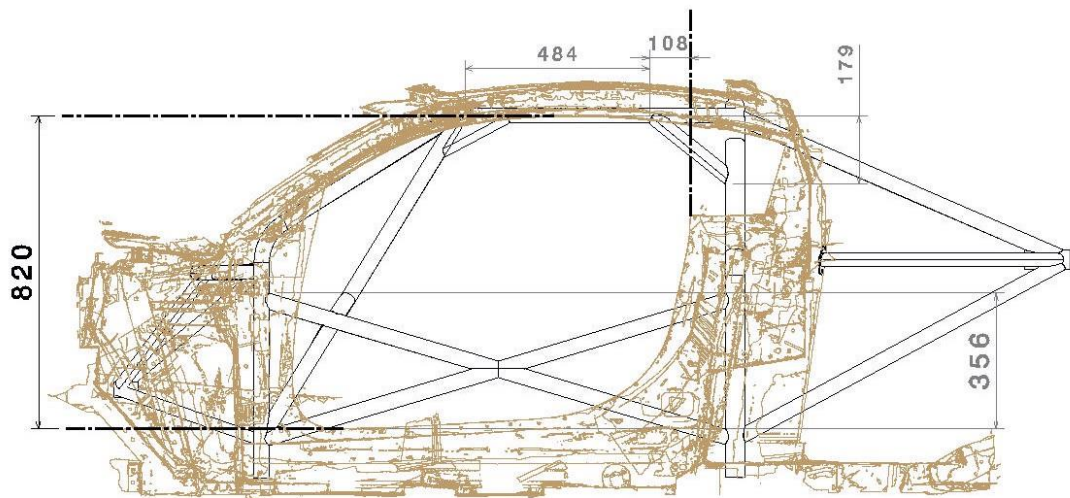
Kuva 16. CATIAlla mallinnettu Skeleton-malli

Skeleton-malli asetetaan mallissa korin sisälle sopimaan niin hyvin, kuin on mahdollista (kuva 17). Tässä vaiheessa on otettava myös huomioon, miten turvakaaret jaetaan osiin valmistuksen ja valmistusjärjestyksen suhteen.

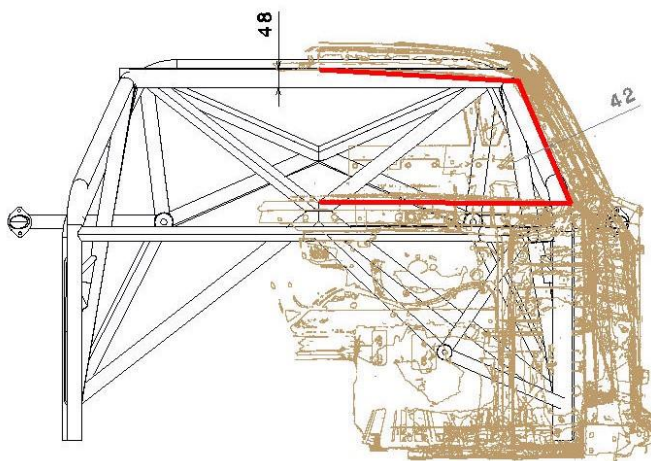


Kuva 17. Turvakaarien mallin sovittelua skannattuun koriin

Mallinnus vaiheessa myös tarkistettiin turvakaarien sääntömääräisyys mittojen puolesta (kuva 18 ja 19).



Kuva 18. Turvakaarien mittojen tarkistaminen FIA sääntö 8.3.2.5 (FIA Appendix J)



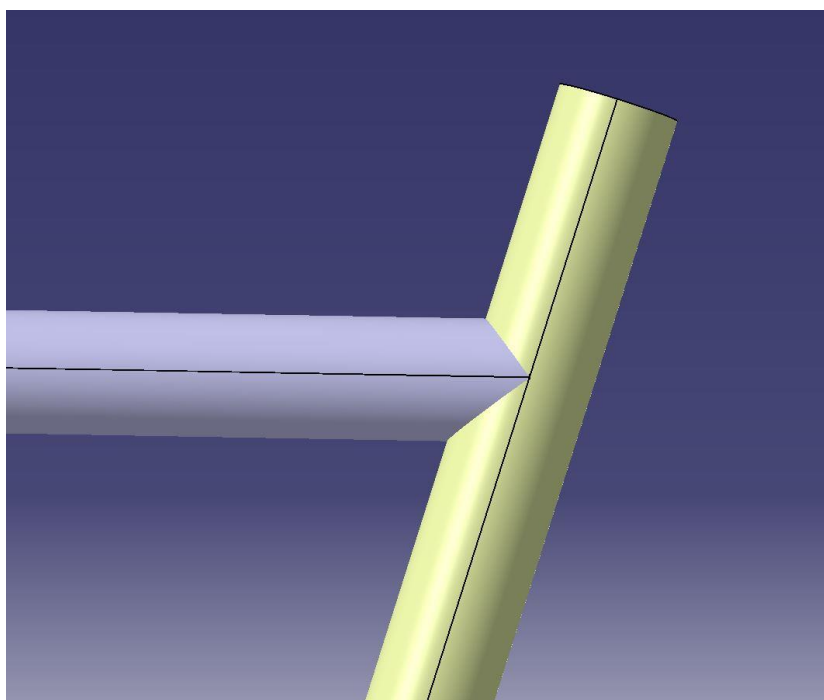
Kuva 19. Turvakaarien mittojen tarkistaminen FIA sääntö 8.3.2.5 (FIA Appendix J)

5.10 Kokoonpanon mallintaminen

Turvakaariputket on mallinnettava erikseen, jotta niistä saadaan tehtyä yksilölliset työkuvat. Tässä vaiheessa on hyvä tietää, mitkä turvakaarien putket ovat määrääviä putkia ja mitkä putket tukeutuvat näihin määrääviin putkiin. Tämä on erityisen tärkeää tietää, jotta putkien leikkaukset on mahdollisia mallintaa 3D-malliin.

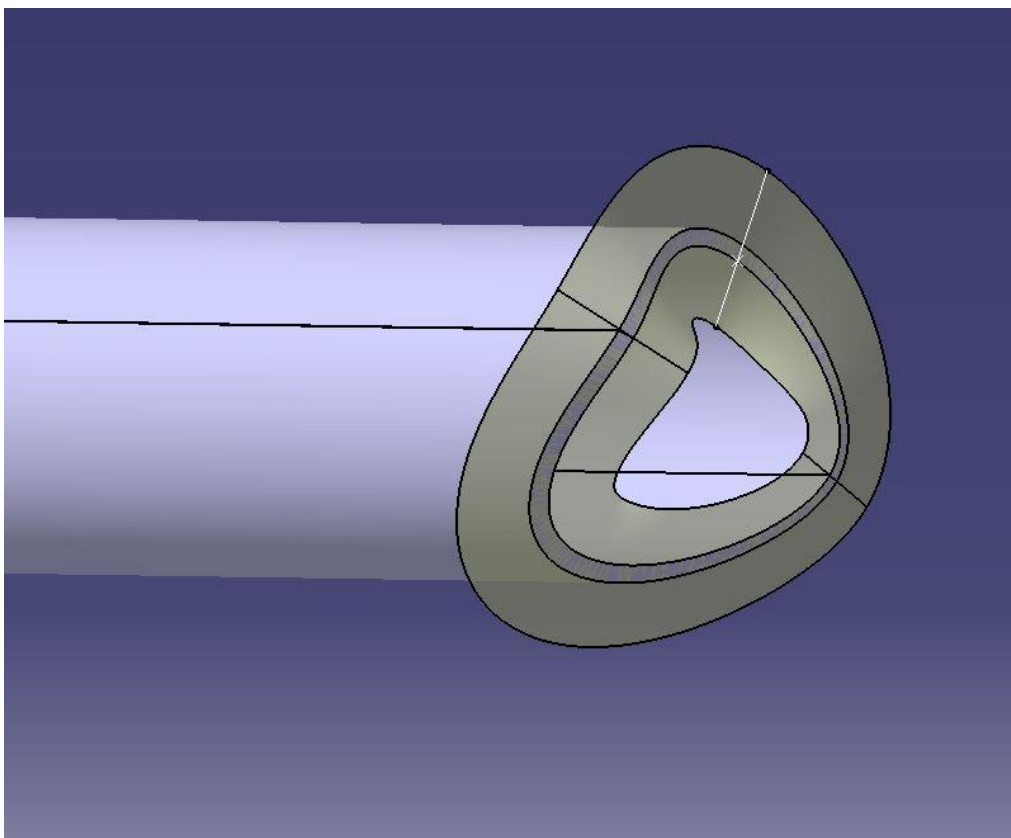
Tässä vaiheessa tehtiin geometriasta erillään oleva kokoonpano, jonka nollapiste on samassa paikassa kuin pääkoordinaatiston nollapiste. Kokoonpanoon lisättiin niin monta osaa kuin turvakaareissa on putkia. Mallintamisen tehostamiseksi on olemassa työkaluja CATIA:n ohjelmistossa. Jos jokin osa esiintyy molemmin puolin keskilinjan suhteen ja on mahdollista suunnitella symmetriseksi auton keskilinjaan verrattuna, on käytännössä turhaa mallintaa osa keskilinjan molemmin puolin. Visuaalisesti ja projektinhallinnan kannalta on kuitenkin hyvä olla osat molemmin puolin. Tässä voidaan käyttää Symmetry-työkalua, joka tekee kappaleesta symmetrisen osan valitun tason suhteen, tässä tapauksessa auton keskilinjan pystytason mukaan. Tässä kuitenkin on syytä olla tarkkaavainen, koska välttämättä kaikki osat eivät käy symmetrisesti toiselle puolelle. Myös työkuvioiden teossa on vaalittava tarkkuutta, jotta työkuva tulee varmasti oikein päin.

Aikaisemmin geometriassa käytettyjä viivoja, pisteitä sekä putkimuotoja käytetään referenssinä sen mukaan, mikä kokoonpanon putki on tiedossa. Geometrian viivoihin on lisätty ylimääräistä sen takia, että nyt putken mallinnusvaiheessa saadaan aihiota putkeen, mihin leikkaus tehdään. Jos putkissa ei ole tarpeeksi aihiota, tulee pintamallilla leikkaamisessa ongelmia, kun pintamalli ei lävistä koko alalta solidia. Putkipintamalliin lisätään solid-puolella materiaalipaksuus, joka on ennalta määritelty aikaisemmin putkivalinnoista. Kun osalle on määritelty materiaalipaksuus, voidaan toisella pintageometrialla leikata putkeen tarvittava leikkaus (kuva 20).



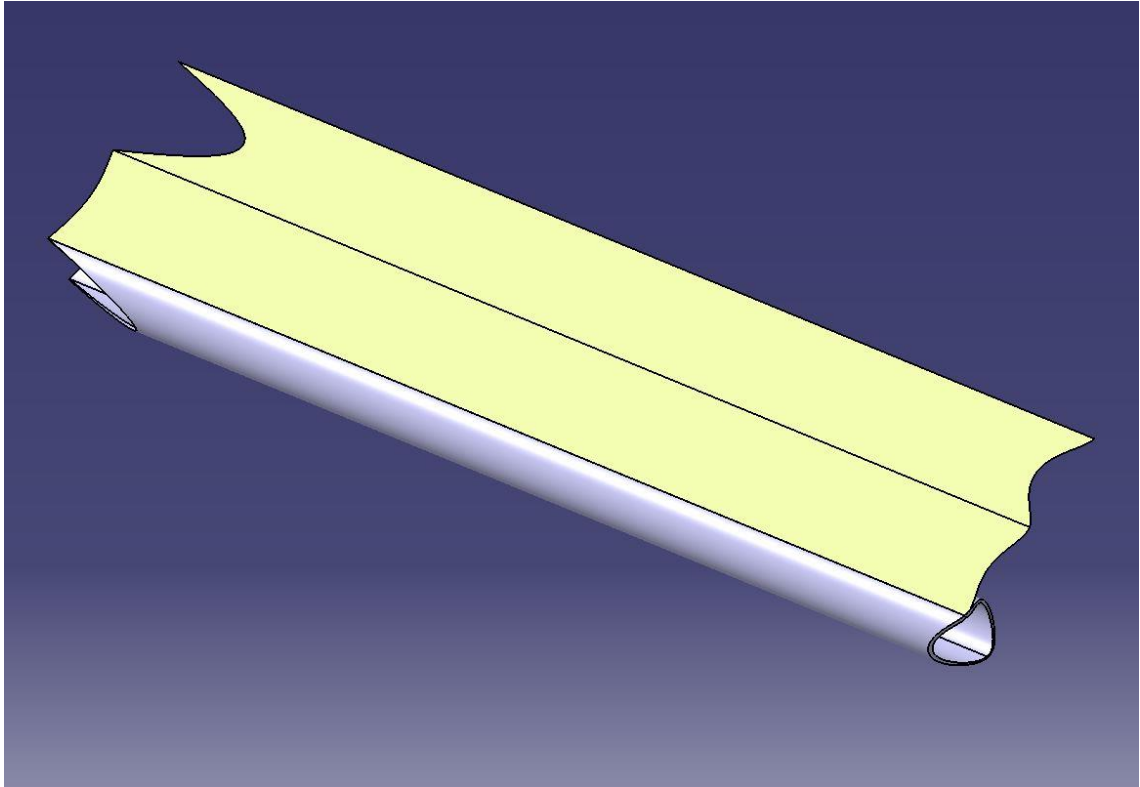
Kuva 20. Solid-mallin (harmaa) leikkaus pintamallilla (keltainen)

Tässä tapauksessa jouduttiin putkien leikkauskuvat tekemään DXF-tiedostomuotoon. Tämä myös rajasi mahdollisuuksia leikata vinoja leikkauksia putkien reunoihin, koska DXF-muodossa olevalla leikkauskuvalla ei pystytä tekemään 3D-leikkauksia. Jos putkien leikkauksia 3D:nä ei saada leikattua, joudutaan ottamaan huomioon, että laser menee 90 asteen kulmassa putken keskilinjasta katsottuna (kuva 21). Tätä menetelmää voidaan ajatella 2D-leikkauksena. Tämä ei kuitenkaan ollut ongelma, vaan aikaisempien leikkauksien tuoman kokemuksen perusteella 2D:nä leikatut putket mahdollistavat hyvät hitsausrillot, jolloin hitsitunkeuma saadaan paremmaksi.



Kuva 21. Turvakaariputken mallinnettu leikkauspinta

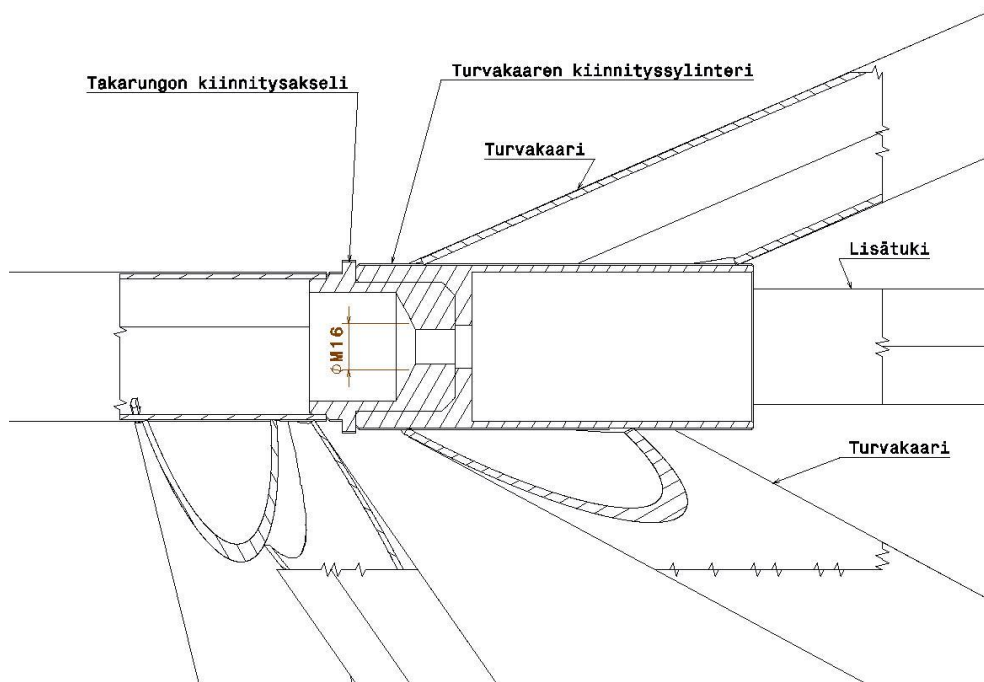
Putken molemmat päät on leikattu yllä olevan mukaisesti, minkä jälkeen putken päälipinnasta tehdään pinta, jonka voi levittää auki (kuva 22). Tämä aukilevitys tallennetaan CATIAN drawing-puolella DXF-tiedostoksi. Samaisessa moduulissa saadaan tehtyä putkille tuotenumerointi, jotta putken tunnistaminen olisi helpompaa. Putkien leikkaaja pitää ohjeistaa niin, että tuotenumerointi putken kyljessä on vain merkkkaus eikä läpi asti leikattava.



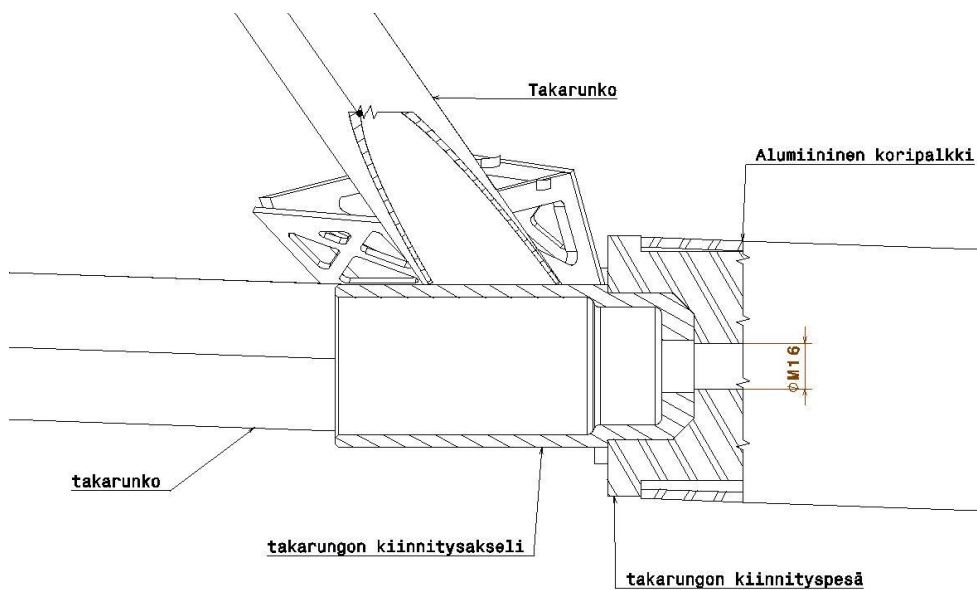
Kuva 22. Putken aukilevitys.

5.11 Takarungon kiinnitys

Projektin alkaessa oli tiedossa, että takarunko tehdään uusiksi. Vanhan vaurioituttua pahasti piti takarungon kiinnitys turvakaariin suunnitella uudella tavalla. Uusittu takarunko on suunniteltu teräsputkesta. Takarungon sekä turvakaarien liitosmenetelmän halettiin olevan yksinkertainen ja tarvittaessa takarungon irrottamisen rungosta nopeaa. Takarunkoon kiinnitetään takajousitus, takasiipi sekä moottori voimansiirtoineen. Takarungon kiinnittäminen alumiinikoriin toteutettiin pulttaamalla. Kuitenkaan itse pultteihin ei tule missään tilanteessa leikkausta, jossa pultti on heikoimmillaan. Tässä tapauksessa kiinnitysmekanismissa käytettiin hyödyksi Sylinteri – Akseli välistä liitosmenetelmää (kuvat 23 ja 24). Tässä kiinnitysmenetyksessä pultti pitää akselin sylinterin pohjassa. Sylinteri-akseliliitos ottaa vastaan taivutusta ja leikkausta, jolloin kiinnityspulttiin kohdistuva leikkausvoima pienenee. Lisäksi turvakaarien sääntömääräinen takaristikko suunniteltiin pultattavaksi, jotta varikko-olosuhteissa voidaan tehdä korjaustoimenpiteitä, ilman että takarunkoa tarvitsisi irrottaa rungosta.



Kuva 23. Turvakaaren sekä takarungon ylemmän liitoksen poikkileikkaus



Kuva 24. Korin sekä takarungon alemman liitoksen poikkileikkaus

6 Turvakaarien valmistus

Turvakaariputkien yhteen liittämiseksi valittiin TIG-hitsausmenetelmä. Tämä sen takia, että tekijällä on huomattava määrä hitsauskokemusta kyseisestä menetelmästä ja näin saadaan myös tehtyä huolellisempaa hitsausjälkeä.

Turvakaarien suunnittelussa on huomioitu, ettei kokonaisia turvakaaria saada asennettua koriin sisälle yhtenä osana, vaan turvakaaret joudutaan osittain hitsaamaan hitsauspöydällä jigeissä sekä osittain auton korin sisällä.

Valmistuksen suunnittelussa on otettu huomioon turvakaarien hitsaaminen ja hyvän laadun varmistaminen. Kaariputket oli valmiiksi leikattu sekä merkattu laserleikkausmenetelmällä, joten putkien istuvuus toisiinsa oli huippuluokkaa.



Kuva 25. Laserleikatut sekä NC-taivutetut turvakaariputket

6.1 Puolikaarien valmistus

Puolikaarien hitsaus suoritettiin hitsauspöydällä siihen erikseen suunnitellussa jigissä (kuva 26). Hitsausjigin käyttö vähentää auton korin sisällä suoritettavaa hitsausta hankalissa työasennoissa. Tämä jigi mahdollisti valmistaa puolikaaret puoli kerrallaan siihen pisteeseen, että yhteen liitettynä oli tämän jälkeen taivutettu puolikaari, tuulilasipilarivahvistusputken, sekä puolikas sivutörmäysristikosta. Näin saadaan myös varmistuttua siitä, että rakenne on oikean muotoinen auton korin sisälle. Samaisessa jigissä oli myös mahdollista hitsata puolikkaan sivutörmäyssuojan sekä tuulilasipilarin sääntömääräiset kulmavahviket. Koska puolikaaret oli taivutettu symmetrisesti keskilinjan mukaisesti, toisen puolen puolikaari pystyttiin hitsaamaan hitsausjigin toisella puolella. Samaista hitsausjigiä hyödynnettiin auton alustan tukivarsien valmistuksen hitsausjiginä. Teräslevyn on leikattu laserleikkausmenetelmällä alustapisteitä vastaavat reiät, joihin pystyi pulttaamaan kiinni koneistettuja sekä laserleikattuja alustan osia hitsauksen ajaksi. Näin saadaan mittatarkkoja osia valmistettua ja toistettavuus on parempi kuin ilman hitsausjigiä.



Kuva 26. Puolikaarien hitsausjigi sekä oikean puolen putket siihen asennettuina

Koska oviristikon putkien ja kaarien leikkauspisteiden korkeus Z-tasossa oli samassa tasossa sekä sivutörmäysristikon putkien yhtymäkohta oli suunniteltu puolikaaren ja pääkaaren välisen etäisyyden puoliväliin, pystyi sivutörmäysristikon kaksi muuta putkea hitsaamaan keskenään yhteen samassa jigissä.

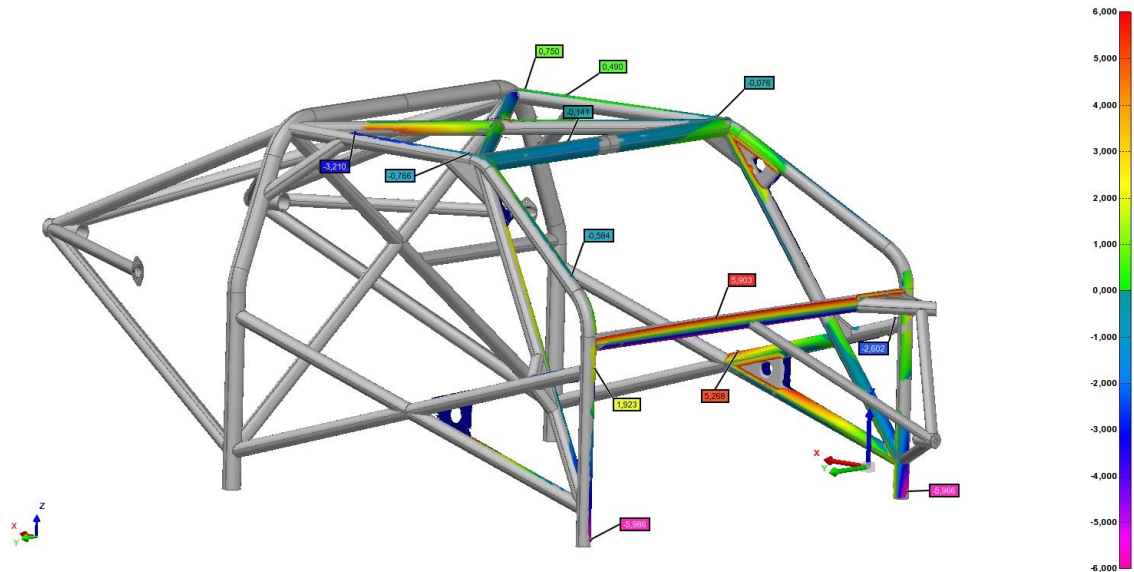
Kattoristikkoputkien oli suunniteltu olevan suorina, mikä helpotti huomattavasti niiden hitsaamista yhteen. Suorilla putkilla toteutettu rakenne pystyttiin hitsaamaan yhteen hitsauspöytää hyödyntäen.

Puolikaarien väliin sovitettiin poikittaiset turvakaariputket ja sovitettiin paikoilleen. Tämän jälkeen puolikaaret saatiin yhdistettyä samaisella putkella hitsaamalla, jolloin etukaarien leveys oli oikea. Putket hitsattiin kokonaisuudessaan puolikaariin kiinni. Tässä vaiheessa kattoristikkoa sovitettiin puolikaariin (kuva 27).



Kuva 27. Puolikaarien, poikittaisten tukiputkien sekä kattoristikon sovitus

Sovituksien jälkeen puolikaaret skannattiin mittojen varmistamiseksi, jotta voitiin vielä tehdä tarvittavia muutoksia, kun puolikaaria soviteltiin koriin sisälle (kuva 28).

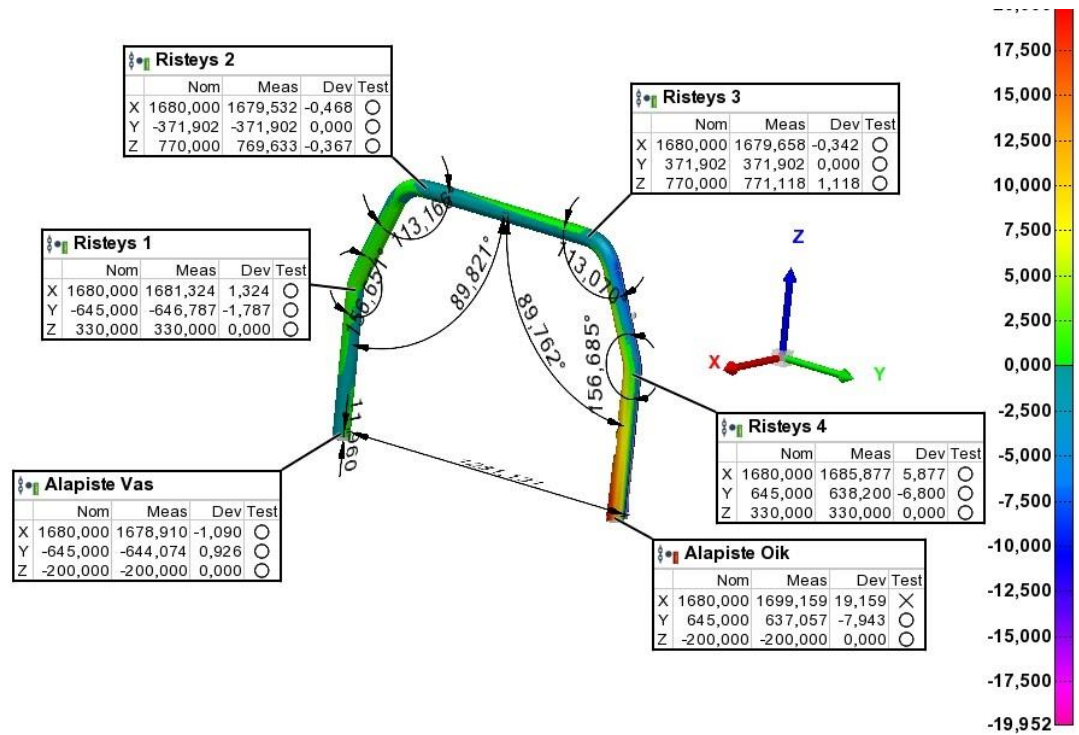


Kuva 28. Hitsattujen puolikaarien välimittaus

Ylläolevasta kuvasta 28 pystyy toteamaan puolikaarien alapintojen olevan noin 5 mm liian pitkät, mikä vaati säätämistä vielä ennen kuin kaaret asennettiin lopullisesti. Muuten kehikon mitta-heitot olivat 5 mm:n sisällä verrattuna 3D-malliin.

6.2 Pääkaaren valmistus sekä sovitus puolikaariin

Taivutetun pääkaaren, tuentaristikon sekä turvavyön kiinnityspotken hitsaaminen toteutettiin hitsauspöydällä. Tähän hitsaukseen ei ollut erikseen käytettävissä jiggiä, mutta tarkasti leikatut osat ja mittaamalla todennettu pääkaari edesauttoivat hyvän lopputuloksen saavuttamisessa. Mittauksessa (kuva 29.) voidaan todeta, että taivutukset ovat hyvin lähellä toisiaan, mutta kuitenkin kuljettajan puolen alapiste on hieman eteenpäin taipunut sekä alapisteet ovat liian kaukana toisistaan. Tämä ei kuitenkaan ollut ongelma vaan pääkaarta pystyi hitsausvaiheessa asettelemaan oikeaan asentoon.



Kuva 29. Erillään mitattu taivutettu pääkaari

Osat hitsattiin yhdeksi kokonaisuudeksi ja lisättiin sääntömääräiset lisätuennot (kuva 30.)



Kuva 30. Valmis pääkaari tukineen

Puolikaarien ja pääkaarien esisovitus keskenään suoritettiin hitsauspöydällä. Puolikaaret tulivat taivutettuna, joten puolikaaren putkien päät olivat suorat. Tämä liitoskohta leikattiin ja osat sovitettiin tässä vaiheessa sopimaan keskenään kulmahiomakoneella leikatun 3D-mallista hyödyntäen paperille tulostettua aukilevityskuvaa. Kaarirakenteen alapisteiden etäisyydet tarkistettiin ristimittamalla. Näin saatiin tehostettua kaarien sovittamista keskenään, ilman että kaaret olisivat auton korin sisällä. Niiden ollessa sisällä valmistaminen hankaloituu huomattavasti korin rakenteiden aiheuttaman tilanpuutteen takia (kuva 30).



Kuva 31. keskenään sovitettut turvakaarien osat

6.3 Turvakaarien asennus koriin

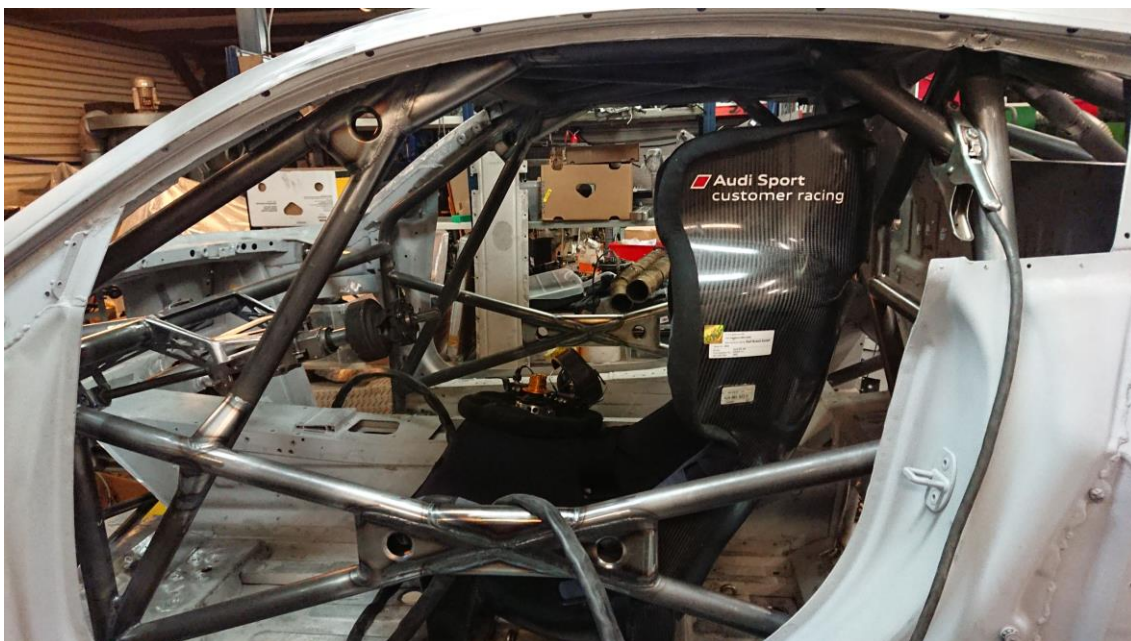
Pääkaaren paikoittaminen oikeaan kohtaan auton korin sisälle on hyvin tärkeitä. Pääkaareen tukeutuvat sääntömääräiset takarungon tuentaristikot, sekä pääkaaren paikka määrittelee takarungon sijainnin. Pääkaaren paikoittaminen toteutettiin niin, että skannausdatasta sekä 3D-mallista tarkastettiin korin poikittaisen alumiinipalkin sekä pääkaaren välinen auton pituuslinjan suuntainen etäisyys. Kaaren ja alumiinipalkin väliin asetettiin oikeanpaksuinen levy ja kaari kiristettiin ruuvipuristimella alumiinipalkkiin kiinni. Kaaren sivuttainen sijainti tarkistettiin myös 3D-mallista sekä skannauksista, jolloin pystyttiin

varmistamaan oikeanpaksuiset levyt pääkaaren ja korin b-pilareiden väliin. Näin saatiin pääkaari paikoitettua sivuttaissuunnassa keskelle koriin nähden.

Puolikaarien sekä pääkaaren väliselle alueelle lähelle katon rajaa hitsattiin sääntömääräinen kattoristikko. Tämä asetti korin puolelta haasteita, koska ristikon pitää olla mahdollisimman lähellä kattoa, jotta kuljettajalle jää tilaa istua kypärän kanssa ohjaamossa. Mitä lähempänä kattoa kattoristikko on, sitä hankalempi se on hitsata. Tämä oli otettu huomioon siten, että puolikaaret hitsattiin pääkaareen ja pääkaaren kiinnityspisteiden alapuolella korissa oleva alumiininen runkopalkki poistettiin. Kun tämä runkopalkki poistettiin, oli mahdollista kallistaa turvakaaria alaspäin. Turvakaaret kallistettuna tuli lisää työskentelytilaa kattoristikon hitsaamiseen. Näin saatiin laadukkaasti kiinnitettyä kattoristikko ympäri hitsisaumalla.

Puolikaaren ja pääkaaren hitsauksen jälkeen auton korin sisällä asennettiin aikaisemmin hitsausjigissä osittain valmiiksi hitsattu sivutörmäyssuojan takaosa, joka kiinnittyy toisesta päästä pääkaareen ja toisesta etukaareen valmiiksi hitsattuun sivutörmäyssuojan puolikkaaseen. Kattoristikon ja puolikaaren hitsaaminen pääkaareen oli taivuttanut koko pääkaarta aavistuksen alapisteistä, mutta mittaan leikatuilla sivutörmäysputkien asennuksen myötä mitta muuttui lähemmäksi suunniteltua.

Tässä vaiheessa lisättiin tarvittavat kulmavahvikkeet sääntömääräisiin kohtiin ja hitsattiin kaikki saumat kokonaisuudessaan. Kaarien kiinnityspisteet auton koriin paikannettiin, kun kaaret oli hitsattu valmiiksi korin sisällä, eikä niitä tarvinnut liikuttaa. Alumiinirunkoon tehtiin uudet takarungon palkit, joihin uudistettu takarunko kiinnitetään. Tämän jälkeen pääkaaren korkeutta säädettiin hiomalla putken pituutta alapäistä. Alumiinirunkoon tehtiin reiät turvakaarien kiinnitystä varten laserleikattujen teräs kiinnityslevyjen avulla. Runkoon valmistettiin sorvaamalla holkit, jotka hitsattiin koriin kiinteäksi. Holkit estävät korin painumista, kun turvakaaret pultataan koriin kiinni. Teräslevyt kiinnitettiin koriin ja turvakaaret hitsattiin alapäistä kiinni kiinnityslevyihin. Turvakaaret pultattiin koriin kiinni (kuva 31).



Kuva 32. Valmiit turvakaaret pultattuna koriin

Turvakaarien takatuet paikoitettiin paikoilleen mittaamalla. Takarungon kiinnityssylinterit kiinnitettiin erikseen suunniteltuun paikoitusputkeen, joka asetettiin nostimella paikalleen. Putkia hitsattiin paikalleen ja välissä mitattiin (kuva 32).



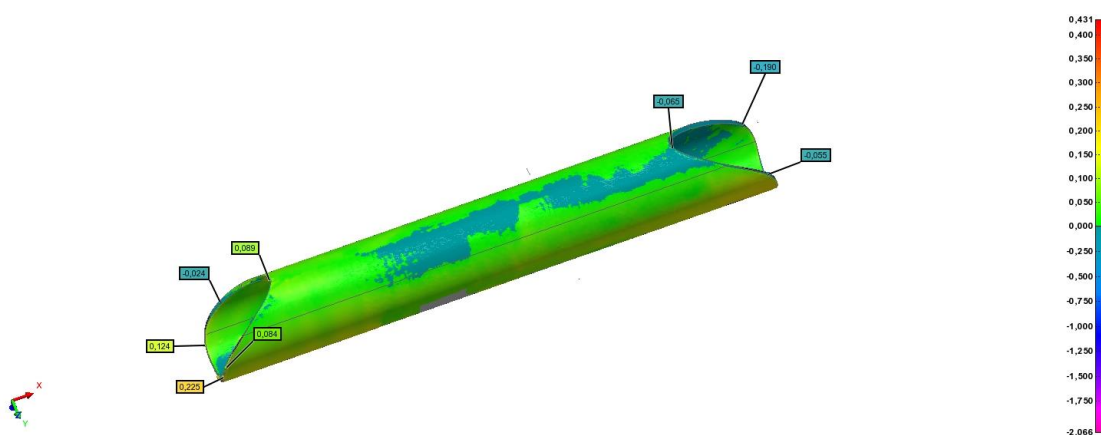
Kuva 33. Takarungon yläpään kiinnitys turvakaariin

7 Mittatuloksia

Valmis kokonaisuus mitattiin 3D-nivelmittavartta hyödyntäen laadun varmistamiseksi. Yksittäisiä osia sekä osakokonaisuuksia mitattiin myös työn edetessä, jotta mahdollisia muutostöitä voitiin tehdä paremman lopputuloksen saavuttamiseksi.

Liitteessä 1 olevassa mittaraportissa on esitetty auton turvakaariputkien mitatut arvot. Mittatuloksiin on kerätty putkien sylinterimäinen piirteen halkaisija, positio X-, Y- sekä Z-koordinaatistossa samoin kuin myös putken toteutunut astekulma vertailtuna koordinaatiston akselien suuntiin. Mittausraporttiin asetettu toteutunut valmistustoleranssi on ± 10 mm, joka täyttyi kaikkien putkien osalta.

Kuvassa 33 voidaan todentaa yksittäisen laserleikatun turvakaariputken tarkkuus visuaalisesti. Suurimmat mittaheitot olivat $+0,225$ mm ja $-0,190$ mm väliltä. Kuitenkin mittatuloksista voidaan todentaa, että mittadatan paikoitus vertailtavaan 3D-malliin heittää hieman, kun tarkastellaan visuaalisesti, missä heitot ovat mittauksessa. Laserleikattujen putkien valmistustoleranssi olivat hyvät projektin tarkoitukseen.



Kuva 34. Visuaalinen mittatulos yksittäisestä turvakaariputkesta.

Kuvasta 34 näkyvät puolikaaren mittaheitot hitsattuna. Visuaalisesta kuvasta voidaan huomata, kuinka pitkän putken pääty on laskeutunut noin 7 mm:n verran. Tämä johtuu siitä, että kun tuulilasipilarin vahvistusputki hitsataan viimeisenä puolikaareen, vääntää hitsausauma puolikaaren päätyä alaspäin.

8 Loppusanat

Audi R8:n turvakaarien suunnittelu 3D-ohjelmistoja sekä mittanivelvartta hyödyntäen oli hyvinkin opettavainen prosessi. Tämänkaltainen työ tehtiin aivan täysin opinnäytetyöntekijän omien intressien mukaisesti, vaikka vaatimattomampikin valmistaminen olisi ollut lopputulokseltaan hyvä. Käytännön tekemisessä huomasin hyvin suunniteltujen ratkaisujen kokonaisvaltaisesti nopeuttavan valmistusta huomattavasti, kun pystyi ennakoimaan paremmin mahdollisia ongelmakohtia, lähinnä sovitusten sekä tilojen suhteen. Kokonaisen auton suunnittelu tyhjästä vaatii hyvin paljon aikaa suunnitteluun, ja sitä käytettiin paljon. Turvakaarien mitoitus pysyi hyvin tarkkana käytetyillä menetelmillä, sekä mahdollisuus tehdä useampia kappaleita samanlaisia turvakaaria tästä eteenpäin olisi hyvinkin nopeaa.

Työssä onnistuttiin yksinkertaistamaan rakennetta sekä ulkoistamaan osien valmistusta ulkopuolisille tahoille. Tämä oli hyvin tärkeää, koska turvakaarien suunnittelun lisäksi oli paljon muuta suunniteltavaa autoon, jotta se valmistuisi ajallaan kaudelle 2019. Työssä opin itse ajankäytön merkityksen sekä sen, ettei ihan kaikkia ratkaisuja kannata viilata äärimmilleen, kun katsoo isompaa kuvaa sekä saatua hyötyä. Yksittäisen turvakaaren valmistus tällä menetelmällä oli aikaa vievää, mutta kokonaisuudessaan uuden auton rakentaminen kannalta välttämätöntä. Rungon muutostyöt vaativat mittatarkkuutta, jotta kokonaisuus olisi hyvä. Toteutunut valmistustoleranssi oli mielestäni hitsatulle teräsrakenteelle hyvä.

Auto suunniteltiin ja rakennettiin kisakaudelle 2019 syyskuun 2018 ja heinäkuun 2019 välisenä aikana. Aikataulu oli hyvinkin tiukka, eikä testikilometrejä saatu autolla ajettua alkuperäisen suunnitelman mukaisesti. Kilpa-auton suunnitteluun ja valmistukseen insinööriyden tekijä kulutti kokonaisuudessaan noin 2000 työtuntia yllä mainitulla aikavälillä. Auto on tätä lopputyötä kirjoittaessa rantautunut Australiaan, ja kisat ovat alkamassa.

Lähteet

Annexe J / Appendix J – Article 253-8. 2016. Verkkoaineisto. FIA. <<https://www.fia.com/file/54650/download/17461>>. Luettu 4.1.2019.

Autojen Tekniset Määräykset ja Kuljettajien Ajovarusteet2019. 2019.Verkkoaineisto. AKK-Motorsport ry.<https://www.autourheilu.fi/site/assets/files/1613/tekniset_maaraykset_2019.pdf>. Luettu 3.6.2019.

General Requirements of Automobiles Schedule J - Safety Cage Structures. 2019. Verkkoaineisto. Confederation of Australian Motor Sport. <https://www.cams.com.au/docs/default-source/manual/general-requirements/2019-schedule-j---1.pdf?sfvrsn=7721ed27_10>. Luettu 4.1.2019

Mekaniikka. 2007.Verkkoaineisto. OAMK. <http://www.oamk.fi/~kurki/automaatio-labrat/TTTT/02_0_Mekaniikka.pdf> Luettu 2.10.2016

Roll Cage Certification. 2019. Verkkoaineisto. Custom Cages Ltd.<<https://www.customcages.co.uk/about/certification>>. Luettu 4.1.2019

ROMER Absolute Arm overview brochure. 2015. Verkkoaineisto. Hexagon AB. <https://www.hexagonmi.com/-/media/Hexagon%20MI%20Legacy/hxrom/romer/general/brochures/ROMER%20Absolute%20Arm_overview_brochure_en.ashx>. Luettu 2.10.2019.

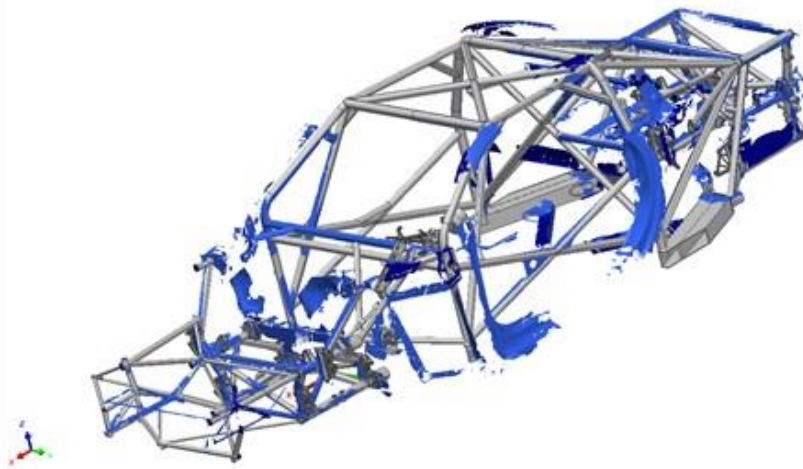
Turvakaarien mittatulos

Mittaraporttiin on esitetty auton turvakaariputkien mitatut arvot. Mittatuloksiin on kerätty putkien sylinterimäinen piirteen halkaisija, positio X-, Y- sekä Z-koordinaatistossa samoin kuin putken toteutunut astekulma vertailtuna koordinaatiston akselien suuntiin. Mittausraporttiin asetettu toteutunut valmistustoleranssi on ± 10 mm, joka täyttyi kaikkien putkien osalta.

Mittaraportti on laadittu Polyworks-ohjelmistolla



Report Author: Joonas Ikonen



Organization: Revision Tech Oy
Operator: Joonas Ikonen
E-mail:
Workspace: Kaaret EtujaTakarungoilla
Project: R8 1:1

Part name:
Part number:
Drawing #:
Serial #:
Device:



Feature Table							
Units	Millimeters						
Coordinate Systems	csys 2						
Data Alignments	best-fit meas objects 1 (alignment group 1)...						
Name	Control	Nom	Meas	Tol	Dev	Test	Out Tol
Pääkaari vaaka sylinteri	Midpoint X	-1564,000	-1557,114	±10,000	6,888	○	
	Midpoint Z	977,002	976,019	±10,000	-0,983	○	
	X Angle	90,000	90,308	±1,000	0,308	○	
	Y Angle	0,000	0,326	±1,000	0,326	○	
	Z Angle	90,000	89,893	±1,000	-0,107	○	
Pääkaaren vino sylinteri vasen	Midpoint X	-1564,000	-1560,822	±10,000	3,178	○	
	Midpoint Y	571,530	565,466	±10,000	-6,064	○	
	Midpoint Z	740,609	738,035	±10,000	-2,574	○	
	X Angle	90,000	90,271	±1,000	0,271	○	
	Y Angle	67,000	66,685	±1,000	-0,315	○	
	Z Angle	157,000	156,683	±1,000	-0,317	○	
Pääkaari pysty sylinteri vasen	Diameter	50,000	49,159	±1,000	-0,841	○	
	Midpoint X	-1564,000	-1562,060	±10,000	1,940	○	
	Midpoint Y	645,001	640,276	±10,000	-4,725	○	
	Midpoint Z	272,000	272,000	±10,000	0,000	○	
	X Angle	90,000	89,918	±1,000	-0,082	○	
	Y Angle	90,000	89,807	±1,000	-0,193	○	
	Z Angle	0,000	0,209	±1,000	0,209	○	
pääkaari pysty sylinteri oikea	Diameter	50,000	49,671	±1,000	-0,329	○	
	Midpoint X	-1564,000	-1562,163	±10,000	1,837	○	
	Midpoint Y	-644,999	-638,222	±10,000	6,777	○	
	Midpoint Z	272,004	272,004	±10,000	0,000	○	
	X Angle	90,000	89,470	±1,000	-0,530	○	
	Y Angle	90,000	90,470	±1,000	0,470	○	
	Z Angle	0,000	0,708	±1,000	0,708	○	
Pääkaaristikon vasen putki	Diameter	40,000	40,149	±1,000	0,149	○	
	Midpoint X	-1564,000	-1562,958	±10,000	1,042	○	
	Midpoint Y	96,854	99,074	±10,000	2,220	○	
	Midpoint Z	530,635	533,507	±10,000	2,872	○	
	X Angle	90,000	90,063	±1,000	0,063	○	
	Y Angle	142,301	141,750	±1,000	-0,551	○	
	Z Angle	52,301	51,750	±1,000	-0,551	○	
pääkaaristikon oikea putki	Diameter	40,000	40,494	±1,000	0,494	○	
	Midpoint X	-1564,000	-1563,418	±10,000	0,582	○	
	Midpoint Y	-315,634	-312,582	±10,000	3,052	○	
	Midpoint Z	361,551	357,602	±10,000	-3,949	○	
	X Angle	90,000	89,955	±1,000	-0,045	○	
	Y Angle	37,698	37,880	±1,000	0,182	○	

Organization:	Part name:
Operator:	Part number:
E-mail:	Piece: piece 1

26.9.2019

2/7



Turvavyöputki	Z Angle	52,302	52,120	±1,000	-0,182	<input type="radio"/>
	Midpoint X	-1564,000	-1561,802	±10,000	2,198	<input type="radio"/>
	Midpoint Y	355,857	355,857	±10,000	0,000	<input type="radio"/>
	Midpoint Z	547,001	549,572	±10,000	2,571	<input type="radio"/>
	X Angle	90,000	89,956	±1,000	-0,044	<input type="radio"/>
	Y Angle	0,000	0,506	±1,000	0,506	<input type="radio"/>
	Z Angle	90,000	90,504	±1,000	0,504	<input type="radio"/>
Pääkaaren/Puolikaaren tuki vasen	Midpoint X	-1451,907	-1451,855	±10,000	0,052	<input type="radio"/>
	Midpoint Y	508,364	502,527	±10,000	-5,837	<input type="radio"/>
	Midpoint Z	869,845	866,767	+5,000/-10,000	-3,078	<input type="radio"/>
	X Angle	137,792	137,921	±1,000	0,129	<input type="radio"/>
	Y Angle	72,044	72,082	±1,000	0,038	<input type="radio"/>
	Z Angle	126,649	126,539	±1,000	-0,110	<input type="radio"/>
	Puolikaari pysty sylinteri vasen	Midpoint X	-323,867	-322,262	±10,000	1,605
Midpoint Y		639,195	633,530	±10,000	-5,665	<input type="radio"/>
Midpoint Z		287,056	287,057	±10,000	0,001	<input type="radio"/>
X Angle		90,085	89,408	±1,000	-0,677	<input type="radio"/>
Y Angle		90,016	89,555	±1,000	-0,461	<input type="radio"/>
Z Angle		0,086	0,741	±1,000	0,655	<input type="radio"/>
Puolikaari pysty sylinterin oikea		Diameter	40,000	40,292	±1,000	0,292
	Midpoint X	-323,867	-320,411	±10,000	3,456	<input type="radio"/>
	Midpoint Y	-639,193	-638,452	±10,000	0,741	<input type="radio"/>
	Midpoint Z	287,061	287,066	±10,000	0,005	<input type="radio"/>
	X Angle	90,085	89,555	±1,000	-0,530	<input type="radio"/>
	Y Angle	89,983	90,397	±1,000	0,414	<input type="radio"/>
	Z Angle	0,086	0,597	±1,000	0,511	<input type="radio"/>
Puolikaari vino sylinteri vasen	Diameter	40,000	40,097	±1,000	0,097	<input type="radio"/>
	Midpoint X	-592,159	-592,435	±10,000	-0,276	<input type="radio"/>
	Midpoint Y	563,383	558,458	±10,000	-4,925	<input type="radio"/>
	Midpoint Z	805,142	802,485	±10,000	-2,657	<input type="radio"/>
	X Angle	145,447	145,259	±1,000	-0,188	<input type="radio"/>
	Y Angle	103,466	103,729	±1,000	0,263	<input type="radio"/>
	Z Angle	58,858	58,795	±1,000	-0,063	<input type="radio"/>
Puolikaari vino sylinteri oikea	Diameter	40,000	40,210	±1,000	0,210	<input type="radio"/>
	Midpoint X	-592,159	-594,200	±10,000	-2,041	<input type="radio"/>
	Midpoint Y	-563,378	-563,677	±10,000	-0,299	<input type="radio"/>
	Midpoint Z	805,146	802,031	±10,000	-3,115	<input type="radio"/>
	X Acute Angle	34,553	34,407	±1,000	-0,146	<input type="radio"/>
	Y Acute Angle	76,534	76,792	±1,000	0,258	<input type="radio"/>
	Z Acute Angle	58,858	58,881	±1,000	0,023	<input type="radio"/>
Puolikaari vaaka sylinteri vasen	Midpoint X	-1217,013	-1216,602	±10,000	0,411	<input type="radio"/>
	Midpoint Y	472,073	465,272	±10,000	-6,801	<input type="radio"/>
	Midpoint Z	955,566	954,781	±10,000	-0,785	<input type="radio"/>
	X Angle	3,433	3,374	±1,000	-0,059	<input type="radio"/>
Organization:						
Operator:		Part name:				
E-mail:		Part number:				
		Piece: piece 1				

26.9.2019

2/7



	Y Angle	86,574	86,633	±1,000	0,059	<input type="radio"/>
	Z Angle	89,786	90,224	±1,000	0,438	<input type="radio"/>
☑ pääkaari tukiristikko vasen ylä	Midpoint X	-1564,000	-1560,161	±10,000	3,839	<input type="radio"/>
	Midpoint Y	218,787	218,363	±10,000	-0,424	<input type="radio"/>
	Midpoint Z	774,572	775,121	±10,000	0,549	<input type="radio"/>
	X Angle	90,000	89,952	±1,000	-0,048	<input type="radio"/>
	Y Angle	37,698	37,378	±1,000	-0,320	<input type="radio"/>
	Z Angle	52,302	52,622	±1,000	0,320	<input type="radio"/>
☑ Oviristikko alempi putki vasen	Midpoint X	-943,724	-943,667	±10,000	0,057	<input type="radio"/>
	Midpoint Y	642,139	637,500	±10,000	-4,639	<input type="radio"/>
	Midpoint Z	290,845	291,108	±10,000	0,263	<input type="radio"/>
	X Angle	16,707	16,365	±1,000	-0,342	<input type="radio"/>
	Y Angle	90,253	90,722	±1,000	0,469	<input type="radio"/>
	Z Angle	106,705	106,348	±1,000	-0,357	<input type="radio"/>
☑ Oviristikko ylempi putki vasen	Midpoint X	-968,040	-968,358	±10,000	-0,318	<input type="radio"/>
	Midpoint Y	642,185	637,562	±10,000	-4,623	<input type="radio"/>
	Midpoint Z	283,737	284,733	±10,000	0,996	<input type="radio"/>
	X Angle	16,520	15,867	±1,000	-0,653	<input type="radio"/>
	Y Angle	90,260	90,265	±1,000	0,005	<input type="radio"/>
	Z Angle	73,482	74,135	±1,000	0,653	<input type="radio"/>
☑ Oviristikkoputki oikea ylä	Diameter	40,000	39,577	±1,000	-0,423	<input type="radio"/>
	Midpoint X	-634,064	-631,760	±10,000	2,304	<input type="radio"/>
	Midpoint Y	-640,604	-642,878	±10,000	-2,274	<input type="radio"/>
	Midpoint Z	382,785	375,054	±10,000	-7,731	<input type="radio"/>
	X Angle	163,480	163,586	±1,000	0,106	<input type="radio"/>
	Y Angle	90,260	90,602	±1,000	0,342	<input type="radio"/>
	Z Angle	106,518	106,403	±1,000	-0,115	<input type="radio"/>
☑ Tuulilasipilari tukiputki vasen	Diameter	40,000	39,884	±1,000	-0,116	<input type="radio"/>
	Midpoint X	-584,907	-582,980	±10,000	1,927	<input type="radio"/>
	Midpoint Y	567,083	563,100	±10,000	-3,983	<input type="radio"/>
	Midpoint Z	530,498	531,006	±10,000	0,508	<input type="radio"/>
	X Angle	121,190	120,953	±1,000	-0,237	<input type="radio"/>
	Y Angle	98,221	98,117	±1,000	-0,104	<input type="radio"/>
	Z Angle	32,497	32,232	±1,000	-0,265	<input type="radio"/>
☑ Tuulilasipilarin tukiputki oikea	Diameter	40,000	40,065	±1,000	0,065	<input type="radio"/>
	Midpoint X	-584,907	-583,867	±10,000	1,040	<input type="radio"/>
	Midpoint Y	-567,079	-568,603	±10,000	-1,524	<input type="radio"/>
	Midpoint Z	530,502	531,399	±10,000	0,897	<input type="radio"/>
	X Angle	121,190	121,158	±1,000	-0,032	<input type="radio"/>
	Y Angle	81,778	82,131	±1,000	0,353	<input type="radio"/>
	Z Angle	32,497	32,358	±1,000	-0,139	<input type="radio"/>
☑ Kattoristikon putki vasen	Diameter	40,000	40,064	±1,000	0,064	<input type="radio"/>
	Midpoint X	-1042,866	-1039,964	±10,000	2,902	<input type="radio"/>
	Midpoint Y	234,972	232,769	±10,000	-2,203	<input type="radio"/>
Organization:		Part name:				
Operator:		Part number:				
E-mail:		Piece: piece 1				

26.9.2019

2/7



Kattoristikon putki oikea	Midpoint Z	954,440	954,054	±10,000	-0,386	○
	X Angle	62,788	62,713	±1,000	-0,075	○
	Y Angle	37,212	37,294	±1,000	0,082	○
	Z Angle	89,989	90,596	±1,000	0,607	○
	Diameter	40,000	40,377	±1,000	0,377	○
	Midpoint X	-1038,275	-1041,352	±10,000	-3,077	○
	Midpoint Y	-241,011	-243,348	±10,000	-2,337	○
Puolikaaren ylempi väliputki	Midpoint Z	954,443	955,492	±10,000	1,049	○
	Diameter	50,000	49,876	±1,000	-0,124	○
	Midpoint X	-845,258	-847,871	±10,000	-2,613	○
	Midpoint Y	0,003	0,003	±10,000	0,000	○
	Midpoint Z	954,506	949,898	±10,000	-4,608	○
	X Angle	90,000	89,561	±1,000	-0,439	○
	Y Angle	0,000	0,484	±1,000	0,484	○
Puolikaaren alempi väliputki	Z Angle	90,000	89,798	±1,000	-0,202	○
	Diameter	40,000	40,181	±1,000	0,181	○
	Midpoint X	-324,145	-320,271	±10,000	3,874	○
	Midpoint Y	0,002	0,002	±10,000	0,000	○
	Midpoint Z	545,983	550,141	±10,000	4,158	○
	X Angle	90,000	89,993	±1,000	-0,007	○
	Y Angle	0,000	0,052	±1,000	0,052	○
Takaristikon alempi tukiputki vasen	Z Angle	90,000	89,948	±1,000	-0,052	○
	Diameter	40,000	40,146	±1,000	0,146	○
	Midpoint X	-1998,536	-1997,876	±10,000	0,660	○
	Midpoint Y	525,129	520,675	±10,000	-4,454	○
	Midpoint Z	341,750	340,698	±10,000	-1,052	○
	X Angle	148,760	149,214	±1,000	0,454	○
	Y Angle	103,642	103,264	±1,000	-0,378	○
Takaristikon alempi tukiputki oikea	Z Angle	62,490	62,773	±1,000	0,283	○
	Diameter	40,000	39,564	±1,000	-0,436	○
	Midpoint X	-1998,536	-1996,509	±10,000	2,027	○
	Midpoint Y	-525,127	-518,188	±10,000	6,939	○
	Midpoint Z	341,753	341,963	±10,000	0,210	○
	X Angle	148,760	148,925	±1,000	0,165	○
	Y Angle	76,357	76,861	±1,000	0,504	○
Takaristikon ylempi tukiputki vasen	Z Angle	62,491	62,393	±1,000	-0,098	○
	Midpoint X	-1997,178	-1995,072	±10,000	2,106	○
	Midpoint Y	428,247	426,743	±10,000	-1,504	○
	Midpoint Z	766,424	761,753	±10,000	-4,671	○
	X Angle	156,400	156,572	±1,000	0,172	○
	Y Angle	92,795	92,674	±1,000	-0,121	○
	Z Angle	113,414	113,257	±1,000	-0,157	○
Takaristikon ylempi tukiputki oikea	Midpoint X	-1999,000	-1998,281	±10,000	0,719	○
	Midpoint Y	-428,145	-424,017	±10,000	4,128	○
Organization:		Part name:				
Operator:		Part number:				
E-mail:		Piece: piece 1				

26.9.2019

2/7



Takiristikkoputki oikea	Midpoint Z	765,637	764,485	±10,000	-1,152	<input type="radio"/>
	X Angle	166,400	166,438	±1,000	0,038	<input type="radio"/>
	Y Angle	87,205	87,539	±1,000	0,334	<input type="radio"/>
	Z Angle	113,414	113,418	±1,000	0,004	<input type="radio"/>
	Diameter	40,000	39,088	±1,000	-0,912	<input type="radio"/>
	Midpoint X	-1999,000	-1997,037	±10,000	1,963	<input type="radio"/>
	Midpoint Y	-23,145	-21,854	±10,000	1,291	<input type="radio"/>
	Midpoint Z	765,635	764,039	±10,000	-1,596	<input type="radio"/>
	X Angle	132,916	132,894	±1,000	-0,022	<input type="radio"/>
	Y Angle	47,918	48,050	±1,000	0,132	<input type="radio"/>
takiristikkoputki vasen	Z Angle	107,174	107,442	±1,000	0,268	<input type="radio"/>
	Diameter	40,000	39,640	±1,000	-0,360	<input type="radio"/>
	Midpoint X	-1999,000	-1996,743	±10,000	2,257	<input type="radio"/>
	Midpoint Y	23,150	21,734	±10,000	-1,416	<input type="radio"/>
	Midpoint Z	765,635	763,646	±10,000	-1,989	<input type="radio"/>
	X Angle	47,084	46,780	±1,000	-0,304	<input type="radio"/>
	Y Angle	47,918	48,158	±1,000	0,240	<input type="radio"/>
	Z Angle	72,826	72,942	±1,000	0,116	<input type="radio"/>
Organization:		Part name:				
Operator:		Part number:				
E-mail:		Piece: piece 1				

26.9.2019

2/7

Sivutörmäyssuojan vertailu

Tässä liitteessä on käyty läpi sääntömääräisiä sivutörmäyssuojia ja vertaillaan niiden ominaisuuksia törmäystilanteessa.

Roll Cage´s side impact structure FEM-Analysis for R8 1:1 Race car



Joonas Ikonen
Mechanical Designer
Revision Tech Oy
Jäähdytintie 26 A
00770 Helsinki Finland
8.1.2019

Summary

R8 1:1 Team is building new race car for 2019 World Time Attack PRO -AM – class and Time Attack Finland Unlimited-class. This analysis will compare different construction of side impact structures.

Table of contents

Summary	Page 2
Introduction	Page 3
Rules	Page 3
R8 1:1 Side impact structure	Page 5
CAMS Regulation side impact structure	Page 6
FIA Regulation side impact structure	Page 7
Basic information of FEM	Page 8
Results	Page 9

Introduction

Roll Cages has been designed regarding FIA Appendix J regulations and CAMS Schedule J 2019.

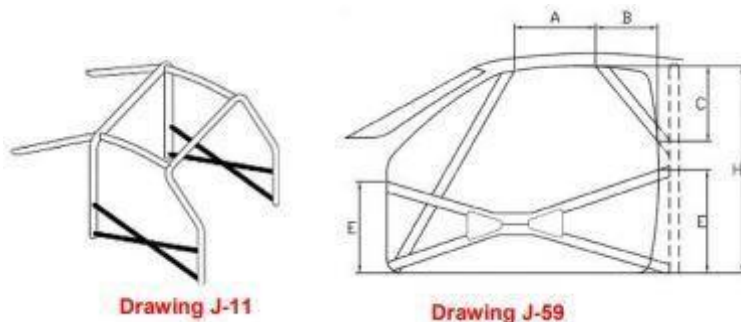
This Fem analysis includes comparisons between 3 types of side impact structures. We wanted to prove stiffness of different constructions on two different impact case: Side impact and front impact. *In this analysis there will be calculations of rule approved construction. Those will be references to our design.*

Side impact structure is one of safety equipment of roll cages and it will protect driver during the impact.

Rules

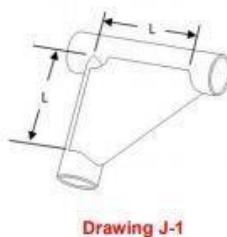
Regarding CAMS Schedule J 2019 Rule 12.3 (vi):

" In the case of door bars in the form of an "X" (Drawing J-11) it is mandatory that this joint be reinforced by two gussets in accordance with Article 2.15 (see Drawing J-59). It is recommended that the "X" be formed by two continuous bars which are joined in the center, in which case a gusset reinforcement must be fitted"



2.15 GUSSET (DRAWING J-1):

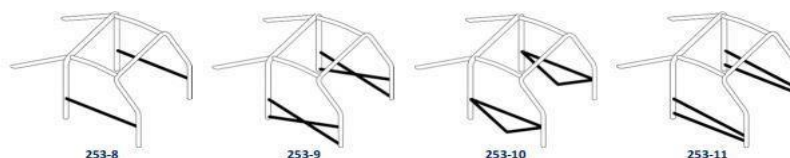
A reinforcement, made from sheet steel of not less than 1.0mm thick, formed to a U-shape and welded to a bend or junction. The dimension (L) shall be between two and four times the diameter of the larger of the tubes joined.



Regarding FIA Appendix J 8.3.2.1.2:

" In the case of doorbars in the form of an "X" (Drawing 253-9), it is recommended that the lower attachment points of the cross-struts be fixed directly onto the longitudinal member of the bodyshell/chassis and that at least one part of the "X" be a single- piece bar"

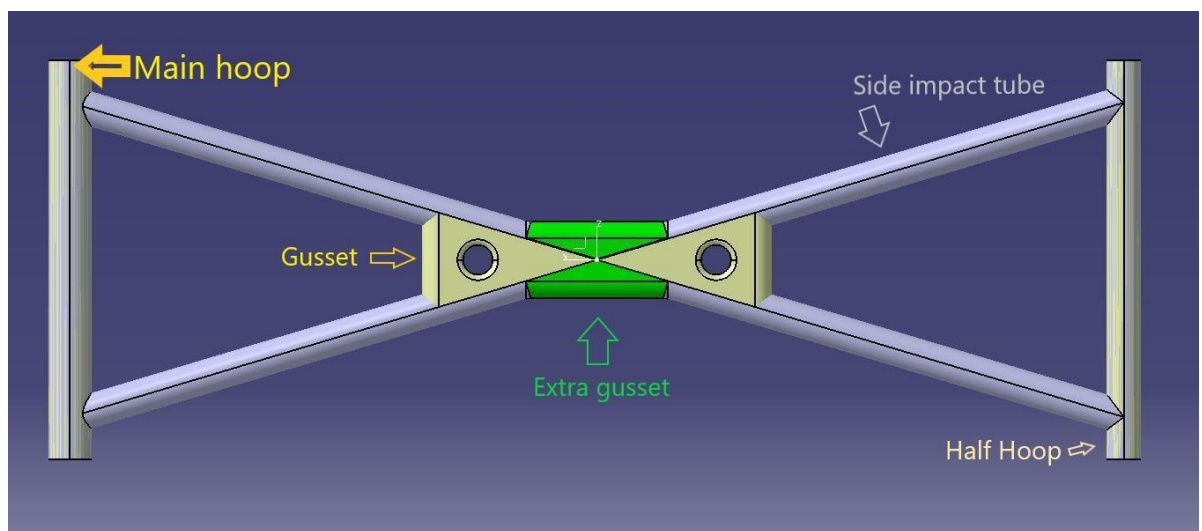
Annexe J / Appendix J – Article 253-8



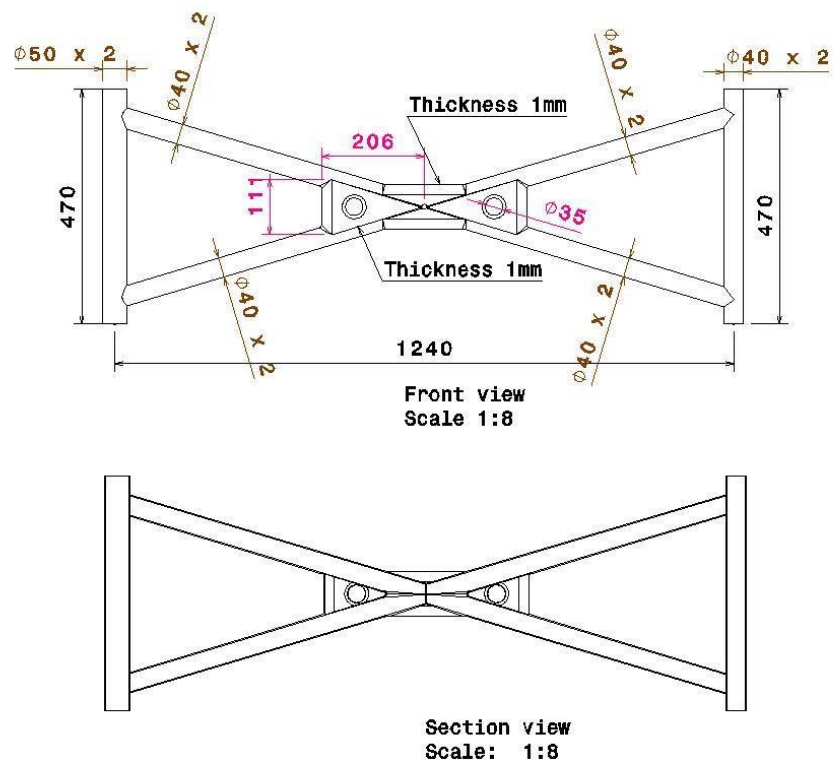
R8 1:1 Side impact structure

R8 1:1 side impact structure has been designed using 4 steel tubes. Regarding previous mentioned rules there is recommended to use one full length tube or two bended tubes.

As by rule there need to be two reinforcement gussets adding more stiffness to structure. In our structure we will use 4 reinforcement gussets. Why we are using this kind of design is because it is easier for us to manufacture and it is possible to weld parts together on welding table with proper welding jig. Which increase the quality of welding seams.



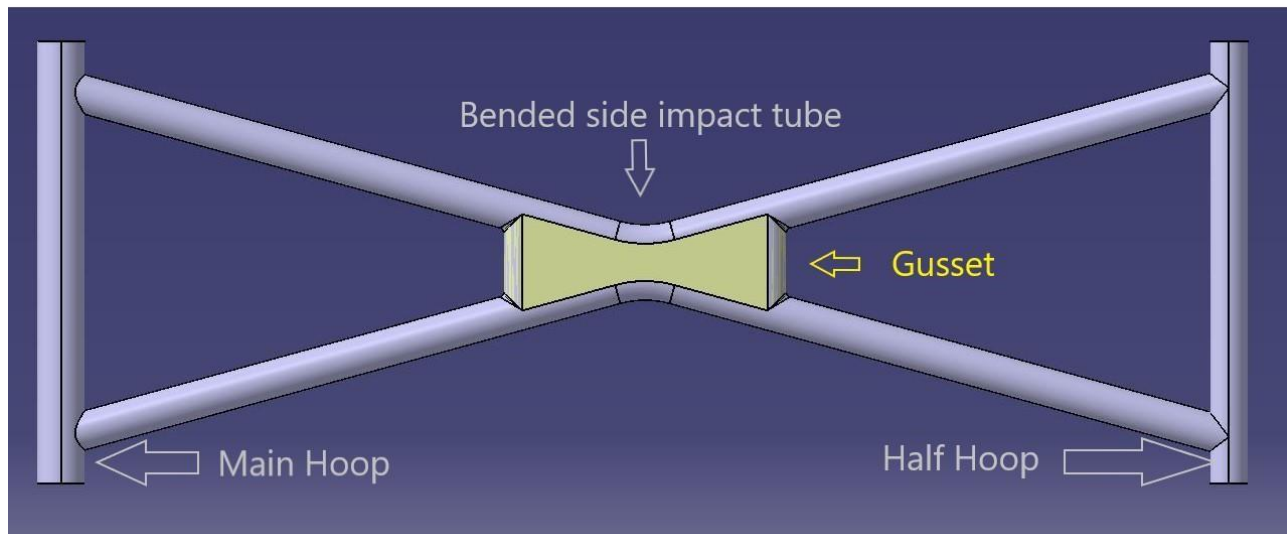
R8 1:1 Side Impact Structure CAD-model



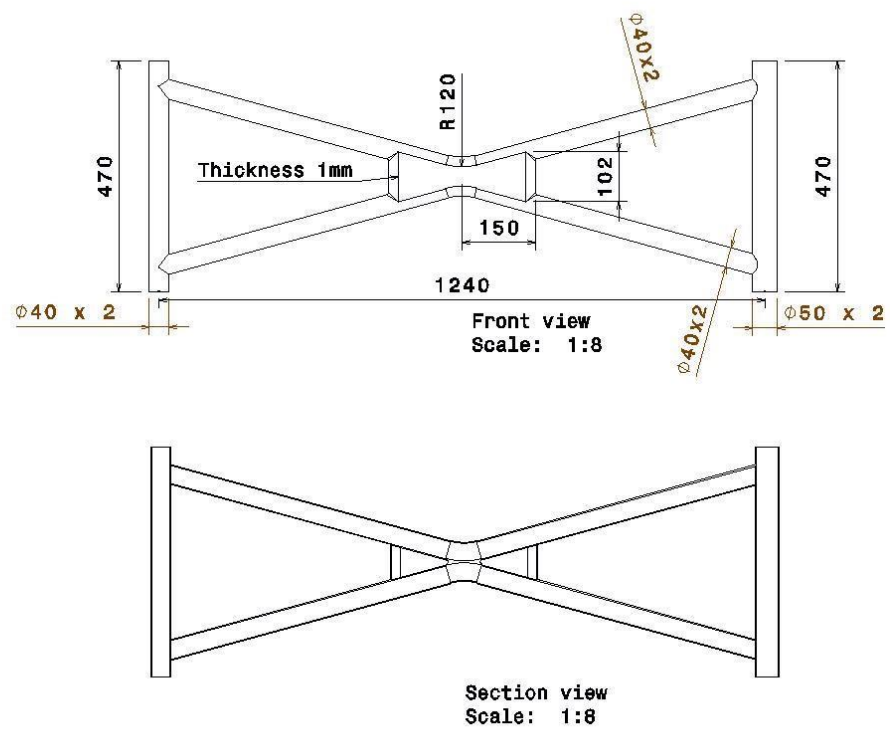
R8 1:1 Side Impact Structure drafting

CAMS Regulation side impact structure

CAMS Regulation side impact structure includes two bended continuously full-length tube and reinforcement gusset. Bended tubes will be welded together on the contact surfaces.



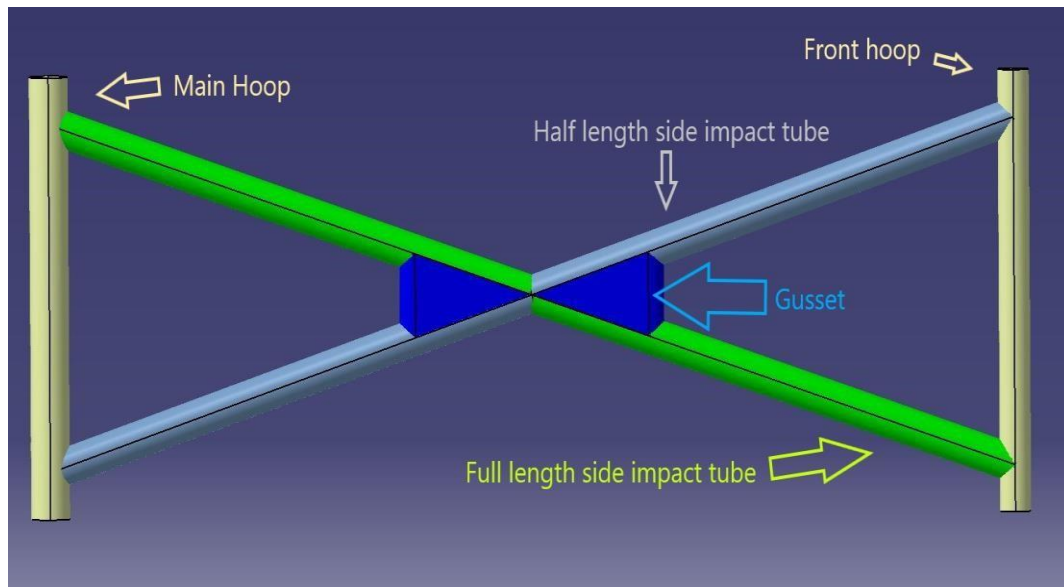
CAMS Regulation side impact structure CAD - model



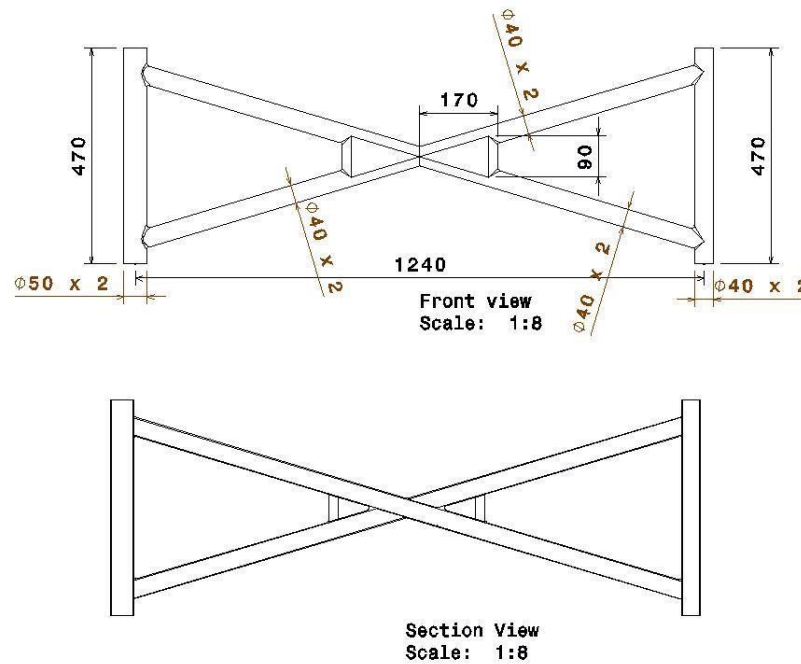
CAMS Regulation side impact structure drafting

FIA Regulation side impact structure

FIA regulation side impact structure has been made one continuously full-length steel tube and two half-length steel tube. Tubes will be welded together. Structure includes reinforcement gussets.



FIA regulation side impact structure CAD-model



FIA-regulation side impact structure drafting

Basic information of FEM

Material: e235 Steel tube (tensile strength minimum 350Mpa)

Coordinates: x = longitudinal + rear direction
y = lateral + Right direction
z = Up +

Force : side impact 10000N Y- and front impact 10000N X+

Force location:

Side impact : Middle of side impact structures cross-section 10mm diameter area.

Front impact : ends of the "half hoop"

Clamping style : Side impact : Ends of "hoops"

Front impact : Ends of the "main hoop"

Nodes and elements :

Size 2mm and absolute sag 0,2mm, Element type : linear *FEM – calculations and CAD-models have been made with CATIA V5-6R2014 – software.*

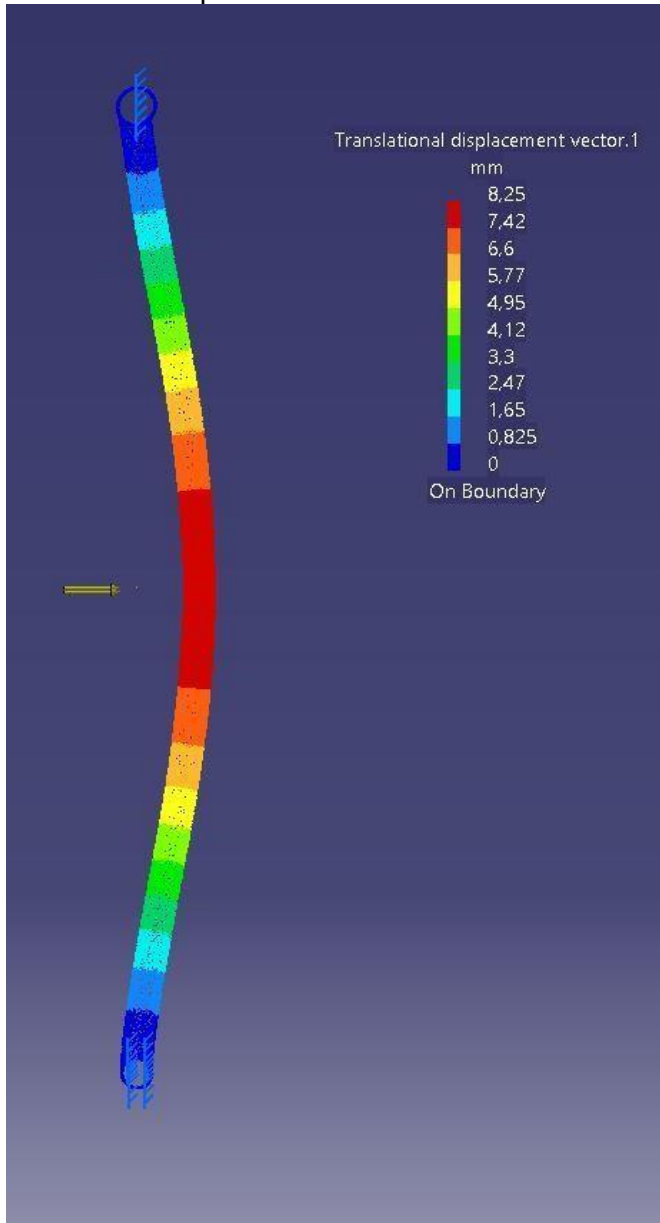
On side impact simulations force will applied center of the structure. Force and the area is unlike what real side impact will actually is, but for this simulation it is more important to have same calculating method for every construction. For that reason, we are apply to compare results.

Results:

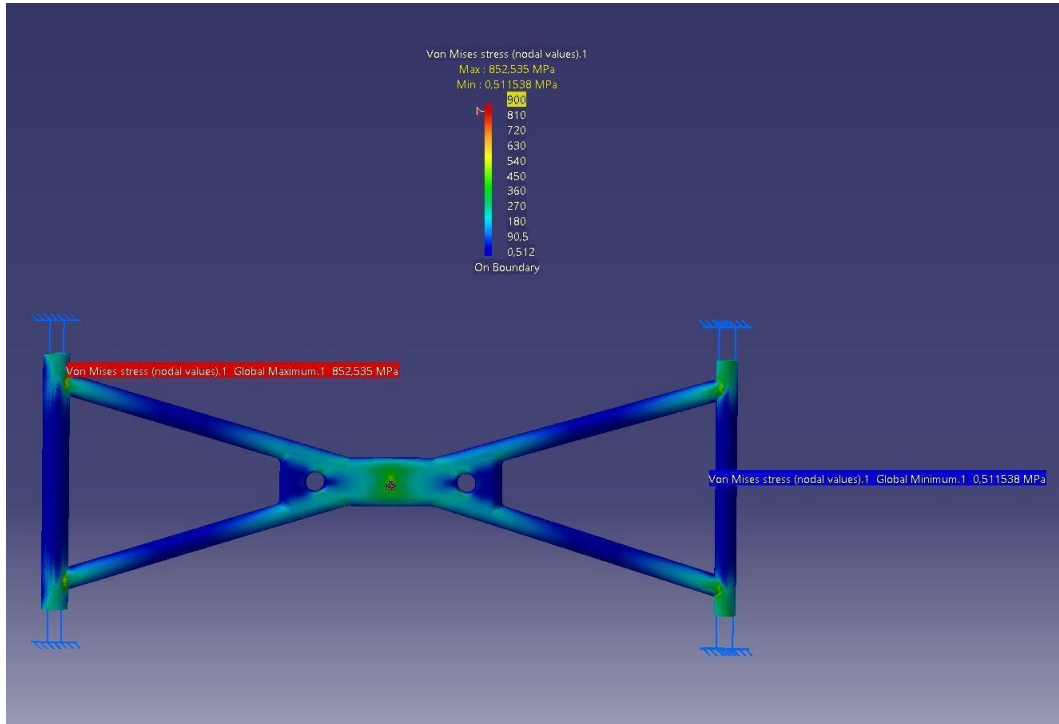
Displacement of side impact structure			
	R8 1:1	CAMS	FIA
Side Impact 10KN Y-	8,25mm	8,74mm	9,06mm
Front Impact 10KN X+	0,38mm	0,39mm	0,39mm

Von Mises Stress was mostly the same of all construction. There was peak forces middle of CAMS regulation side impact structure. CAMS structure got hollow area between gusset and tube cross-section. That hollow section is not effect the overall displacement of CAMS side impact structure.

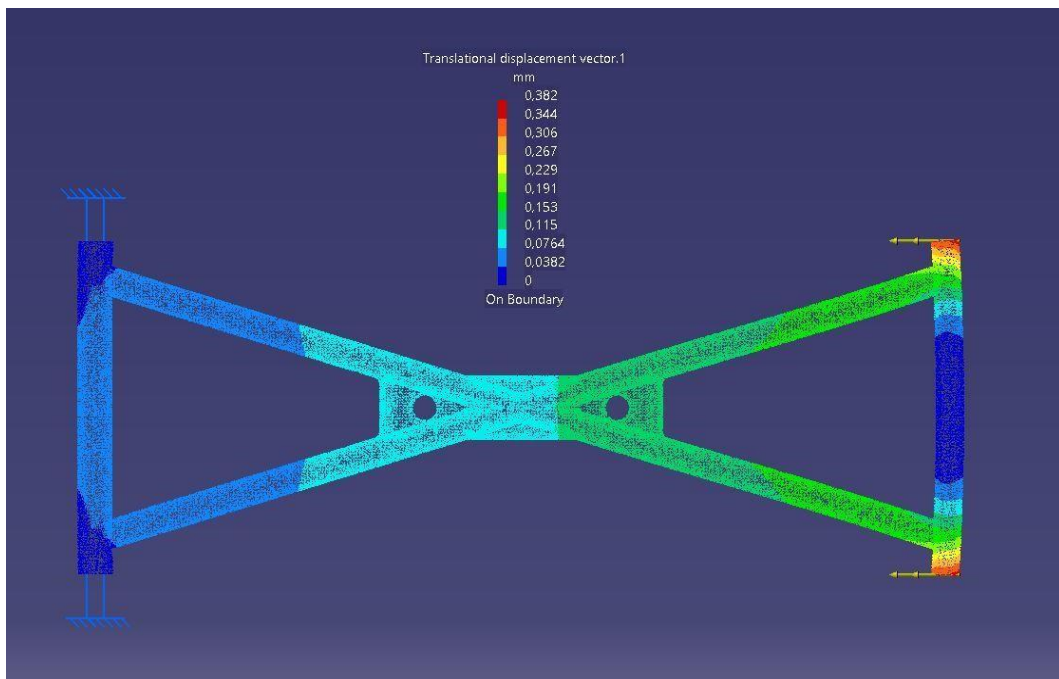
R8 1:1 Side Impact Structure



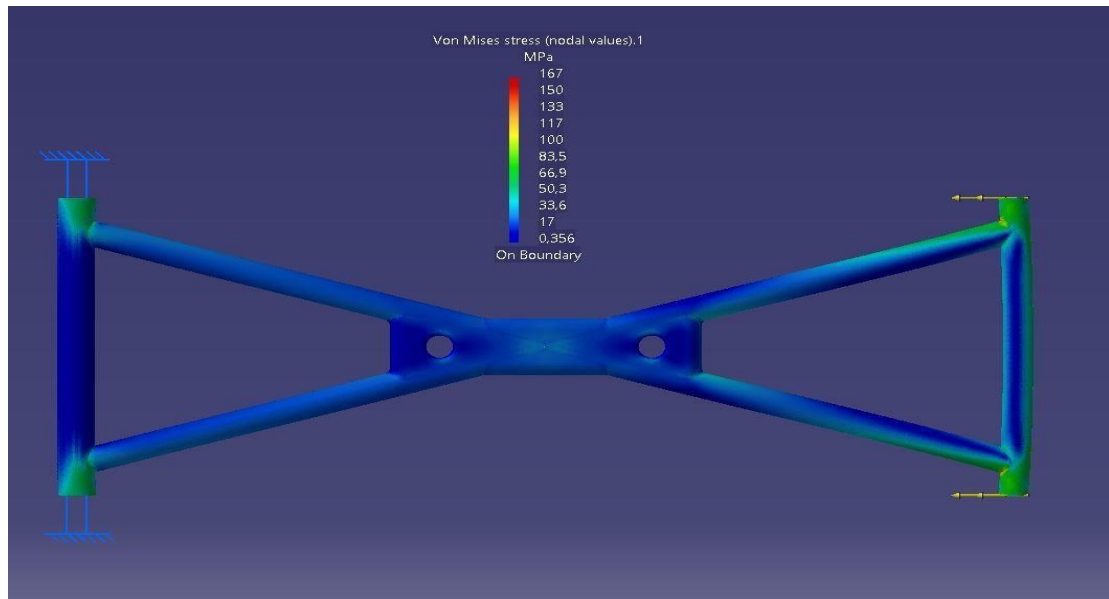
Displacement during side impact



Von Mises Stress during side impact

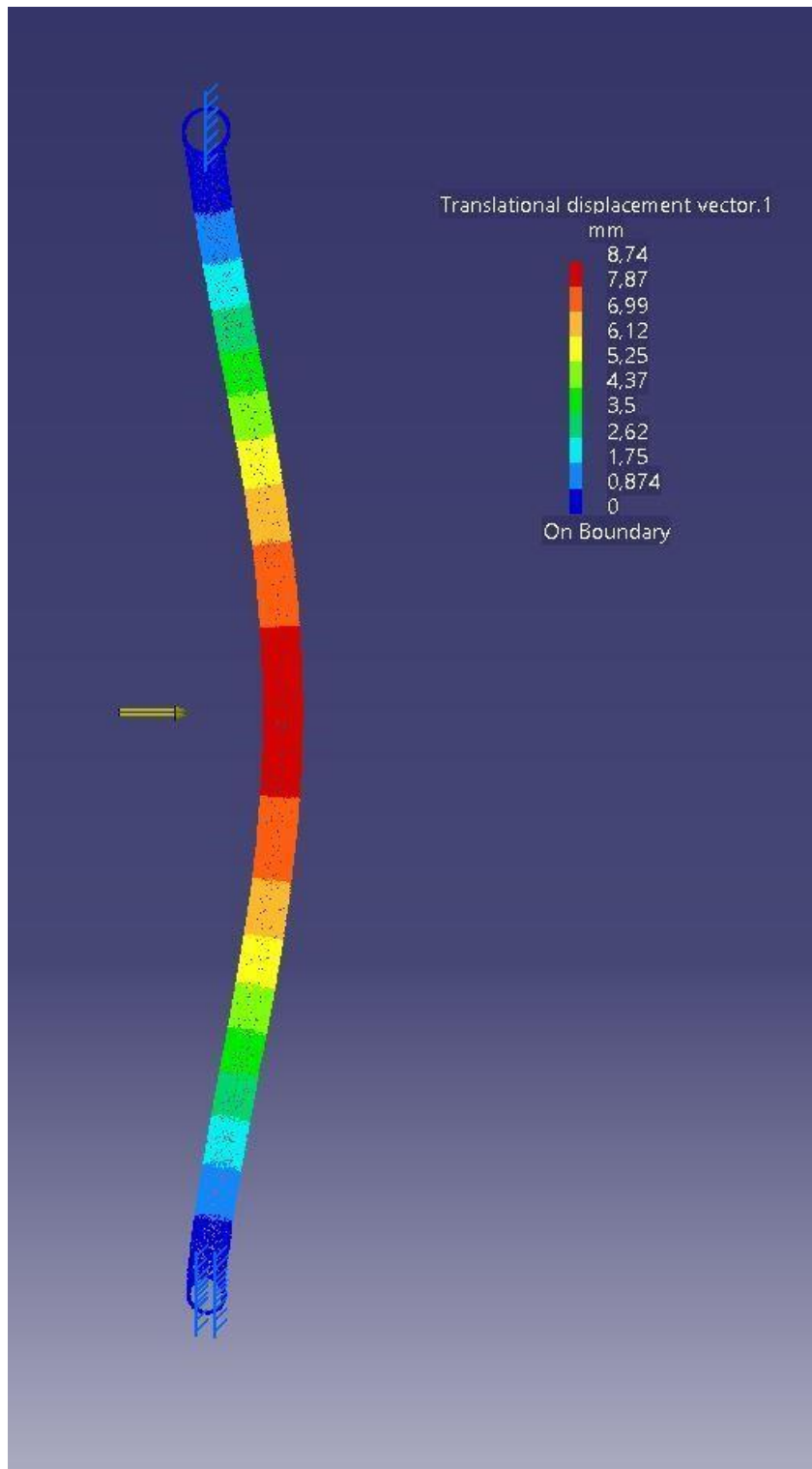


Displacement during front impact

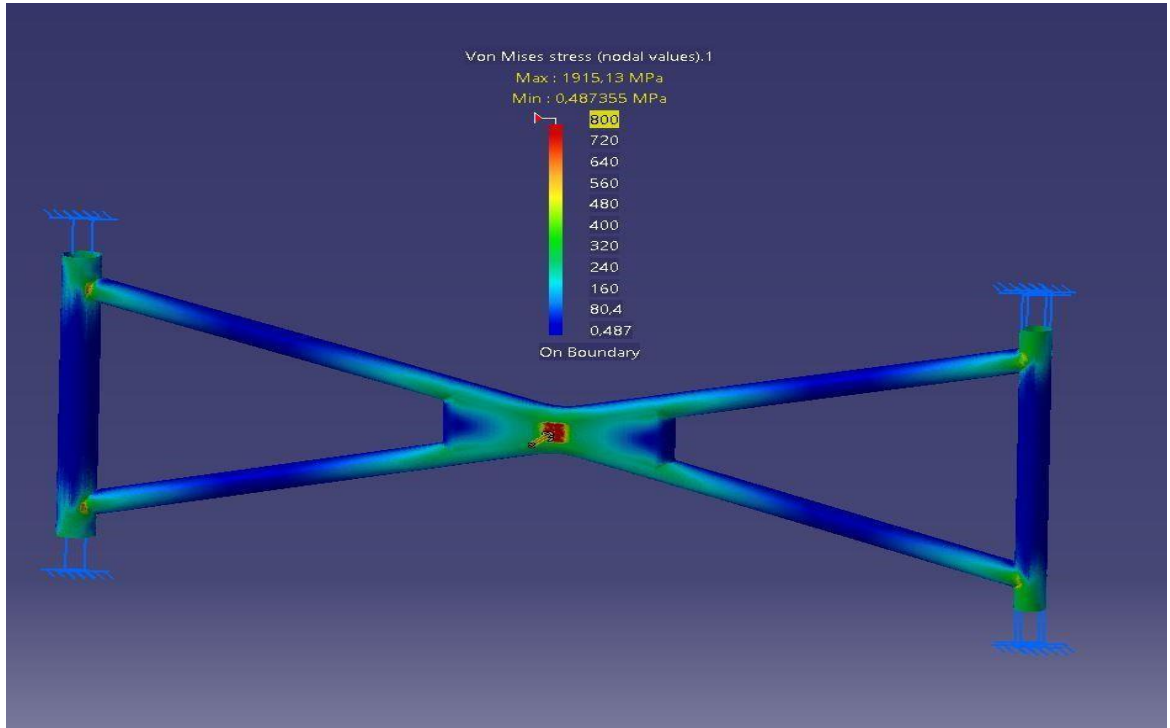


Von mises stress during front impact

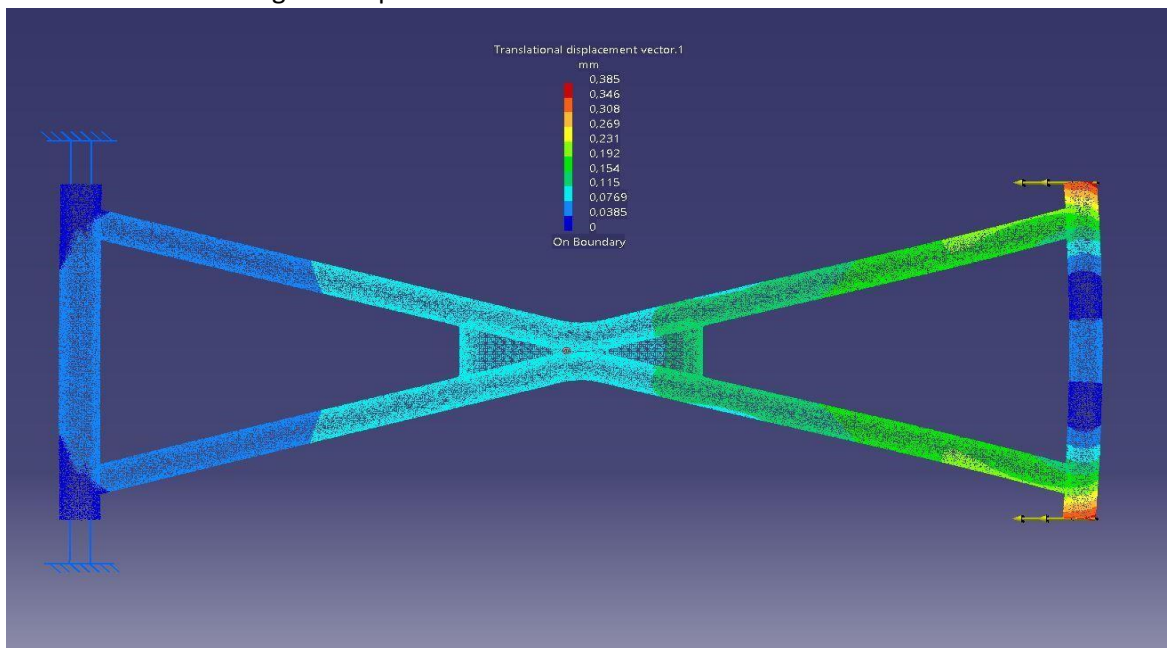
CAMS Regulation Side impact Structure



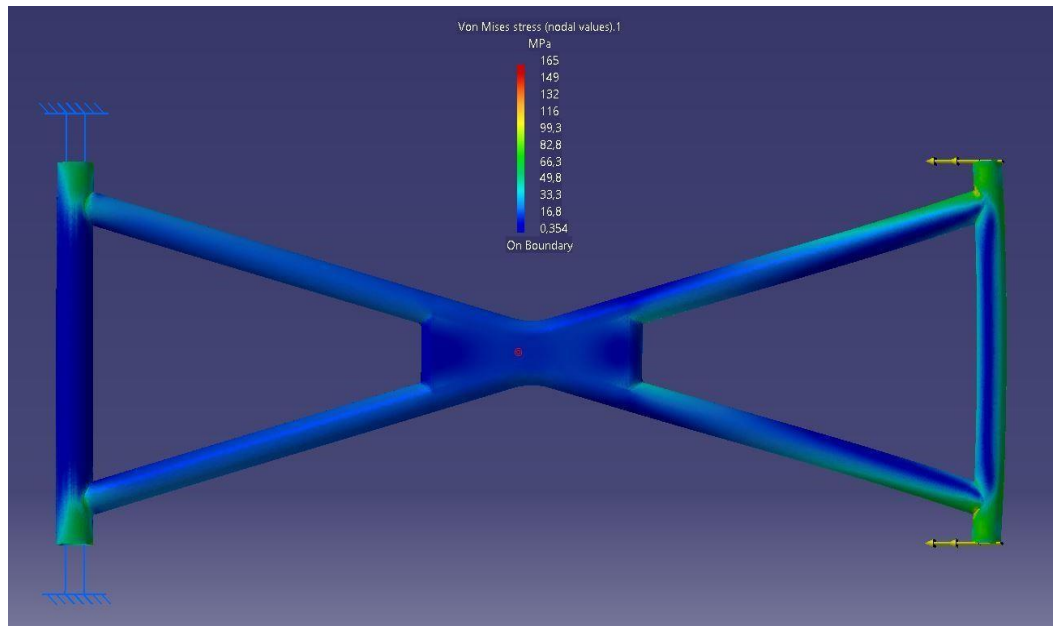
Displacement during side impact



Von mises stress during side impact

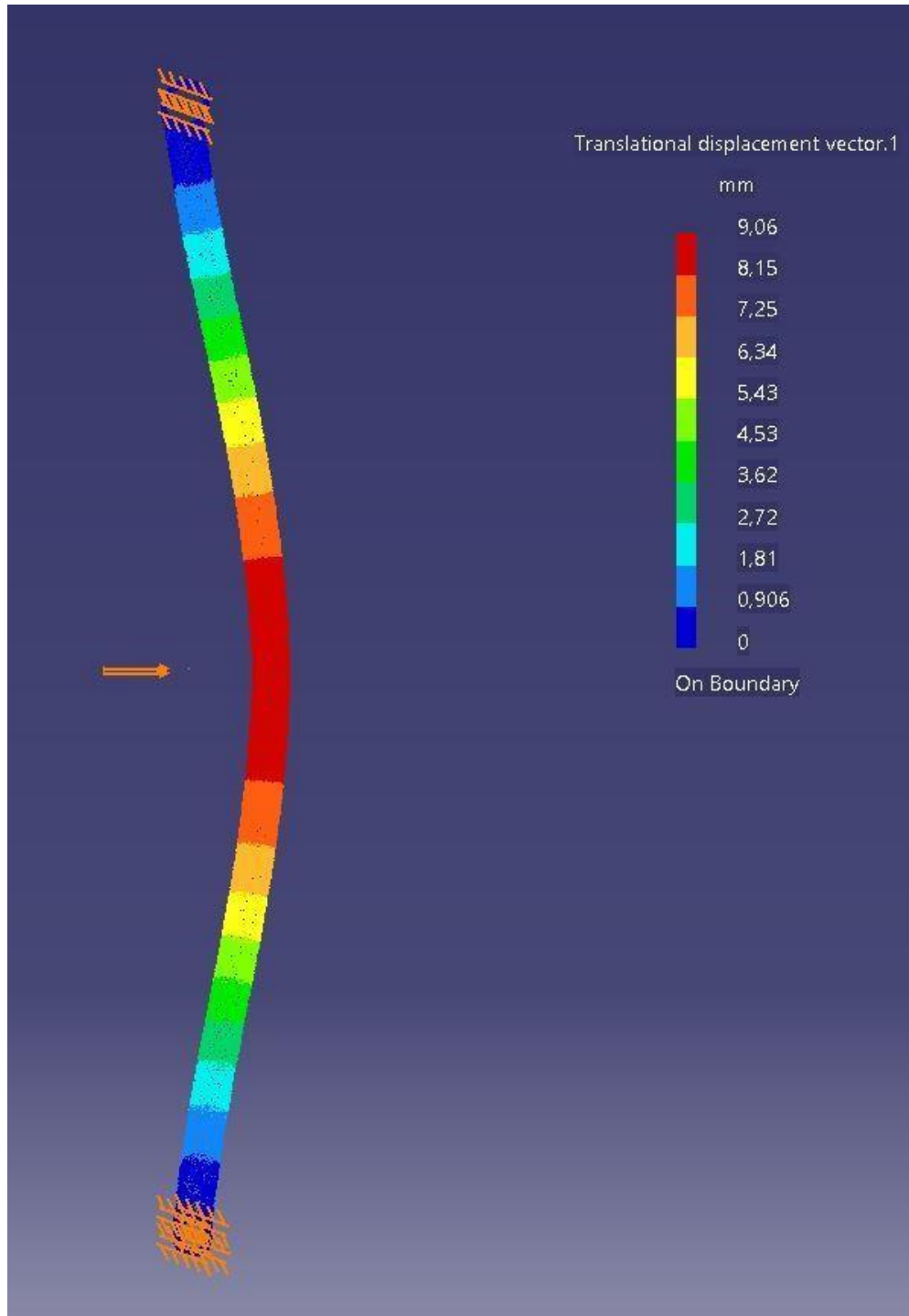


Displacement during front impact

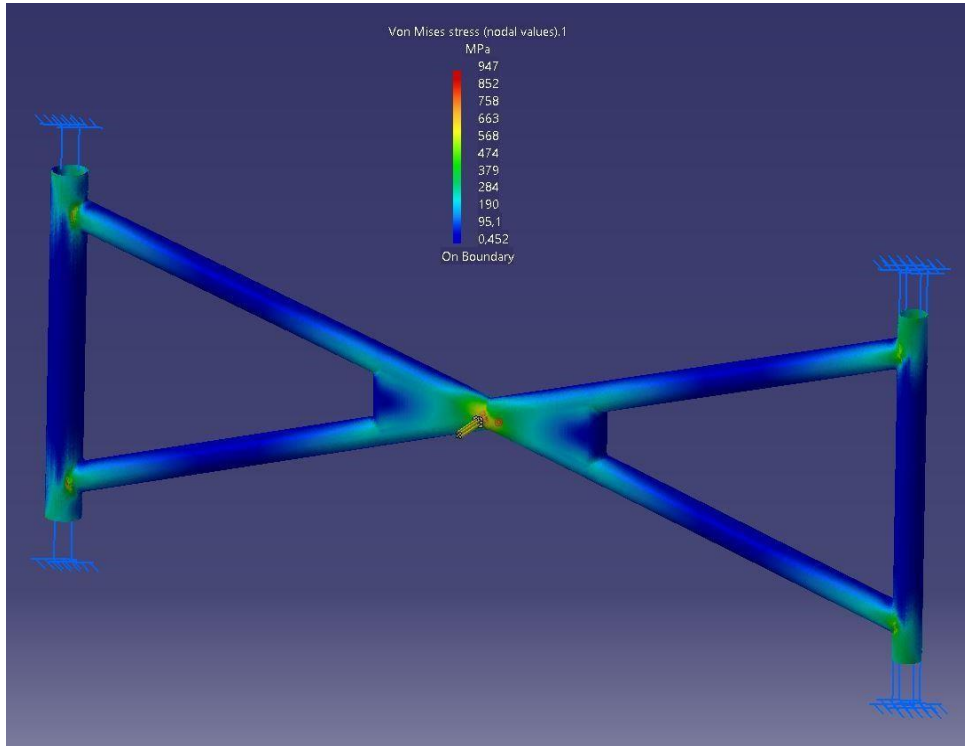


Von mises stress during front impact

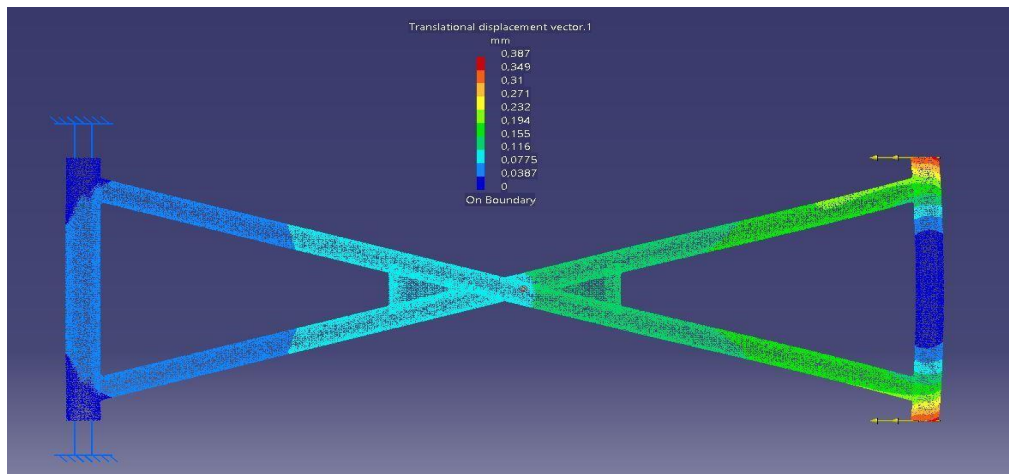
FIA regulation side impact structure



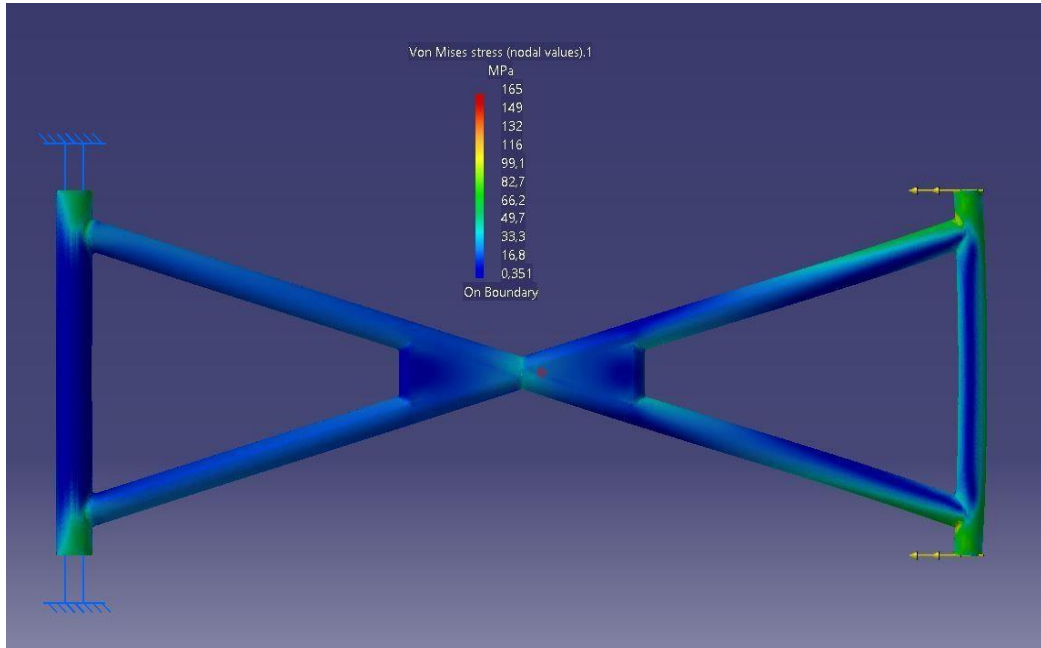
Displacement during side impact



Von Mises Stress during side impact



Displacement during front impact



Von Mises Stress during front impact

Conclusion

For this analysis we have results for three different side impact structure. Comparing results, we can say that our side impact structure design is stiffer than rule regulations. Displacement is lower on both impact cases.