

# Turvakehikon suunnittelu

Otto Koliseva

OPINNÄYTETYÖ  
Joulukuu 2019

Ajoneuvotekniikka  
Työkonetekniikka

## TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Ajoneuvotekniikka  
Työkonetekniikka

KOLISEVA, OTTO:  
Turvakehikon suunnittelu

Opinnäytetyö 48 sivua, joista liitteitä 5 sivua  
Joulukuu 2019

---

Tässä opinnäytetyössä tarkoituksena oli perehtyä ralliauton turvakehikon suunnitteluun ja 3D-mallinnukseen sekä tarkasteluun FEM-ohjelmistolla. Työn tavoitteena tutkia eroja muutamien erilaisten turvakehikkovariaatioiden ja putkiprofiileiden eroja ja luoda tulosten pohjalta kevyt ja kestävä turvakehikko FIN-R 2WD -luokan Renault Clioon. Turvakehikon suunnittelussa jouduttiin ottamaan huomioon AKK:n teknisten sääntöjen asettamat yleiset vaatimukset turvakehikolle sekä kohdeajoneuvon ja luokan aiheuttamat lisävaatimukset.

Turvakehikosta luotiin kolme erilaista variaatiota AKK:n teknisten sääntöjen mukaisesti. 3D-mallit luotiin Autodesk Inventor 2019 -ohjelmistolla ja niiden analysointi tehtiin Ansys 2019 R3 -ohjelmistolla. Analysoinnin pohjana käytettiin kuvitteellisia törmäystilanteita ja niissä syntyviä voimia. Voimien kehikoihin aiheuttamia muodonmuutoksia ja jännityksiä vertailtiin eri variaatioiden välillä ja maksimiarvot taulukoitiin analysoinnin helpottamiseksi.

Kehikon eri variaatioiden analysoinnin ja johtopäätösten perusteella valikoitiin paras variaatio toteutettavaksi kohdeajoneuvoon. Kehikon valinta painottui vahvasti kestävyteen, mutta myös kehikon paino ja valmistustekniset seikat otettiin huomioon.

## **ABSTRACT**

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Tampere University of Applied Sciences  
Vehicle engineering

KOLISEVA, OTTO:  
Roll cage designing

Bachelor's thesis 48 pages, appendices 5 pages  
December 2019

---

The object of this thesis was to design a roll cage for a rally car. One part of this thesis was to produce a few 3D models of the roll cage and to compare them in a FEM software.

Roll cage was developed to meet technical regulations of AKK Motorsport. It was designed to fit in model year 2005 Renault Clio.

3D models were produced with Autodesk Inventor 2019 software and Ansys 2019 R3 was used as a FEM software. There were three different variations made for the comparison. Four different imaginary collisions were simulated in FEM software to get good overall picture of differences between the variations. Safety and light weight were the two main features to focus when comparing the different variation of roll cages.

After the comparison and analysing the results the best variation was chosen to produce in real car. After all safety was the major factor while making the choice but weight and manufacturing process were also taken count.

---

Key words: roll cage, rally car, 3D model

## SISÄLLYS

1	JOHDANTO .....	6
2	TEORIA .....	7
3	SÄÄNNÖT .....	8
	3.1 Pakolliset lisärakenteet .....	9
	3.1.1 Diagonaalituet.....	9
	3.1.2 Oviputket .....	10
	3.1.3 Kattoputket .....	10
	3.1.4 Tuulilasipilarin vahvike.....	11
	3.1.5 Kulmavahvikkeet .....	11
	3.2 Valinnaiset lisärakenteet .....	12
	3.3 Putkien materiaali.....	14
4	TURVAKEHIKON SUUNNITTELU.....	15
5	FEM-ANALYSOINTI .....	20
	5.1 Isku etukulmaan .....	22
	5.2 Isku sivulle .....	26
	5.3 Isku tuulilasin yläkulmaan .....	31
	5.4 Isku tuulilasin yläreunaan.....	35
	5.5 Yhteenveto.....	40
6	POHDINTA .....	42
	LÄHTEET.....	43
	LIITTEET .....	44
	Liite 1. Mittauspöytäkirja .....	44

**ERITYISSANASTO**

Turvakaari	Molemmista päistään kiinnitetty putkirakenne
Turvakehikko	Turvakaarista koostuva kehikko, jonka tarkoituksena estää auton painumista kokoon ja suojata kuljettajia törmäystilanteessa
Pääkaari	Etuistuinten takapuolella kulkeva putki, joka kiertää poikittain auton puolelta toiselle mahdollisimman lähellä auton B-pilarin ja katon muotoa seuraten.
Sivukaari	Auton A-pilarin alareunasta pilaria mahdollisimman hyvin seuraten ja B-pilaria mukaillen takaisin alas kiertävä putki
Puolisivukaari	Kuten sivukaari, mutta päättyy pääkaareen B-pilarin yläpäässä
Etukaari	Auton A-pilareita ja tuulilasin yläreunaa mahdollisimman hyvin seuraten auton puolelta toiselle kiertävä putki
FEM	Tietokoneavusteinen lujuuslaskenta (finite element method)
AKK	Autourheilun kansallinen kattojärjestö
FIN-R 2WD	AKK:n teknisissä säännöissä määritelty 2-vetoisten kilpa-autojen luokka

## 1 JOHDANTO

Tässä opinnäytetyössä on tarkoituksena perehtyä AKK:n alaisiin sarjoihin soveltuvan ralliauton turvakehikon suunnittelun ja analysointiin FEM-ohjelmistolla. AKK:n teknisten sääntöjen perusteella luodaan muutamasta kohdeajoneuvoon soveltuvasta turvakehikosta 3D-mallit, joiden eroja tutkitaan FEM-ohjelmistolla. Työssä myös perehdytään sääntöjen mukaisten putkiprofiileiden eroihin. Turvakehikko on ralliauton yksi tärkeimmistä turvavarusteista, joten tavoitteena on luoda mahdollisimman kestävä kehikko, mutta samalla kiinnittää huomiota myös kehikon keveyteen, joka on auton suorituskyvyn kannalta kriittinen ominaisuus.

Kohdeajoneuvona tässä työssä on FIN-R 2WD -luokkaan soveltuva vuosimallin 2005 Renault Clio. Auton paino kilpailuvarustein on n. 1 000 kg. Turvakehikon suunnittelussa on otettava huomioon auton vuosimalliin ja luokkaan liittyvät tarkennukset AKK:n teknisissä säännöissä.

## 2 TEORIA

Rakenteen kestävyys ja sen turvakertoimeen vaikuttavat kolme päätekijää ovat rakenteen geometria, materiaali sekä siihen vaikuttavat kuormat (Bosch 2014, 41). Tässä työssä keskitytään näistä rakenteen geometrian kehittämiseen, sillä materiaali on määritelty säännöissä ja kehikkoon kohdistuviin voimiin ei esimerkiksi onnettomuustilanteessa pysty vaikuttamaan.

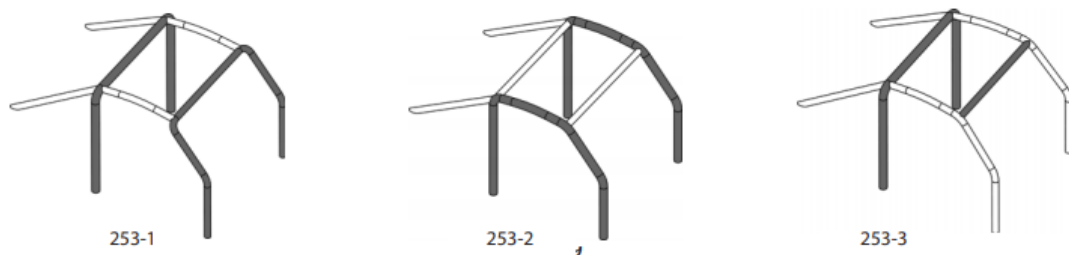
Kehikon rakenteita vertaillaan FEM-ohjelmistoa käyttäen. Kyseisessä ohjelmistossa kappaleesta muodostetaan verkko, joka koostuu pienistä esimerkiksi kolmion tai neliön mallisista elementeistä sekä näiden risteyskohdista eli solmuista. Tämän verkon pohjalta ohjelmisto suorittaa laskutoimituksia, joilla voidaan simuloida rakenteeseen kohdistuvia voimia ja sitä kautta tarkastella esimerkiksi siihen muodostuvia muodonmuutoksia ja jännityksiä. Tämäkin menetelmä kuitenkin sisältää aina jossain määrin epätarkkuustekijöitä. Tuloksien tarkkuuteen vaikuttaa tietokoneen laskentatarkkuus, sillä ohjelma pystyy käyttämään laskuissa vain rajallisen määrän desimaaleja. Ohjelma myös hieman yksinkertaistaa esimerkiksi muodonmuutoksissa tapahtuvaa liikettä muuttamalla solmukohtien todellisuudessa kaartuvan liikkeen useiksi pieniksi suoraviivaisiksi muutoksiksi. Näiden lisäksi myös käyttäjällä on suuri rooli lopputuloksen tarkkuuteen, sillä virheet käytettävän 3D-mallin tarkkuudessa tai rasitustilanteen määrittämisessä simulointia varten saattavat aiheuttaa isoja eroja todellisuuden ja laskennallisen tuloksen välille. (Bosch 2014, 172–173)

### 3 SÄÄNNÖT

Turvakehikolle on AKK Motorsport Oy:n sääntöjen liite J:ssä tarkat määräykset. Näihin sääntöihin viitataan jäljempänä termillä tekniset säännöt. Kehikon suunnittelu alkaa sääntöjen määräämien pakollisten kaarien ja hyväksytyjen putkityyppien tarkastelulla. Koska tämä työ liittyy omavalmistekehikkoon, tarkastellaan sääntöjä siitä näkökulmasta. Tässä työssä käsiteltävät sääntökohdat on rajattu kehikon putkirakenteisiin liittyviin sääntöihin. Niiden lisäksi turvakehikkoon liittyy muitakin sääntöjä esimerkiksi kehikon kiinnitykseen ja hitsaukseen liittyen, mutta ne ovat epäolennaisia tämän työn kannalta.

Tekniset säännöt antavat artikkelissa 8.3.1 kolme vaihtoehtoa perusrakenteelle, jonka pohjalta kehikko rakentuu. Perusrakenteen lisäksi kehikkoon tulee pakollisia lisärakenteita ja haluttaessa myös valinnaisia lisärakenteita on mahdollista tehdä. Perusrakenteen vaihtoehdot ovat (kuva 1):

- pääkaari + etukaari + 2 pitkittäistukea + 2 takatukea + 6 kiinnitys-  
jalkaa (kuva 253-1)
- 2 sivukaarta + 2 poikittaistukea + 2 takatukea + 6  
kiinnitys-  
jalkaa (kuva 253-2)
- pääkaari + 2 puolisivukaarta + 1 poikittaistuki + 2  
takatukea + 6 kiinnitys-  
jalkaa (kuva 253-3) (AKK:n tekniset säännöt  
2019, s. 320)



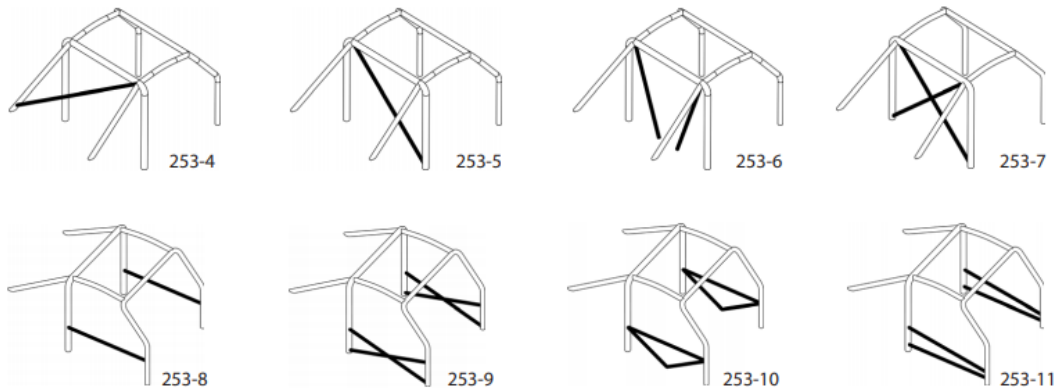
KUVA 1. Perusrakenteet (AKK:n tekniset säännöt 2019, 319)

Artiklan 253-8.3.1 mukaan pää-, etu- ja sivukaarien tulee seurata mahdollisimman lähellä korirakennetta ja niiden alaosassa saa olla vain yksi taivutus. Artiklan 253-8.2.3 mukaan pääkaari saa olla kallistettu korkeintaan 10° pystysuorasta ja sen tulee olla poikittaissuunnassa suorassa.



### 3.1 Pakolliset lisärakenteet

Perusrakenteen lisäksi on teknisten sääntöjen artiklassa 253-8.3.2.1 määritelty kuvan 2 mukaisia pakollisia lisärakenteita. Näiden määrään vaikuttavat auton luokitusvuosi ja ryhmä. Joidenkin lisärakenteiden osalta on olemassa useampia vaihtoehtoja toteuttaa pakolliset rakenteet.



KUVA 2. Pakollisia lisärakenteita (AKK:n tekniset säännöt 2019, 321)

Tässä tapauksessa on kyseessä FIN-R 2WD -luokan auto ja luokitusvuodeksi tulkitaan kansallisen lisäyksen mukaisesti katsastuskortin myöntämispäivämäärä eli 2019. Näiden perusteella teknisten sääntöjen mukaan pakollisiksi rakenteiksi määräytyvät kaksi diagonaalitukea, kaksi oviputkea molemmin puolin, kaksi kattoputkea, tuulilasipilarin vahvikkeet ja kulmavahvikkeet diagonaalitukien ja oviputkien keskiliitokseen sekä oviputkien ja tuulilasipilarin vahvikkeiden välille. (AKK:n tekniset säännöt 2019, s. 327)

#### 3.1.1 Diagonaalituet

Artiklan 253-8.3.2.1.1 mukaan jokin kuvassa 2 esitettyjen rakenteiden 253-4, 253-5 tai 253-6 mukaisista diagonaalituista on pakollinen ennen 1.1.2002 luokitelluissa autoissa. Näistä kaksi ensimmäistä vaihtoehtoa voidaan toteuttaa myös peilikuvana.

Tämän työn ajoneuvo on kuitenkin luokituspäivämäärältään tuon jälkeinen, joten artiklan 253-8.3.2.1.1 mukaan on käytettävä rakenteen 253-7 mukaisia dia-

gonaalitukia. Tukien yläpäiden kiinnitys on oltava 100 mm sisällä pääkaaren takatuen välisestä liitoksesta ja alapään kiinnitys korkeintaan 100 mm etäisyydellä pääkaaren kiinnitysjalasta. Diagonaalituet eivät saa olla taivutettuja.

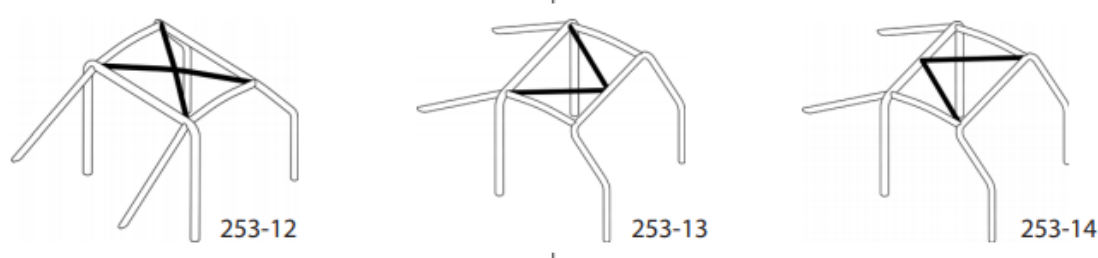
### 3.1.2 Oviputket

Teknisten sääntöjen artiklan 253-8.3.2.1.2 mukaan oviputkien oltava kuvan 2 rakenteiden 253-8, 253-9, 253-10 tai 253-11 mukaisia. Koska 1.1.2007 jälkeen luokitelluissa autoissa vaaditaan kaksi oviputkea molemmin puolin, ei rakennetta 253-8 voida käyttää tässä tapauksessa. Rakenteita voi halutessaan myös yhdistää. Oviputket on toteutettava samanlailla molemmin puolin.

Artiklassa 253-8.3.2.1.2 määrätään myös, että oviputken tulee sijaita mahdollisimman korkealla, mutta se ei kuitenkaan saa ylittää miltään kohtaa oviaukon puoliväliä (kuva 7, mitta E). Mikäli käytetään rakennetta 253-9, on ristikon toisen putken oltava yhtenäinen. Teknisten sääntöjen kansallisen lisäyksen mukaan oviputket saavat olla taivutettuja. (AKK:n tekniset säännöt 2019, 327)

### 3.1.3 Kattoputket

Kattovahvistuksien osalta määräykset löytyvät artiklasta 253-8.3.2.1.3. Tässä tapauksessa, koska auton luokitus on 1.1.2005 jälkeinen, on käytettävä jotakin kuvan 3 mukaisista rakenteista.

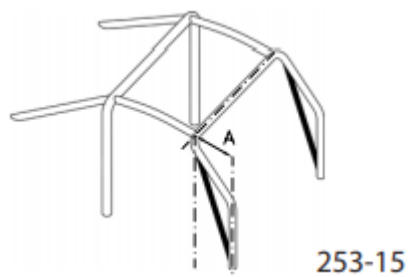


KUVA 3. Kattoputket (AKK:n tekniset säännöt 2019, 321)

Kattoputkien päiden on sijaittava 100 mm etäisyyden sisällä peruskehikon liitoksesta lukuun ottamatta rakenteiden 253-13 ja 253-14 V-kärkiä. V-kärjissä putkien etäisyys toisistaan saa olla korkeintaan 100 mm. Kattoputket saavat olla katon muotojen mukaan taivutettuja.

### 3.1.4 Tuulilasipilarin vahvike

1.1.2006 jälkeen luokiteltuihin autoihin on artiklan 253-8.3.2.1.4 mukaan on tehtävä kuvan 4 mukainen vahvikeputki. Mikäli kuvassa 4 esitetty A-mitta on alle 200 mm, ei vahvike ole pakollinen.

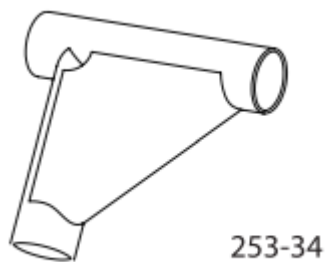


KUVA 4. Tuulilasipilarin vahvike (AKK:n tekniset säännöt 2019, 321)

Putkea saa taivuttaa korkeintaan  $20^\circ$ , mutta sivuprojektion on oltava suora. Vahvikkeen alapään kiinnityksen on sijaittava korkeintaan 100 mm etäisyydellä etu- tai sivukaaren kiinnitysjalasta. Yläpään kiinnitys saa sijaita korkeintaan 100 mm päässä etukaaren ja pitkittäistuen tai sivukaaren ja poikittaistuen liitoksesta. (AKK:n tekniset säännöt 2019, 321)

### 3.1.5 Kulmavahvikkeet

Artiklan 253-8.3.2.1.5 mukaan pääkaaren diagonaalien, oviputkien ja kattoputkien keskiliitos tulee vahvistaa kahdella kuvan 5 ja artiklan 253-8.2.14 mukaisella kulmavahvikkeella. Lisäksi tuulilasipilarin ja oviputken välinen liitos tulee vahvistaa kahdella vastavilla vahvikkeilla.

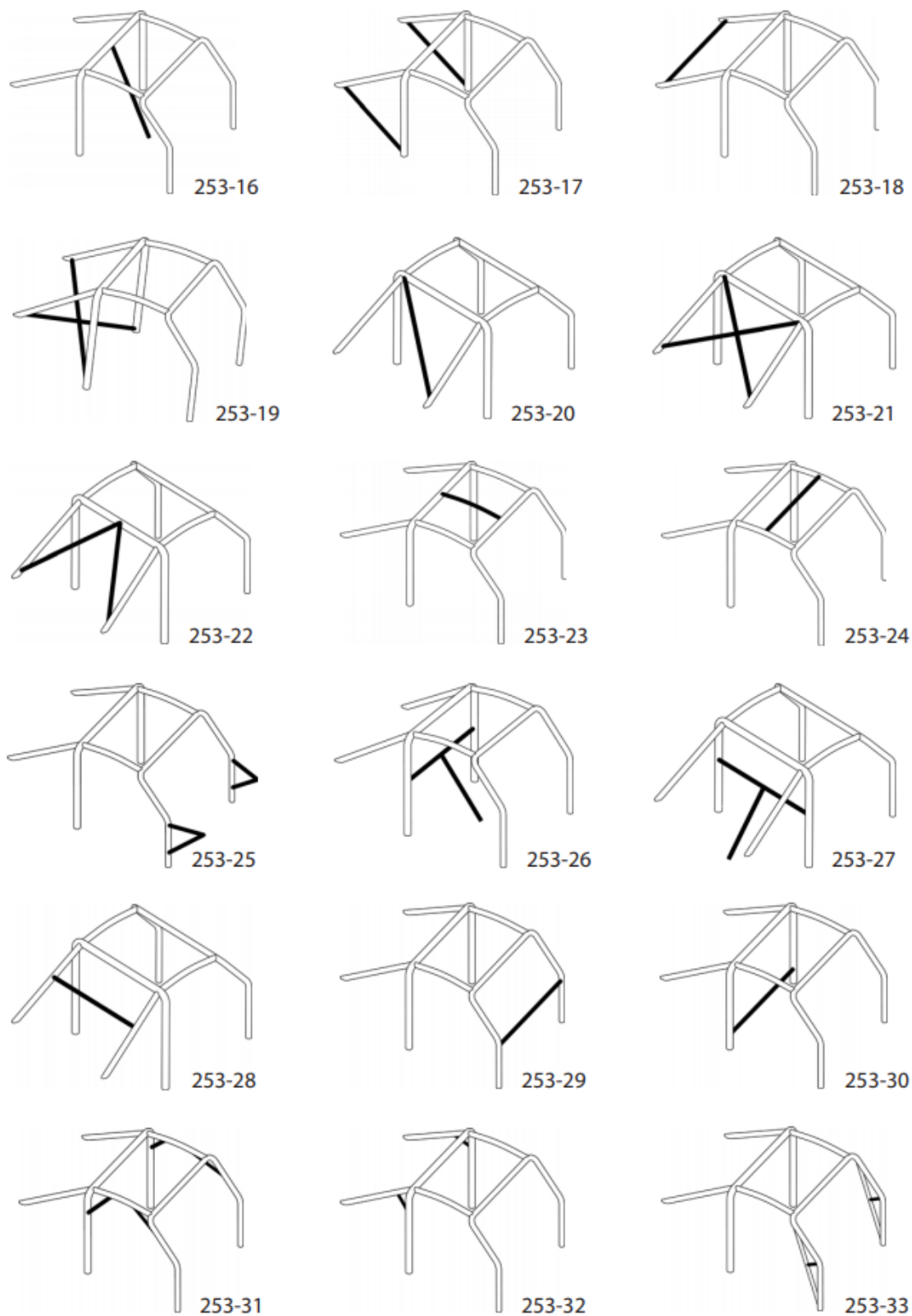


KUVA 5. Kulmavahvike (AKK:n tekniset säännöt 2019, s. 320)

Kulmavahvike tulee olla vähintään 1,0 mm vahvuisesta pellistä taivutettu ja mitoitettu siten, että putkea vasten olevat sivut ovat 2-4 kertaa paksuimman liitokseen tulevan putken halkaisijan pituiset. Putkien liitoskohtaan saa tehdä leikkauksen, jonka säde on korkeintaan 1,5 kertaa liitoksen paksuimman putken halkaisija. Vahvikkeen sivuille saa tehdä reiät, joiden suuruus on korkeintaan liitoksen paksuimman putken halkaisijan verran. (AKK:n tekniset säännöt 2019, 320)

### 3.2 Valinnaiset lisärakenteet

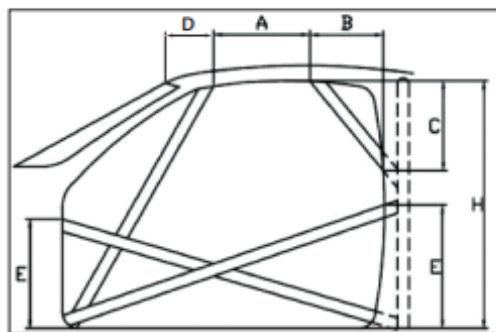
Teknisten sääntöjen artiklan 253-8.3.2.2. mukaan pakollisten rakenteiden lisäksi rakentajan halun mukaan voi kehikkoon lisätä kuvan 6 mukaisia rakenteita. Näitä saa käyttää yhdessä tai erikseen, mutta kuvassa 6 esiintymättömiä rakenteita ei saa käyttää. Poikkeuksena rakenne 253-17, jossa putkien etummainen liitoskohta voidaan nostaa oviputkien taaemman liitoksen tasolle. Myös rakenne 253-33 voidaan kuvasta poiketen asettaa samalle korkeudelle rakenteen 253-25 liitoskohdan kanssa.



KUVA 6. Valinnaiset lisärakenteet (AKK:n tekniset säännöt 2019, 323)

Valinnaisista lisärakenteista tulee huomioida, että artiklan 8.3.2.2.3 mukaan rakenteen 253-22 mukaiset diagonaalituet ovat pakolliset, mikäli käytetään katto-

putkissa rakennetta 253-14. Lisäksi kuvassa 7 on esitetty mittoja, joita tulee noudattaa rakenteen 253-31 mukaisten pääkaaren ja puolisivukaarten välisten vahvikkeiden mitoissa. Mitta A tulee olla vähintään 300 mm, mitta B korkeintaan 250 mm ja mitta C korkeintaan 300 mm. (AKK:n tekniset säännöt 2019, 322, 325)



253-49

KUVA 7. Määräviä mittoja (AKK:n tekniset säännöt 2019, 325)

### 3.3 Putkien materiaali

Teknisten sääntöjen artiklassa 8.3.3 on määritelty sallitut turvakehikossa käytettävät materiaalit. Putkien on oltava poikkileikkaukseltaan ympyrän muotoisia ja niiden on oltava kylmäviedettyä, saumatonta puhdasta hiilliterästä. Hiilen sallittu enimmäismäärä on 0,3 %, mangaanin 1,7 % ja muiden lisäaineiden 0,6 %. Materiaalin murtolujuus on oltava vähintään 350N/mm<sup>2</sup>. (AKK:n tekniset säännöt 2019, 326)

Pääkaaren tai rakennetta 253-2 (kuva 1) käytettäessä sivukaarien ja taaemman poikittaistuen on oltava vähintään 45x2,5 mm tai 50x2,0 mm kokoista putkea. Muiden putkien on oltava vähintään kokoa 38x2,5 mm tai 40x2,0 mm. Putkien taivutuksissa taivutussäde on oltava keskilinjalta mitattuna vähintään kolminkertainen putken halkaisijaan nähden. (AKK:n tekniset säännöt 2019, 326)

#### 4 TURVAKEHIKON SUUNNITTELU

Turvakehikon suunnittelu alkoi kohdeajoneuvon eli 2005 vuosimallin Renault Clion mittauksella. Autosta mitattiin tiettyjä kriittisiä pisteitä. Näitä olivat turvakehikon kiinnityspisteiden sijainti lattiassa sekä kohdat, joihin pää- ja sivukaarien taivutukset tulevat. Mittaukset suoritettiin rullamitalla sekä digitaalisella astemittalla (liite 1).

Mittausten ja sääntöihin tutustumisen jälkeen alkoi kehikon 3D-mallinnus Autodesk Inventor 2019 -ohjelmistolla. Putket mallinnettiin erillisinä osina, jotta eri variaatioiden välillä oli helppo muuttaa kokoonpanoa.

Tässä kohtaa oli myös tarpeen päättää käytettävien putkien koko. Vaihtoehtojen välillä kiinnostaa erityisesti erot massassa ja kestävydessä. Putkien massa saadaan selville tiheyden kaavasta (1) johtamalla, kun tiedossa on putken materiaalin tilavuus ja tiheys. Tiheys  $\rho$  on

$$\rho = \frac{m}{V}, \quad (1)$$

jossa  $m$  on massa ja  $V$  tilavuus (Karkela ym. 2011, 119). Putkien tilavuus taas saadaan johdetusta ympyrälieriön kaavasta (2), jossa putken ulkokehän lieriöstä vähennetään sisäkehän lieriön tilavuus. Putken tilavuus  $V$  on siis

$$V = V_u - V_s = \pi R^2 h - \pi r^2 h, \quad (2)$$

jossa  $R$  on putken ulkokehän säde,  $r$  sisäkehän säde ja  $h$  putken pituus. Putkien massaa verrattaessa voidaan tarkastella suhdetta

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{\rho V_1}{\rho V_2} = \frac{\rho(\pi R_1^2 h - \pi r_1^2 h)}{\rho(\pi R_2^2 h - \pi r_2^2 h)} = \frac{R_1^2 - r_1^2}{R_2^2 - r_2^2}. \quad (3)$$

Näin ollen 40x2 mm putken massan suhteeksi 38 mm x 2,5 mm putken massaan saadaan kaavalla (3)

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{R_1^2 - r_1^2}{R_2^2 - r_2^2} = \frac{(20 \text{ mm})^2 - (18 \text{ mm})^2}{(19 \text{ mm})^2 - (16,5 \text{ mm})^2} = 0,8563.$$

Tästä havaitaan, että 40x2 mm profiilin putki on noin 14,4% kevyempää kuin 38x2,5 mm putki. Pääkaaren putkivaihtoehtoja verrattaessa putken 50x2 mm massa suhteessa 45x2,5 mm putkeen kaavalla (3) laskettuna on noin 0,9035, joten suuremman halkaisijan putki on noin 9,7 % kevyempää.

Putkien kestävyysvertailuun hyviä mittareita ovat neliömomentti ja taivutusvastus, joka vaikuttaa esimerkiksi normaalijännityksen syntyyn putkea taivutettaessa. Putken poikkileikkaus vastaa ympyräengasta, jonka taivutusvastus  $W$  voidaan laskea kaavalla

$$W = \frac{\pi(D^4 - d^4)}{32D}, \quad (4)$$

jossa  $D$  on putken ulkokehän halkaisija ja  $d$  sisäkehän halkaisija. Näin ollen kaavaa (4) käyttäen 40 mm x 2 mm kokoisen putken taivutusvastus on

$$W = \frac{\pi(D^4 - d^4)}{32D} = \frac{\pi[(0,04 \text{ m})^4 - (0,036 \text{ m})^4]}{32 \cdot 0,04 \text{ m}} = 2,16^{-6}.$$

Vastaavasti kaavaa (4) käyttäen 38x2,5 mm putkelle saadaan neliömomentiksi  $2,32^{-6}$ , 45x2,5 mm putkelle  $3,36^{-6}$  ja 50x2 mm putkelle  $3,48^{-6}$ . (Mäkelä, Soininen, Tuomola & Öistämö, 2015, 140, 145)

Putken neliömomentti  $I$  voidaan laskea kaavalla

$$I = \frac{\pi(D^4 - d^4)}{64}, \quad (5)$$

jossa  $D$  on putken ulkokehän halkaisija ja  $d$  sisäkehän halkaisija. Näin ollen kaavaa (5) käyttäen 40 mm x 2 mm kokoisen putken neliömomentti on

$$W = \frac{\pi(D^4 - d^4)}{64} = \frac{\pi[(0,04 \text{ m})^4 - (0,036 \text{ m})^4]}{64} = 4,32^{-8}.$$

Edelleen kaavaa (5) käyttäen 38x2,5 mm putkelle saadaan neliömomentiksi  $4,41^{-8}$ , 45x2,5 mm putkelle  $7,56^{-8}$  ja 50x2 mm putkelle  $8,70^{-8}$ . (Mäkelä ym. 2015, 140, 145)

Kun tarkastellaan taivutuksen yhteydessä syntyvän normaalijännityksen  $\sigma_{\max}$  kaavaa

$$\sigma_{\max} = \frac{M}{W},$$



(6)

jossa  $W$  on taivutusvastus ja  $M$  taivutusmomentti, tai IV-tyyppin nurjahdusvoiman  $F_n$  kaavaa

$$F_n = \frac{4\pi^2 EI}{l^2}, \quad (7)$$

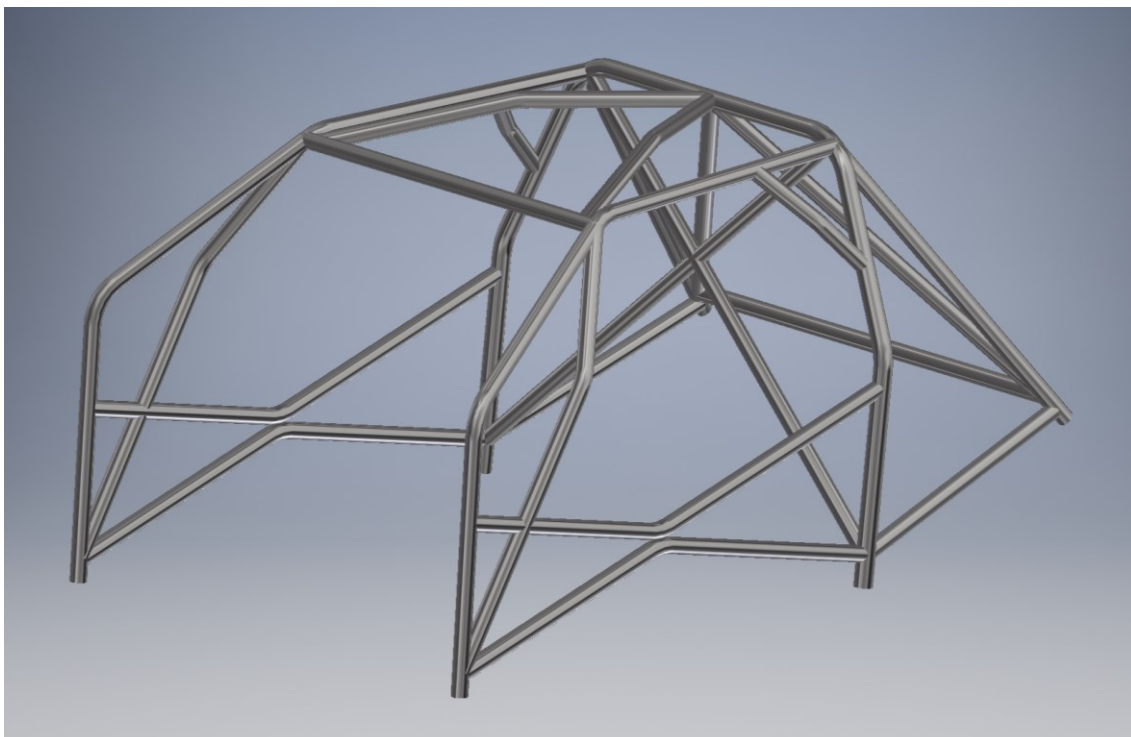
jossa  $E$  on kimmokerroin,  $I$  neliömomentti ja  $l$  pituus, voidaan todeta, että muiden muuttujien pysyessä vakiona suuremman taivutusvastuksen ja neliömomentin omaava putki vaatii nyrjähtääkseen suuremman puristuksen ja taipueensa siihen kohdistuva leikkausjännitys jää pienemmäksi. (Mäkelä ym. 2015, 140, 142)

Pienemmän kokoluokan putkiprofiileiden välillä joutuu tekemään ominaisuuksien osalta kompromissin, sillä 38x2,5 mm profiili oli 40x2 mm profiiliin nähden neliömomentin sekä taivutusvastuksen pohjalta tarkasteltuna hiukan parempi, mutta huomattavasti painavampi vaihtoehto. Näin ollen valinta kohdistuikin lopulta 40x2 mm putkeen niille kehikon osille, joissa ei vaadita isompaa putkea. Putkiprofiili 50x2 mm on siis vaihtoehtoon kevyempi ja neliömomentin sekä taivutusvastuksen pohjalta tarkasteltuna myös kestävämpiä. Pääkaareen kuitenkin valikoitui suuremman putkiprofiilin keveydestä ja kestosta huolimatta 45 mm x 2,5 mm profiili sen huomattavasti paremman saatavuuden johdosta.

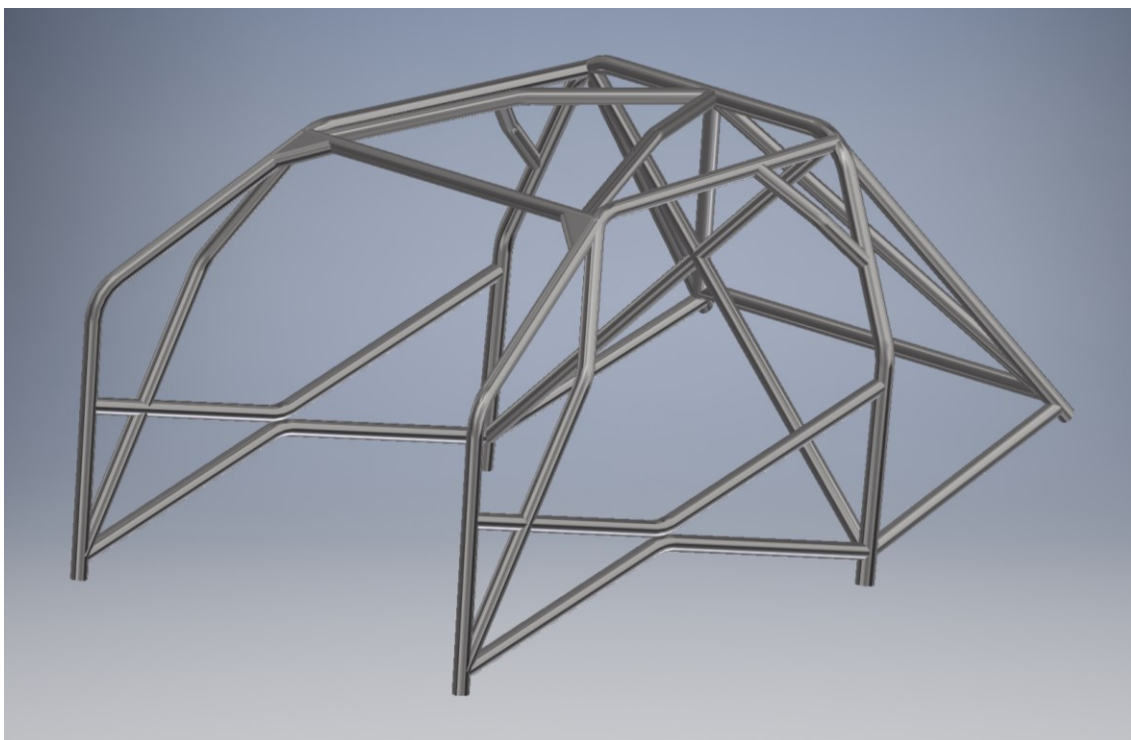
Kehikon perusrakenteeksi valikoitui yleisimmin käytössä oleva rakenne, jossa on pääkaari, puolisivukaaret, poikkituki ja takatuet. Lisäksi muita pakollisia rakenteita ovat kaksi oviputkea molemmin puolin, kattoputket, diagonaaliristikko pääkaareen. Kattoputkien osalta päädyttiin rakenteen 253-14 mukaiseen V-malliin, joka on hieman ristikkoo kevyempi ja helpompi valmistaa. V-kärjen ollessa taaksepäin, myös rakenteen 253-22 mukaiset diagonaalituet ovat pakolliset. Valinnaisten lisärakenteiden osalta haluttiin käyttää kuvan 6 rakenteita 253-17, 253-18 ja 253-31.

Korikehikosta mallinnettiin kolme erilaista variaatiota vertailuun. Ensimmäinen variaatio (kuva 8) on toteutettu oviristikolla, jossa oviputkia on taivutettu 30°. Kuvan 9 variaatiossa on ensimmäiseen variaatioon lisätty tuulilasin yläreunan poikkiputkeen kulmavahvikkeet 1,5mm pellistä, joka on taivutettu U-malliseksi

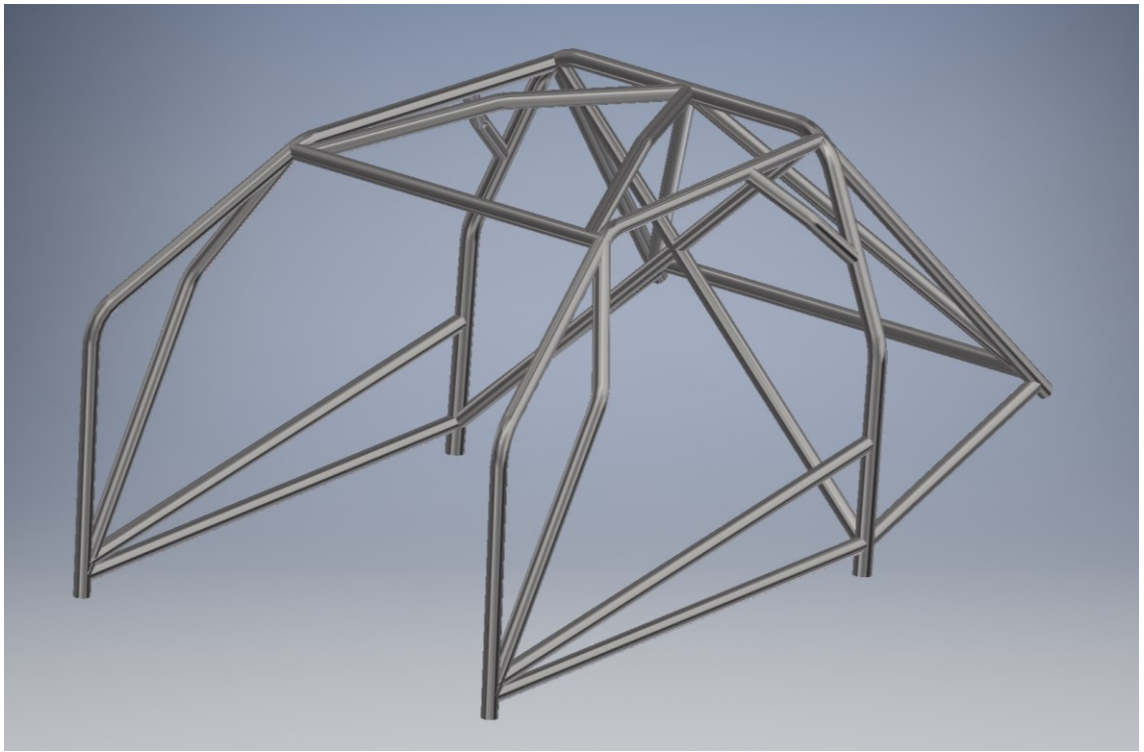
ulkopinnalta mitattuna 19 mm säteellä. Kolmas variaatio (kuva 10) on toteutettu kahdella suoralla oviputkella. 3D-mallien yksinkertaistamiseksi FEM-analyysiä varten on pakolliset kulmavahvikkeet jätetty mallintamatta.



KUVA 8. Kehikko oviristikolla



KUVA 9. Kehikko oviristikolla ja tuulilasiputken vahvikkeilla



KUVA 10. Kehikko suorilla oviputkilla

## 5 FEM-ANALYSOINTI

Kehikon eri variaatioiden vertailuun käytettiin Ansys 2019 R3 -ohjelmistoa. Kehikoiden ominaisuuksia vertailtiin muutamalla erilaisella kuvitteellisella törmäystilanteella. Törmäystilanteessa syntyvien voimien suuruutta arvioitiin etenemisen liikeyhtälön kaavan (8) perusteella. Etenemisen liikeyhtälön mukainen voima  $F$  saadaan kaavalla

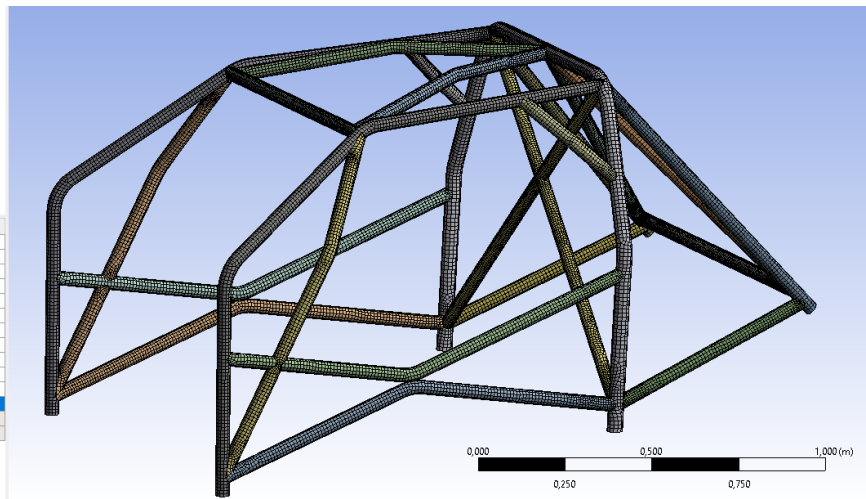
$$F = ma, \tag{8}$$

jossa  $m$  on massa ja  $a$  kiihtyvyys (Karkela ym. 2011, 117). Tässä työssä on oletettu, että auto törmäyksissä auton pysähtymiseen kuluu yksi sekunti ja massana on käytetty auton oletettua kilpailupainoa 1 000 kg.

Kehikkoon törmäystilanteissa kohdistuvat voimat ja niiden suunnat vaihtelevat suuresti törmäyksen tyypistä ja ajonopeudesta riippuen. Auton kori myös absorboi osan törmäyksen voimasta. Näin ollen absoluuttisten arvojen tarkastelu ei tässä työssä ole mielekäästä, vaan olennaisempaa on vertailla eroja eri variaatioiden välillä. Vertailuun on otettu voimien aiheuttaman muodonmuutoksen suuruus, sekä Von-Mises jännitys. Kaikissa esitetyissä kuvissa muodonmuutokset ovat todellisessa mittakaavassa.

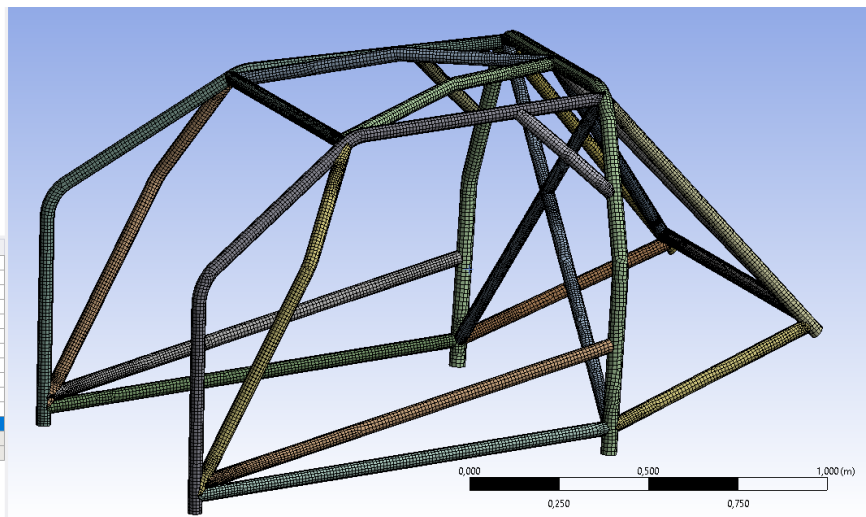
Kuvissa 11-13 on esitetty eri variaatioiden verkot. Verkoissa solmujen ja elementtien määrä vaihtelee noin 38 000 - 41 000 kappaleen välillä. Mallin aineominaisuuksissa on käytetty S235 rakenneteräksen ominaisuuksia, joten kimokertoimeksi  $E$  on asetettu 210 GPa (Mäkelä ym. 2015, 151).

Details of "Mesh"	
Display	
Display Style	Use Geometry Setting
Defaults	
Physics Preference	Mechanical
Element Order	Program Controlled
Element Size	Default (2,73174e-002 m)
Sizing	
Quality	
Inflation	
Batch Connections	
Advanced	
Statistics	
Nodes	38668
Elements	38267



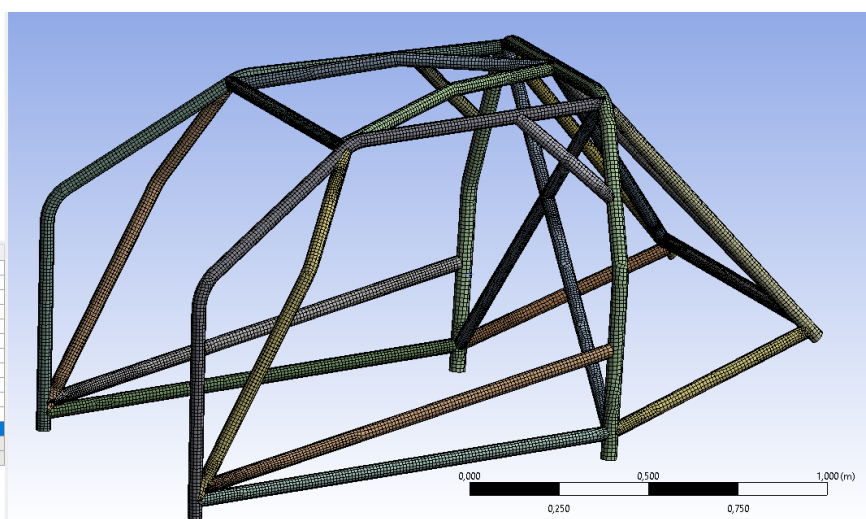
KUVA 11. Verkotus oviristikolla

Details of "Mesh"	
Display	
Display Style	Use Geometry Setting
Defaults	
Physics Preference	Mechanical
Element Order	Program Controlled
Element Size	Default (2,91084e-002 m)
Sizing	
Quality	
Inflation	
Batch Connections	
Advanced	
Statistics	
Nodes	41228
Elements	40825



KUVA 12. Verkotus oviristikolla kulmavahvikkein

Details of "Mesh"	
Display	
Display Style	Use Geometry Setting
Defaults	
Physics Preference	Mechanical
Element Order	Program Controlled
Element Size	Default (2,91084e-002 m)
Sizing	
Quality	
Inflation	
Batch Connections	
Advanced	
Statistics	
Nodes	41228
Elements	40825



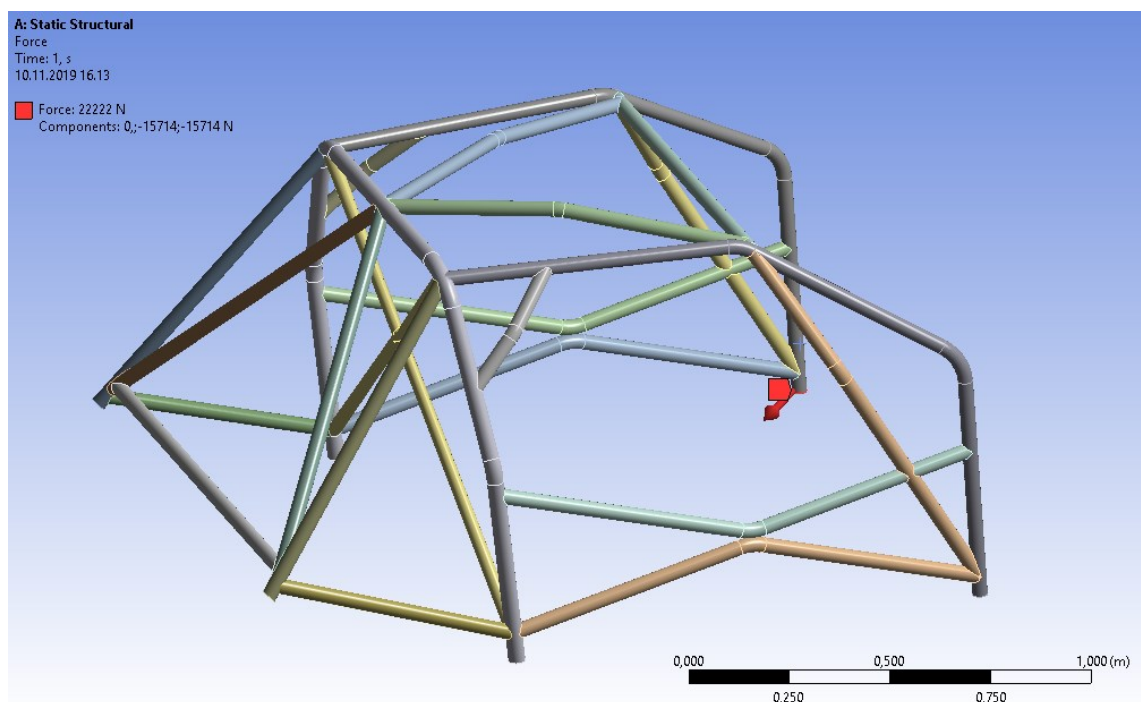
KUVA 13. Verkotus suorilla oviputkilla

## 5.1 Isku etukulmaan

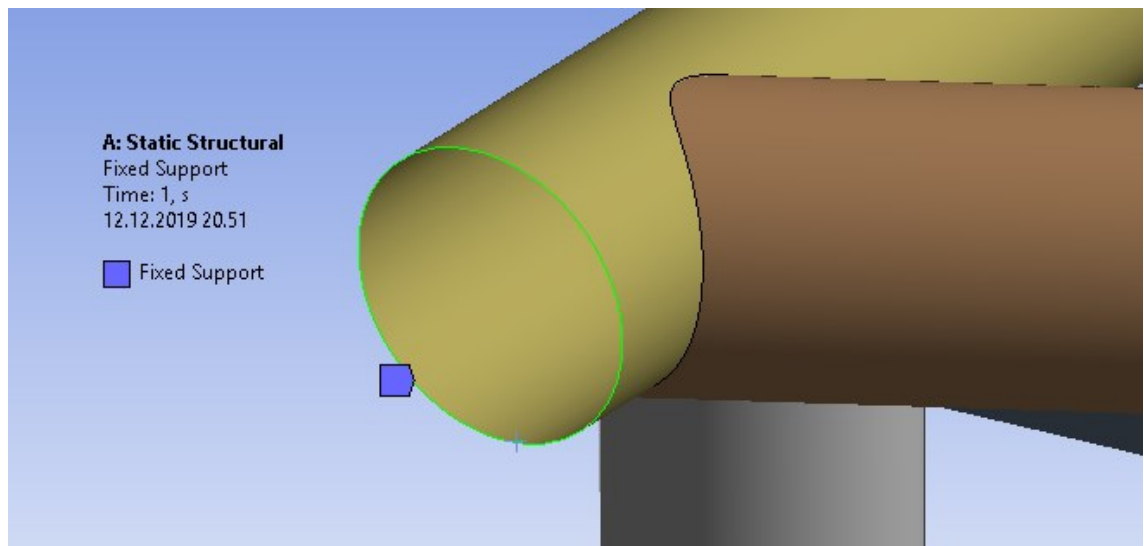
Tässä jäljitellään osumaa, jossa esimerkiksi ajetaan etukulma edellä kiveen tai ojan vastapenkkaan 80 km/h nopeudella. Kaavan (8) mukaan etukulmaan kohdistuvan voima  $F$  suuruus on

$$F = ma = 1000 \text{ kg} \cdot \frac{\left(\frac{80 \text{ m}}{3,6 \text{ s}}\right)}{1 \text{ s}} = 22222,22 \text{ N}.$$

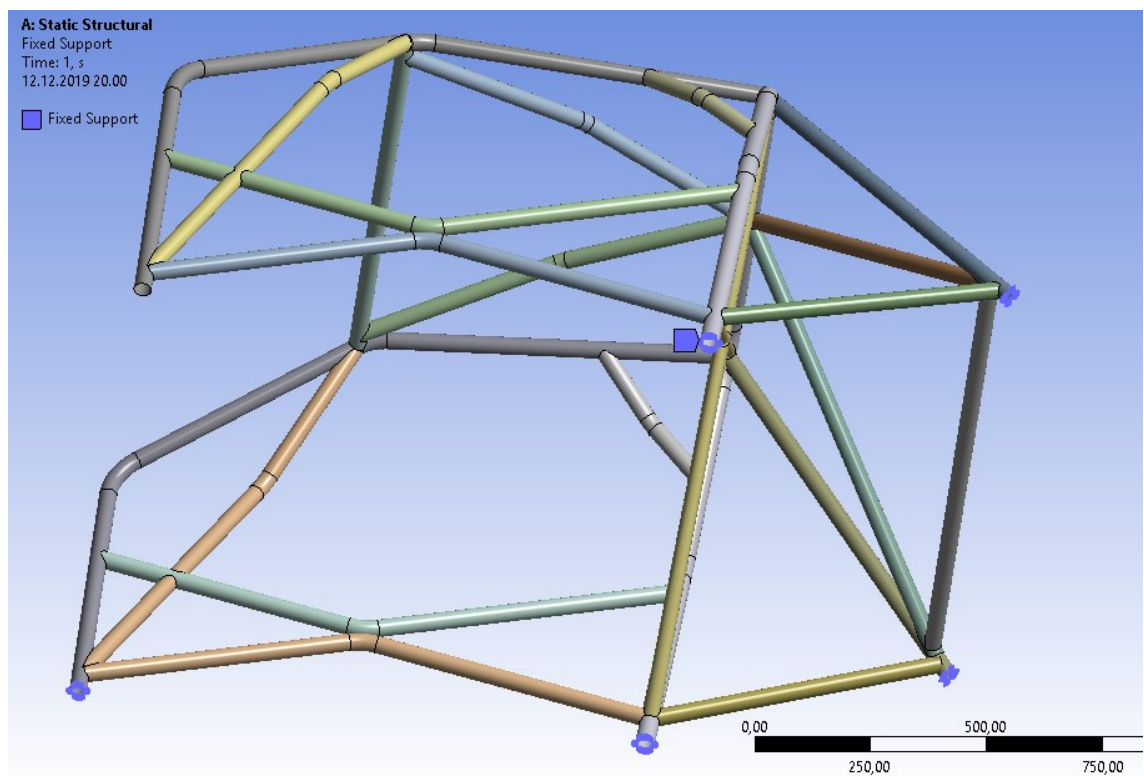
Kyseinen 22 222 N voima suuntautuu kuvan 14 mukaisesti vasemman puolisivukaaren kiinnitysjalasta vaakatasossa  $45^\circ$  kulmassa sisäänpäin. Koska kehikko hitsataan auton koriin kiinni kehikon kiinnitysaloista, on tässä työssä käytetty kiinteää tuentaa kiinnitysalkojen putkien päissä kuvan 15 tapaan. Oletetaan myös, että auton korissa ei kiinnityspisteiden kohdalla tapahdu muodonmuutoksi, pois lukien etukulmaan kohdistuva iskun kiinnityspiste, jossa muodonmuutos on välttämätön, jotta voima välittyisi kehiikkoon asti. Näin ollen tuetaan kehikko kuvan 16 mukaisesti kiinteillä tuennoilla kaikista muista kiinnitysaloista paitsi vasemmasta etukulmasta, johon voima kohdistuu.



KUVA 14. Voima etukulmasta

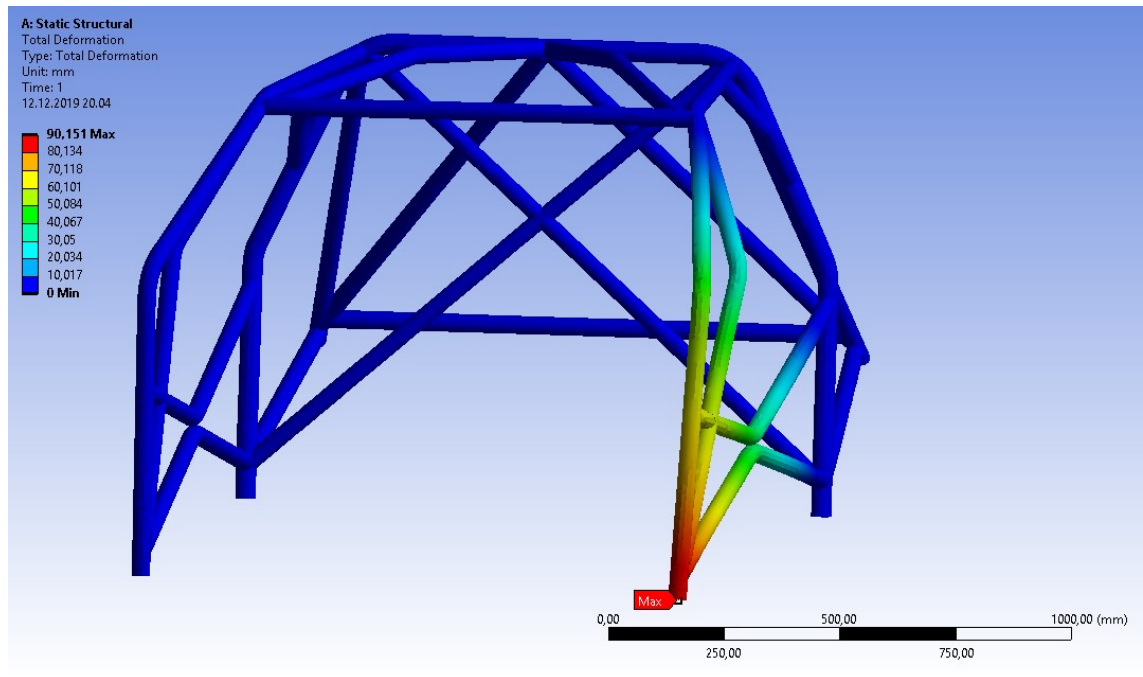


KUVA 15. Kehikon tuenta



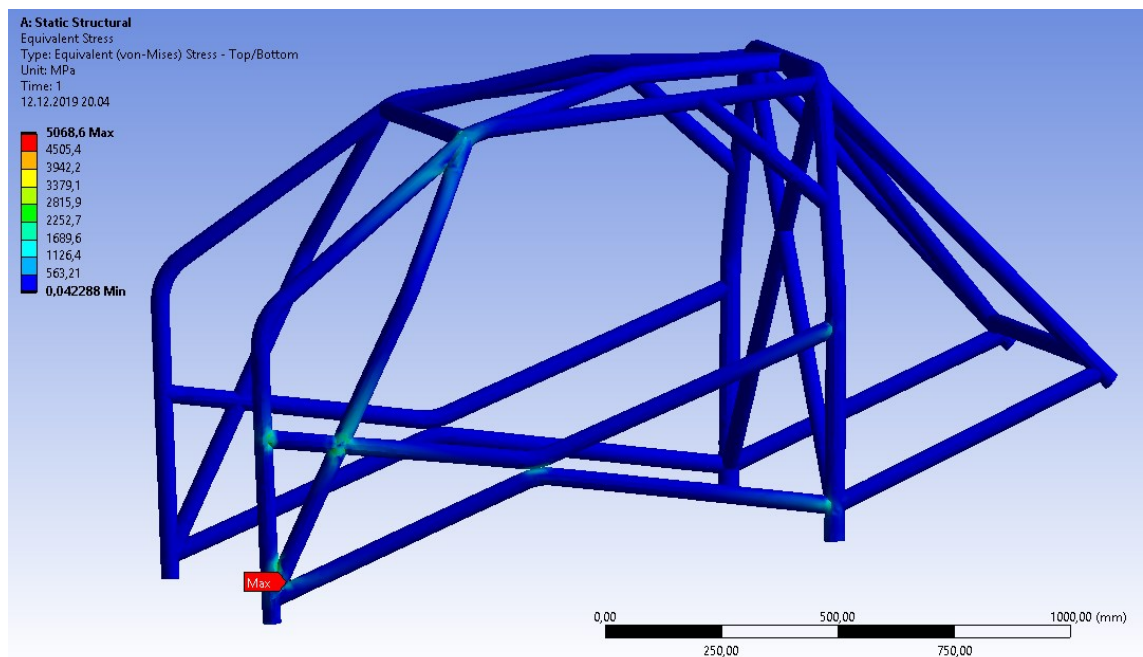
KUVA 16. Kehikon tuentapisteet osumassa etukulmaan

Oviristikolla varustetulla kehikolla suurin muodonmuutos on kuvan 17 mukaisesti vasemman puolisivukaaren kiinnitysjalassa, johon voimakin kohdistuu. Suurin muodonmuutos on 90,15 mm.



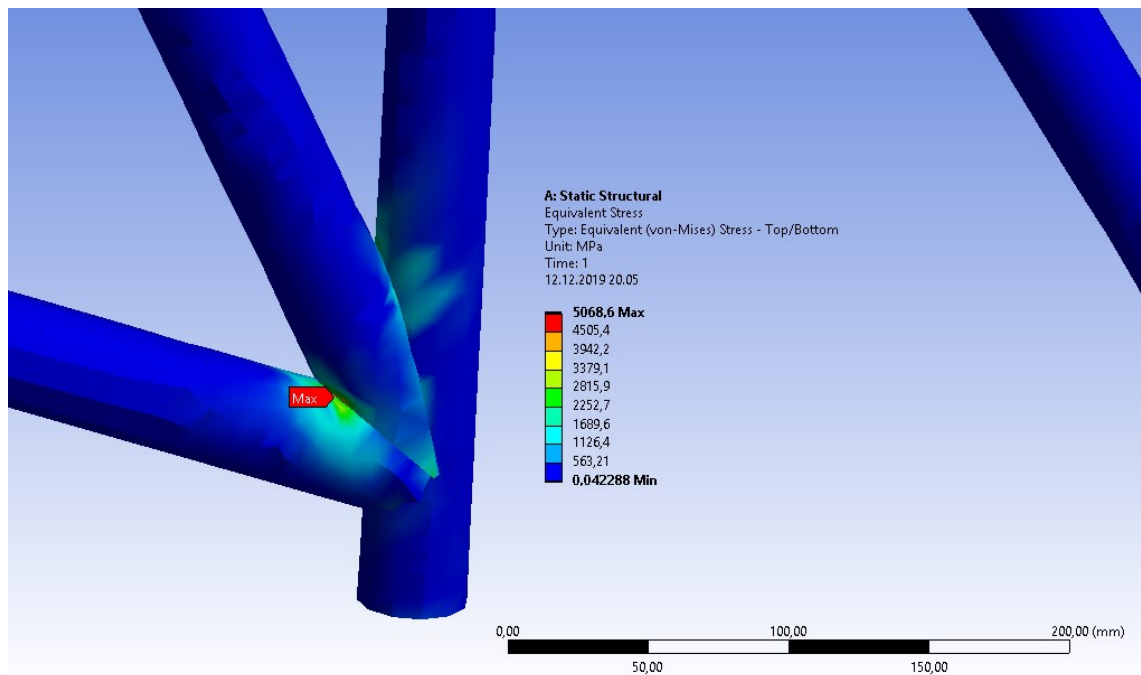
KUVA 17. Muodonmuutos oviristikolla

Voima aiheuttaa kehiin jännityksiä lähinnä oviputkien ja tuulilasipilarin vahvikkeen liitoskohtiin kuvan 18 mukaisesti. Suurin jännitys muodostuu tuulilasipilarin vahvikkeen ja oviputken etupään alemman liitoksen välille kuvassa 19 esitettyyn kohtaan. Maksimijännityksen suuruus on 5 069 MPa.



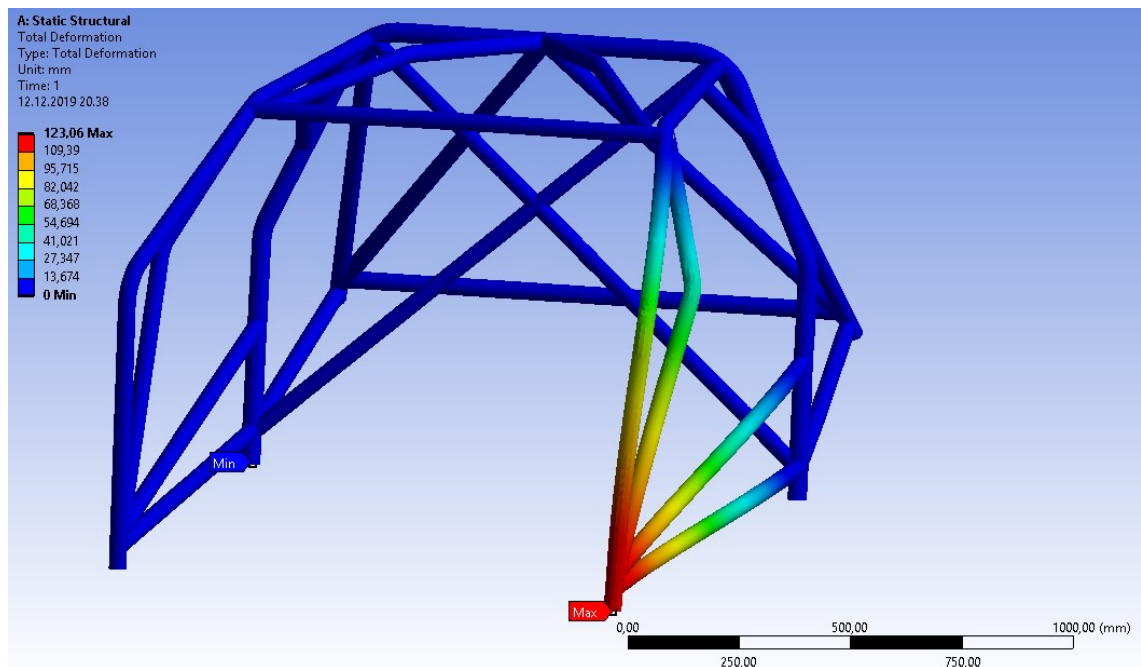
KUVA 18. Jännitys oviristikolla





KUVA 19. Maksimijännitys oviristikolla

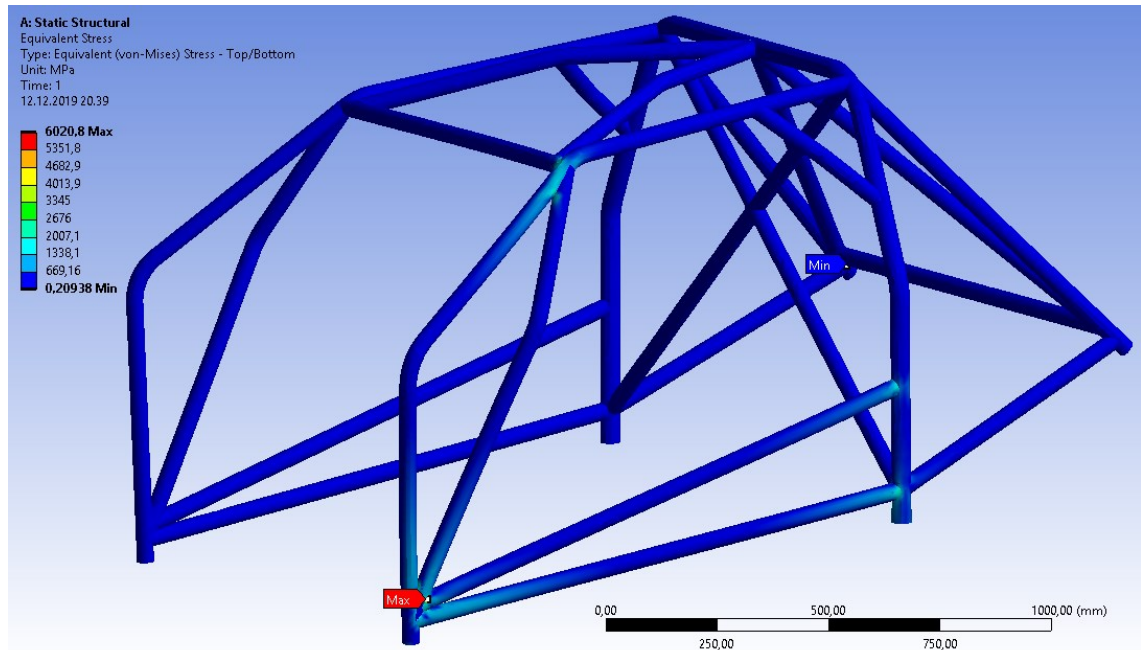
Suorilla oviputkilla varustetun kehikon suurimman muodonmuutoksen sijainti on kuvan 20 mukaisesti sama kuin ristikollakin. Suurin muodonmuutos on 123,06 mm.



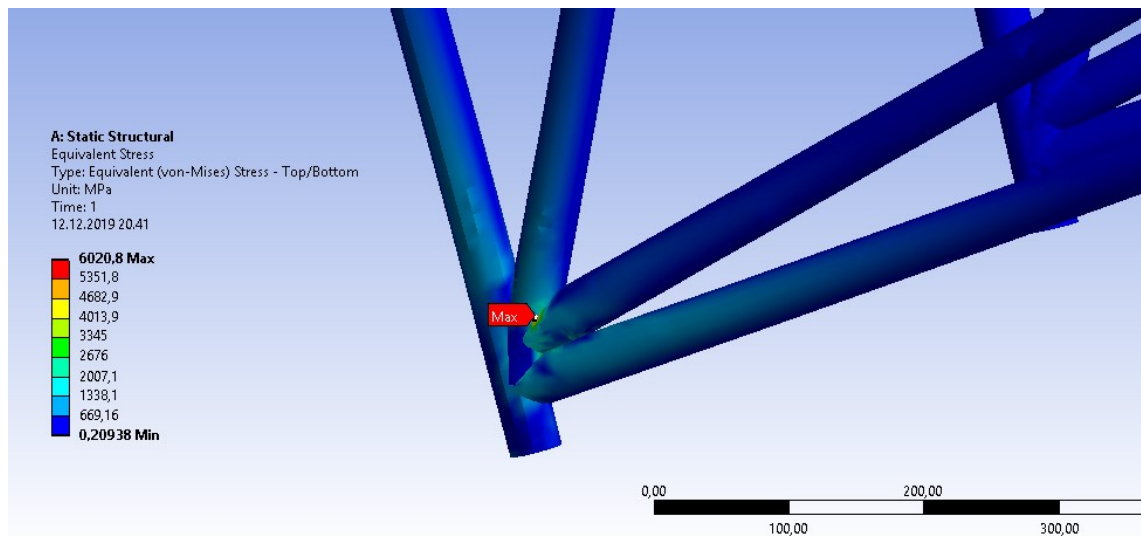
KUVA 20. Muodonmuutos suorilla oviputkilla

Suorilla oviputkilla myös jännitys kohdistuu vastaavaan tapaan kuin ristikollakin oviputkien ja tuulilasipilarin vahvikkeen liitosten ympärille. Selkeää jännitystä on

kuitenkin kuvan 21 mukaisesti laajemmalla alueella ja maksimijännityksen suuruus on 6 021 MPa. Myös suorilla oviputkilla maksimijännitys sijaitsee tuulilasipilarin vahvikkeen ja oviputken välisessä liitoksessa (kuva 22).



KUVA 21. Jännitys suorilla oviputkilla

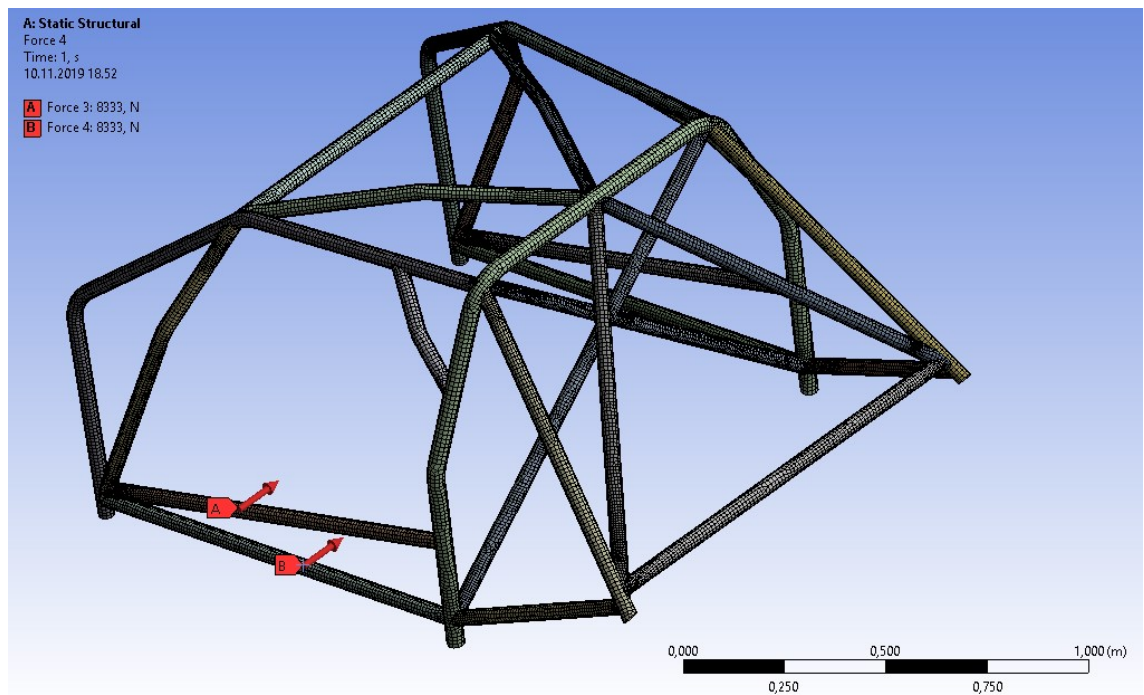


KUVA 22. Maksimijännitys suorilla oviputkilla

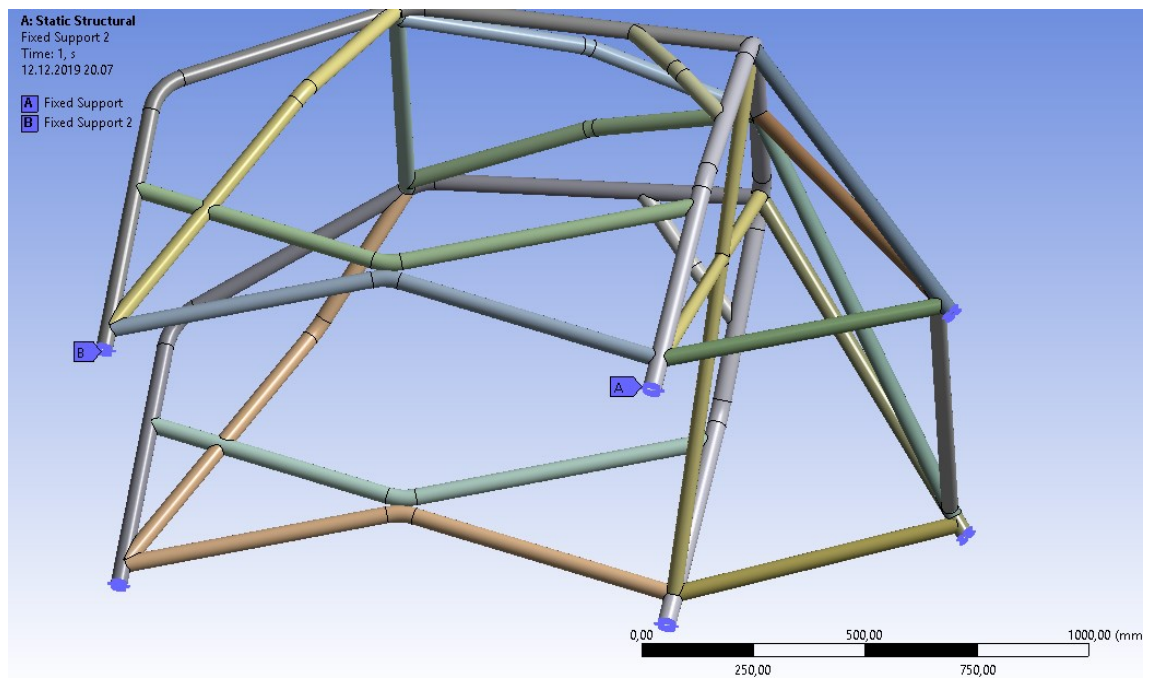
## 5.2 Isku sivulle

Sivulle kohdistuvalla iskulla mallinnetaan törmäystä kylki edellä esimerkiksi puuhun tai kiveen 60 km/h nopeudella. Tällöin Sivulta kohtisuoraan sisäänpäin kuvan

23 mukaisesti suuntautuvaksi voimaksi saadaan kaavan (8) perusteella noin 16 666 N. Voima on jaettu puoliksi oviputkien välille ja voima jakautuu tasaisesti putkien mitalle. Tässä tilanteessa kaikki kiinnitysjalat on tuettu kiinteällä tuennalla (kuva 24).

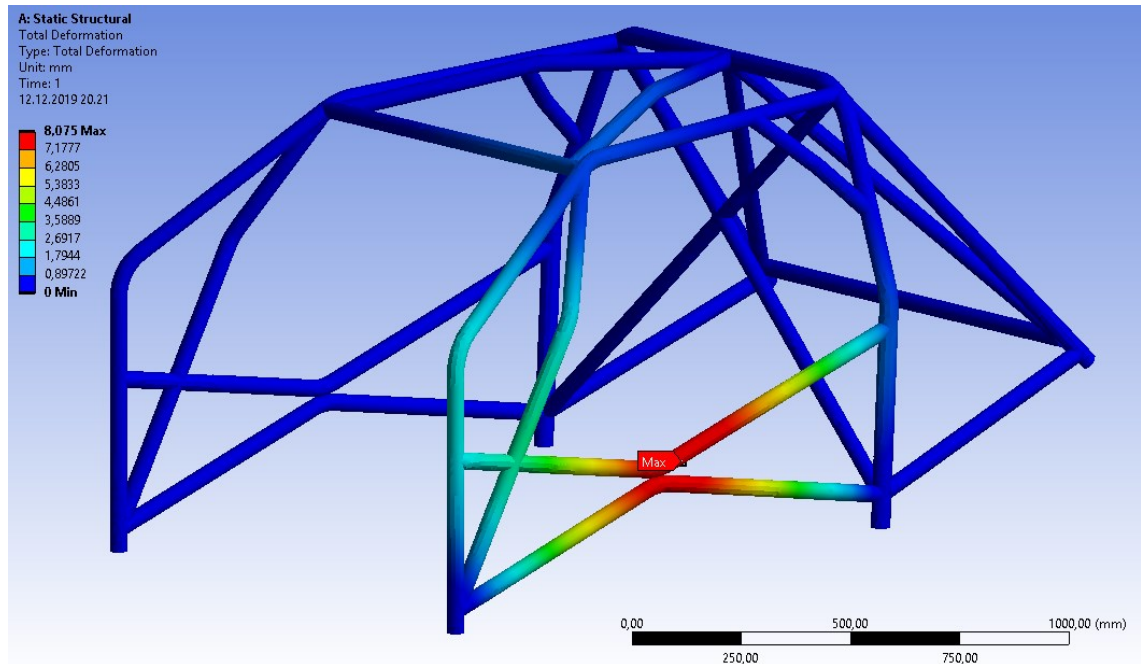


KUVA 23. Voimat sivulta



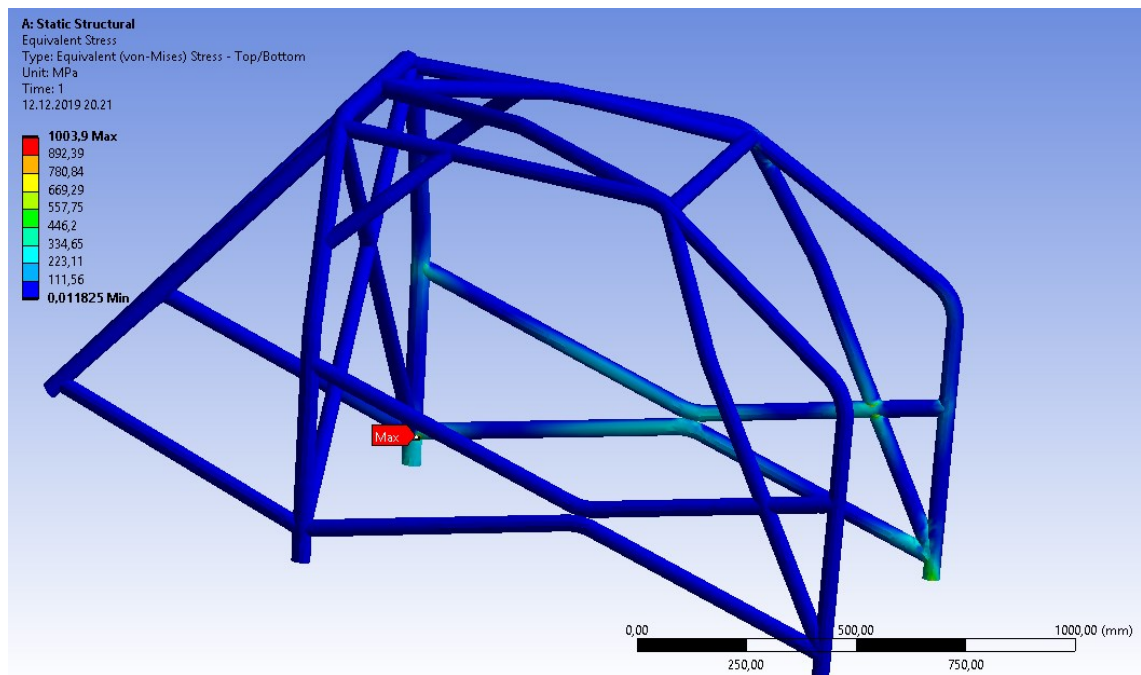
KUVA 24. Kehikon tuenta muissa iskuissa

Suurin muodonmuutos molemmilla oviputkien variaatioilla syntyy ylemmän oviputken keskikohdalle. Kuvassa 25 näkyvässä oviristikossa suurin muodonmuutos on 8,08 mm.

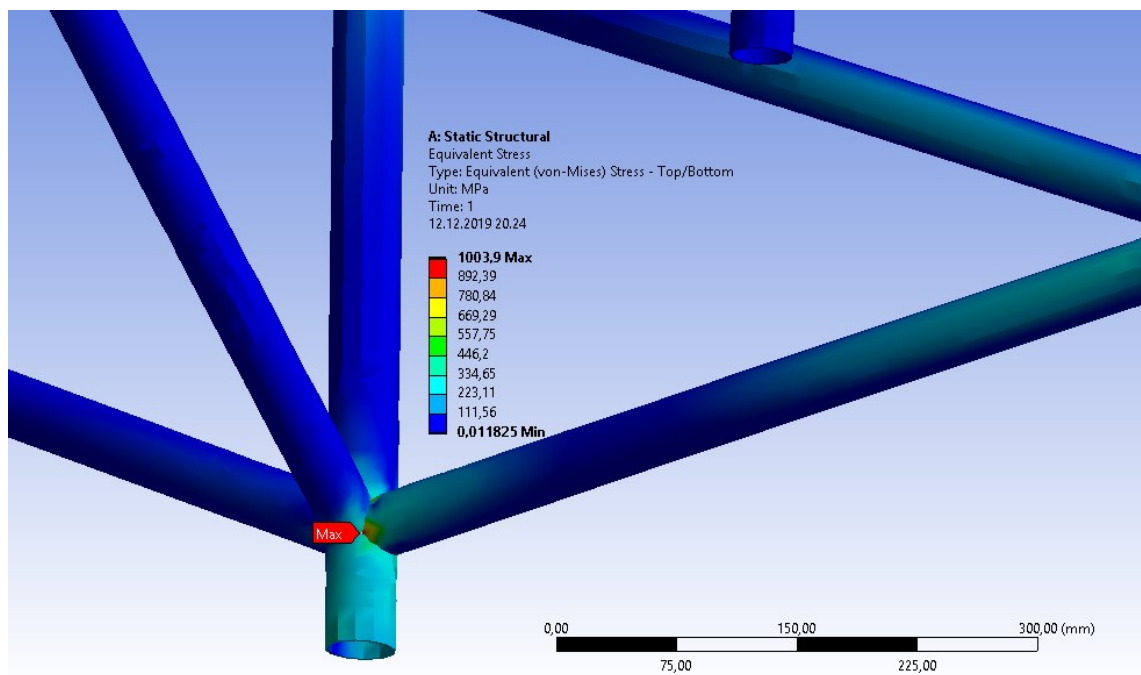


KUVA 25. Muodonmuutos oviristikolla

Jännitykset kohdistuvat tässä tapauksessa pääosin oviputkien liitoksiin ja keski-kohtaan kuvassa 26 esitettyyn tapaan. Kuvassa 27 esitetty suurin jännitys sijaitsee alemman oviputken taaemmassa liitoksessa ja on suuruudeltaan 1 004 MPa.

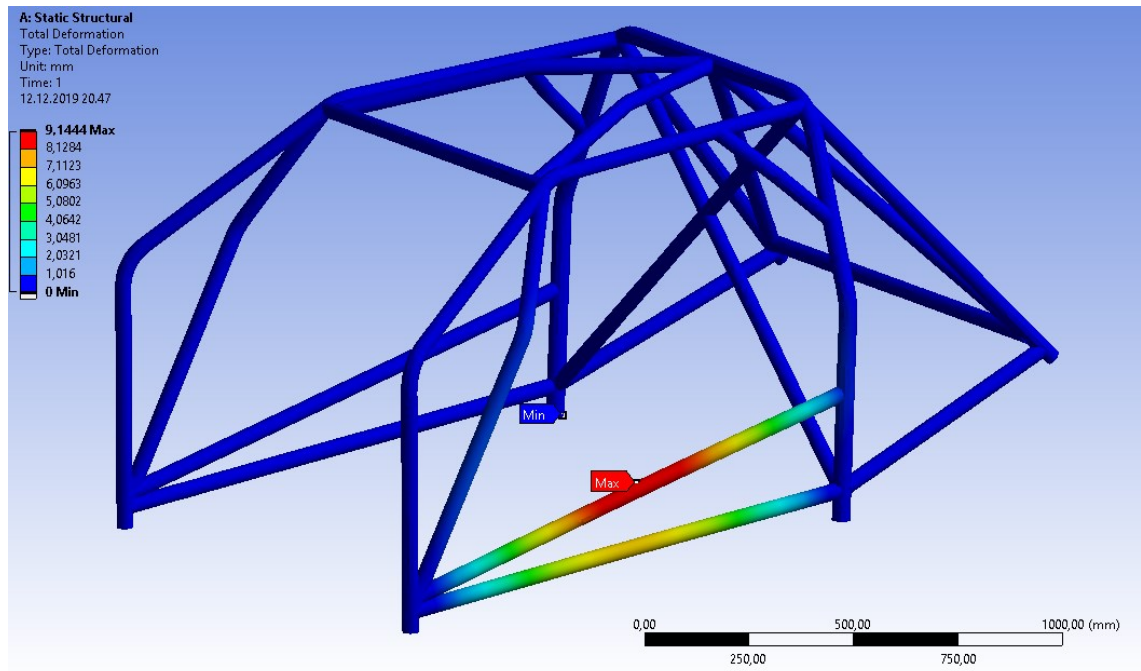


KUVA 26. Jännitys oviristikolla



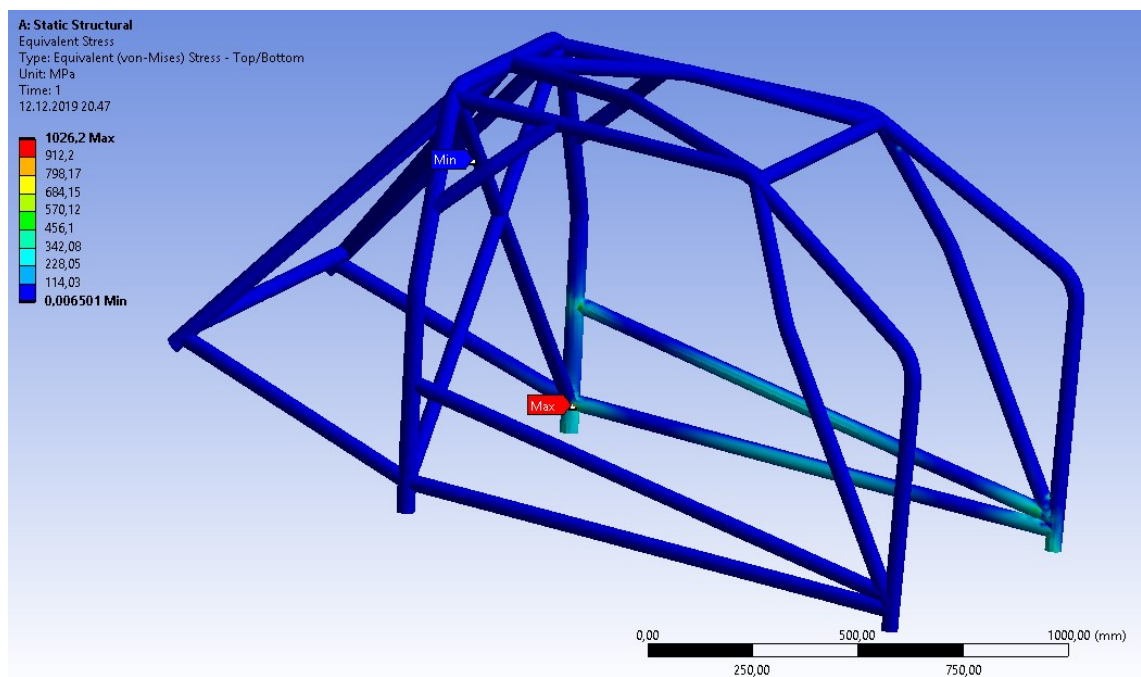
KUVA 27. Maksimijännitys oviristikolla

Suorilla oviputkilla suurin muodonmuutos ylemmässä oviputkessa on 9,14 mm (kuva 28).

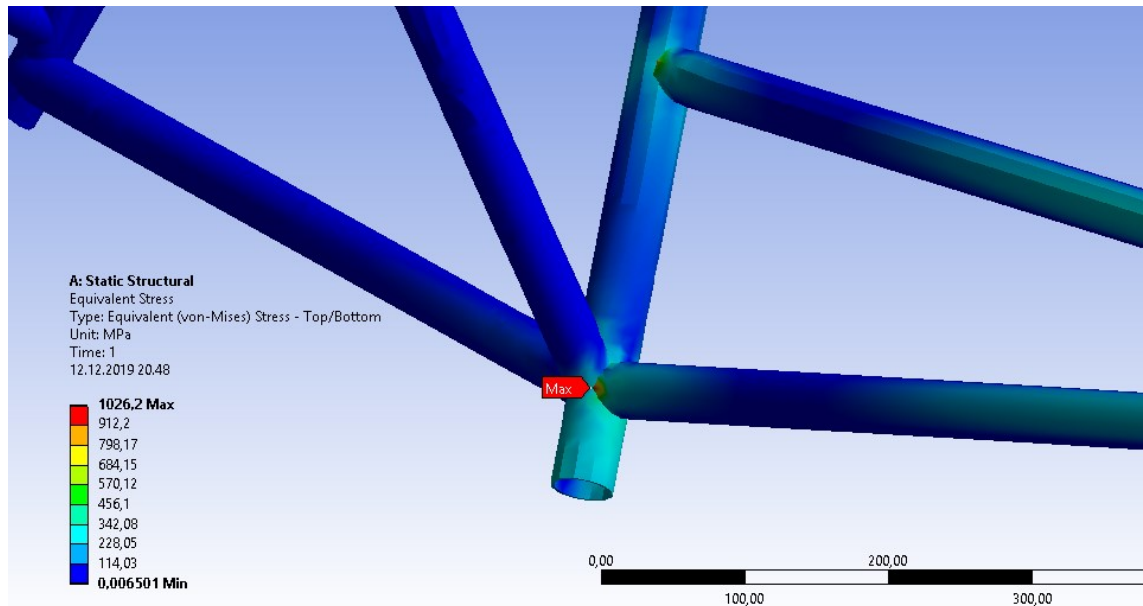


KUVA 28. Muodonmuutos suorilla oviputkilla

Kuvassa 29 esitetyt jännitykset suorilla oviputkilla jakautuvat, samantapaisesti kuin ristikollakin, oviputkien liitoksiin ja keskikohtaan. Maksimijännitys (kuva 30) sijaitsee myös samassa paikassa kuin ristikolla ja sen suuruus on 1 026 MPa.



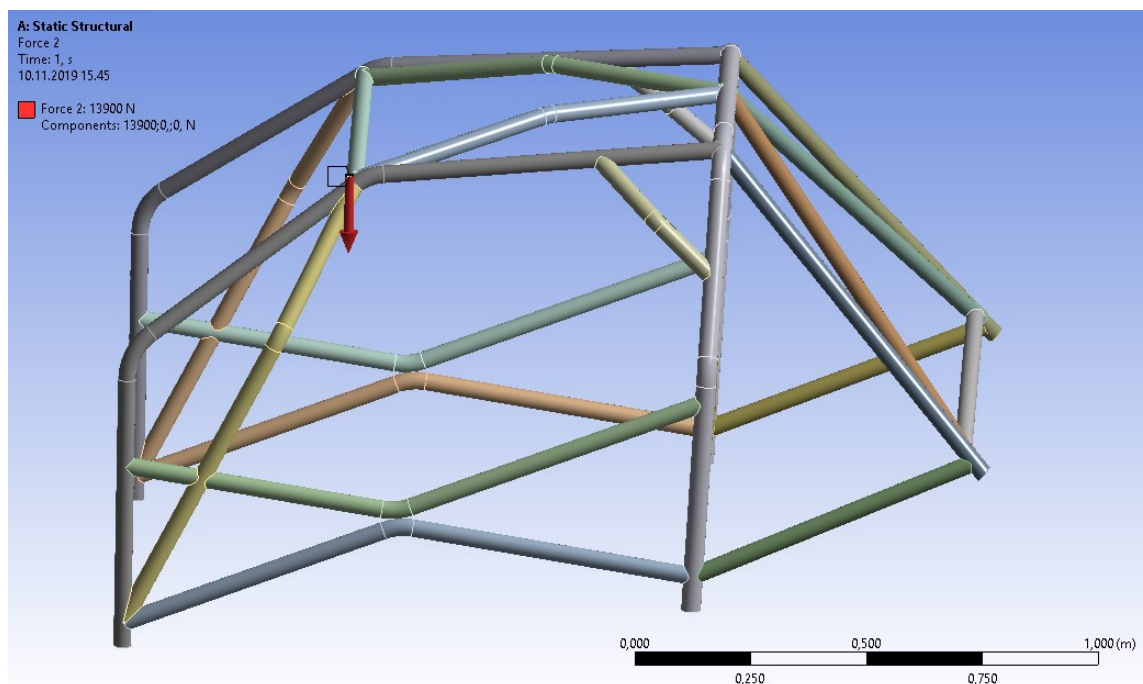
KUVA 29. Jännitys suorilla oviputkilla



KUVA 30. Maksimijännitys suorilla oviputkilla

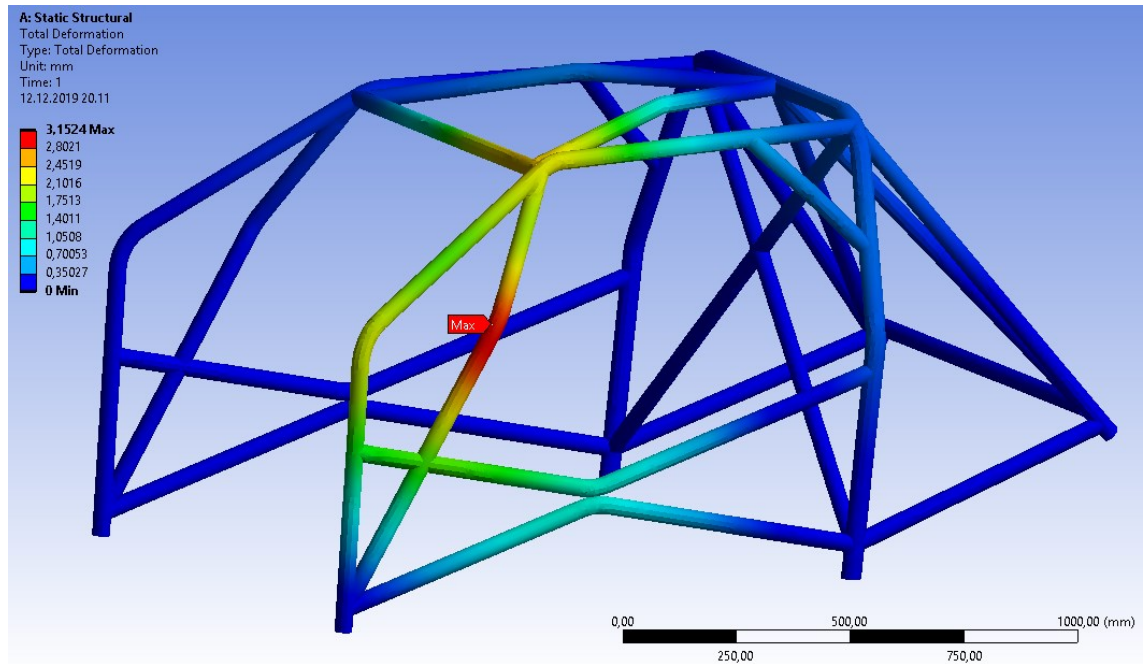
### 5.3 Isku tuulilasin yläkulmaan

Yläkulmaan kohdistuva isku voi syntyä esimerkiksi auton kaatuessa. Tässäkin tapauksessa kaikki kiinnitysjalat on tuettu kiinteällä tuennalla (kuva 24). 50 km/h nopeudella voimaksi saadaan kaavalla (8) noin 13 900 N. Voima kohdistuu poik-  
 kipun ja puolisivukaaren liitoksesta suoraan alas kuvan 31 mukaisesti.



KUVA 31. Voima yläkulmaan

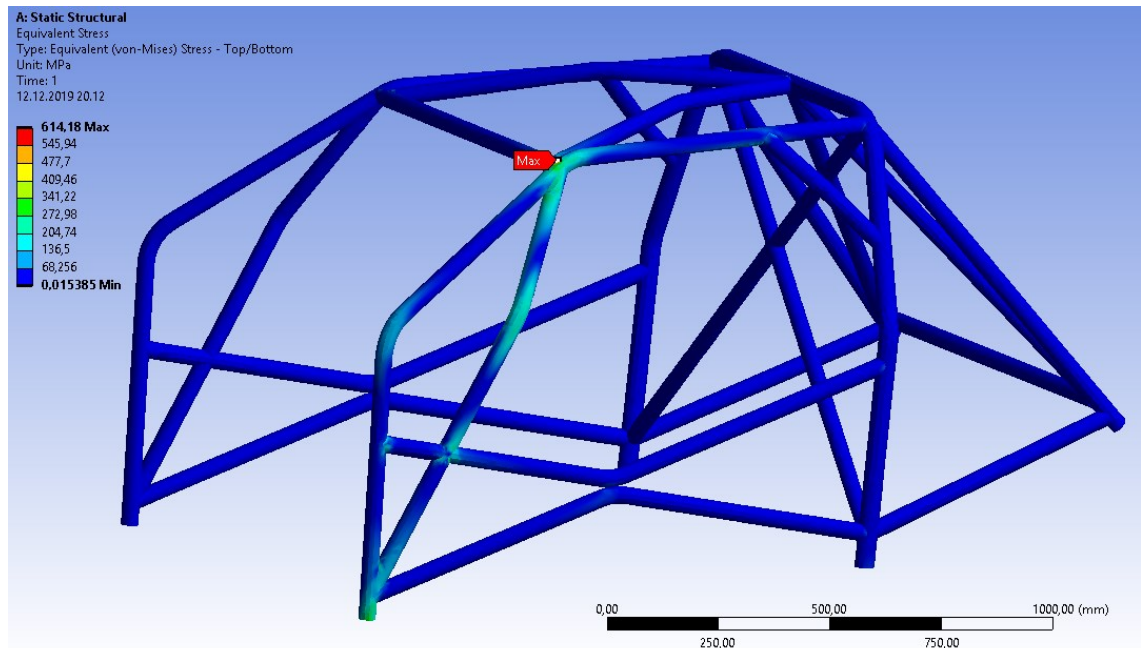
Suurin muodonmuutos syntyy tuulilasipilarin vahvikkeen taivutuksen kohdille sekä kulmavahvikkeen kanssa että ilman. Kuvassa 32 ilman vahviketta olevan kehikon muodonmuutos. Suurin muodonmuutos 3,15 mm.



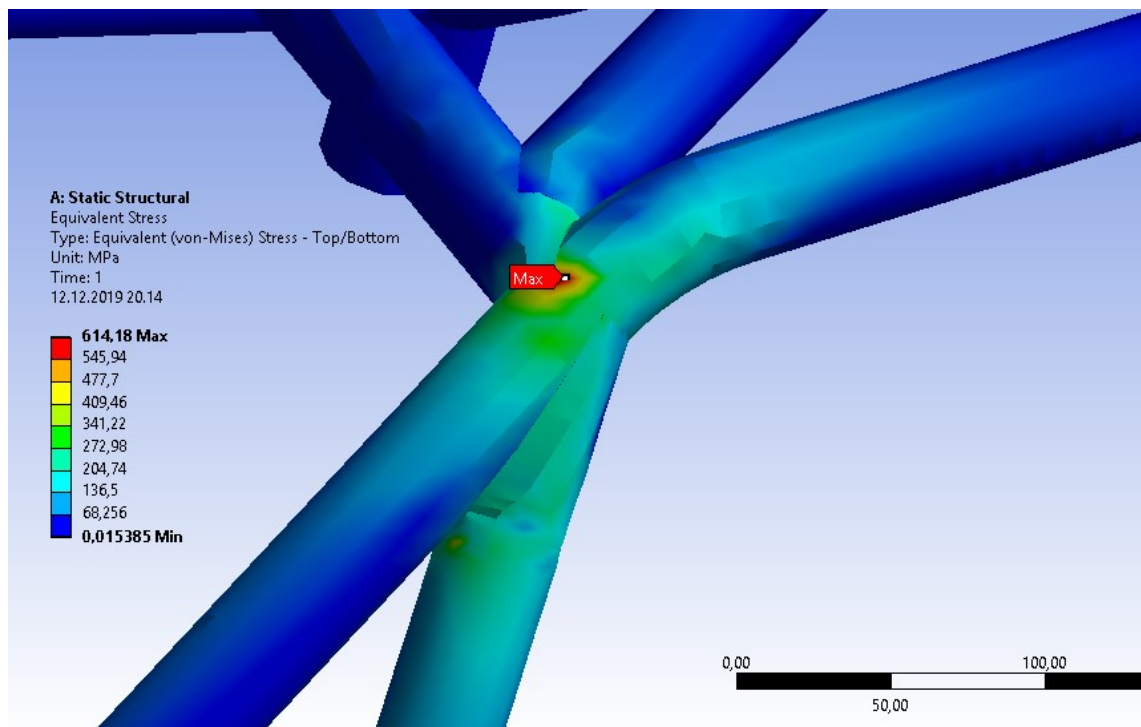
KUVA 32. Muodonmuutos oviristikolla

Jännitys ilman kulmavahviketta on esitetty kuvassa 33. Se jakautuu pääasiassa puolisivukaaren ja tuulilasipilarin vahvikkeen taivutuksiin ja puolisivukaaren kiinnitysalkaan. Maksimijännitys (kuva 34) sijaitsee hyvin lähellä voiman vaikutuspistettä ja sen suuruus on 614 MPa.



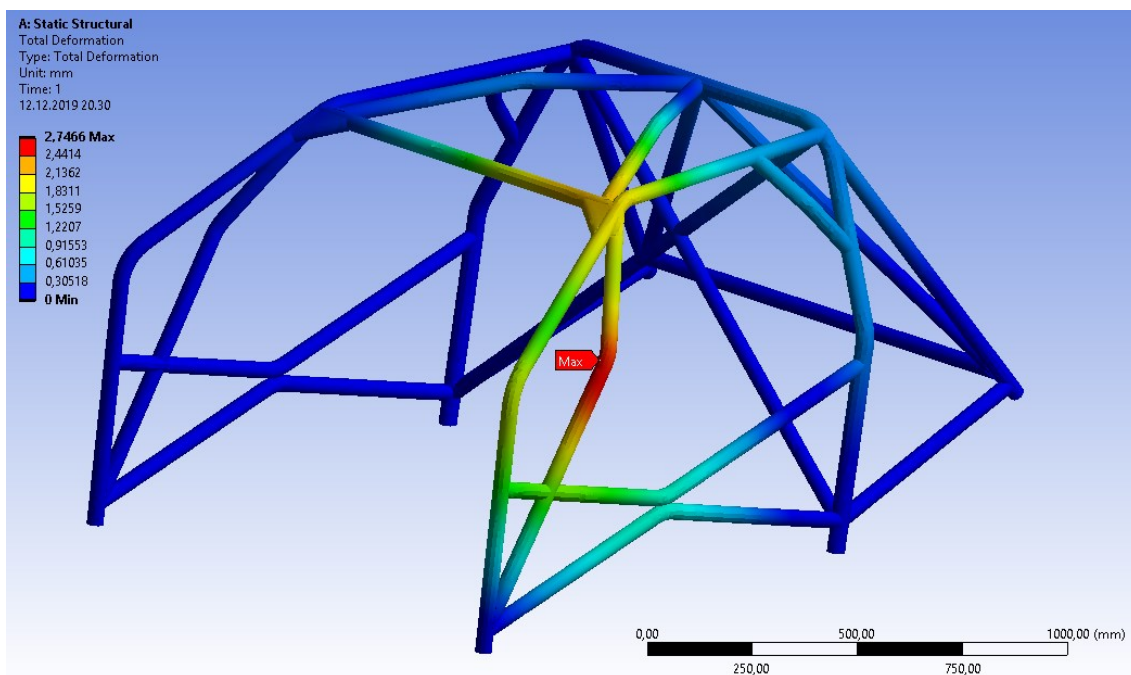


KUVA 33. Jännitys oviristikolla



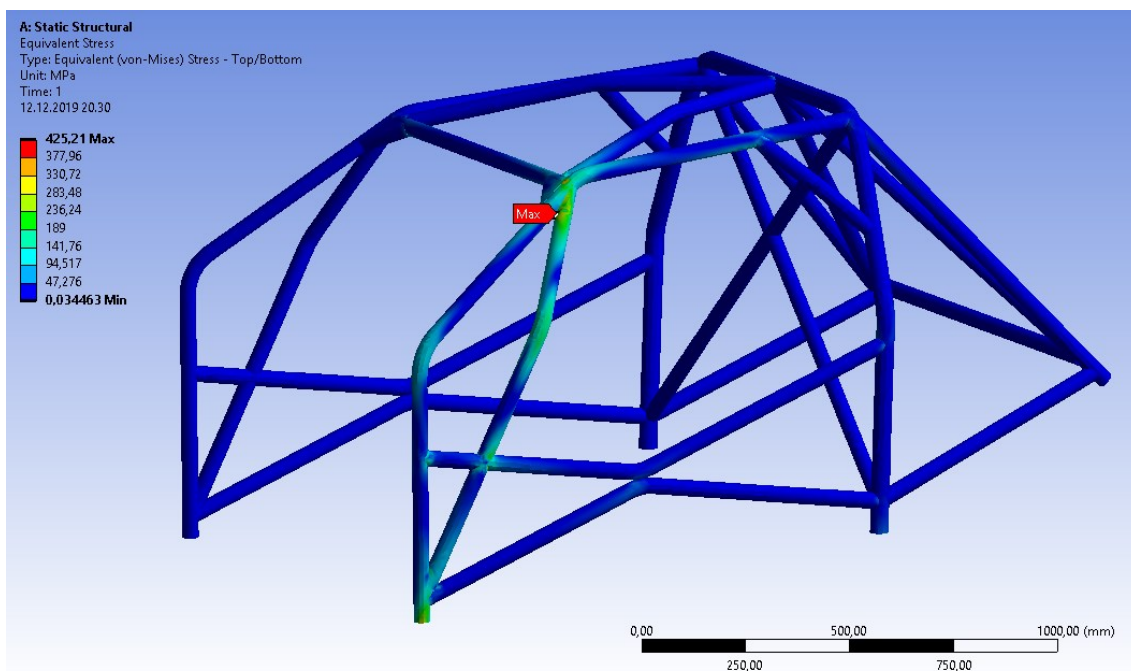
KUVA 34. Maksimijännitys oviristikolla

Kulmavahvikkeen kanssa suurimman muodonmuutoksen suuruus on 2,75 mm (kuva 35).

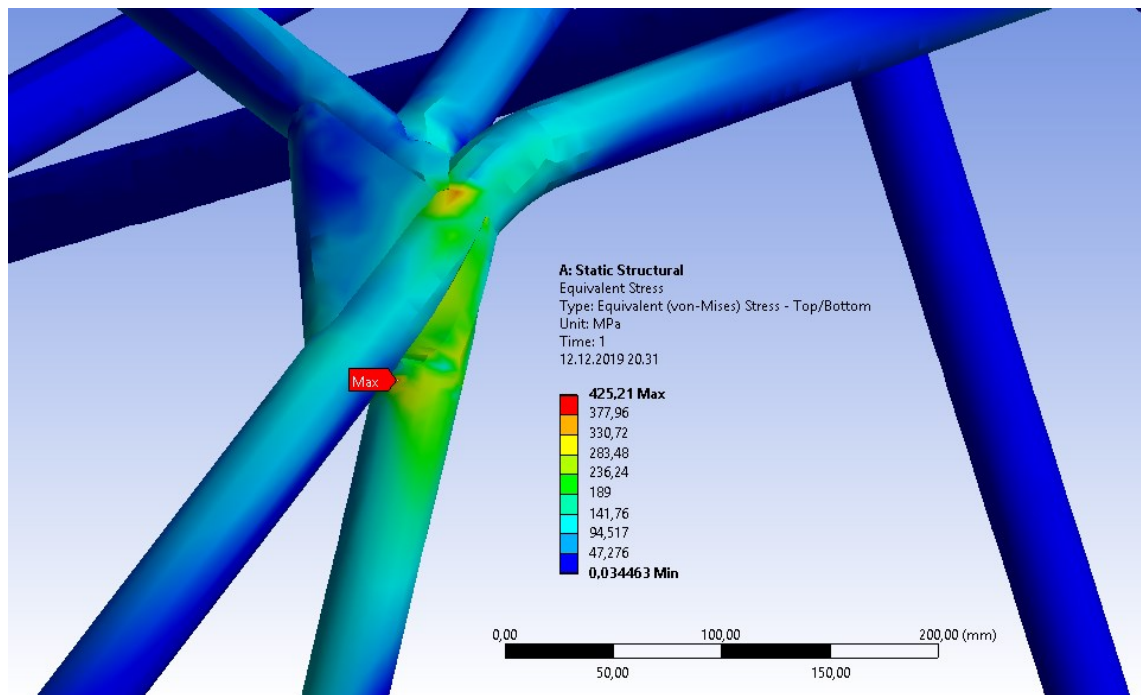


KUVA 35. Muodonmuutos oviristikolla kulmavahvikkein

Jännitykset sijaitsevat kuvan 36 mukaisesti samoilla alueilla kuin ilman vahviketakin. Maksimijännitys kuitenkin siirtyy tuulilasipilarin vahvikkeen ja puolisivukaaren väliseen liitokseen kuvan 37 mukaisesti. Maksimijännityksen arvo tässä tapauksessa on 425 MPa.



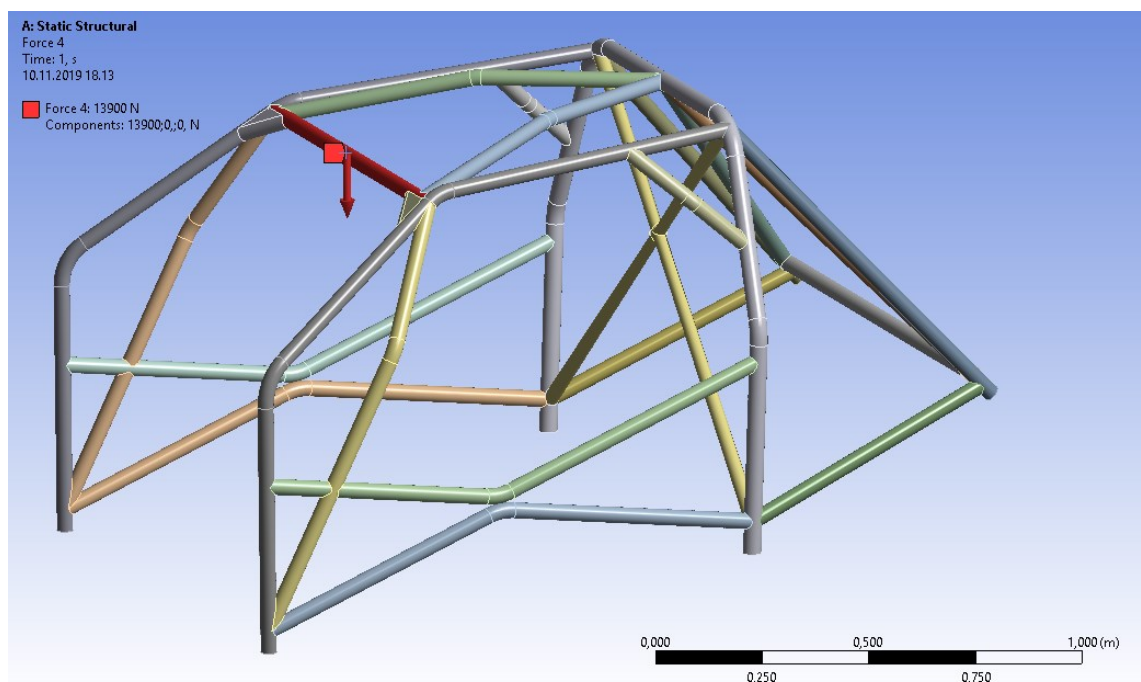
KUVA 36. Jännitys oviristikolla kulmavahvikkein



KUVA 37. Maksimijännitys oviristikolla kulmavahvikkein

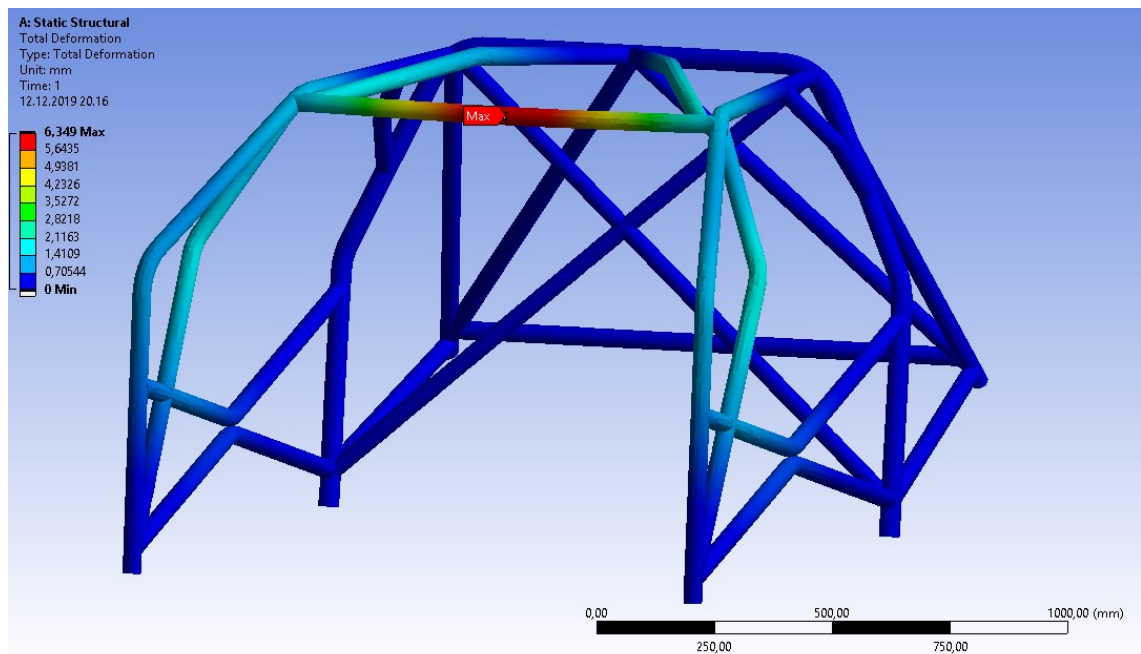
## 5.4 Isku tuulilasin yläreunaan

Kaadon yhteydessä isku voi tulla myös suoraan tuulilasin yläreunaa kohti. Tässä tapauksessa sama 50 km/h nopeudesta törmätessä syntyvä 13 900 N voima suuntautuu kuvan 38 mukaisesti suoraan alaspäin ja jakautuu tasaisesti poikki-putken matkalle. Kaikki kiinnitysjalat tuettu kiinteällä tuennalla (kuva 24).



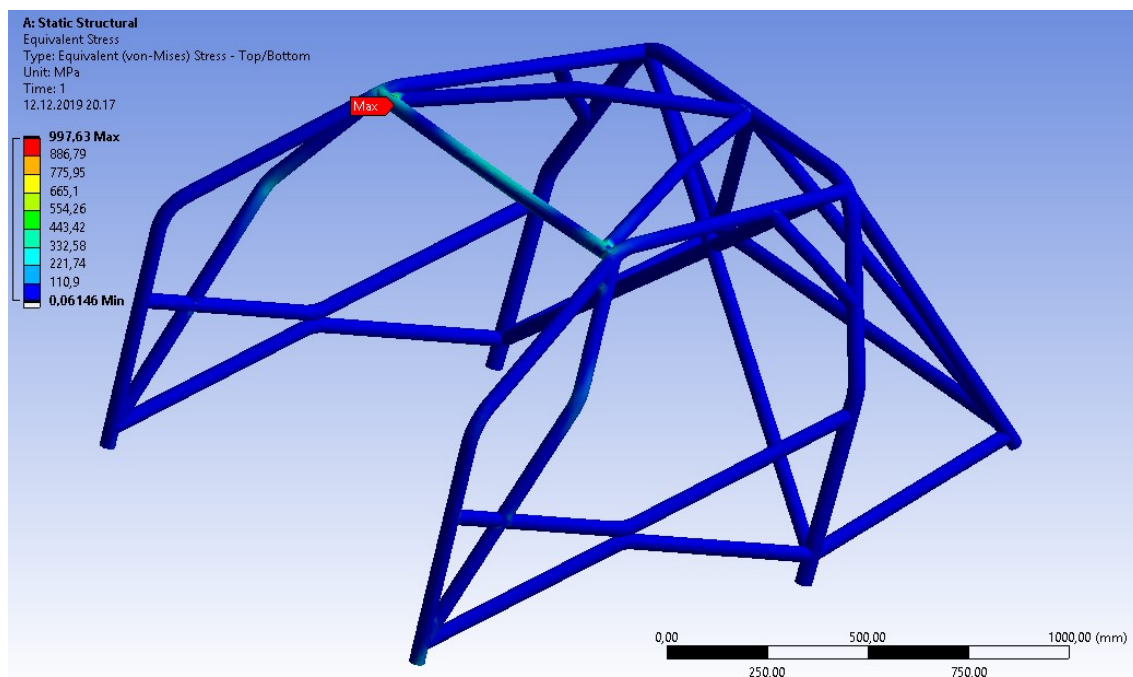
KUVA 38. Voima yläreuna

Suurin muodonmuutos jokaisella kehikkovariaatiolla tapahtuu poikkiputken keskikohdalla. Kuvan 39 kehikossa oviristikolla ilman kulmavahvikkeita suurin muodonmuutos on 6,35 mm.

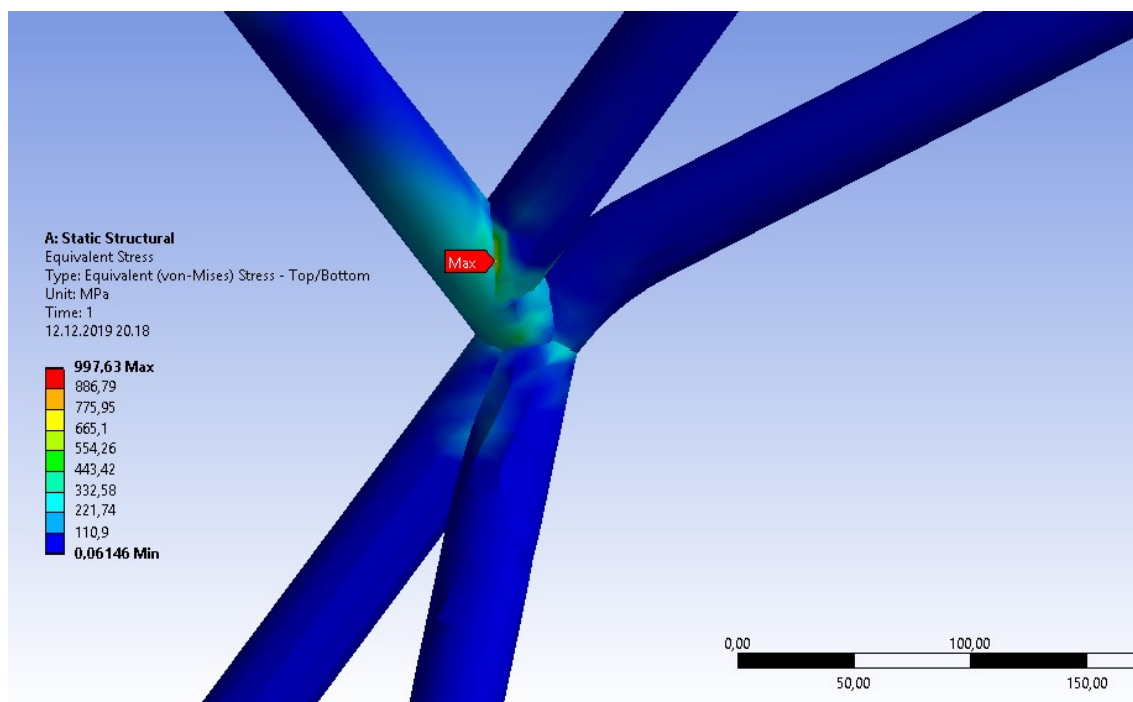


KUVA 39. Muodonmuutos oviristikolla

Jännitys jakautuu tässä tapauksessa enimmäkseen poikkiputken keskiosaan ja liitoksiin (kuva 40). Kuvassa 41 esitetty maksimijännitys sijaitsee kattoputken ja poikkiputken liitoksen alareunalla. Sen suurus on 998 MPa.

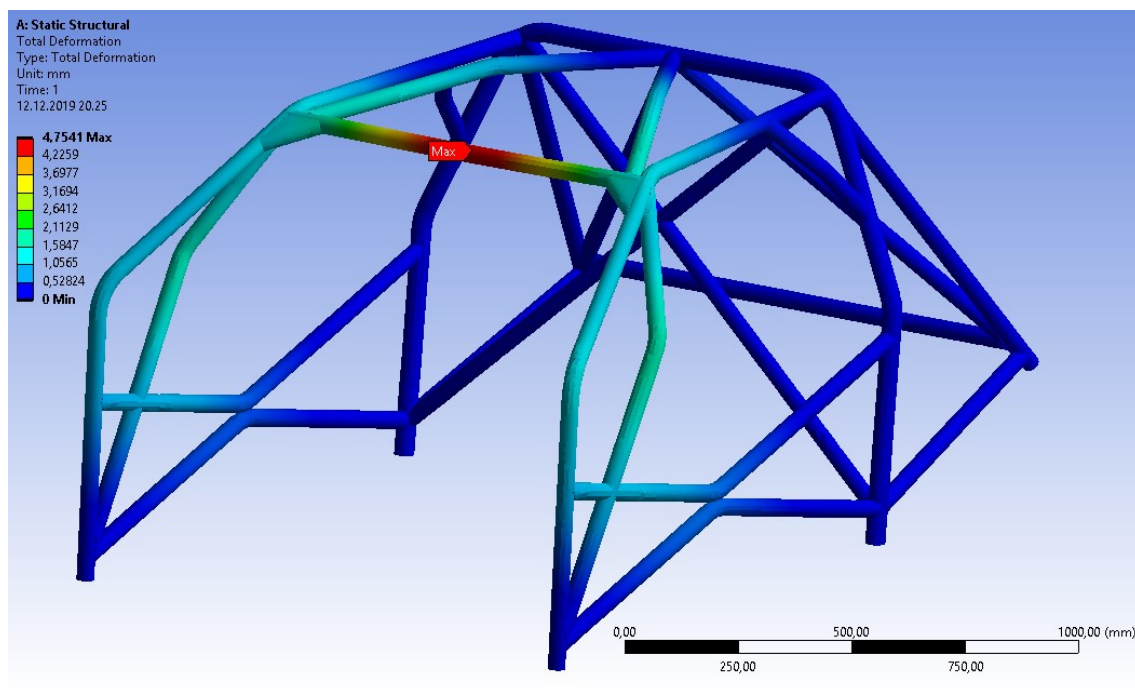


KUVA 40. Jännitys oviristikolla



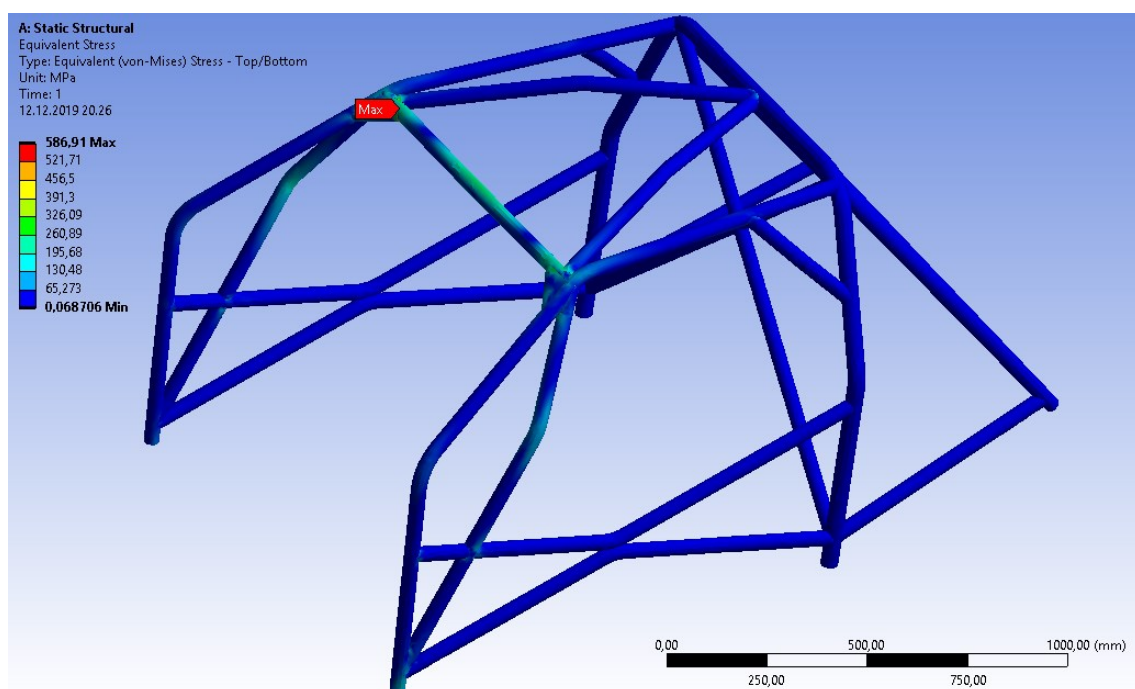
KUVA 41. Maksimijännitys oviristikolla

Kuvan 42 kehikossa oviristikolla kulmavahvikkein varustettuna suurin muodonmuutos on 4,75 mm.

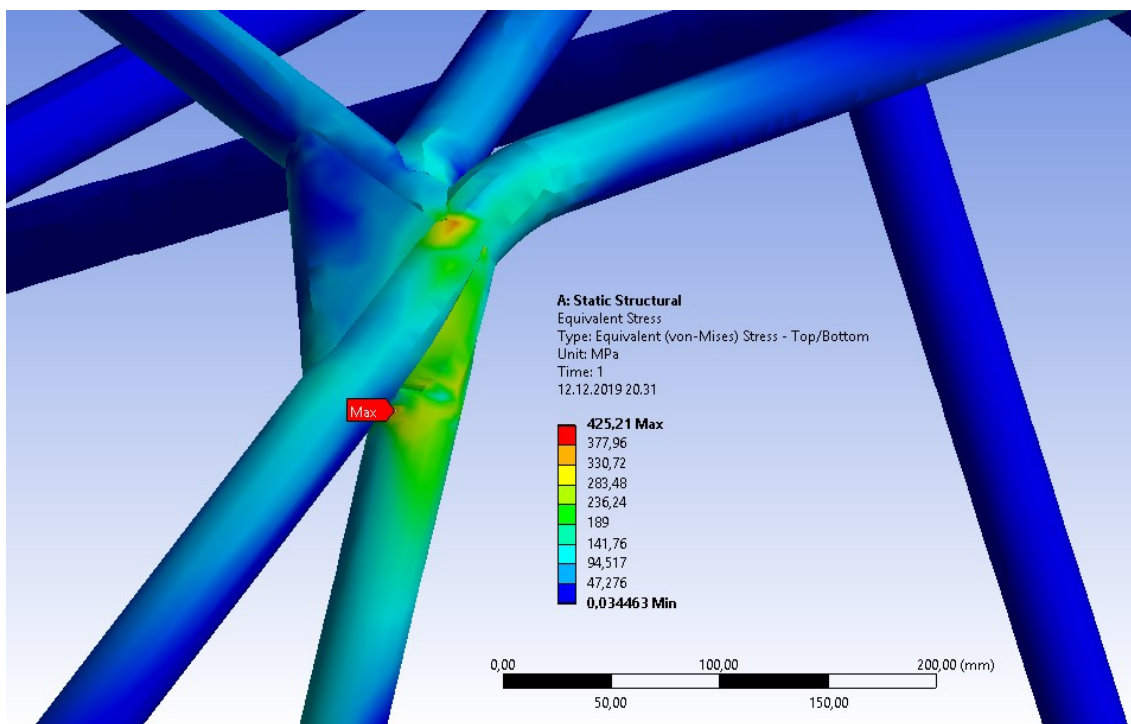


KUVA 42. Muodonmuutos oviristikolla kulmavahvikkein

Kuvassa 43 jännitys kulmavahvikkein varustetussa kehikossa jakautuu varsin samaan tapaan kuin ilman vahvikkeitakin. Kuvan 44 maksimijännityksen suuruus on 587 MPa ja se sijaitsee samalla kohtaa kuin ilman kulmavahvikkeitakin.

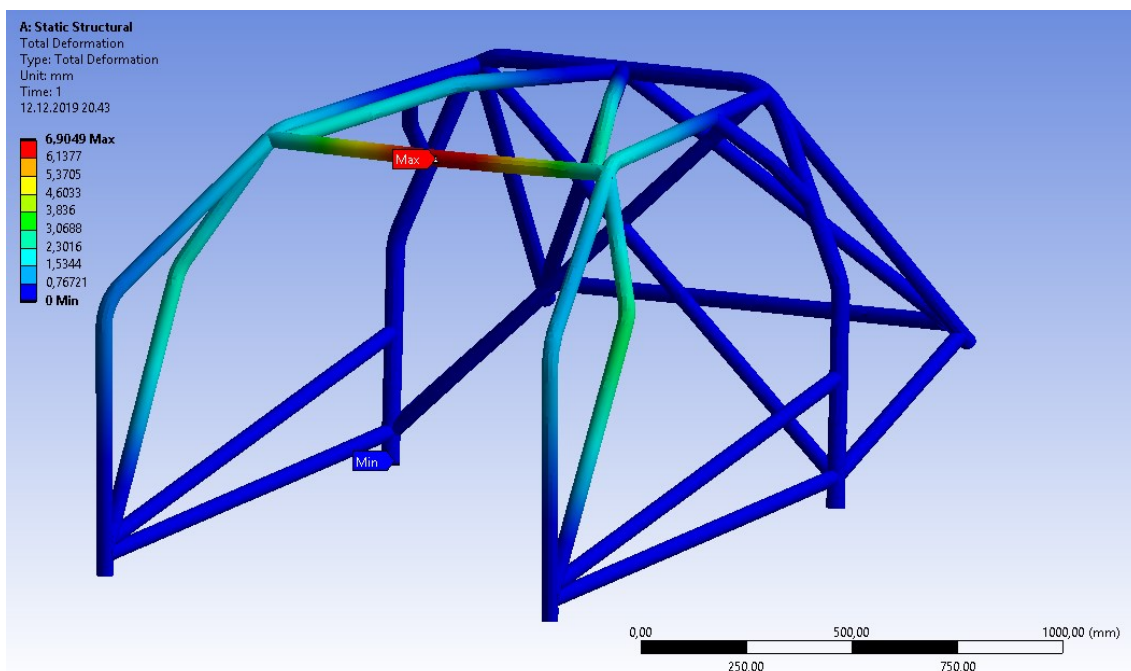


KUVA 43. Jännitys oviristikolla kulmavahvikkein



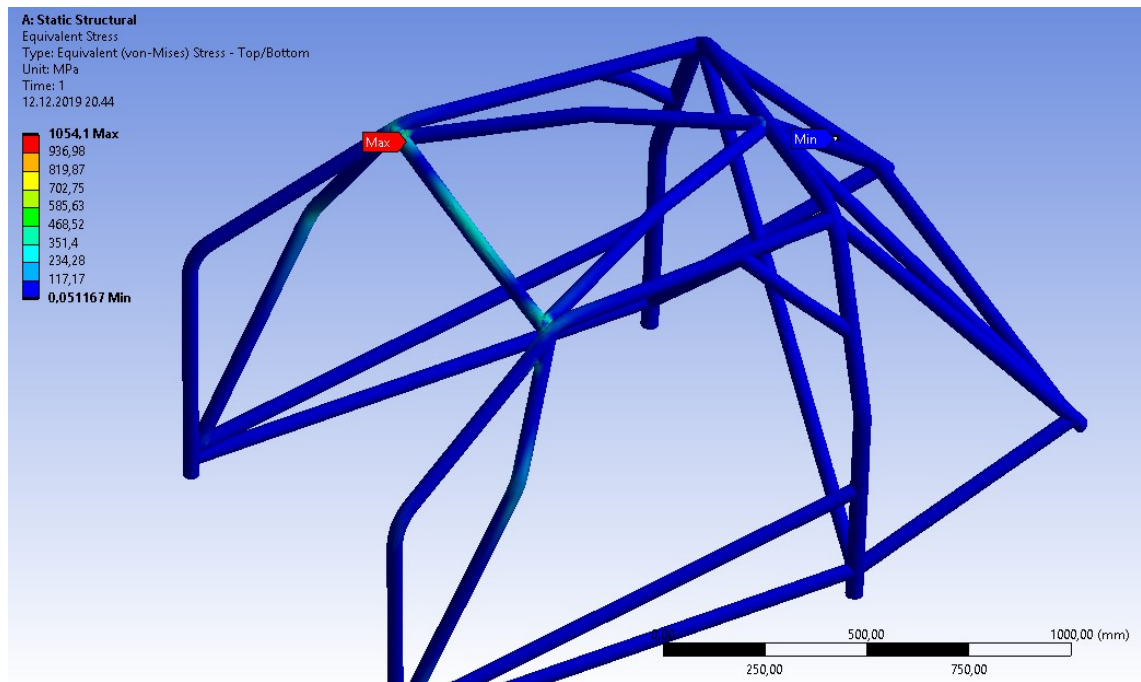
KUVA 44. Maksimijännitys oviristikolla kulmavahvikkein

Kuvassa 45 suorilla oviputkilla varustetun kehikon suurin muodonmuutos on 6,90 mm.

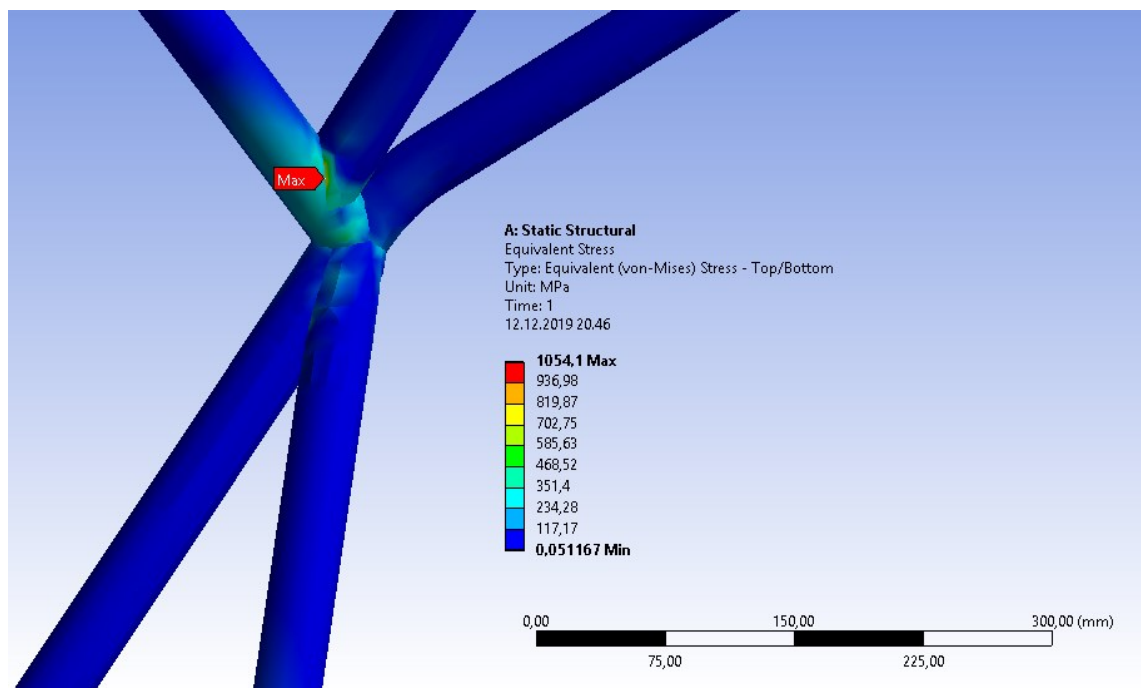


KUVA 45. Muodonmuutos suorilla oviputkilla

Kuvan 46 mukaisesti jännitys jakautuu hyvin samaan tapaan kuin muillakin kekkovariaatioilla. Maksimijännityksen suuruus kuvassa 47 on 1 054 MPa.



KUVA 46. Jännitys suorilla oviputkilla



KUVA 47. Maksimijännitys suorilla oviputkilla

## 5.5 Yhteenveto

Taulukoissa 1-4 on yhteenveto FEM-analyseistä. Vertailu jokaisen iskun osalta on tehty ensimmäiseen variaatioon nähden eli kehittöön oviristikolla ilman kulmavahvikkeita.



TAULUKKO 1. Isku etukulmaan

	<b>Ristikolla</b>	<b>Suorilla putkilla</b>	<b>Ero</b>
<b>Muodonmuutos</b>	90,15 mm	123,06 mm	36,5 %
<b>Maksimijännitys</b>	5 069 MPa	6 021 MPa	18,8 %

TAULUKKO 2. Isku sivulle

	<b>Ristikolla</b>	<b>Suorilla putkilla</b>	<b>Ero</b>
<b>Muodonmuutos</b>	8,08 mm	9,14 mm	13,1 %
<b>Maksimijännitys</b>	1 004 MPa	1 026 MPa	2,2 %

TAULUKKO 3. Isku yläkulmaan

	<b>Ilman vahviketta</b>	<b>Vahvikkeella</b>	<b>Ero</b>
<b>Muodonmuutos</b>	3,15 mm	2,75 mm	-12,7 %
<b>Maksimijännitys</b>	614 MPa	425 MPa	-30,8 %

TAULUKKO 4. Isku yläreunaan

	<b>Ristikolla</b>	<b>Suorilla putkilla</b>	<b>Ero</b>
<b>Muodonmuutos</b>	6,35 mm	6,90 mm	8,7 %
<b>Maksimijännitys</b>	998 MPa	1 054 MPa	5,6 %
	<b>Ilman vahviketta</b>	<b>Vahvikkeella</b>	<b>Ero</b>
<b>Muodonmuutos</b>	6,35 mm	4,75 mm	-25,2 %
<b>Maksimijännitys</b>	998 MPa	587 MPa	-41,2 %

## 6 POHDINTA

Oviputkivariaatioiden välillä erot jäivät varsin maltillisiksi varsinkin iskuissa sivulle ja yläreunaan. Rakenteiden ero korostuneekin tilanteissa, joissa niiden tulee tukea muuta kehikon rakennetta, kuten esimerkiksi etukulmaan tulevan iskun osalta oli nähtävissä. Muiden rakenteiden tukeminen nousee esiin myös käytettäessä rakenteen 253-25 mukaisia tukia etuiskunvaimennuksen yläpäälle, sillä ristikon ylempi etuliitos asettuu usein varsin lähelle kyseistä tukea. Lisäksi on huomioitava, että ristikkorakenteeseen tulevat pakolliset kulmavahvikkeet vaikuttanevat eroon ristikon hyväksi. Toisaalta suora oviputki suojaa ristikkoa paremmin alaviistosta sivulle kohdistuvaa iskua, joten parhaiten suojaavaa ratkaisua ajatellen kolmas putki ristikon alle olisi hyvä, mutta toisi myös runsaasti painoa lisää.

FEM-analyysin pohjalta havaittu vaikutus tuulilasin yläreunan poikkiputken ja sivukaaren välisen kulmavahvikkeella oli sekä muodonmuutoksen että jännityksen vähentämiseksi oli yllättävän suuri. Kulmavahvikkeen aiheuttama lisäpaino ja työmäärä valmistusvaiheessa ovat hyvin vähäisiä, joten saavutetun hyödyn ollessa huomattava ei syitä vahvikkeen käyttämättä jättämiselle juuri ole.

Työn pohjalta oviputkien ristikkorakenne ja kulmavahvikkeet tuulilasin yläreunan poikkiputkelle olivat selkeä valinta toteutettavaan turvakehikkoon. Aiemmin rakentamieni kehikoiden rakenne on vastannut kuvan 8 mukaista kehikkoa ja ne ovat toteutettu pääosin 38x2,5 mm profiilin putkella. Näin ollen tämän työn tuloksena saavutettiin kehitystä aiempaan 40x2 profiilin tarjoaman kevyemmän rakenteen myötä. Lisäksi tuulilasin yläreunaan kohdistuvia iskuja silmällä pitäen myös kehikon kestävyudessa saavutettiin selkeä parannus.

Jatkotutkimusmahdollisuuksia aiheen osalta olisi runsaasti esimerkiksi muiden valinnaisten rakenteiden vertailun saralla. Tutkimusta voisi myös tehdä putkien liitoskohtien sijainnin muutoksien vaikutuksesta kehikon jäykkyyteen.

## LÄHTEET

AKK Motorsport Oy. Autojen tekniset määräykset ja kuljettajien ajovarusteet. Liite J. Luettu 17.11.2019. [https://www.autourheilu.fi/site/assets/files/1930/30878977\\_akk\\_11\\_tekniset\\_2020\\_paiv\\_13112019.pdf](https://www.autourheilu.fi/site/assets/files/1930/30878977_akk_11_tekniset_2020_paiv_13112019.pdf)

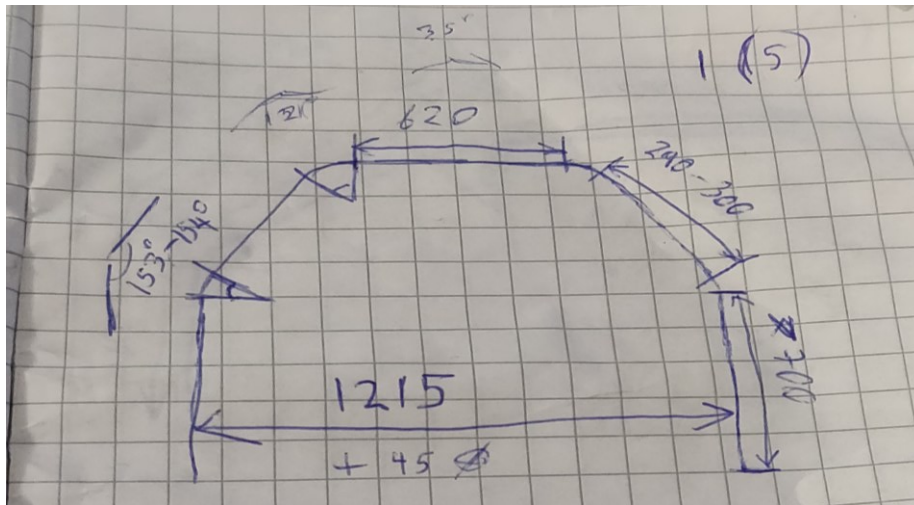
Bosch. 2014. Automotive Handbook. 9. painos. Saksa: Robert Bosch GmbH.

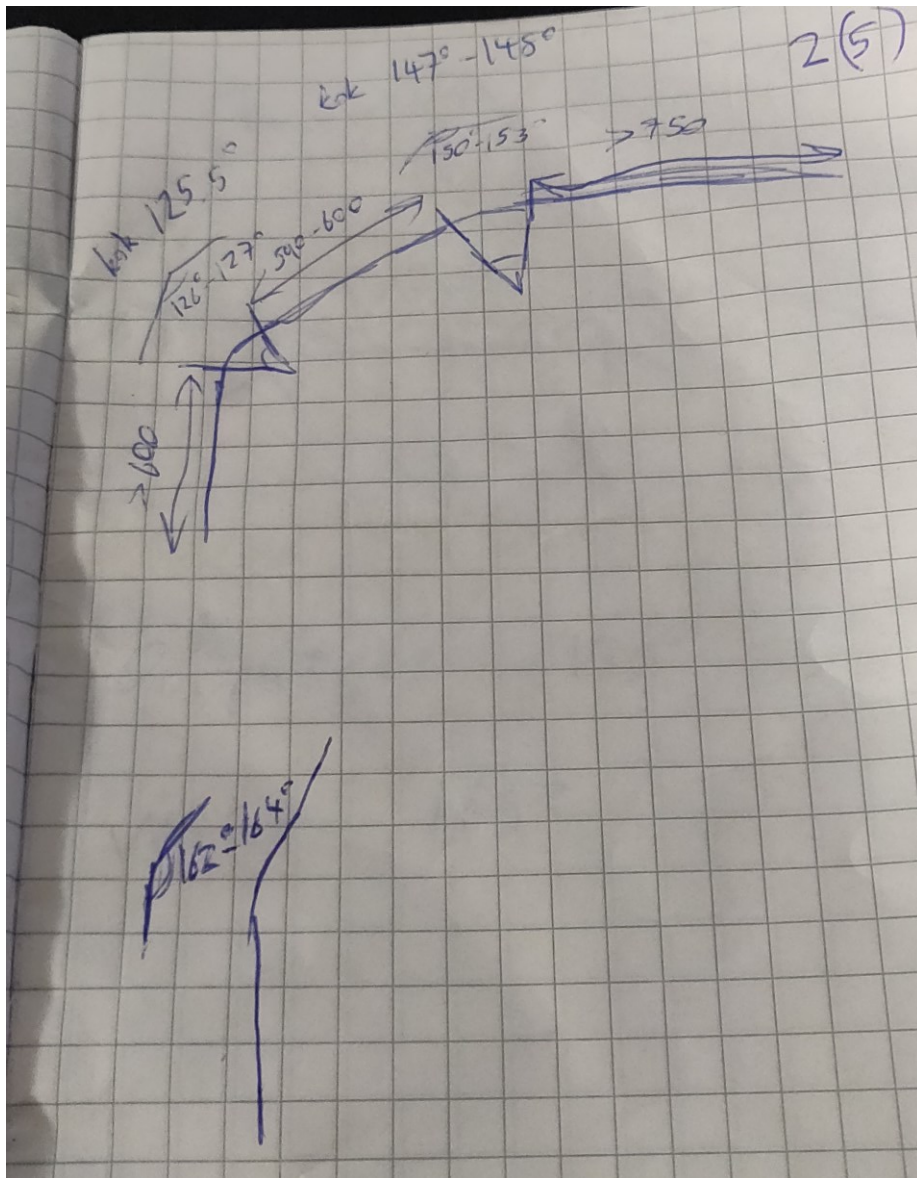
Karkela, L., Kervinen, M., Meriläinen, P., Parkkila, I. & Seppänen, R. 2011. MAOL taulukot. Keuruu: Otavan kirjapaino Oy.

Mäkelä, M., Soininen, L., Tuomola, S. & Öistämö, J. 2015. Tekniikan kaavasto. Tampere: Tammertekniikka.

## LIITTEET

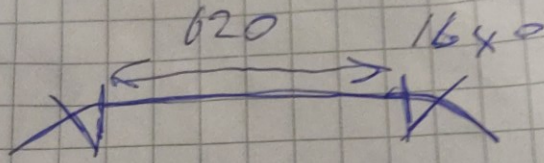
## Liite 1. Mittauspöytäkirja





Tunnit

3 (5)



Quipatket  $150^\circ$

WRC  $108^\circ$

