



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL  
MEHAANIKATEADUSKOND

Masinaehituse instituut  
Tootmistehnikaõppetool

MET70LT

*Siin Nõmme*

**FORMULA STUDENT KLASSI VORMELAUTO  
FEST 14 VELGEDE PROJEKTEERIMINE**

Autor taotleb  
tehnikateaduse magistri  
akadeemilist kraadi

Tallinn  
2014

## AUTORIDEKLARATSIOON

Deklareerin, et käesolev lõputöö on minu iseseisva töö tulemus.

Esitatud materjalide põhjal ei ole varem akadeemilist kraadi taotletud.

Töös kasutatud kõik teiste autorite materjalid on varustatud vastavate viidetega.

Töö valmis..... juhendamisel

“.....” .....201...a.

Töö autor

..... allkiri

Töö vastab magistritööle esitatavatele nõuetele.

“.....” .....201...a.

Juhendaja

..... allkiri

Lubatud kaitsmisele.

..... eriala/õppekava kaitsmiskomisjoni esimees

“.....” .....201... a.

..... allkiri

## **MAGISTRITÖÖ ÜLESANNE**

2014. aasta kevadsemester

Üliõpilane: Siim Nõmme, 122224 (nimi, üliõpilaskood)  
Õppekava: MATM02/11 Tootearendus ja tootmistehnika  
Eriala: Tootmistehnika  
Juhendaja: Lektor, Risto Kõiv (amet, nimi)  
Konsultandid: (nimi, amet, telefon)

### **MAGISTRITÖÖ TEEMA:**

(eesti keeles) Formula Student klassi vormelauto FEST14 velgede projekteerimine  
(inglise keeles) Wheel design for a Formula Student class racecar FEST14

### **Lõputöös lahendatavad ülesanded ja nende täitmise ajakava:**

| Nr | Ülesande kirjeldus                   | Täitmise tähtaeg |
|----|--------------------------------------|------------------|
| 1  | Lõputöö kava koostamine              | 01.03.2014       |
| 2. | Katsete tegemine                     | 01.04.2014       |
| 3. | Põhiosa kirjutamine                  | 12.05.2014       |
| 4. | Vormistuse viimistlemine ja köitmine | 19.05.2014       |
| 5. |                                      |                  |

**Lahendatavad insenertehnilised ja majanduslikud probleemid:** Lõputöö käigus projekteeritakse CAD tarkvara abil vormelauto FEST 14 esiemesed ja tagumised veljed. Ühtlasi tehakse ka ulatuslikke LEM tugevusanalüüse. Veljed peavad vastama Formula SAE sarja reeglitele ning velgede maksumus peab olema minimaalne vastavalt sarjas kasutatavatele kuluaruande standarditele.

**Täiendavad märkused ja nõuded:**.....

**Töö keel:** Eesti keel

Kaitsmistaotlus esitada hiljemalt 12.05.2014

**Töö esitamise tähtaeg 27.05.2014**

Üliõpilane Siim Nõmme

/allkiri/ .....

kuupäev.....

Juhendaja Risto Kõiv

/allkiri/ .....

kuupäev.....

Konfidentsiaalsusnõuded ja muud ettevõttepoolsed tingimused formuleeritakse pöördel

# SISUKORD

|  |           |
|--|-----------|
| <b>EESSÕNA</b> .....                                     | <b>6</b>  |
| <b>SISSEJUHATUS</b> .....                                | <b>7</b>  |
| <b>1. FS TEAM TALLINN JA FORMULA STUDENT</b> .....       | <b>10</b> |
| 1.1. FORMULA STUDENT .....                               | 10        |
| 1.2. FORMULA STUDENT TEAM TALLINN .....                  | 13        |
| <b>2. EESMÄRK JA PIIRAVAD TEGURID</b> .....              | <b>15</b> |
| <b>3. EELNEVA LAHENDUSE ANALÜÜS</b> .....                | <b>17</b> |
| 3.1. EELNEVA LAHENDUSE TEHNILINE SPETSIFIKATSIOON: ..... | 18        |
| 3.1.1. <i>Probleemid eelneva lahendusega</i> .....       | 18        |
| 3.1.2. <i>Eelneva lahenduse tugevusanalüüs</i> .....     | 18        |
| 3.2. TUGEVUSANALÜÜSI METOODIKA .....                     | 20        |
| 3.3. EELNEVA LAHENDUSE FUNKTSIONAALSUS .....             | 20        |
| <b>4. VÕIMALIKUD UUE VELJE LAHENDUSED</b> .....          | <b>21</b> |
| 4.1. VÕIMALIKUD UUE VELJE KONTSEPTSIOONID .....          | 21        |
| 4.2. ERINEVATE LAHENDUSTE PLUSSID JA MIINUSED .....      | 23        |
| 4.3. UUE VELJEKONTSEPTSIOONI VALIMISE KRITEERIUMID ..... | 25        |
| 4.4. TULEMUSTE HINDAMINE .....                           | 27        |
| <b>5. ESIMENE VELG</b> .....                             | <b>29</b> |
| 5.1. KASUTATAVAD OSTUTOOTED .....                        | 29        |
| 5.2. VELJEVÕRUDE CAD MUDEL .....                         | 30        |
| 5.3. PIIRANGUD PROJEKTEERIMISEL .....                    | 31        |
| 5.4. VELJE AERODÜNAAMILINE ANALÜÜS .....                 | 33        |
| 5.5. TUGEVUSANALÜÜS .....                                | 35        |
| 5.5.1. <i>Koormused</i> .....                            | 36        |
| 5.5.2. <i>Rajatingimused</i> .....                       | 36        |
| 5.5.3. <i>Koormuste rakendamine</i> .....                | 39        |
| 5.5.4. <i>Tugevusanalüüsi parameetrid</i> .....          | 39        |
| 5.6. MATERJALID .....                                    | 41        |
| 5.7. TUGEVUSANALÜÜS VELJESENTRILE .....                  | 45        |

|   |           |
|---|-----------|
| 5.8. TUGEVUSANALÜÜS VELJEKOOSTULE .....   | 49        |
| <b>6. TAGUMINE VELG.....</b>              | <b>51</b> |
| 6.1. PIIRANGUD PROJEKTEERIMISEL.....      | 51        |
| 6.2. TUGEVUSANALÜÜS VELJETSENTRILE .....  | 52        |
| 6.3. TUGEVUSANALÜÜS VELJEKOOSTULE .....   | 53        |
| <b>7. TOOTMINE .....</b>                  | <b>55</b> |
| 7.1. TOORIKUD .....                       | 55        |
| 7.2. TÖÖTLEMISMETOODIKA .....             | 56        |
| <b>8. MAJANDUSLIK ARVUTUS.....</b>        | <b>59</b> |
| 8.1. KULUARUANDE NÄIDE .....              | 59        |
| 8.2. ESIMISE VELJE KULUARUANNE .....      | 60        |
| 8.3. TAGUMISE VELJE KULUARUANNE .....     | 62        |
| 8.4. VÕRDLUS EELNEVA MUDELIGA.....        | 63        |
| <b>KOKKUVÕTE .....</b>                    | <b>64</b> |
| <b>SUMMARY .....</b>                      | <b>66</b> |
| <b>KASUTATUD KIRJANDUS .....</b>          | <b>68</b> |
| <b>LISAD .....</b>                        | <b>69</b> |
| Lisa 1. Esimese veljetsentri joonis.....  | 70        |
| Lisa 2. Tagumise veljetsentri joonis..... | 71        |
| Lisa 3. Välimise veljevõru 2" joonis..... | 72        |
| Lisa 4. Sisemise veljevõru 6" joonis..... | 73        |
| Lisa 5. Välimise veljevõru 4" joonis..... | 74        |
| Lisa 6. Sisemise veljevõru 4" joonis..... | 75        |
| Lisa 7. Esimese velje koostu joonis.....  | 76        |
| Lisa 8. Tagumise velje koostu joonis..... | 77        |

## **EESSÕNA**

Lõputöö teema on autori enda algatusel valitud. Teema on seotud Tallinna Tehnikaülikooli ja Tallinna Tehnikakõrgkooli ühise tudengiorganisatsiooniga Formula Student Team Tallinn. Lõputöö teemaks olev tootearendus on tudengiorganisatsioonile päevakohane ning vajalik. Lõputöö põhineb meeskonna aastatepikkusel kogemusel ning kogutud algandmetel. Töö koostamisel tekkinud küsimustega abistasid autorit meeskonna vedrustuse, aerodünaamika ning lõiketöötuse spetsialistid.

## SISSEJUHATUS

Käesoleva lõputöö teemaks on Formula Student Team Tallinna poolt projekteeritava ning ehitatava vormelauto prototüübi FEST14 velgede projekteerimine. Teema valiti kuna antud valdkonnas on meeskonna eelnevatel prototüüpidel esinenud puudujääke. Velgede projekteerimine ning kõikide selle nüansside põhjalik uurimine pakkus ka piisavat väljakutset ning teema tundus huvitav.

Formula Student Team Tallinn projekteerib ning ehitab igal aastal uue Formula Student sarja võistlusauto. Eesmärk on pidev vormeli parendamine seega tootearendus peab toimuma kõikides valdkondades kaasaarvatud velgedes. Kuna meeskonna töös on ranged tähtjad siis lõputöö esitamise ajaks peavad kõik vormeli detailid, ka veljed, olema valmistatud ning vormeli küljes.

Lõputöö tulemusena valmivad vormelauto veljed, mis vastavad tehnilistele nõuetele ning on oma omadustelt võimalikult head. Midagi täiesti uutset luua on väga keeruline ning võimalik, et ka ebaotstarbekas kuid velje projekteerimisel kasutatavad meetodid, materjali katsed ning mitmed spetsiaaltarkvaradega tehtavad analüüsid on Formula Student Team Tallinna 6 aasta pikkuses praktikas uued.

Käesoleva lõputöö eesmärgiks on projekteerida veljed FS Team Tallinna 2013/2014 hooaja võistlusautole FEST14 ning pakkuda välja projekteeritud lahenduse tootmiseks sobilikud tootmismeetodid. Lisaks sellele on töös käsitletud veel põhjalikku taustauuringut võimalikest velje kontseptsioonidest ning ühtlasi ka velje tootmiseks vajaminevaid kulutusi sisaldavaid majanduslikke arvutusi Formula Studenti võistluste kuluaruande baasil.

Formulas Student on peamiselt autotehnika ning masinaehituse eriala üliõpilastele suunatud ülemaailmne tootearendusvõistlus, milles osalevad ülikoolid üle maailma. Võisteldakse üheistmelise võidusõiduauto projekteerimises, ehitamises ning sellega võidusõitmises. Sarjas osalemine annab noorele insenerile hea kogemuse tootearenduses ning pakub võimaluse tõestada ennast võistlustel omaala spetsialistidest kohtunike ees. 1970ndate lõpul Ameerika Ühendriikidest alguse saanud võistlus on nüüdseks levinud üle kogu maailma. Euroopas algas Formula Studenti levik 1998ndal aastal Inglismaal. Praegu peetakse Euroopas võistlusi peale Inglismaa veel Austrias, Ungaris ning Itaalias.

Formula Student Team Tallinn on 2006. aastal Tallinna Tehnikaülikooli ning Tallinna Tehnikakõrgkooli koostöös loodud ühismeeskond. Meeskonna liikmeteks on Tehnikaülikooli ning Tehnikakõrgkooli transpordi- ning mehhanikateaduskonna bakalaureuse ning magistriõppe tudengid. Alates 2007. aastast on FS Team Tallinn osalenud rahvusvahelistel võistlustel. Esimese prototüübi loomiseni jõuti 2008. aastal, mida saatis oma esimesel võistlusel Inglismaal Silverstone'is ka kohe edu. Nüüdseks on valminud juba 3 võidusõiduautot. FS Team Tallinn on oma tegutsemis aastate jooksul võistelnud nii Euroopas kui Ameerika Ühendriikides ning saavutanud väga häid tulemusi.

Formula Studenti sarjas on kasutusel väga põhjalikud Formula SAE reeglid, mis reglementeerivad muuhulgas ka kõik sõiduki sõlmi puudutavad tehnilised tingimused. Reeglites on välja toodud ka mõned sisulised piirangud ja juhised velgedele. Kõik tehnilised lahendused, kaasaarvatud veljed, peavad vastama täielikult tehnilistele nõuetele.

Lõputöö aluseks on võetud velgedega paralleelselt projekteeritav vedrustuse kinemaatika, millest tulenevad mitmed baasparameetrid velgede projekteerimiseks. Töös on kasutatud mitmeid meeskonna poolt loodud arvutusmooduleid. Lisaks sellele on kasutatud lõputöös tehtud tugevusanalüüsiks ning CAD projekteerimiseks CATIA V5R21 tarkvara. Voolavusanalüüsiks on kasutatud Autodesk Simulation CFD nimelist tarkvara. Töölusprotsesside simuleerimiseks on kasutatud MastercamX7 nimelist tarkvara. Materjali katsetusteks on kasutatud Tallinna Tehnikaülikooli laboreid ning valmistamiseks on kasutatud Tallinna Tehnikakõrgkooli lõiketööluslaborit.

Lõputöö põhiosa algab Formula Studentit ning Formula Student Team Tallinnat tutvustava peatükiga. Sellele järgneb peatükk, milles kirjutatakse lahti töö eesmärk ja parameetrid, mis on võetud aluseks antud tootearenduse tegemisel. Järgmine peatükk selgitab, milline on seis enne tootearenduse algust ehk mis on stardiplatvorm, milline oli eelnev velje lahendus. Tehakse põhjalik eelneva lahenduse analüüs, et õppida vanadest vigadest ning saada aru, millised valdkonnad vajavad kõige enam parendamist. Edasi minnakse järgmises peatükis juba võimalike uute lahenduste analüüsi juurde. Tegemist on erinevate veljekonseptsioonide analüüsiga. Järgmises peatükis alustatakse juba eesmise velje projekteerimisega. Selles peatükis käiakse läbi kõik tehtud tootearenduse sammud ning kirjeldatakse, kuidas on jõutud tehtud järeldusteni. Alapeatükid on nii tugevusarvutustest, voolavusanalüüsist, kasutatud materjalidest kui ka kasutatavatest ostutoodetest ja nende analüüsist. Järgmine peatükk kirjeldab tagumise velje projekteerimisprotsessi. Alapeatükid on sarnased esivelje peatükile.



Järgmises peatükis antakse ülevaade tootmisprotsessist. Kirjeldatakse nii kasutatavaid masinaid kui ka töötlemise põhimõtteid ning järjekorda. Viimane sisupeatükk on majanduslike arvutuste kohta. Velje tootmiseks vajaminevad kulutused arvutatakse välja kasutades Formula Studenti sarja kuluaruande põhimõtteid ning tabeleid. Lõputöö lõpeb lisadega, milleks on projekteeritud veljetsentrite joonised ning nii esimese kui tagumise velje koostujoonised.

# 1. FS TEAM TALLINN JA FORMULA STUDENT

## 1.1. Formula Student

Formula Student on rahvusvaheline tootearendusvõistlus, milles osalevad enam kui 500 ülikooli tudengid üle terve maailma. Võistluse eesmärk on projekteerida ning ehitada üheistmeline võidusõiduauto, mis oleks mõeldud võistleva väga tehnilistel ning keerukatel lühiradadel. Projekteeritava sõiduki sihtrühmiks on amatöör pühapäevavõidusõitja, mis tähendab, et sõiduki kavandamisel peab pöörama väga suurt tähelepanu ka kasutusmugavusele ning lihtsusele. Eduka toote väljaarendamine annab noortele inseneride väärt kogemuse nii projekteerimise kui ka meeskonnatöö vallas. Formula Studenti võistluse idee on pärit Ameerika Ühendriikidest, kus ülikoolid alustasid omavahel võistlemist juba aastal 1978. Euroopasse jõudis võistlus aastal 1998. Algselt toimusid võistlused ainult Inglismaal, kuid nüüdseks on Formula Student levinud juba üle Euroopa.

Võistlus ise ei seisne ainult rajal võidukihutamises. Laias laastus jaguneb võistlus kaheks – staatiliseks ja dünaamiliseks osaks. Staatilisse ossa kuuluvad projekti esitlemine äriplaanina (*business presentation*), vormelauto kuluaruanne (*cost report*) ning võistluste üks kõige tähtsam osa ehk disaini kaitsmine (*design judging*). Dünaamilise osa moodustavad 8-kujulisel rajal külgiirenduskatse (*skid-pad*), 75 meetri kiirendus (*acceleration*), kvalifikatsioonisõit (*autocross*) ning 22 kilomeetri kestvussõit (*endurance*).

Äriplaani esitlemine tähendab seda, et kogu võidusõiduauto ehitusprojekti tuleb esitleda reaalse äriplaanina potentsiaalsetele investoritele, keda esindavad võistlustel kohtunikud. Kuluaruande aluseks on nii paberil kui digitaalsel kujul kohtunikele esitatud täielik kuluaruanne. Aruandes on kirjas kõikide vormeli küljes olevate detailide maksumus. Isevalmistatud toodete puhul nende tootmiseks vajalike toormaterjalide hinnad, valmistamise maksumus, valmistamiseks kasutatud rakiste maksumus jne. Ostutoodete puhul on kirjas lihtsalt toote hind. Kõik hinnad võetakse võistluse reglemendis avaldatud tabelitest, mitte ei arvestata realselt detailide maksumust. See tagab meeskondade võrdsuse. Ka ostutoodete hinnad võetakse vastavatest tabelitest. Eelpoolmainitud tabelid on koostatud seeriatootmist silmas pidades. Materjali töötlemise, tööriistade ning rakiste maksumused on arvatud aastas 1000 auto tootmise korral.

*Design Judging* ehk disaini kaitsmine on võistluste üks tähtsamaid alasid. Eesmärgiks on põhjendada oma tehnilisi lahendusi maailmatasemel auto-, võidusõidu- ning masinaehitusinseneridele. Hinnatakse eelkõige insenerlikku mõtlemist ning teooria tundmist detaili projekteerimisel. *Skid-pad* ehk külgiirenduskatse põhineb 8-kujulise raja võimalikult kiirel läbimisel. Alustatakse 8 tsentrist ja sõidetakse kaks ringi ühele poole ning kaks ringi teisele poole. Kummalegi poole sõidetud teine ring läheb arvesse ning tulemus saadakse aritmeetilise keskmise arvutamise teel. Katse eesmärk on testida sõiduki kurvisuutlikkust. Eelkõige näitab see vormelauto projekteerimisel tehtud otsuste toimivust rajal ning meeskonna võimekust seadistada, eeskätt just sõiduki vedrustust, parima võimaliku tulemuse saavutamiseks.

75 meetri kiirenduskatse seisneb paigaltstardist 75 meetri läbimises. Kiireim aeg võidab. *Autocross* ehk kvalifikatsioon sõidetakse koonustega märgitud väga keerukal ning tehnilisel rajal. Rada sisaldab endas tavaliselt palju slaalomeid, põikeid ning järske kurve, selgitamaks välja parima juhitavusega ning kurvisuutlikkusega autot. Kestvussõit ehk endurance on võistluse kõige vaatamängulisem ala. Korraga on rajal tavaliselt 3 kuni 4 vormelit. Starditakse kvalifikatsiooni sõidu pööratud järjestuses (kiireimad tulevad rajale viimasena). Kestvussõit on 22 km pikk ning poolel distantsil peab toimuma kohustuslik juhivahetus. Peale kestvussõitu hinnatakse ka sõiduki ökonoomsust kütusekulu mõõtmise teel. Võistluse üldvõitja selgitatakse välja punktide kokku liitmise teel. Igalt võistlusosalalt on võimalik saada teatud arv punkte, mis on määratud Formula Studenti reeglitega. Kui palju punkte iga meeskond saab, otsutavad kohtunikud. Kokku on võimalik koguda 1000 punkti. [1]

Tabel 1.1 Maksimaalsed võimalikud saadaolevad punktid.

| Staatiline osa  |                      | Punktid |
|-----------------|----------------------|---------|
|                 | Äriplaani esitlemine | 75      |
|                 | Kuluaruanne          | 100     |
|                 | Disaini kaitsmine    | 150     |
|                 |                      |         |
| Dünaamiline osa |                      |         |
|                 | Külgkiirenduskatse   | 50      |
|                 | Kiirenduskatse       | 75      |
|                 | Kvalifikatsioonisõit | 150     |
|                 | Kestvussõit          | 300     |
|                 | Kütusekulu           | 100     |
| <hr/>           |                      |         |
| KOKKU           |                      | 1000    |

## 1.2. Formula Student Team Tallinn

Eestisse jõudis idee Formula Studentist 2005. aasta alguses. Umbes poolteist aastat hiljem moodustati Tallinna Tehnikakõrgkooli ja Tallinna Tehnikaülikooli ühismeeskond Formula Student Team Tallinn. Aastate jooksul on FS Team Tallinn arenenenud üheks tippmeeskonnaks maailmas. Esikolmiku kohti rahvusvahelistel võistlustel on saavutatud nii Euroopas kui ka Formula Studenti sünnimaal Ameerika Ühendriikides. Meeskonna saavutustest annab ülevaate tabel 1.2.

Tabel 1.2. FS Team Tallinna saavutused

| Aasta | Auto             | Võistlus    | Koht                 | Võistlejate arv |
|-------|------------------|-------------|----------------------|-----------------|
| 2007  | Virtuaalne mudel | Silverstone |                      |                 |
| 2008  | FEST08           | Silverstone | 13 (parim uustulnuk) | 72              |
| 2009  | FEST09           | Hockenheim  | 46 (katkestamine)    | 78              |
|       | FEST09           | Baltic Open | 1                    | 9               |
|       | FEST08           | Baltic Open | 3                    | 9               |
| 2010  | FEST10           | Michigan    | 40 (katkestamine)    | 120             |
|       | FEST10           | Silverstone | 7                    | 76              |
|       | FEST10           | Baltic Open | 1                    | 10              |
|       | FEST08           | Baltic Open | 2                    | 10              |
| 2011  | FEST11           | Austria     | 7                    | 32              |
|       | FEST11           | Hockenheim  | 11                   | 75              |
|       | FEST11           | Ungari      | 4                    | 28              |
|       | FEST11           | Baltic Open | 2                    | 20              |
|       | FEST10           | Baltic Open | 6                    | 20              |
|       | FEST08           | Baltic Open | 9                    | 20              |
| 2012  | FEST12           | Silverstone | 5                    | 80              |
|       | FEST12           | Ungari      | 1                    | 40              |
|       | FEST12           | Baltic Open | 1                    | 20              |
|       | FEST10           | Baltic Open | 3                    | 20              |
|       | FEST08           | Baltic Open | 7                    | 20              |
| 2013  | FEST12           | Michigan    | 2                    | 130             |
|       | FEST12           | Kanada      | 2                    | 50              |
|       | FEST13           | Ungari      | 15 (katkestamine)    | 45              |
|       | FEST12           | Baltic Open | 1                    | 25              |
|       | FEST10           | Baltic Open | 7                    | 25              |
|       | FEST08           | Baltic Open | 10                   | 25              |

Aastate jooksul on meeskonnast läbi käinud sadu noori insenere. Kui algusaastatel koosnes meeskond 7-8 inimesest, siis praeguseks on meeskond kasvanud umbes 30-liikmeliseks. Meeskonna liikmete arvukusega on samal ajal kasvanud ka meeskonna tehniline kompetents

ning kogemustepagas. 2013. aastaks oli Formula Student Team Tallinn saavutanud maailmaedetabelis 5. koha enam kui 500 ülikooli meeskonna seas. Uueks väljakutseks sai elektrivormeli ehitus. Paralleelselt sise põlemismootoriga kasutatakse Formula Studenti sarjas ka elektrilisi jõuallikaid. Arendustöö algas paljudes valdkondades nullist. 2013. aasta suveks valmis Eesti esimene elektrivormel FEST13. Esimest prototüüpi ei saanud küll täielik edu, kuid seda enam andis see innustust meeskonnale arendamiseks oma ideid ning tehnoloogiaid edasi. 2014. aastal valmistab meeskond prototüüpi FEST14, mis on samuti elektrimootoriga vormel. Eesmärgiks on võistelda 2014. aasta suvel võistlustel Austrias, Ungaris, Itaalias ja ka Eestis. [1]

## 2. EESMÄRK JA PIIRAVAD TEGURID

Käesoleva lõputöö eesmärgiks on projekteerida FS Team Tallinna poolt loodavale Formula Student klassi vormelautole FEST14 eesmine ja tagumine velg. Põhimõtted, mida on vaja järgida vormelauto FEST14 velgede projekteerimisel:

- Velgede mass peab olema väiksem kui eelneval mudelil
- Veljed peavad vastu pidama neile rakenduvatele koormustele ning sealjuures peab säilima piisav varutegur
- Veljed peavad tagama võimalikult hea pidurijahutuse
- Veljed peavad täielikult vastama Formula SAE 2014 reeglitele
- Veljed peavad olema valmistatavad kasutades FS Team Tallinnale kättesaadavat masinaparki ja võimalusi
- Velgede maksumus kuluaruandes (*cost report*) ei tohi ületada eelmise aasta velje maksumust

Velje projekteerimisel on mitmeid parameetreid, mille määrab sõiduki vedrustus. FEST14 velje projekteerimisel tuleb samuti järgida vedrustuse poolt etteseadud piiranguid ja parameetreid. Tähtsamateks parameetriteks on velje diameeter, velje laius, velje nihe, tsentriava suurus ning kinnituspoltide poldivalem. FEST14 velje projekteerimisel kasutatakse järgnevaid etteantud parameetreid (Tabel 2.1):

Tabel 2.1. Esimeste ja tagumiste velgede parameetrid [2;6]

|                          | <b>Esimene velg</b> |       | <b>Tagumine velg</b> |       |
|--------------------------|---------------------|-------|----------------------|-------|
| <b>Velje diameeter</b>   | 10                  | tolli | 10                   | tolli |
| <b>Velje laius</b>       | 8                   | tolli | 8                    | tolli |
| <b>Velje nihe</b>        | 25                  | mm    | -25                  | mm    |
| <b>Tsentriava suurus</b> | 80                  | mm    | 80                   | mm    |
| <b>Poldivalem</b>        | 3x104               |       | 3x104                |       |

Nagu eelnevalt mainitud, peavad projekteeritavad veljed vastama täielikult Formula SAE 2014 reeglitele. Reeglitele mittevastavat lahendust tehnilisest kontrollist läbi ei lasta. Järgnevalt on välja toodud reeglid, millele projekteeritavad veljed peavad vastama.

FSAE Reeglid 2014 [3]

### T6.3 Rattad

T6.3.1 Sõiduki rataste diameeter peab olema vähemalt 203,2mm (8 tolli) või enam.

T6.3.2 Ratta kinnitismehanismid mis kasutavad ühte kinnitusmutrit, peavad kasutama lukustust, mis ei lase mutril lahti tulla.

T6.3.3 Tavalisi polte ja mutreid tohib kasutada ratta kinnitamisel, kui neid pole modifitseeritud. Juhul, kui neid on modifitseeritud, peavad need läbima tehnilise kontrolli tagamaks, et modifikatsioonid on tehtud hea inseneritava kohaselt.

T6.3.4 Alumiiniumist rattamutreid võib kasutada juhul, kui need on kõvaanodeeritud ja eeskujulikus seisukorras.

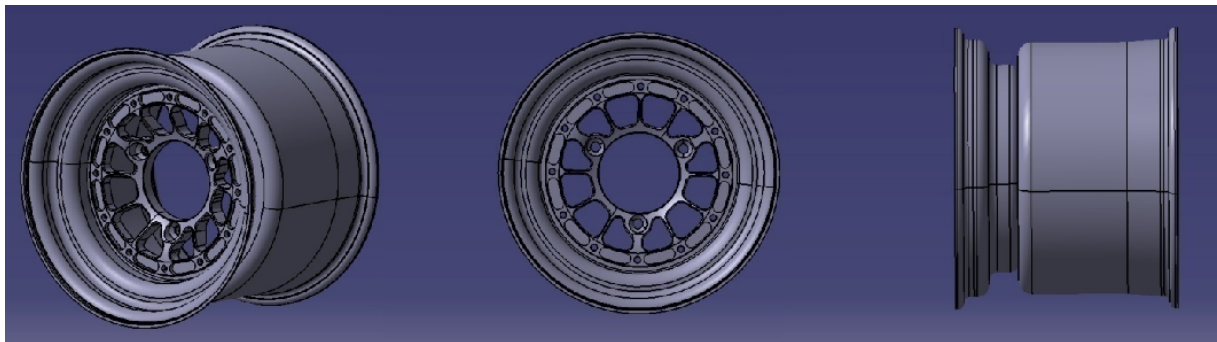
Projekteeritud vormelauto FEST14 veljed valmistatakse Tallinna Tehnikakõrgkooli metallilõikelaboris. Seega tuleb arvestada antud laboris olevate seadmetega ning võimalustega. Tööriistad metallilõiketöökaks valitakse FS Team Tallinna suurtoetaja, ettevõtte OÜ Attila tootevalikust.



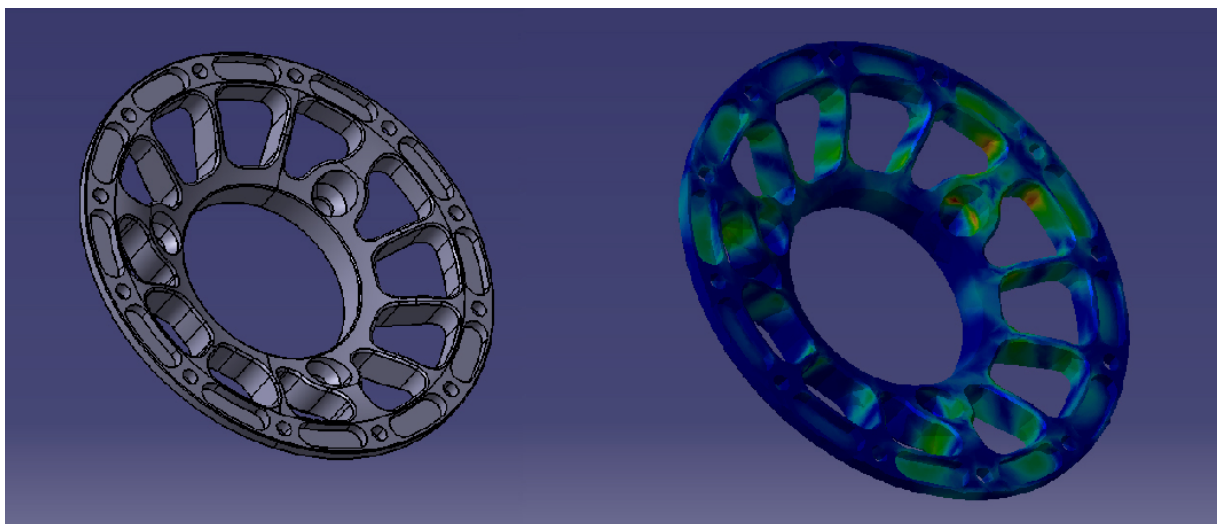
### 3. EELNEVA LAHENDUSE ANALÜÜS

Uue velje projekteerimisel tuleb alustada eelneva lahenduse põhjalikust analüüsist. Pole mõtet alustada nullist, vaid tuleb alustada sealt, kus areng parasjagu seisma on jäänud. Sellepärast alustatigi eelmise aasta prototüübi FEST13 velgede põhjalikust analüüsist. Järgnevas peatükis analüüsitakse velgede ehitust, disaini ning vastupidavust neile rakenduvatele jõududele.

Veljelahendus, mis võetakse edasiarenduse aluseks, on rakendatud prototüüpsel vormelautol FEST13 kasutusel olevate velgede puhul (Sele 3.1). Velg on valmistatud kolmest osast. Veljevõrud on ostutooted ning velje tsentriosa on meeskonna poolt projekteeritud ning valmistatud. Projekteerimisel on kasutatud nii CAD kui LEM (Lõplike Elementide Meetod) tarkvara (Sele 3.2).



Sele 3.1. FEST13 velg



Sele 3.2. FEST13 velje CAD mudel vasakul ja pilt LEM tugevusanalüüsist paremal

### **3.1. Eelneva lahenduse tehniline spetsifikatsioon:**

Järgnevas loetelus on kirjas peamised tehnilised nüansid ning protsessid, mida eelneva veljelahenduse korral on kasutatud. Samuti on välja toodud ka tähtsamad parameetrid selle lahenduse kohta.

- Veljevõrud on ostutootena tellitud Ameerika Ühendriikides tegutsevast firmast Keizer Racing
- Veljevõrud on valmistatud alumiiniumist 6061 T6
- Veljetsenter on valmistatud alumiiniumist 7075 T6 (Alumec89)
- Veljetsenter on projekteeritud vastavalt tugevusarvutuste (LEM simulatsioonide) tulemustele
- Veljetsenter on valmistatud kasutades 3-teljelist CNC freespink
- Velje kogukaal on 2157g millest 325g moodustab veljetsenter
- Varutegur velje projekteerimisel on võetud 3, mis on sarnane kõikidel vormelauto vedrustuse ning veermiku detailidel
- Veljetsenter on peale valmistamist anodeeritud, tagamaks paremat vastupidivust välistingimustele

#### **3.1.1. Probleemid eelneva lahendusega**

Uue velje projekteerimiseks on vaja teada, mis eelneva lahenduse probleemid olid. Järgnevas loetelus on välja toodud peamised murekohad.

- Veljetsentri väiksusest ning kinnisest disainist sõltuvalt ei saa pidurisadulad piisavalt jahutust.
- Velje kaalu/jäikuse suhe võiks parem olla.

#### **3.1.2. Eelneva lahenduse tugevusanalüüs**

Vormelautol FEST13 kasutusel olnud velgede tsentrid on valmistatud Uddeholmi materjalist Alumec 89 (Alumiinium 7075 T6). Antud materjali omadused on välja toodud järgnevas tabelis 3.1.

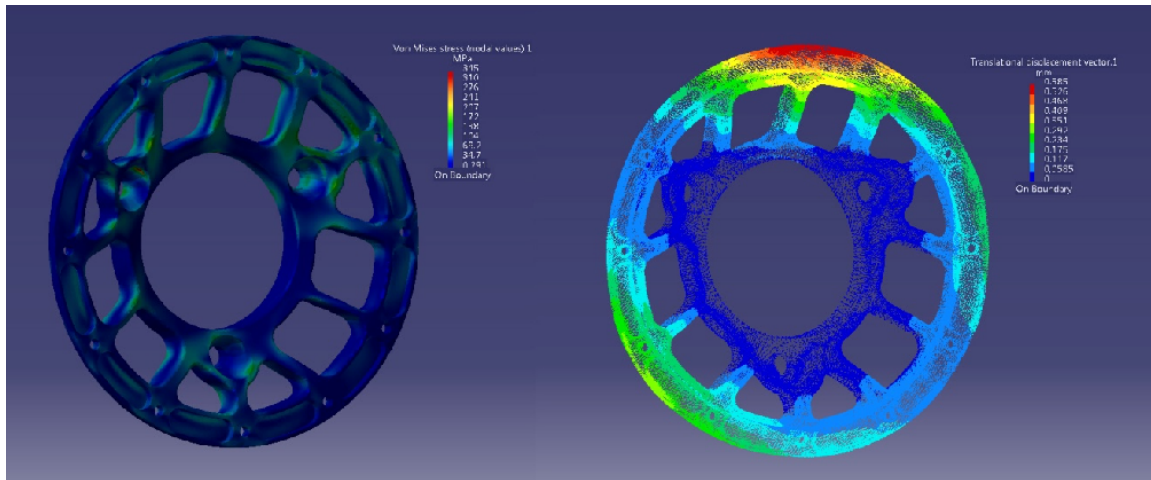
Tabel 3.1. Alumiiniumi Alumec 89 mehaanilised omadused [4]

| Tõmbetugevus | Voolavuspiir   | Elastsus moodul | Tihedus  |
|--------------|----------------|-----------------|----------|
| $\sigma$     | $\sigma_{0,2}$ | $E$             | $\rho$   |
| $N/mm^2$     |                |                 | $kg/m^3$ |
| 590          | 550            | 71500           | 2830     |

Tugevusanalüüs tehti veljetsentrile, kuna veljevõrude disaini muuta pole võimalik. Nende puhul usaldati, et tootja tagab piisava tugevuse. Tugevusarvutustes on kasutatud jõude, mis on arvatud vastavalt sõiduki massile ning sõiduki poolt arendatavatele kül- ning pikikiirendusjõududele. Jõudude arvutamiseks on meeskonnal koostatud programmis Microsoft Excel arvutusmoodul. Sisendparameetrid on määratud vedrustuse disainiga ning vastavad kül- ning pikikiirendused on saadud reaalseste rajatestide tulemusena eelnevate aastate testandmeid analüüsides. Järgnevates peatükkides on arvutusmoodulist põhjalikumalt kirjutatud. Tugevusanalüüsi tulemused on välja toodud järgnevas tabelis 3.2. Analüüsi maksimalse pinge ning deformatsiooni olukord on näidatud seel 3.3. Maksimaalne pinge on 245MPa ning maksimaalne deformatsioon 0,385mm.

Tabel 3.2. LEM tugevusanalüüsi tulemused

|                           |          |
|---------------------------|----------|
| Pikijõud                  | 1503 N   |
| Küljõud                   | 2700 N   |
| Vertikaal koormus         | 1650N    |
| Maksimaalne pinge         | 245 MPa  |
| Maksimaalne deformatsioon | 0,385 mm |



Sele 3.3. Maksimaalsete pingete olukord vasakul ja maksimaalsete deformatsioonide olukord paremal

### 3.2. Tugevusanalüüsi meetodika

LEM tugevusanalüüsiks on kasutatud nn. halvimat olukorda, kus on maksimaalsete külge- ning pikikiirenduste koosmõju. Reaalsuses eeldab selline jõudude olukord maksimaalset pidurdust kurvis. Kasutatavateks jõududeks on 2700N külgsuunas, 1503N pikisuunas ning 1650N vertikaal suunas. Jõud on rakendatud virtuaalsesse punkti, mis simuleerib rehvi puutepunkti teega.

LEM analüüsis kasutatava võrgustiku (*Mesh*) suuruseks on 2mm ning võrgustiku maksimaalne erinevus mudelist (*Sag*) on 0,5mm.

### 3.3. Eelneva lahenduse funktsionaalsus

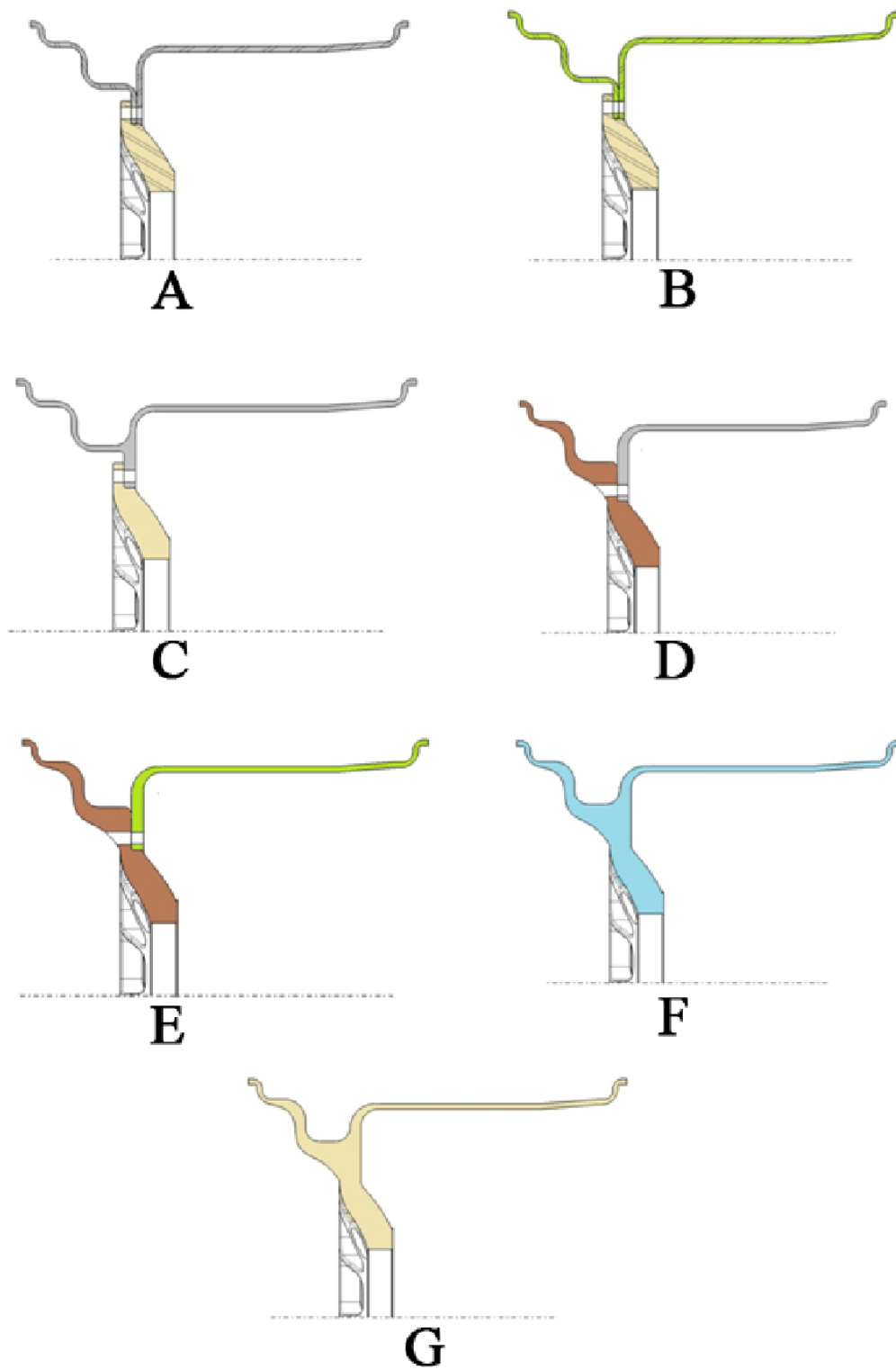
Funktsionaalsuse kohapealt eelnevale veljelahendusele midagi ette heita ei ole peale selle, et pidurijahutuse seisukohalt võiks olla velg rohkem avatum, et pidurisupportite ümber olev õhk paremini ringleks. Hermeetilisusega probleeme ei ole, ning rehvi monteerimine käib kergelt.

## 4. VÕIMALIKUD UUE VELJE LAHENDUSED

Antud peatükis on välja toodud erinevad võimalikud lahendused kuidas võiks vormelauto FEST14 velge projekteerida. Erinevaid lahendusi on palju ning nendest parima leidmiseks on analüüsitud nende plusse ja miinuseid.

### 4.1. Võimalikud uue velje kontseptsioonid

- Kolmest osast koosnev alumiiniumvelg. Alumiiniumist ostetud veljevõrud ning iseprojekteeritud alumiiniumist veljetsenter. (Eelnevaga sarnane lahendus). Sele 4.1 A
- Kolmest osast koosnev hübriidvelg. Isevalmistatud süsinikkiud komposiitmaterjalist veljevõrud ning isevalmistatud alumiiniumist veljetsenter. Sele 4.1 B
- Kahest osast koosnev hübriidvelg. Isevalmistatud süsinikkiud komposiitmaterjalist võru ning isevalmistatud alumiiniumist veljetsenter. Sele 4.1 C
- Kahest osast koosnev alumiiniumvelg. Isevalmistatud alumiiniumist veljetsenter koos välimise võruosaga ning ostetud sisemine veljevõru. Sele 4.1 D
- Kahest osast koosnev hübriidvelg (2). Isevalmistatud alumiiniumist veljetsenter koos välimise võruosaga ning isevalmistatud süsinikkiud komposiitmaterjalist sisemine veljevõru. Sele 4.1 E
- Ühest tükist isevalmistatud alumiiniumvelg. Sele 4.1 F
- Ühest tükist isevalmistatud süsinikkiud komposiitmaterjalist velg. Sele 4.1 G



Sele 4.1. Võimalikud uue velje kontseptsioonid

## 4.2. Erinevate lahenduste plussid ja miinused

Järgnevalt on hinnatud kõikide eelnevalt väljatoodud variantide plusse ja miinuseid. Eelkõige on välja toodud plussid ja miinused funktsionaalsuse seisukohast. Kõiki plusse ning miinuseid on hinnatud 5 punkti skaalas, see lihtsustab hiljem parima variandi leidmist. Hinded 1 - 5 näitavad vastavalt plussi või miinuse kaalu, kus "1" tähistab vähima kaaluga omadust ning "5" väga kaalukat omadust.

- Kolmest osast koosnev alumiiniumvelg (Sele 4.1. A):

### **Plussid**

- + Kõige lihtsam ja odavam valmistada (5)
- + Tehnilise lahenduse poolest kõige lihtsamalt teostatav (4)
- + Kõige rohkem ostutooteid (2)

### **Miinused**

- Suur mass (tuleb kasutada suurel hulgal polte ja mutreid komplekteerimiseks) (3)
- Keeruline saada head funktsionaalsust eelkõige pidurite jahutuses (3)

- Kolmest osast koosnev hübriidvelg (Sele 4.1. B):

### **Plussid**

- + Kerge kaal tänu süsinikkiud komposiitmaterjalist veljevõrudele (4)

### **Miinused**

- Süsinikkomposiitmaterjalist veljevõrude valmistamine on keeruline ning töömahukas (3)
- Süsinikkiud komposiitmaterjalist veljevõrude töökindlus on kaheldav (3)
- Kallim kui alumiiniumvelg (3)
- Alumiiniumi ning komposiitmaterjali ühendamine (hermeetiliselt) võib olla keerukas (2)

- Kahest osast koosnev hübriidvelg (Sele 4.1 C):

### **Plussid**

- + Kerge kaal tänu süsinikkiud

### **Miinused**

- Süsinikkomposiitmaterjalist veljevõru

|  |   |
|--|---|
| komposiitmaterjalist veljevõrule (4)   | valmistamine on väga keeruline ning mahukas (3)                         |
| + Suurem jäikus, kuna veljevõru on valmistatud ühest tükist (4)                      | - Üpris kallid tänu   |
| + Puudub hermeetilise ühenduse vajadus komposiitmaterjali ning alumiiniumi vahel (2) | valmistamistehnoloogiale (3)  |
|  | - Süsinikkiud komposiitmaterjalist veljevõru töökindlus on kaheldav (3) |

- Kahest osast koosnev alumiiniumvelg (Sele 4.1 D):

**Plussid**

+ Suure jäikusega velg (4)  
 + Pidurijahutuse seisukohast väga hea lahendus (4)

**Miinused**

- Aja- ja ressursimahukas valmistustehnoloogia (3,5)  
 - Suur materjali kulu (4)

- Kahest osast koosnev hübriidvelg (2) (Sele 4.1 E):

**Plussid**

+ Suure jäikusega velg (4)  
 + Pidurijahutuse seisukohast väga hea lahendus (4)  
 + Kerge kaal tänu süsinikkiud komposiitmaterjalist veljevõrule (3,5)

**Miinused**

- Aja- ja ressursimahukas valmistustehnoloogia nii alumiiniumist osa kui ka komposiitmaterjalist osa puhul (4)  
 - Suur materjalikulu (4)

- Ühest tükist isevalmistatud alumiiniumvelg (Sele 4.1 F):

**Plussid**

+ Ülisuure jäikusega velg (5)  
 + Pidurijahutuse seisukohast väga hea lahendus (5)

**Miinused**

- Ülisuur materjalikulu (5)  
 - Ülimalt aja- ja ressursimahukas valmistustehnoloogia (4,5)

- Ühest tükist isevalmistatud süsinikkiud komposiitmaterjalist velg (Sele 4.1 G):

**Plussid**

+ Ülisuure jäikusega velg (5)

**Miinused**

- Ülimalt aja- ja ressursimahukas



- + Pidurijahutuse seisukohast väga hea valmistustehnoloogia (5)
- lahendus (5) - Suur materjalikulu (4)
- + Ülikerge velg (5)

### 4.3. Uue veljekontseptsiooni valimise kriteeriumid

Suures plaanis tuleb leida kompromiss kahe peamise faktori, funktsionaalsuse ning valmistustehnoloogia lihtsuse vahel. Kaalukauss on kaldu pigem funktsionaalsuse poole, kuna tegemist on siiski prototüüpkorras valmistatava võidusõidutehnikaga. See tähendab, et tootmismaht on ülimalt väike ning funktsionaalsus on seega olulisem kui tootmislihtsus. Piiramatuid ressursse aga reaalsuses ei esine, seega teatav kompromiss on vajalik leida ka võidusõidumaailmas. Et saavutada maksimaalne funktsionaalsus võimalikult väikeste tootmisressursside abil, tuleb valida kõige sobivam velje ülesehitus ehk kontseptsioon.

Järgnevalt on hinnatud kõikide väljapakutud variantide sobivust valmistamistehnoloogia seisukohast. Selleks on koostatud kõigi variantide kohta väike andmete loetelu, milles on toodud välja umbkaudne materjalikulu, valmistamistehnoloogia keerukus, vajaminevate abivahendite ning rakiste olemasulul nende keerukus ning viimaks ostutoodete hulk ja maksumus, mis iga variandi juurde kuuluvad. Kõiki argumente on hinnatud 5 punkti skaalas, mis lihtsustab hiljem parima variandi leidmist. 5 tähendab kõige soosivamat ning 1 kõige vähemsoosivat hinnangut.

- Kolmest osast koosnev alumiiniumvelg.
  - Materjalikulu** - Alumiiniumi kulub veljetsentri valmistamiseks ~3500g (5)
  - Valmistamistehnoloogia keerukus** - Alumiiniumist veljetsenter valmistatakse CNC freespingiga. Veljevõrud, mis on ostutooded, tuleb tavatreipingis mõõtu treida. Velje komplekteerimine käib käsitsi. (5)
  - Abivahendid ja rakised** - Spetsiaalrakis veljevõrude mõõdutreimiseks. (4)
  - Ostutooded** - Alumiiniumist veljevõrud (2tk maksumusega ~100\$ tk), poldid ja mutrid. (2)
- Kolmest osast koosnev hübriidvelg.
  - Materjalikulu** - Alumiiniumi kulub veljetsentri valmistamiseks ~3500g. Süsinikriide kulu veljevõrude valmistamiseks on ~750g. Vaigu kulu veljevõrude valmistamiseks on ~250g. (3)

**Valmistamistehnoloogia keerukus** - Alumiiniumist veljetsenter valmistatakse CNC freespingiga. Veljevõrud valmistatakse süsinikkiud komposiitmaterjalist. Veljevõrud on lihtsa kujuga detailid, mida on kerge lamineerida. Velje komplekteerimine käib käsitsi. (3,5)

**Abivahendid ja rakised** - Mitmeosaline vorm veljevõrude lamineerimiseks. (3)

**Ostutooted** - Poldid ja mutrid. (4)

- Kahest osast koosnev hübriidvelg.

**Materjalikulu** - Alumiiniumi kulub veljetsentri valmistamiseks ~3500g. Süsinikkiude kulu veljevõru valmistamiseks on ~750g. Vaigu kulu veljevõru valmistamiseks on ~250g. (3)

**Valmistamistehnoloogia keerukus** - Alumiiniumist veljetsenter valmistatakse CNC freespingiga. Veljevõru valmistatakse süsinikkiud komposiitmaterjalist. Ühest tükist veljevõru on palju keerulisem kui kahest tükist. Valmistamine nõuab keerukamat vormi. Velje komplekteerimine käib käsitsi. (3)

**Abivahendid ja rakised** - Mitmeosaline vorm veljevõru lamineerimiseks. (2,5)

**Ostutooted** - Poldid ja mutrid. (4)

- Kahest osast koosnev alumiiniumvelg.

**Materjalikulu** - Alumiiniumi kulub velje välimise poole valmistamiseks ~10000g (3)

**Valmistamistehnoloogia keerukus** - Velje alumiiniumist välimine pool valmistatakse CNC freespingiga. Velje sisemine võru, mis on ostutoode, tuleb tavatreipingis mõõtu treida. Velje komplekteerimine käib käsitsi. (4)

**Abivahendid ja rakised** - Spetsiaalrakis veljevõru mõõdutreimiseks. (4)

**Ostutooted** - Alumiiniumist veljevõrud (2tk maksumusega ~100\$ tk), poldid ja mutrid. (2)

- Kahest osast koosnev hübriidvelg (2).

**Materjalikulu** - Alumiiniumi kulub velje välimise poole valmistamiseks ~10000g. Süsinikkiude kulu veljevõru valmistamiseks on ~750g. Vaigu kulu veljevõru valmistamiseks on ~250g. (2)

**Valmistamistehnoloogia keerukus** - Velje alumiiniumist välimine pool valmistatakse CNC freespingiga. Veljevõrud valmistatakse süsinikkiud komposiitmaterjalist. Velje komplekteerimine käib käsitsi. (2,5)

**Abivahendid ja rakised** - Mitmeosaline vorm veljevõru lamineerimiseks. (2,5)

**Ostutooted** - Poldid ja mutrid. (4)

- Ühest tükist isevalmistatud alumiiniumvelg.

**Materjalikulu** - Alumiiniumi kulub ühest tükist velje valmistamiseks ~25000g. (1)

**Valmistamistehnoloogia keerukus** - Velg freesitakse välja CNC freespingiga. Olenevalt velje disainist on vaja kas kolme- või viieteljelist freespinkki. Velg on suur ning keerukas detail, seega läheb vaja mitmeid spetsiaalseid lõiketööriistu. (1,5)

**Abivahendid ja rakised** - Olenevalt valmistustehnoloogiast võib vaja minna erirakistust. (3,5)

**Ostutooted** - Puudub (5)

- Ühest tükist isevalmistatud süsinikkiud komposiitmaterjalist velg.

**Materjalikulu** - Komposiitmaterjalist velje valmistamiseks läheb vaja ~1500g süsinikriiet ning ~1000g vaiku. (2,5)

**Valmistamistehnoloogia keerukus** - Arvestades, et tegu on väga vastuttusrikka detailiga, siis lamineerimisel tuleb välistada defektide teke. Defektide vältimiseks tuleks velg lamineerimise järgselt panna autoklaavi või vähemalt vaigu kõvenemise ajaks ahju. Velje sisse on vaja ka lamineerida alumiiniumist tugevdused, et rattapoldid komposiitmaterjali ei kahjustaks. Olenevalt disainist võib vaja minna ka spetsiaalsete lamineerimismeetodite kasutamist, et saavutada näiteks õõnsaid veljekodaraid. (1)

**Abivahendid ja rakised** - Väga keeruline mitmeosaline vorm velje lamineerimiseks. (1)

**Ostutooted** - Puudub. (5)

#### 4.4. Tulemuste hindamine

Järgnevalt on hinnatud eelnevalt saadud tulemusi (Tabel 4.1). Koostatud on maatriks plussidest, miinustest ning hinnetest, mis erinevatele faktoritele pandud. Plussid ning miinused on esitatud aritmeetilise keskmisena. Tulemust hinnatakse lihtsa summa alusel. Mida suurem on punktide summa, seda rohkem on sellel variandil plusse ning vähem miinuseid.

Tabel 4.1. Saadud tulemused erinevate veljevariantide kohta

|   | Plussid | Miinused | Materjalikulu | Valmistustehnoloogia ja keerukus | Abivahendid ja rakistus | Ostutoodete maht | KOKKU |     |
|---|---------|----------|---------------|----------------------------------|-------------------------|------------------|-------|-----|
| Kolmest osast koosnev alumiiniumvelg                  | 3,7     | 3        | 5             | 5                                | 4                       | 2                | 16,7  | I   |
| Kolmes osast koosnev hübriidvelg                      | 4       | 2,8      | 3             | 3,5                              | 3                       | 4                | 14,8  | II  |
| Kahest osast koosnev hübriidvelg                      | 3,33    | 3        | 3             | 3                                | 2,5                     | 4                | 12,8  | IV  |
| Kahes osast koosnev alumiiniumvelg                    | 4       | 3,8      | 3             | 4                                | 4                       | 2                | 13,3  | III |
| Kahest osast koosnev hübriidvelg (2)                  | 3,83    | 4        | 2             | 2,5                              | 2                       | 4                | 10,3  | VI  |
| Ühest tükist isevalmistatud alumiiniumvelg            | 5       | 4,8      | 1             | 1,5                              | 3,5                     | 5                | 11,3  | V   |
| Ühest tükist isevalmistatud komposiitmaterjalist velg | 5       | 4,5      | 2,5           | 1                                | 1                       | 5                | 10,0  | VII |

Antud tulemuste hindamisel eelpool kirjeldatud meetodi alusel sai parima tulemi variant nr. 1, milleks on kolmest osast koosnev alumiiniumvelg. Selline lahendus on Formula Student vormelautodel kasutusel olnud ka juba eelnevalt. Antud lahenduse suurimaks miinuseks võib lugeda funktsionaalsuse poolepealt just seda, et on keeruline saavutada head pidurijahutust. Samuti võib selle variandi miinuseks pidada ka kõrget kaalu, kuid seda annab kindlasti parandada heade tehniliste lahenduste kasutamisega. Selle variandi suurimateks plussideks on aga lihtne ning vähe ressursi nõudev valmistustehnoloogia ning teiste variantidega võrreldes väike maksumus, mis tuleneb vähesest materjalikulust.

## **5. ESIMENE VELG**

Antud peatükis on kirjeldatud vormelauto FEST14 esivelje arendamiseks tehtud etappe. Velg on kolmeosaline, millest kaks, velje võrud, on ostutooted ning kolmas osa, velje tšenter, täielikult ise projekteeritud ning valmistatud. Peatükis on välja toodud ostutooted ning nendega tehtavad protsessid, esivelje projekteerimisel vajalikud parameetrid ning piirangud, LEM tugevusanalüüs ning sellega seonduv, projekteerimiskäigu tähtsamad etapid, lõpplahenduse kirjeldus ning võrdlus eelneva lahendusega.

### **5.1. Kasutatavad ostutooted**

Velje projekteerimisel on võetud aluseks juba mitmel eelneval aastal kasutuses olnud Keizer Racingu poolt valmistatud veljevõrud. Võrusid on võimalik tellida sobiva diameetri ning laiusega. Võru laiust on võimalik valida 1-7 tollini ühetollise sammuga. See tähendab, et sisemise ja välimise veljevõru ühendamisel on võimalik komplekteerida kuni 14 tolli laiust 10-tollise diameetriga velge. Keizer Racingu veljevõrud on juba mitmeid aastaid langenud valituks sellepärast, et tegu on ainukese ettevõttega, kes valmistab veljevõrusid spetsiaalselt Formula SAE sarja jaoks. Teised turul olevad veljevõrud on mõeldud sõiduautodele mis tähendab, et need on valmistatud paksemast materjalist ning on seetõttu liiga rasked. Keizer Racingu FSAE veljevõrud on valmistatud alumiiniumist 6061 T6 trugimise teel. Veljevõrude materjali paksus on umbes 3 mm (varieerub) [5]. Täpne materjali paksus ja veljevõrude kuju mõõtmestamine on väga oluline, kuna ainult siis saab teha detailist täpse CAD mudeli. Järgmises alapunktis on tutvustatud täpsemalt veljevõru CAD mudeli tegemise meetodit. Ostetud võrud on ainult toorikud. Võrusid tuleb hiljem töödelda. Samad võrud on kasutusel ka tagumises veljes.

Teisteks ostutoodeteks, mida velje tootmisel vaja, on kinnitusvahendid. Veljevõrud ja veljetsenter ühendatakse poltidega. Kinnitusvahendid valitakse OÜ Baltic Bolt tootevalikust. Kuna vormeli rattad on nii ohutuse kui ka funktsionaalsuse mõttes vägagi olulised detailid, reguleerib ka nende küljes kasutatavaid kinnitusvahendeid tehniline määrustik. Kinnitusvahendid peavad vastama Formula SAE 2014 reeglitele, millest on võetud järgnevad punktid.

## **Artikkel 11. Kinnitusvahendid [3]**

### T11.1 Kinnitusvahendite klass

T11.1.1 Kõik keermega kinnitusvahendid, mis on seotud sõitjaruumi, roolisüsteemi, pidurite, turvarihmade ning vedrustusega, peavad vastama (või ületama) SAE Grade 5, Metric Grade 8.8 standardi.

T11.1.2 Seenpea-, madalpea- ja peitepeaga poltide kasutamine on kriitilistes kohtades keelatud.

### T11.2 Kinnitusvahendite lukustamine

T11.2.1 Kõik kriitilistes kohtades kasutatavad kinnitusvahendid peavad olema lukustatud. Lukustuseks sobivad:

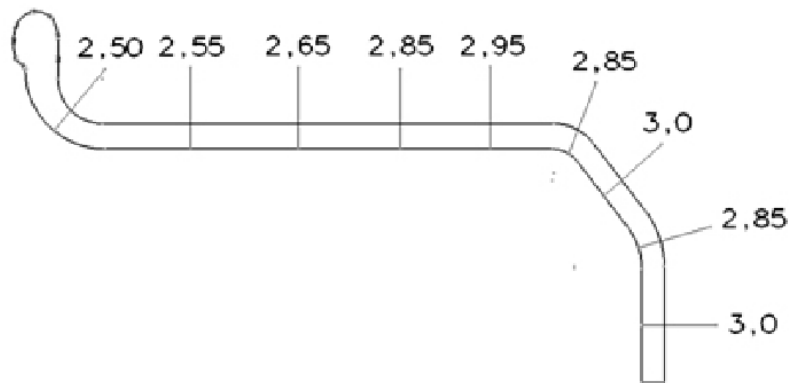
- Õigesti paigaldatud turvatraat
- Splint
- Lukustusmutter

## **5.2. Veljevõrude CAD mudel**

Kuna veljevõrud on ostutooted, siis peab nendest kõigepealt tegema CAD mudeli, et saaks neid sobitada kokku projekteeritavate veljetsentritega ning teha neile tugevusanalüüsi. Ilma CAD mudelita on oht, et veljetsenter ei sobi kokku veljevõrudega ning kuna materjali- ja tööhulk nende nende valmistamiseks on suur, siis tuleb välistada igasugune projekteerimisvea oht. Kui viga tekib veljetsentri valmistamises, võib praaki minna üks konkreetne detail. Kui aga viga teha projekteerimisstaadiumis, võib praaki minna terve seeria.

Veljevõrude CAD mudeli tegemiseks on vaja kõigepealt põhjalikult mõõtmestada. Tegu on üldjoontes väga lihtsa detailiga. Mõõtmestamine on võimalik täiesti tavaliste mõõtevahenditega. Keeruline on aga hinnata materjali paksust raadiuste ja painete kohas. Selle kindlakstegemiseks on tehtud katse. Veljevõrust on lõigatud välja sektsioon, millelt saab kerge vaevaga võtta vajalikud mõõdud. Mõõtmiste tulemused on toodud Selet 5.1. Tulemustest on näha, et veljevõru materjali paksus varieerub 2,5 mm kuni 3,0 mm. Paindekohtades on materjali paksus väiksem kui sirgetel pindadel. Antud mõõtude põhjal on

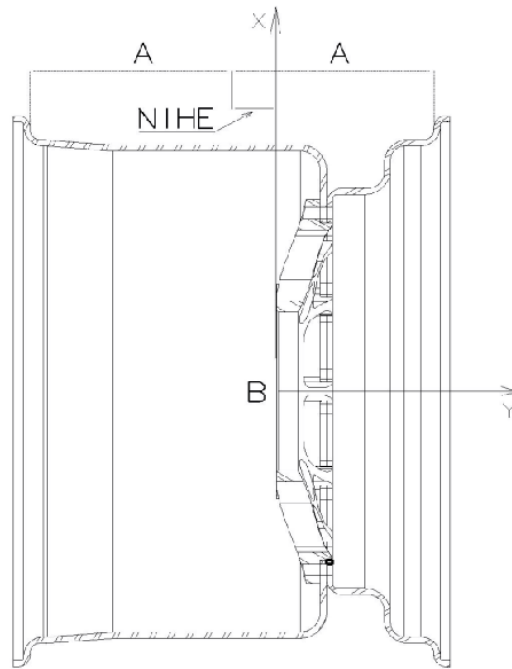
võimalik teha väga täpne CAD mudel ning see tähendab ka täpsemaid tugevusanalüüsi tulemusi.



Sele 5.1. Veljevõru materjali paksuse mõõtmise tulemused

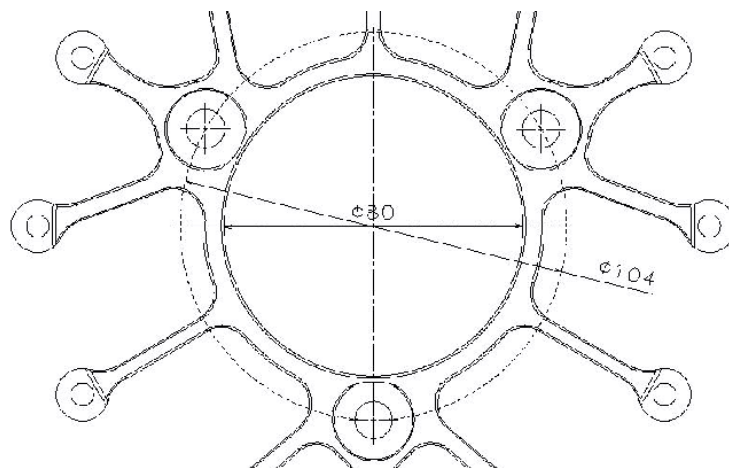
### 5.3. Piirangud projekteerimisel

Velgede projekteerimist alustatakse etteantud parameetrite analüüsist. Antud juhul on nendeks parameetriteks velje diameeter, velje laius, velje nihutus (*offset*), tsentriava suurus ja poldivalem. Esimese velje diameetriks on vedrustuse projekteerija valinud 10 tolli. Seega kasutatakse Keizer Racing veljevõrude valikust 10-tollise diameetriga võrusid. Velje laiuseks on ette nähtud 8 tolli. Velje laius tuleb kokku kahest veljevõrust: sisemisest ja välimisest. Esivelje puhul on võrude laiuseks vastavalt 6 ja 2 tolli. Velje tsepter kinnitatakse veljevõrude ühenduspinnale. Veljevõrude laius on seega üks faktor, mis mõjutab velje nihutust. Velje nihutus on rehvi ning tee vahelise puutepinna tseetri ja velje kinnitustasapinna (B) vaheline kaugus (Y-teljel). Esimese velje puhul peab velje nihutus olema 25 mm (Sele 5.2).



Sele 5.2. Velje nihutus

Tsentriava suurus ning poldivalem tuleb valida veermiku järgi. FEST14 rattavõllid on projekteeritud tsentriavaga 80 mm ning poldivalemiks on 3x104 mm (Sele5.3).



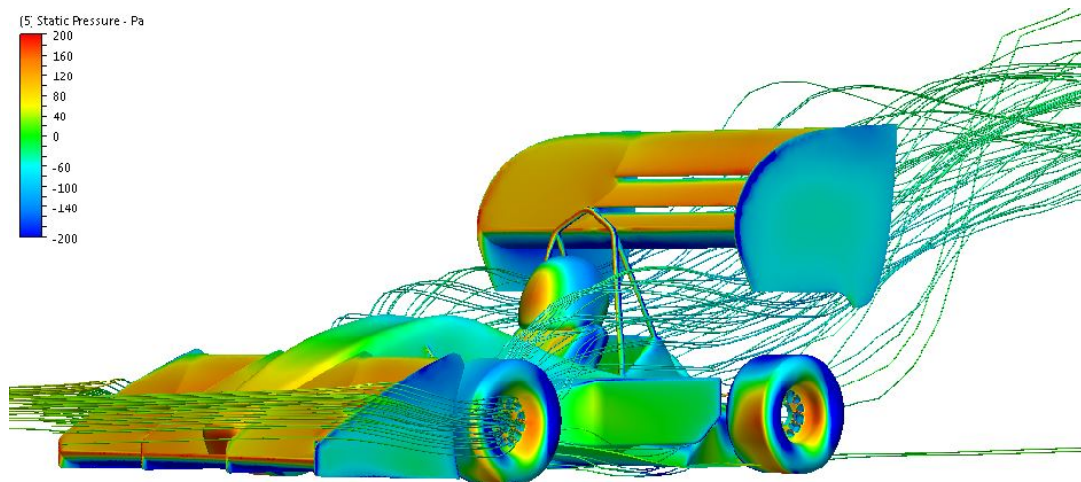
Sele 5.3. Veljevõru tsentriava ja kinnituspoltide jaotusringjoon

Velje projekteerimisel tuleb silmas pidada ka seda, et toormaterjali kasutataks võimalikult efektiivselt. Veljevõrud on ostutooted, kuid veljestentri projekteerimisel tuleb silmas pidada, et kasutatakse võimalikult väikese paksusega plaati, et vähem materjali raisata. Efektiivne materjalikasutus oleneb tehnilisest lahendusest ja disainist.



## 5.4. Velje aerodünaamiline analüüs

Veljetsentri projekteerimisel tuleb võtta arvesse ka pidurite jahutust. Eelnevate aastate kogemusele tuginedes on piduritejahutamine väga aktuaalne probleem eriti just esimeste pidurite puhul. Velgede disain võib seda suurel määral mõjutada. Voolavusanalüüsid näitavad, et liikuva sõiduki puhul püüab õhk liikuda läbi velje väljast sisse poole. Selle põhjuseks on hõrendus mis tekib ratta siseküljele, suure esitiiva pärast (Sele 5.4)



Sele 5.4. Õhuvoolavuse analüüs

Saamaks aru, kuidas jahutab õhk pidureid eelneva veljedisaini korral, viiakse läbi voolavusanalüüs vormeli 3D mudeliga ning mõõdetakse velge läbivat õhuvoolu. Saadud tulemused on baasiks, mida üritatakse parandada uue veljelahendusega.

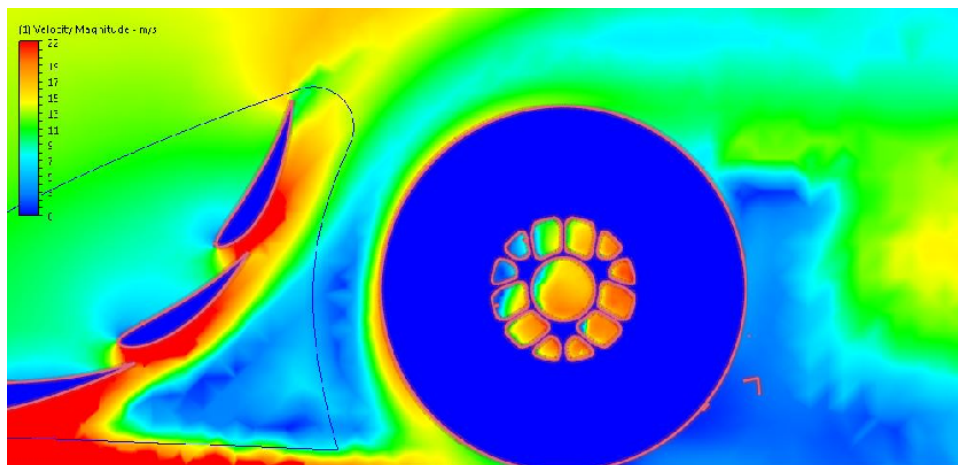
Voolavusanalüüsi peamised sisendparameetrid on järgmised:

- Õhuvoolu kiirus on 55km/h, mis on Formula Student sarja võidusõidu radadel keskmine kiirus.
- Voolavusanalüüsi keskkonna *meshi* suuruseks on 8 miljonit elementi.
- Analüüs on tehtud seisvate ratastega. Pöörlevate ratastega analüüs oleks täpsem, kuid nõuaks liiga palju arvutusvõimsust.
- Analüüsis kasutatav õhumudel on kokkusurumatu. See lihtsustab jällegi arvutust, kuid samas ei mõjuta tulemusi.

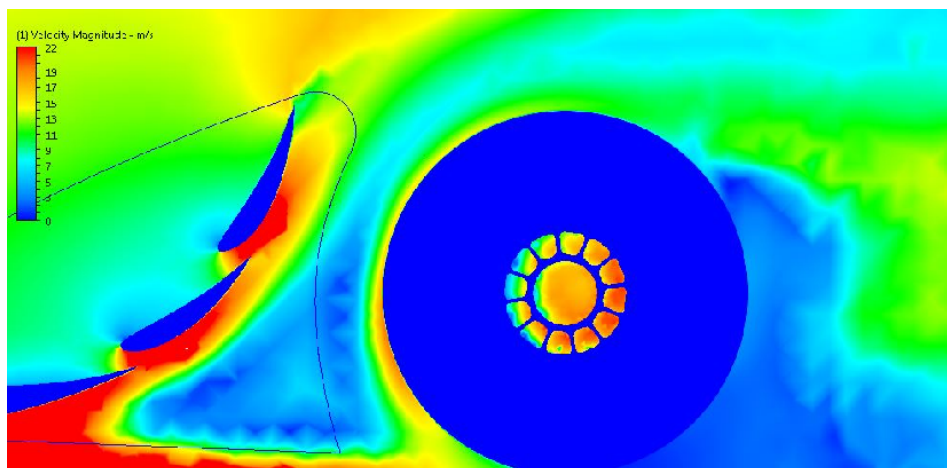
Voolavusanalüüs tehakse tarkvaraga Autodesk Simulation CFD. Analüüs on tehtud FS Team Tallinna aerodünaamikaspetsialisti Tõnis Väli abiga. Tõnisel on 4-aastane kogemus antud tarkvaraga vormelautode aerodünaamika uurimises. Analüüsi tulemustest on selgelt näha, et uue väljapakutud veljelahenduse korral on veljest läbivoolava õhu hulk ning kiirus märgatavalt suurem (Sele 5.5), kui eelneva lahenduse korral (Sele 5.6). Õhu voolukiiruse juures olev miinusmärk tähendab seda, et õhk voolab väljast sisse. Suuremal hulgal, kiiremini läbivoolav õhk tähendab, et piduritelt viiakse eemale rohkem soojust. Pidurite jahutus on seega efektiivsem. Voolavusanalüüsi tulemused on välja toodud järgnevas tabelis 5.1. Kuna pidurite ülekuumenemine on probleemiks ainult esipiduritega, siis tagumestele velgedele õhuvoolavusanalüüsi ei teostata.

Tabel 5.1 Voolavusanalüüsi tulemused.

|                                      | <b>Eelnev lahendus</b> | <b>Uus lahendus</b>   |
|--------------------------------------|------------------------|-----------------------|
| <b>Veljest läbi voolava õhu hulk</b> | 0,265 kg/s             | 0,312 kg/s            |
| <b>Õhu voolu kiirus</b>              | -7,816 m/s             | -9,189 m/s            |
| <b>Külgvaates avade pindala</b>      | 8742 mm <sup>2</sup>   | 14406 mm <sup>2</sup> |



Sele 5.5. Õhu voolavuskiirus uue veljelahenduse korral



Sele 5.6. Õhu voolavuskiirus eelneva veljelahenduse korral

Uue veljetsentri lahenduse parem voolavus tuleneb kodaratevaheliste avade suurenemisest. Külgvaates on veljetsentris olevate avade pindala suurenenud 39%. Selel 5.7 on näha võrdlus eelneva veljetsentri ja uue veljetsentri lahenduse vahel. Uue lahendusega velg on tumehall ning eelnev lahendus on helehall. Nii suur avade pindala erinevus on võimalik ainult tänu sellele, et veljevõru serva on freesitud taskud.



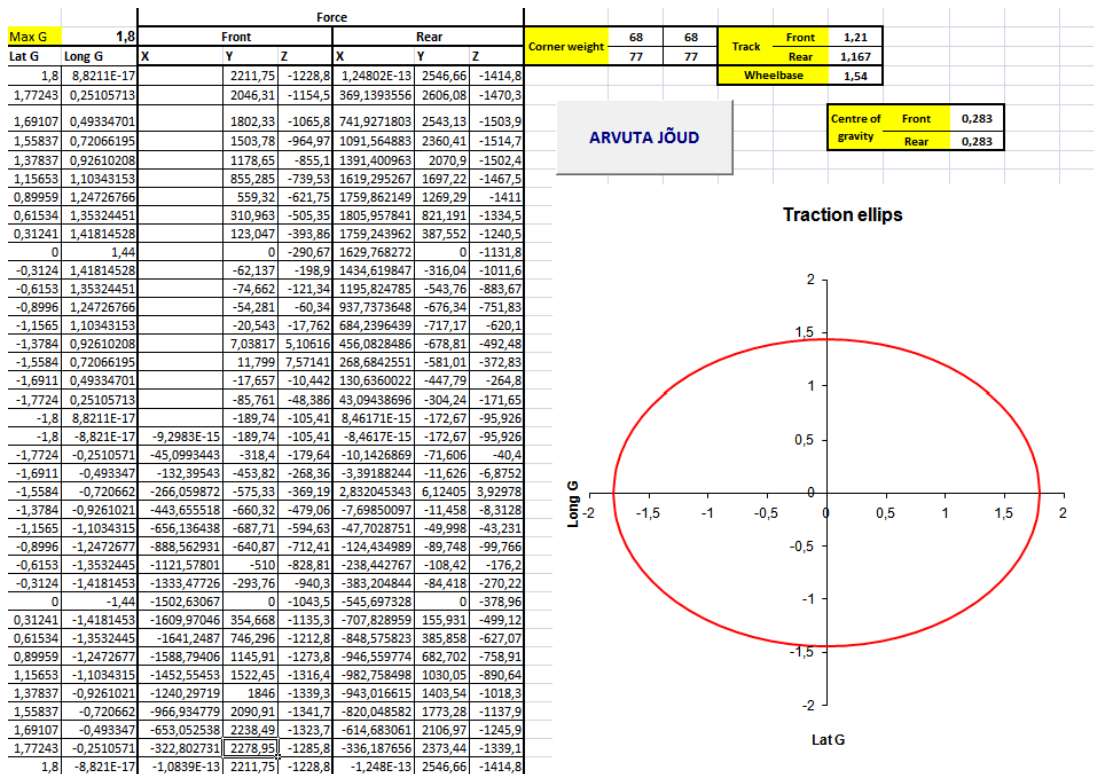
Sele 5.7. Uue ja vana veljelahenduse võrdlus

## 5.5. Tugevusanalüüs

Veljevõrud ja veljetsenter läbivad põhjaliku LEM tugevusanalüüsi. Tugevusarvutuste tarkvaraks kasutatakse CATIA V5R21. Tugevusanalüüsi tegemiseks on vaja paika panna kolm põhiparameetrit. Materjali omadused, rajatingimused ning koormused. Materjali omadustest on siinkohal tähtis teada just mehaanilisi omadusi. Rajatingimused ning koormused on selgitatud järgnevides alapeatükkides.

### 5.5.1. Koormused

Tugevusanalüüsis kasutatavad koormused saadakse juba eelnevatel aastatel FS Team Tallinna liikme Sten Soomlasi ja Lennart Harju poolt loodud arvutusmoodulist. Microsoft Excel'i töölehele loodud arvutusmooduli peamisteks sisendparameetriteks on sõiduki mass, rööbe, massikeskme kõrgus ning maksimaalsed külj- ja pikikiirendused. Tulemuseks arvutab moodul välja teoreetilise jõusuuruse rehvikontaktpinnas erinevates sõiduolukordades (Sele 5.8). Arvutusmoodul leiab jõu väärtused kõikides sidestus ellipsi (*traction ellips*) punktides. Erinevad *traction* ellipsi punktid näitavad erinevaid kombinatsioone piki- ja küljkiirendustest. Tugevusarvutuse jaoks tuleb leida maksimaalne jõu suurus ning kasutada seda arvutustes. Leida tuleb jõu suurus nii X, Y kui Z telje suunal.

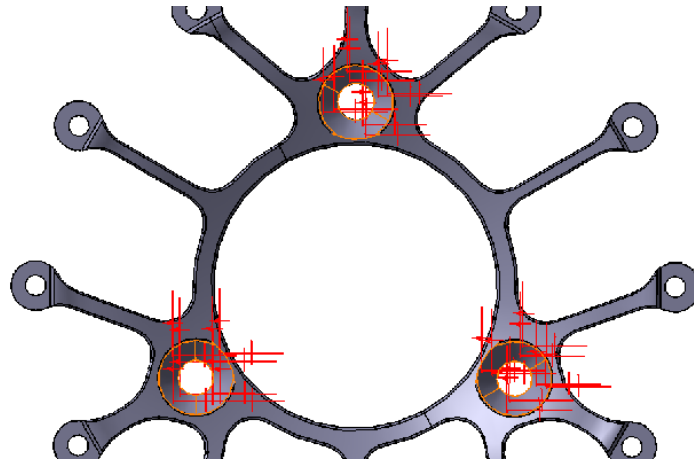


Sele 5.8. Rehvikontaktpunkti jõudude arvutusmoodul

### 5.5.2. Rajatingimused

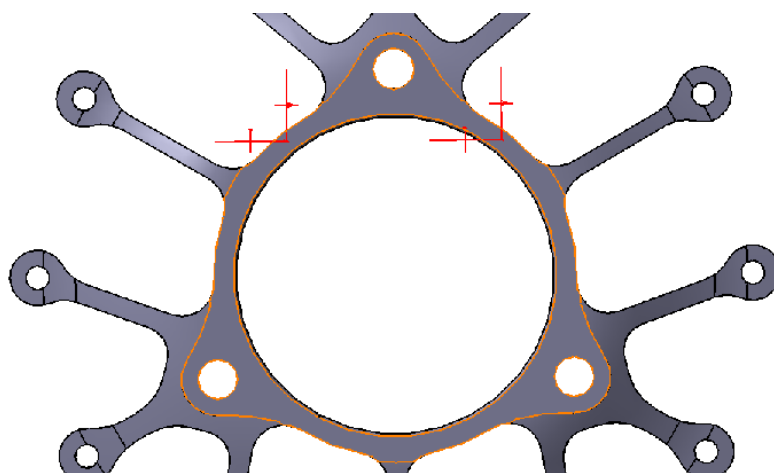
LEM tugevusanalüüsi tulemus sõltub suuresti sellest, mida ja kuidas programmil paluda teha. Tugevusanalüüs teostatakse kahes jaos. Esimesena tegeletakse veljetsentriga ning lõpuks tehakse tugevusanalüüs tervele velje koostule koos veljevõrudega. LEM analüüsi tegemiseks on vaja defineerida rajatingimused ning võrgustiku (*meshi*) omadused.

Rajatingimused on üldjoontes lihtsad. Veljetsentri tugevusanalüüsi puhul kinnitatakse veljetsenter sarnaselt nagu vormeli küljes. Poldiavade koonuspinnad kinnitatakse tööriistaga *User defined restraint*. See käsklus lubab valitud pinnal lukustada erinevaid vabadusastmeid. Antud juhul on lukustatud kõik vabadusastmed peale ühe. Vabaks jääb ainult ümber Z-telje pöörlemine. Koonuspindasid on veljetsentril kolm. Samad rajatingimused rakendatakse kõikidele ühtemoodi (Sele 5.9).



Sele 5.9. Veljetsentri tugevuanalüüsi rajatingimused

Poldiavade tagune pind, mis toetub vastu rattavõlli, kinnitatakse samuti tööriistaga *User defined restraint* (Sele 5.10). Käskluses lukustatakse Z-telje suunaline liikumine ning X ja Y-telje ümber pöörlemine. Teised vabadusastmed jäetakse vabaks. Selline olukord imiteerib reaalsel olukorda vormeli küljes.



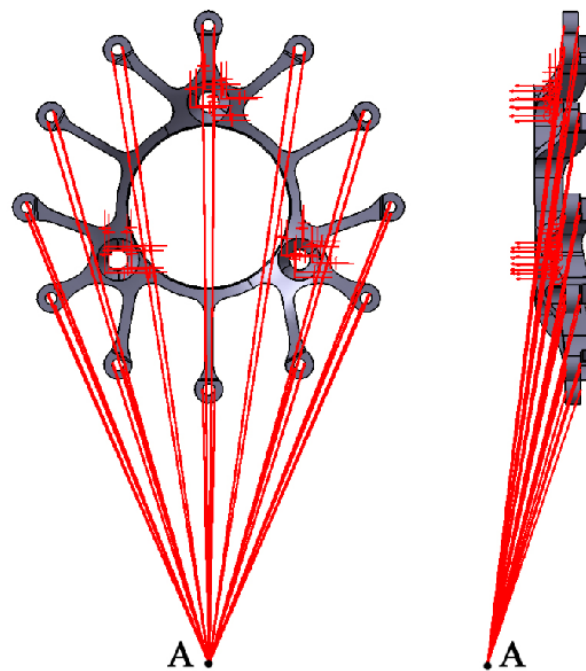
Sele 5.10. Veljetsentri tugevusanalüüsi rajatingimused tagumisele pinnale

Järgmiseks tuleb LEM analüüsi mudelile lisada koormused. Jõudude lisamiseks tekitatakse punkt rehvi ja tee kontaktpinna tsentri asukohta. Selleks on vaja teada velje nihutust ning ratta

dünaamilist raadiust, milleks FEST14ne puhul on 225,5 mm. See punkt seotakse keermestatud avadega veljetsentri sees, mis on tehtud veljetsentri ja veljevõrude ühendamiseks. Avad ja punkt ühendatakse omavahel tööriistaga *Virtual rigid part*. See tööriist tekitab nende kahe elemendi vahele virtuaalse täielikult jäiga keha (Sele 5.11). Kontaktpunkti rakendatakse arvutusmoodulist leitud maksimaalsed jõuväärtused, mis on toodud välja tabelis 5.2.

Tabel 5.2. Esirehvi kontaktpunkti rakenduvad jõud

| Maksimaalsed esirehvi kontaktpunkti rakenduvad jõud |        |        |
|---|--------|--------|
| X   | Y      | Z      |
| 2346 N  | 3306 N | 1756 N |



Sele 5.11. Esimesele veljetsentri jõudude rakendamine tugevusanalüüsis

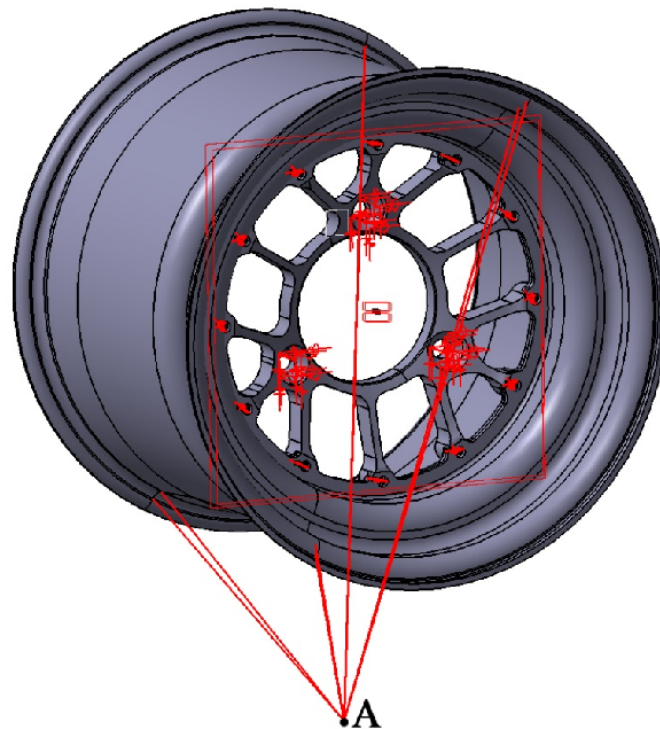
### Velje koostu tugevusanalüüsi rajatingimused

Velje koostu tugevusanalüüsiks on vaja palju keerulisemat mudelit ja keerulisemaid rajatingimusi. Veljetsentri kinnitamise osa on identne eelpool kirjeldatule. Koonuspindade ning poldiavade taguse pinna kinnitamine tehakse samamoodi. Veljevõrud ja veljetsenter kinnitatakse omavahel tööriistaga *Virtual rigid connection*. See tööriist tekitab kolme detaili vahele virtuaalselt jäiga ühenduse, mis imiteerib polti. Kuna antud analüüsi mudelis pole

oluline polti tekkivad pinged, siis on see hea lihtsustus. Veljevõrud ühendatakse omavahel *Contact connection* tööriistaga. See tööriist ühendab kaks pinda nii, et ei lase neil üksteisest läbi minna. Veljevõrud ning veljetsenter ühendatakse omavahel samuti *Contact connection* tööriistaga.

### 5.5.3. Koormuste rakendamine

Velje koostu LEM tugevusanalüüsi mudelile koormuste lisamine käib analoogselt veljetsentri analüüsimudelile. Virtuaalne rehvi ja tee kontaktpunkt ühendatakse nüüd veljevõrude servpindadega kasutades *Virtual rigid part* tööriista (Sele 5.12). Veljevõrude servpinnad on need, kuhu toetub rehvi. Kontaktpinda rakendatakse arvutusmoodulist leitud maksimaalsed jõud, mis on välja toodud tabelis 5.2.

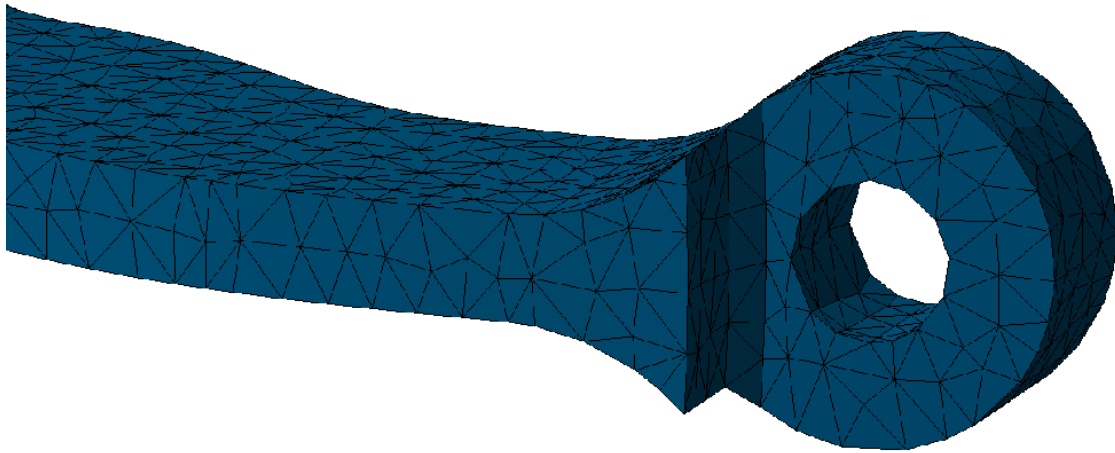


Sele 5.12. Esimesele veljekoostule jõudude rakendamine tugevusanalüüsis

### 5.5.4. Tugevusanalüüsi parameetrid

LEM tugevusanalüüsi tulemuste täpsus sõltub üldjoontes kahest parameetrist. *Mesh* ehk võrgustik ning *Sag* ehk võrgustiku maksimaalne erinevus mudelist. Enne kui programm hakkab arvutama detailis tekkivaid pingeid tekitatakse detailist lihtsustatud mudel, mis

koosneb omavahel kõver- või sirgjoontega ühendatud punktidest. Tekib kolmnurksete püramiidide võrgustik ehk *Mesh*, mis järgib detaili kuju (Sele 5.13).

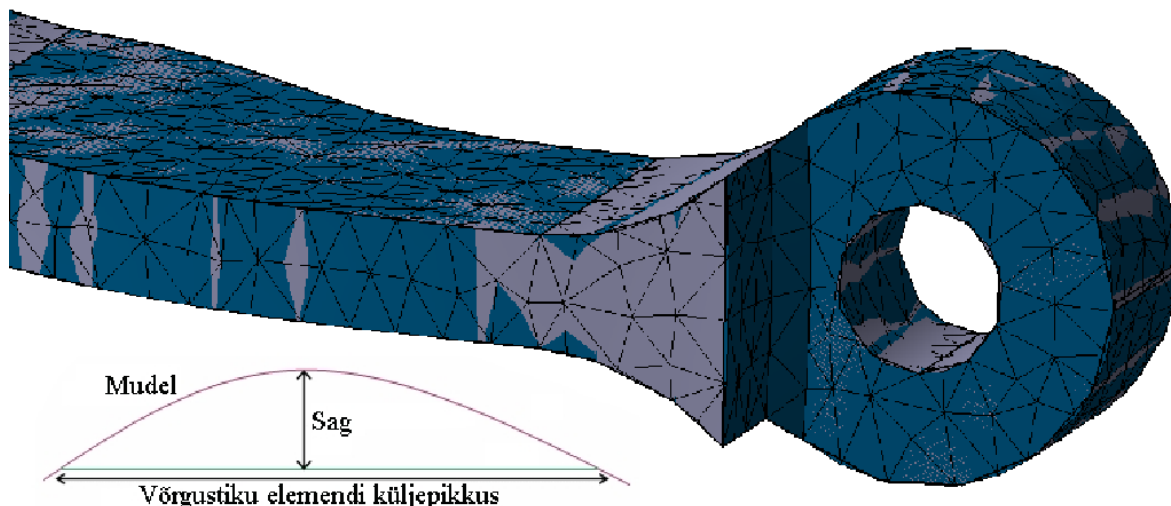


Sele 5.13. Veljetsentri üks kordar võrgustikuna

Võrgustiku tihedus määrab tugevusanalüüsi tulemuste täpsuse. Mida väiksemad on kolmnurkade küljed, seda tihedam on võrgustik ning täpsem on tulemus. Tugevusanalüüsi tehes on võimalik muuta võrgustiku tihedust, sisestades erinevaid kolmnurga küljepikkusi. Tihedam võrgustik tähendab ühtlasi ka pikemat arvutusaega ning nõuab võimsamat arvutustehnikat.

Teine tähtis parameeter on *Sag* ning see määrab ära maksimaalse lubatud erinevuse võrgustiku ning mudeli vahel (Sele 5.14). Keerulise geomeetriaga detaili puhul on raske leida sobivat võrgustiku suurust. Määrates ära parameetri *Sag* muudab programm ise võrgustiku suurust väiksemaks seal, kus vaja, et erinevus mudeliga jääks soovitud piiridesse. Lihtsa geomeetriaga osades jääb võrgustik ikka eelnevalt määratud suuruseks.





Sele 5.14. *Sag* ehk erinevus mudeli ja võrgustiku vahel. On näha, et mudel (hall) paistab kohati võrgustiku seest välja.

Käesolevas lõputöös tehtud tugevusanalüüside puhul on võrgustiku ja mudeli erinevuseks määratud 0,1mm. See annab piisava sarnasuse CAD ja LEM mudelite vahel ning tagab analüüsi tulemuste täpsuse. Lõputöös kasutatav *meshi* suurus on leitud kasutades CATIA V5R21 tarkvara poolt pakutavat *Adaptive Mesh* tööriista. Tööriistale saab ette anda maksimaalse lubatud veaprotsendi. Veljetsentril on palju teravaid servi ning tegu on üpris keeruka geometriaga. Veaprotsent 10% on antud rakenduse puhul piisav.

Kuna veljevõru puhul on tegemist küllaltki õhukese detailiga, siis on mõistlik valida *meshi* suurus nii, et materjali paksuse suunal oleks igalpool vähemalt 3 elementi. Nii peaks tugevusanalüüs andma kõige adekvaatsemad tulemusi.

## 5.6. Materjalid

Tugevusanalüüsi tegemiseks peab teadma täpselt materjali omadusi, et saada aru, kui suured pinged võivad viia materjali purunemiseni. Voolavuspiir on materjali tugevusnäitajatest see suurus, mida ületades on deformatsioonid materjalis jäädavad ehk materjal deformeerub. Deformatsiooniga detail on samaväärne purunenud detailiga. Veel on vaja tugevusanalüüsiks täpselt teada, milline on detaili funktsionaalsus, et analüüsi tehes kasutataks õigeid ühendusviise ja piiranguid. Pingete kõrval on väga oluline ka detailide läbipaindumine. LEM analüüs näitab ära, mitu millimeetrit detaili mistahes osa ruumis liigub talle rakendatud jõudude toimel.

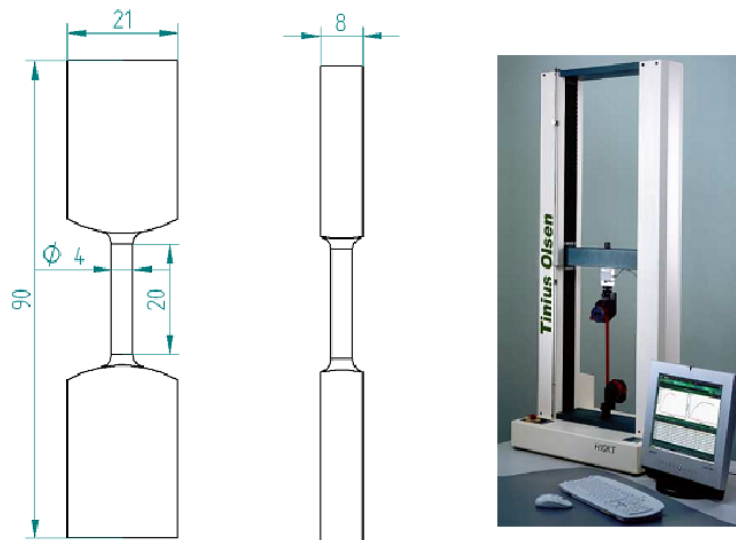
Et saavutada võimalikult kerge detail, peab kasutatav materjal olema väga hea massi-tugevuse suhtega. Eelneva kogemuse baasil kasutatakse alumiiniumi sulamit 7075 T6. Sama materjali kasutatakse FS Team Tallinna poolt ehitatud prototüüpidel ka teiste vastustusrikaste detailide valmistamiseks. Alumiinium 7075 T6 on alumiiniumi, tsingi, magneesiumi ja vase sulam, mis on läbinud termotöötuse T6, milleks on kuumutamine ning seejärel vanandamine. Sulami kohta võib iseloomustuseks öelda, et see on alumiiniumi tiheduse ning terase tugevusega materjal. Järgnevas tabelis 5.3 on välja toodud veljetsentri valmistamiseks kasutatava materjali alumiinium 7075T6 (Uddeholmi mark ALUMEC 89) peamised omadused.

Tabel 5.3. ALUMEC 89 mehaanilised omadused [4]

| <b>Tõmbetugevus</b>    | <b>Voolavuspiir</b> | <b>Elastsusmoodul</b> | <b>Tihedus</b> |
|------------------------|---------------------|-----------------------|----------------|
| $\sigma$               | $\sigma_{0,2}$      | $E$                   | $\rho$         |
| $N/mm^2$               |                     |                       | $kg/m^3$       |
| 590                    | 550                 | 71500                 | 2830           |
| <b>Katse tulemused</b> |                     |                       |                |
| 619,3                  | 576                 |                       |                |

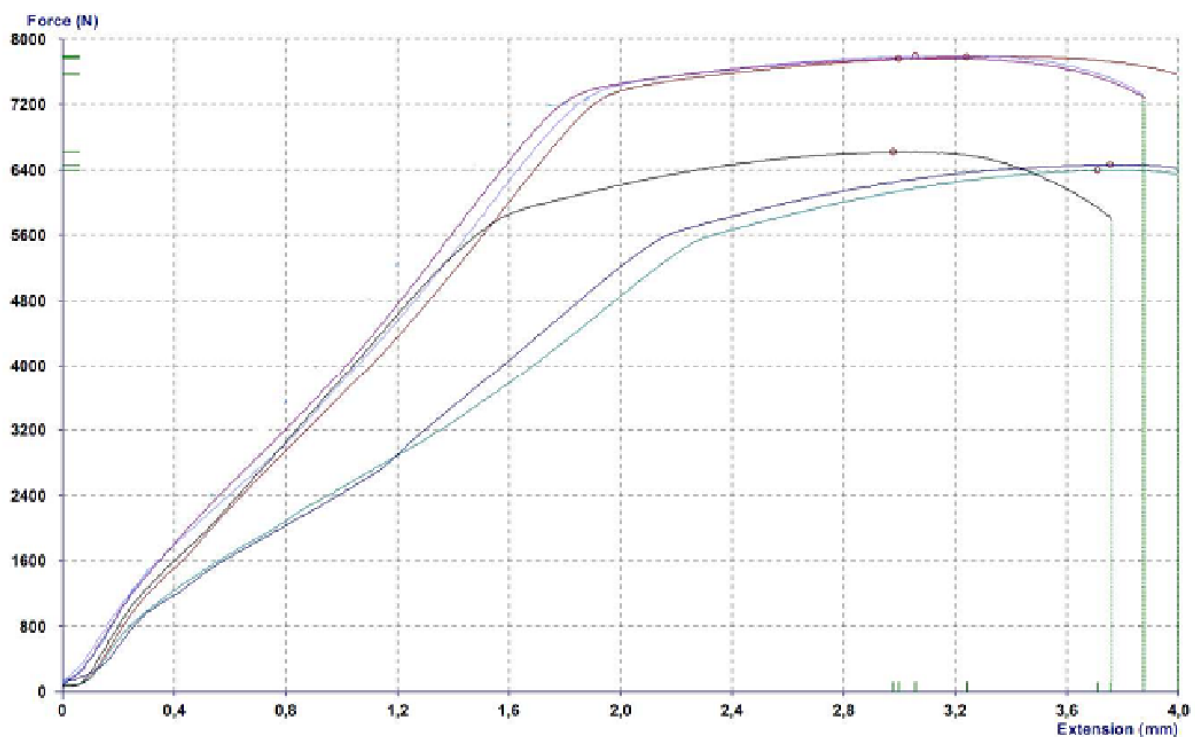
Et veenduda materjali tugevusnäitajate õigsuses ning materjali kvaliteedis, on läbi viidud ka tõmbeteimi katsed saamaks selgust, kas tootja poolt määratletud numbrid vastavad reaalsusele. Järgnevalt on lühidalt kirjeldatud tehtud tõmbeteimi katse metoodikat ja katse käiku (Sele 5.15):

- Katse tehti kolme tõmbeteimiga.
- Katsekehade peeneima osa diameeter on 4mm.
- Katseseadmeks on Tallinna Tehnikaülikooli laboris kasutusel olev Tinius Olsen H10KT, mille maksimaalseks tõmbejõuks on 10kN.
- Katse sooritati kiirusel 2 mm/min



Sele 5.15. Tõmbeteimid vasakul ja katseseade paremal

Katse tulemused on näha järgnevas jõu ja piknemise graafikus (Sele 5.16). Graafikult nähtavad tulemused on välja toodud ka tabelis 5.3. On selgelt näha, et materjali mehaanilised tugevusnäitajad on isegi suuremad, kui tootja poolt lubatud. Seega võib olla kindel tugevusanalüüsi õigsuses materjali kohapealt.



Sele 5.16. Tõmbekatse tulemuste graafik

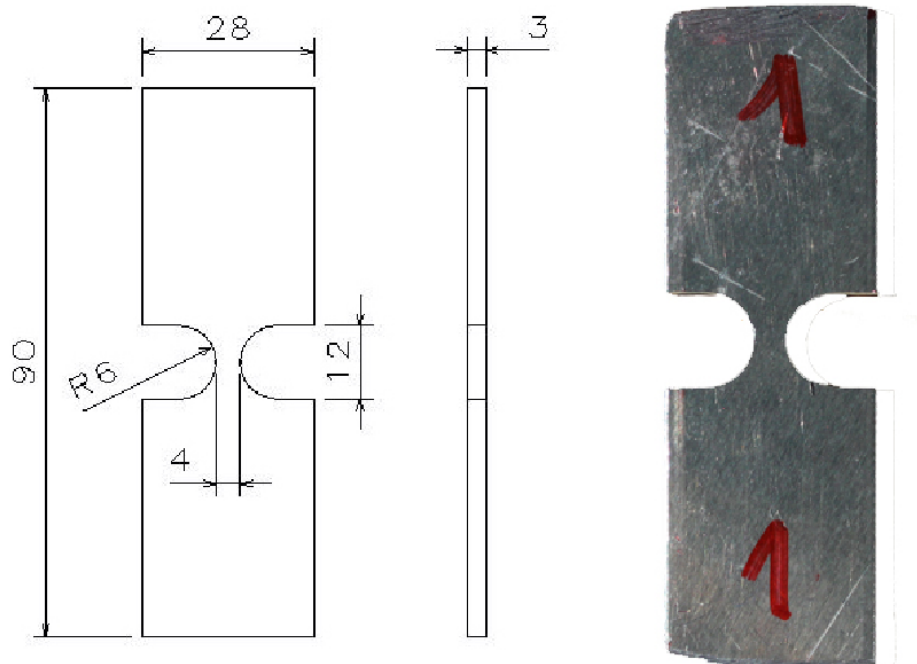
Graafikul tuleb vaadelda kolme kõrgemat joont. Kolm madalamat joont on samast materjalist tõmbeteimide graafikud, kuid need toorikud on viibinud 20 minutit 250 kraadises ahjus.

Veljevõrud aga on tehtud materjalist alumiinium 6061 T6. Selle sulami peamised mehaanilised omadused on välja toodud järgnevas tabelis 5.4.

Tabel 5.4. Alumiinium 6061 T6 mehaanilised omadused [6]

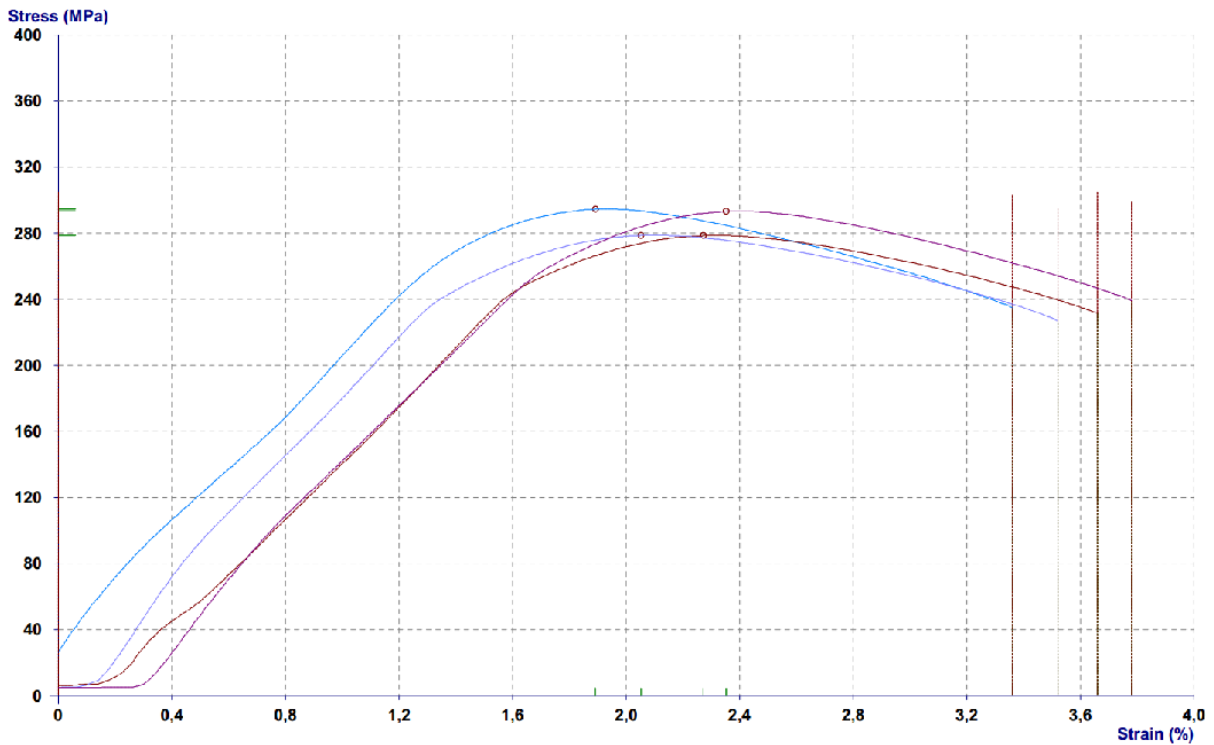
| Tõmbetugevus           | Voolavuspiir   | Elastsusmoodul | Tihedus  |
|------------------------|----------------|----------------|----------|
| $\sigma$               | $\sigma_{0,2}$ | $E$            | $\rho$   |
| $N/mm^2$               |                |                | $kg/m^3$ |
| 310                    | 276            | 68900          | 2700     |
| <b>Katse tulemused</b> |                |                |          |
| 290                    | 270            |                |          |

Ka veljevõrude materjali tugevusnäitajaid on katselisel teel valideeritud. Veljevõrude materjalist on valmistatud neli tõmbeteimi (Sele 5.17), mida on katsetatud sarnaselt veljetsentri materjaliga. Katsetingimused ning katseseade on samad.



Sele 5.17. Veljevõru materjali tõmbeteimi eskiis (vasakul) ning foto tõmbeteimist

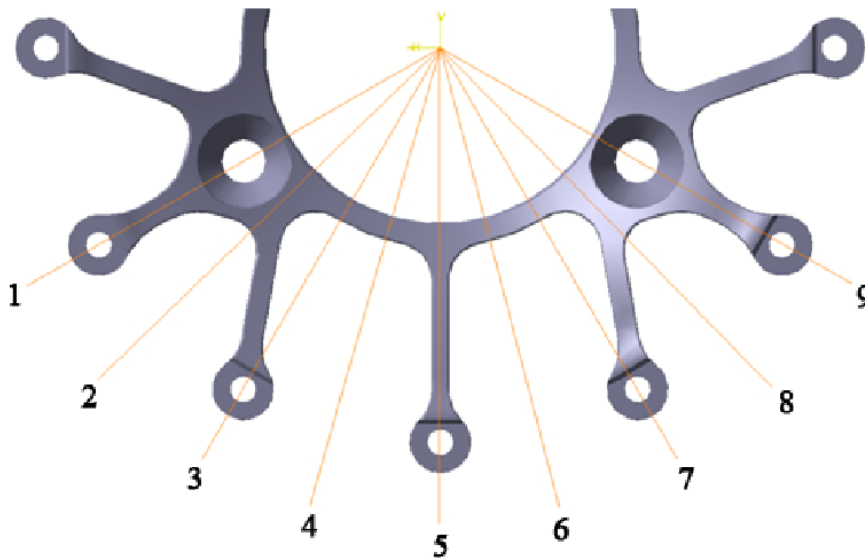
Veljevõrude materjali tõmbekatse tulemused on näha järgneval graafikul (Sele 5.18). Katsetulemused on välja toodud tabelis 5.4. Materjali tugevusnäitajad jäävad vähesel määral alla teoreetilistele andmetele, mis selle materjali kohta on välja toodud. Katsetulemused on esitatud pinge ja deformatsiooni graafikuna.



Sele 5.18. Veljevõru materjali tõmbekatse graafik

## 5.7. Tugevusanalüüs veljetsentrile

LEM tugevusanalüüs viiakse läbi mitme etapi kaupa. Esiteks leitakse maksimaalsete jõudude kombinatsioon, mis veljele mõjuda võib. Need jõu väärtused nii X, Y kui ka Z-telje suunas on välja toodud tabelis 5.2. Teiseks leitakse velje kõige nõrgem asend. Kuna velg kinnitub rattavõllile kolme poldiga siis ei ole veljetsenter täiesti sümmeetriline. Olenevalt asendist osutab ta koormustele vastupanu erinevalt. Nõrgima asendi leidmiseks jaotatakse veljetsenter kolmeks sektoriks. Leidmaks ühe sektori sees kõige nõrgemat asendit jaotatakse sektor omakorda üheksaks sektoriks. (Sele 5.19)



Sele 5.19. Erinevad kontaktpunktide asukohad

See tähendab, et luuakse rehvi ja tee vahel üheksa kontaktpunkti, millesse hakatakse ükshaaval maksimaalsete jõudude kombinatsiooni rakendama, leidmaks veljetsentri asendit, kus on suurimad pinged (Sele 5.19). See asend on järgnevate täpsustavate tugevusanalüüside aluseks.

Erinevaid veljetsentri asendeid läbi mängides selgus, et kõige suuremad pinged tekivad siis, kui jõud on rakendatud punkti 5.

Tugevusanalüüsi tehakse veljetsentri massi ning tugevuse optimeerimiseks. Optimeerimine tähendab seda, et tugevusanalüüs ning veljetsentri CAD mudeli pidev parendamine on tihedalt seotud. Mängitakse läbi mitmeid erinevaid lahendusi ning võimalusi, leidmaks parim lahendus, mis oleks minimaalse massi juures maksimaalse tugevusega.

Tugevusanalüüsiga käib kaasas alati küsimus, kui suur tugevus on piisav. Teada on veljele sõidu ajal mõjuvad koormused ja materjali tugevusomadused. Jääb üle vaid paika panna varuteguri suurus. FS Team Tallinna kogemuste põhjal kasutatakse vedrustuse ja veermiku süsteemides vähemalt varutegurit 3. Kogemuste põhjal on hinnatud, et see on piisav varutegur, mis katab nii väsimuse kui ka eriolukordades tekkida võivad löökkoormused. Veljetsentri varutegur peaks seega samuti olema vähemalt 3. Kuna materjali voolavuspiiriks on 550 MPa, ei tohiks maksimaalsed piged materjalis ületada  $550 / 3 = 183$  MPa.

Veljetsentri projekteerimist alustati eelneva lahenduse põhjalikust analüüsist. Peamisteks projekteerimise eesmärkideks said välise võru ära kaotamine (Sele 5.20), veljetsentri paksuse vähendamine ning üldine topoloogia optimeerimine.



Sele 5.20. Vana (vasakul) ja uue (paremal) veljetsentri erinevus.

Välise võru kaotamine andis märkimisväärse kaalusäästu. Tänu sellele tuli küll veljetsentri kodarad teha veidi tugevamad, kuid kokkuvõttes andis see siiski positiivse tulemuse. Samuti muudeti kodarate asetust. Uuel veljetsentril on kodarad suunatud võimalikult palju rattapoldi suunas. Jõud, mis veljele mõjuvad, kantakse rattavõllile üle läbi rattapoltide. Seega, kui võimalikult palju kodaraid suunata kinnituspoltide poole, on võimalik konstruktsiooni märgatavalt tugevdada ning pingeid hajutada. Vana lahenduse puhul võttis enamus pinged vastu üks kodar. Uue lahenduse puhul kolm. Kõigi nende lahenduste tulemusena kaalub uus veljetsenter 224 grammi, mis on 81 grammi vähem kui eelnev veljetsenter.

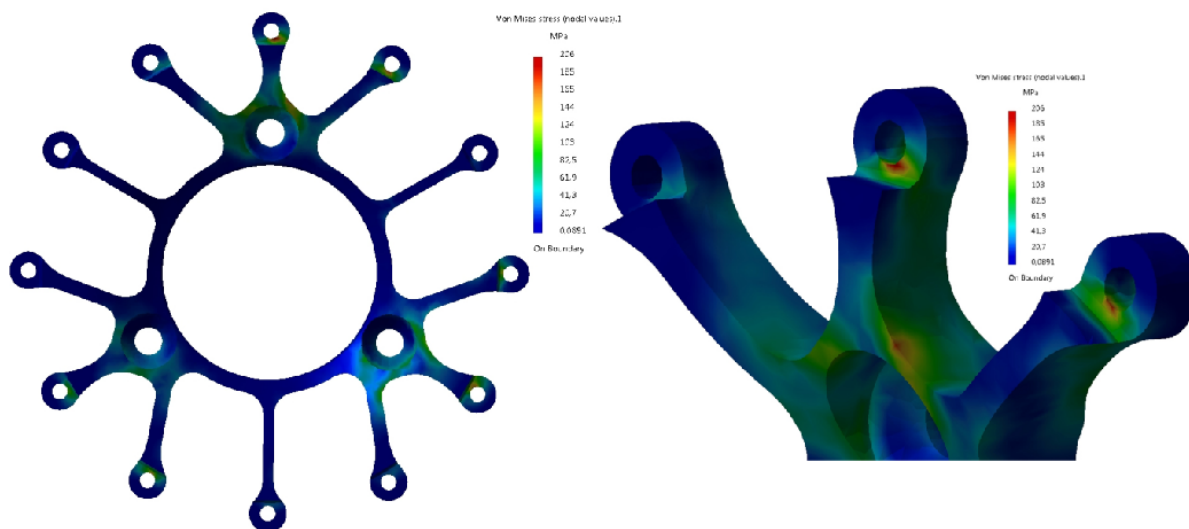
Veljetsentri paksust vähendati 4mm võrra. Kui vanal lahendusel kinnitusid veljevõrud veljetsentri sisemisele pinnale tehtud astmele, siis uue lahenduse puhul kinnituvad veljevõrud veljetsentri välimisele pinnale tehtud astmele. See annab võimaluse vähendada veljetsentri paksust (Sele 5.21).



Sele 5.21. Vana (vasakul) ja uue (paremal) veljetsentri kodarate lõige

Selel 5.21 on näha ka veljetsentri kodara kuju, mida peamiselt dikteerib pidurisadul. Kodara sisemine külg on disainitud täpselt pidurisadula kuju järgi. Veljetsentri kodara ja pidurisadula vahele on projekteeritud umbes 1,5 mm suurune pilu. See on piisav vältimaks nende kahe detaili kokkupuudet sõidu ajal. Arvestatud on nii pidurisadula kui ka veljetsentri tootmise ebatäpsust ning ka veljetsentri läbipaindumist kurviolukorras.

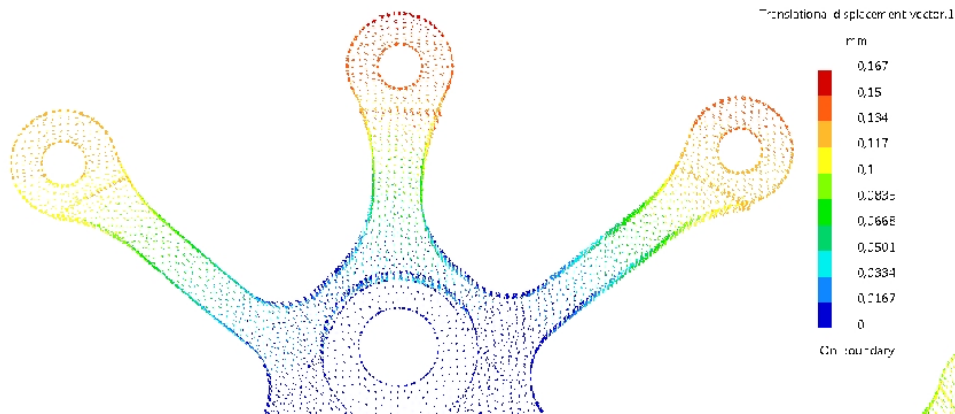
Topoloogia optimeerimist tehakse vastavalt tugevusanalüüsi tulemustele. Põhilised parameetrid, mida muudetakse, on kodarate paksus, ümardusraadiused ja kodarate suund. Peale mitmeid katsetusi jõuti kõiki tingimusi rahuldavale tulemusele. Suurimad pinged 206MPa tekivad oodatult poldiavade servadesse. Tegu on pingekonsentraatoritega, mida eemaldada on ülimalt keeruline. Kuid isegi need pinged jäävad kordades alla materjali voolavuspiiri. Järgneval illustratsioonil (Sele 5.22) on näha pingete jaotumist veljetsentris.



Sele 5.22. Pingete jaotumine esimesel veljetsentris



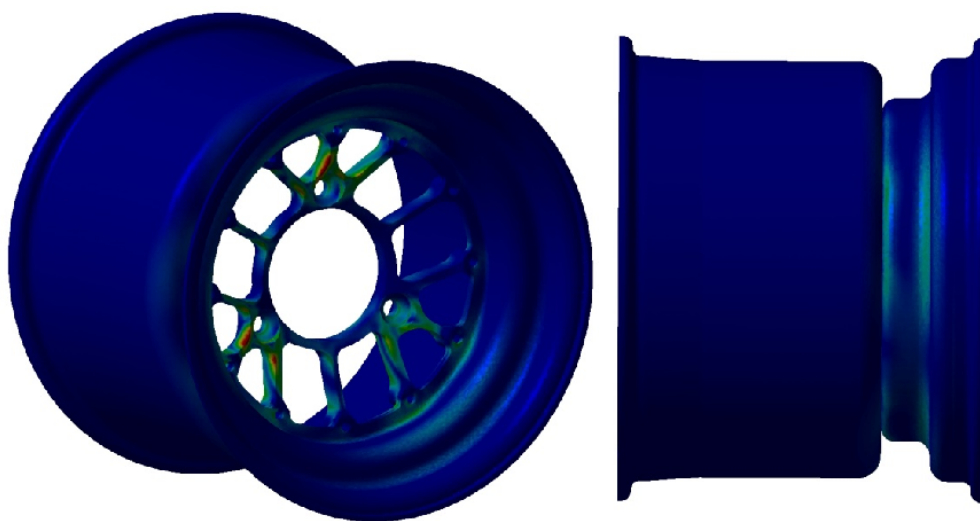
Pingete kõrval tuleb jälgida ka deformatsioone. Lõpliku veljetsentri lahenduse korral on maksimaalsed deformatsioonid 0,16 mm. Seel 5.23 on nädatud deformatsioonide jaotumine detailis.



Sele 5.23. Deformatsioonid veljetsentris

## 5.8. Tugevusanalüüs veljekoostule

Veljekoostu tugevusanalüüs käib analoogselt veljetsentri omaga. Rajatingimused on selgitatud juba eelnevas peatükis. Maksimaalsed rakenduvad koormused nii X, Y kui ka Z-telje suunal on teada ning välja toodud tabelis 5.2. Veljetsentri asend valitakse taaskord sama, mis juba eelnevalt leitud. Tähtis on, et tugevusanalüüsid tehakse kõige ebasoodsama oleku kohta. Siis on teada, et analüüsi tulemused on adekvaatsed.



Sele 5.24. Pingete jaotumine esimese velje koostus

Velje koostu tugevusanalüüsist on näha, et suurimad pinged tekivad siiski veljetsentrisse (Sele 5.24). Kui veljetsentri tugevusanalüüs näitas, et maksimaalne deformatsioon oli 0,16 mm, siis koos veljevõrudega on läbipaindeks 0,24 mm. Suurimad pinged veljevõrudes on 100 MPa. Suurimad pinged tekivad poldiavade servadesse ning veljevõrude paindekohtadesse. Tabelis 5.5 on näha tugevusarvutuste tulemused.

Tabel 5.5. Uue ja vana lahenduse tugevusanalüüside tulemuste võrdlus

|   | <b>Vana lahendus</b> | <b>Uus lahendus</b> |
|---|----------------------|---------------------|
| Veljetsentri maksimaalsed pinged          | 245 MPa              | 206 MPa             |
| Veljetsentri maksimaalsed deformatsioonid | 0,38 mm              | 0,16 mm             |
| Veljetsentri varutegur                    | 2,2                  | 2,7                 |
| Veljetsentri mass                         | 305 g                | 224 g               |
| Velje koostu maksimaalne deformatsioon    | -                    | 0,24 mm             |
| Veljevõrude maksimaalsed pinged           | -                    | 100 MPa             |
| Veljevõrude varutegur                     | -                    | 2,7                 |

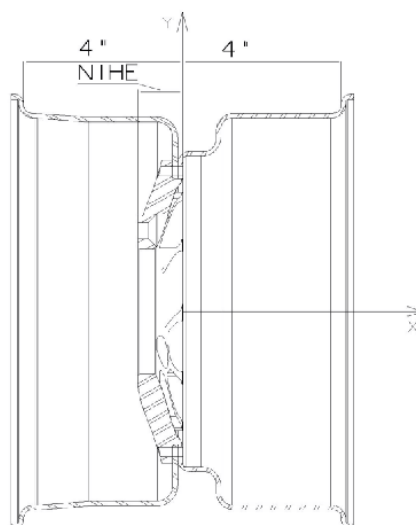
Andmetest selgub, et soovitud varutegur 3 pole küll päris täielikult saavutatud, kuid kui arvestada, et maksimaalsed pinged tekkisid ainult poldiavade servadesse, siis võib selle tulemusega rahul olla. Üldiselt jäävad pinged materjalis selliseks, et piisav varutegur on olemas.

## 6. TAGUMINE VELG

Antud peatükis on kirjeldatud vormelauto FEST14 tagumise velje projekteerimist. Suuresjaos on tegemist esivelje analoogiga. Enamus protsesse on identsed esimese velje projekteerimisega. Tagavelg on samuti kolmeosaline, mis koosneb kahest veljevõrust ning veljetsentrist. Peamine erinevus esiveljega on velje nihutus. Esimese velje puhul on nihutus 25 mm ja tagumise velje puhul -25 mm. Kuna paljud etapid on identsed esimese velje projekteerimisel tehtud etappidega, siis neid enam siin peatükis ei käsitleta. Järgnevas peatükis on välja toodud vaid need protsessid ja etapid, mis erinevad esimest veljest. Sellisteks punktideks on piirangud projekteerimisel ning tugevusanalüüs nii veljetsentrile kui veljekoostule.

### 6.1. Piirangud projekteerimisel

Tagumiste velgede projekteerimist alustatakse jällegi etteantud parameetrite analüüsist. Velje diameeter, velje laius, tsentriava suurus ning poldivalem on sama, mis esimese velje puhul. Ainuke erinevus esiveljega on velje nihutus. Velje laiuseks on ettenähtud 8 tolli. Selleks, et saavutada teistsugust nihutust, on aga veljevõrud esiveljega võrreldes erineva laiusega. Veljevõrude erineva laiusega saab velje nihutust muuta nii, et veljetsenter jääb identseks. See lihtsustab tootmist. Velje laius tuleb kokku kahest veljevõrust, mille laiused on 4 tolli (Sele 6.1). Tagumiste pidurite puhul ei ole ülekuumenemine probleemiks, seega pole tagumisele veljele vajalik teha aerodünaamilist analüüsi.



Sele 6.1. Tagumise velje nihutus

## 6.2. Tugevusanalüüs veljetsentrile

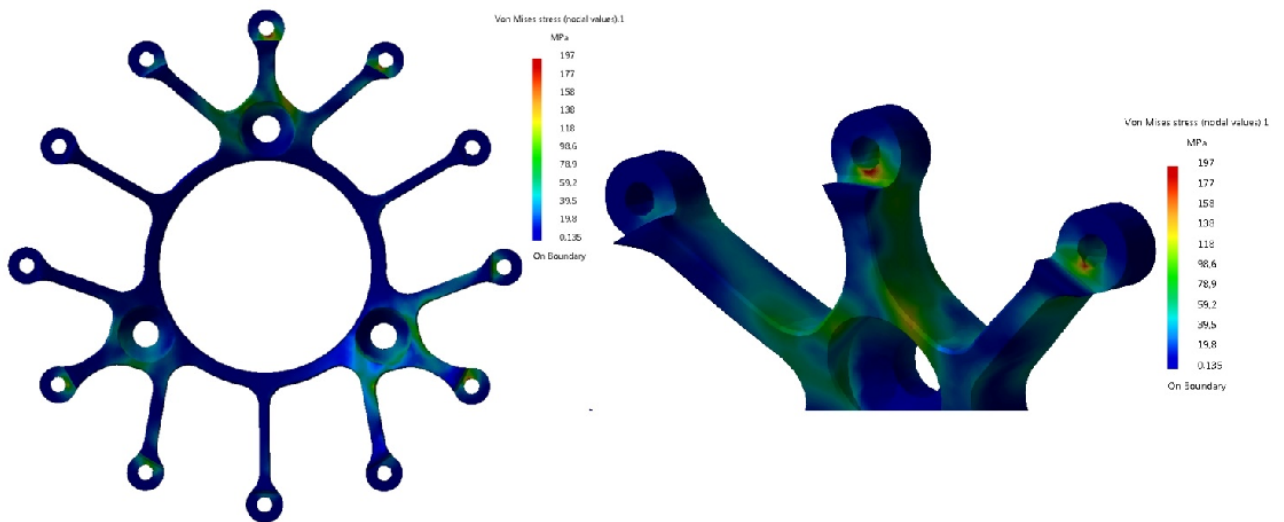
Ka tagumise velje võrud ja veljetsenter läbivad põhjaliku LEM tugevusanalüüsi. Tugevusanalüüsi tegemiseks on vaja jällegi paika panna kolm põhiparameetrit: materjali omadused, rajatingimused ning koormused. Materjal ja materjali omadused ning ka rajatingimused on samad, mis esimese velje puhul. Kuna vormelauto FEST14 kaal on jaotatud tagumisele teljele rohkem kui esimesele, siis on ka veljele mõjuvad koormused suuremad. Jõud X, Y ja Z-telje suunas on arvatud sama arvutusmooduliga ning on välja toodud tabelis 6.1. Jõud rakendatakse velje mudelile analoogselt esimese veljega.

Tabel 6.1. Tagumise rehvi kontaktpunkti rakenduvad jõud

| <b>Maksimaalsed tagarehvi kontaktpunkti rakenduvad jõud</b> |          |          |
|---|----------|----------|
| <b>X</b>  | <b>Y</b> | <b>Z</b> |
| 2453 N  | 3478 N   | 1869 N   |

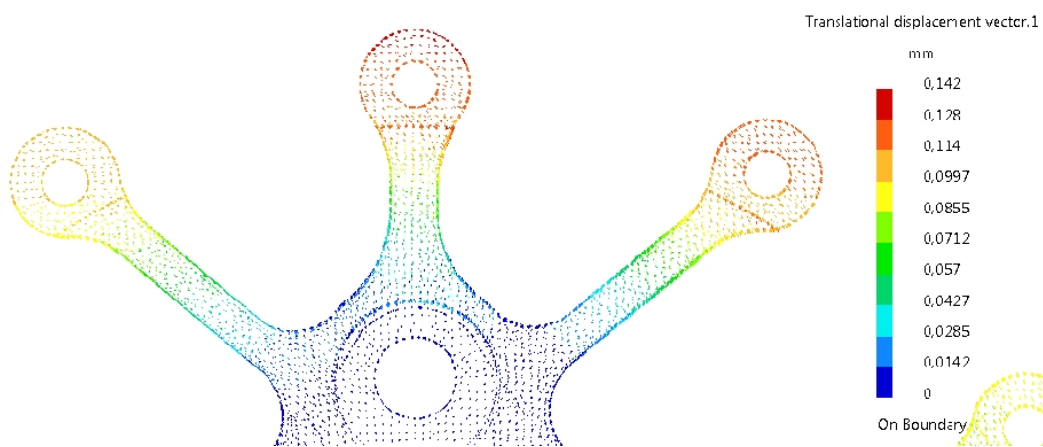
Tugevusanalüüsiks kasutatavad parameetrid võetakse samad, mis esimese velje tugevusanalüüsi puhul.

Tagumise veljetsentri projekteerimine käib identselt esimesega. Tagumised pidurisadulad on märgatavalt väiksemad kui esimesed, seega pidurisadula ja veljetsentri vaheline pilu ei piira nii palju veljetsentri disaini kui esimese velje korral. Tänu sellele on tagumise velje puhul saavutatud veidi väiksemad pinged kui esimesel veljetsentril vaatamata sellele, et mõjuvad koormused on veidi suuremad ning veljetsentri mass erineb esimesest vaid 1 grammi võrra. Uus tagumine veljetsenter kaalub 225 grammi mis on 80 grammi vähem kui eelnev lahendus. Maksimaalsed pinged 197MPa tekivad identselt esimese veljetsentriga, poldiavade servadesse. Pingete jaotumist illustreerib järgnev Sele 6.2.



Sele 6.2. Pingete jaotumine tagumise veljetsentri tugevusanalüüsis

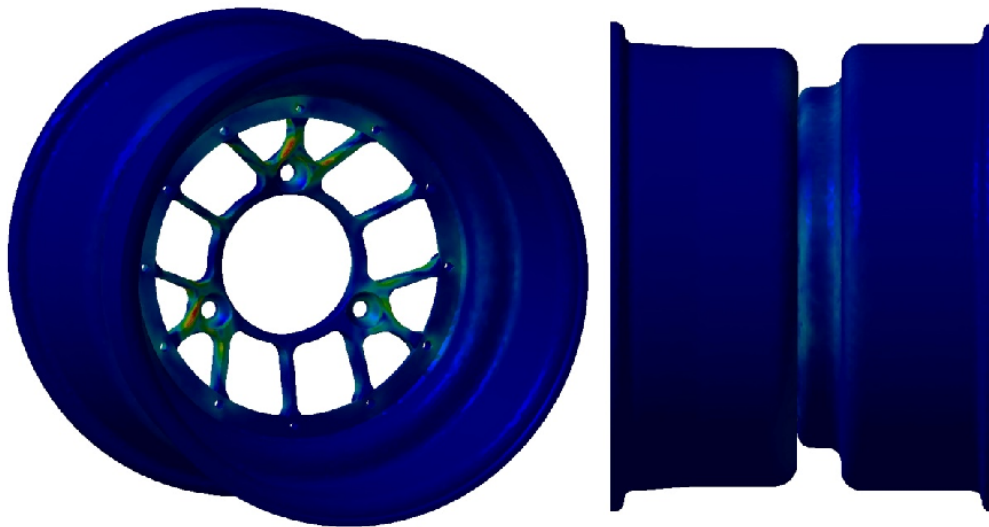
Veljetsentri deformatsioonid on samuti veidi väiksemad kui eesmise velje puhul. Esimene velg deformeerub maksimaalsete jõudude korral 0,16 mm ja tagumine velg 0,14 mm. Deformatsioonide jaotumine on välja toodud järgneval Selel 6.3.



Sele 6.3. Deformatsioonid tagumise veljetsentri tugevusanalüüsis

### 6.3. Tugevusanalüüs veljekoostule

Veljekoostu tugevusanalüüs käib analoogselt esimeseveljega. Maksimaalsed rakenduvad koormused nii X, Y kui ka Z-telje suunal on teada ning välja toodud tabelis 6.1.



Sele 6.4. Pingete jaotumine veljekoostu tugevusanalüüsis

Veljekoostu tugevusanalüüs näitab, et sarnaselt esimese veljega, tekivad suurimad pinged veljetsentrisse ning veljevõrudes tekkivad pinged on pigem tagasihoidlikud (Sele 6.4). Maksimaalsed pinged veljetsentris on 197 MPa ning veljevõrudes 75 MPa. Ka suurimad pinged tekivad samadesse kohtadesse võrreldes esivelje koostuga: poldiavade servadesse ning veljevõrude paindekohtadesse. Järgnevas tabelis 6.2 on näha tugevusanalüüsi tulemused.

Tabel 6.2. Uue ja vana lahenduse tugevusanalüüside tulemuste võrdlus

|   | <b>Vana lahendus</b> | <b>Uus lahendus</b> |
|---|----------------------|---------------------|
| Veljetsentri maksimaalsed pinged          | 245 MPa              | 197 MPa             |
| Veljetsentri maksimaalsed deformatsioonid | 0,38 mm              | 0,14 mm             |
| Veljetsentri varutegur                    | 2,2                  | 2,8                 |
| Veljetsentri mass                         | 305 g                | 225 g               |
| Velje koostu maksimaalne deformatsioon    | -                    | 0,20 mm             |
| Veljevõrude maksimaalsed pinged           | -                    | 75 MPa              |
| Veljevõrude varutegur                     | -                    | 3,6                 |

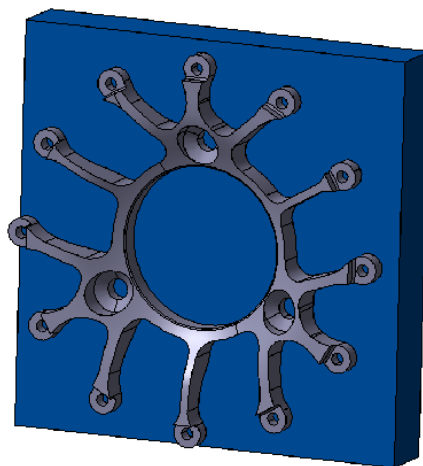
Tugevusanalüüsi tulemustest selgub, et sarnaselt esimese veljega jääb soovitud varutegurist 3 natukene puudu, kuid jällegi tekitavad kõrgemaid pingeid poldiavade servas olevad pingekonsentraatorid. Üldine pingete pilt vastab soovitule.

## 7. TOOTMINE

Kuna Formula Studenti sari on loodud selleks, et noored insenerid õpiksid tootearenduse kõiki etappe, siis eesmärgiks on peale projekteerimise ka velg valmis teha. Tootmise all käsitletakse kahte erinevat protsessi. Esimeseks on veljetsentrite valmistamine ning teiseks on veljevõrude modifitseerimine. Veljetsentrid valmistatakse täielikult FS Team Tallinna liikmete poolt. Valmistamismeetodite valikul tuleb silmas pidada, et tegu ei ole suurseria tootmisega. Kokku tuleb toota 8 veljetsentrit, 4 esimest ja 4 tagumist. Veljevõrude modifitseerimine tähendab seda, et võru keskosa tuleb töödelda, et kahe võru omavaheline ühenduspind oleks tasapinnaline, ning samuti tuleb võru modifitseerida veljetsentri järgi. Järgnevas peatükis kirjeldatakse täpsemalt kasutada olevaid toorikuid, tööriistu ning töötlemismetoodikat. Samuti tuleb juttu CAM programmeerimisest, töötlemise simuleerimisest ning lõpuks ka juba valmis veljetsentritest.

### 7.1. Toorikud

Veljetsentri toorikuks on alumiinium 7075 T6 plokk mõõtmetega 200x200x30 mm (Sele 7.1). Tooriku kaaluks on 3,5 kg. Tooriku mõõtmed on valitud piisava töötlusvaruga. Veljevõru toorikuks on Keizer Wheels'i poolt tarnitav standardne alumiiniumist poleeritud veljevõru toorik (Sele 7.2). Töödelda tuleb keskava ning poldiavad, mille abil veljevõrud ja veljetsenter omavahel ühendatakse.



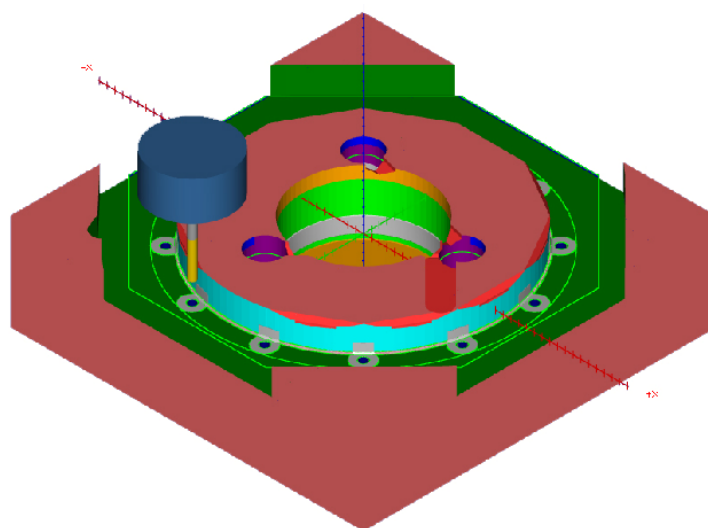
Sele 7.1. Veljetsenter ja toorik (sinine)



Sele 7.2. Veljevõru toorik

## 7.2. Töötlemismetoodika

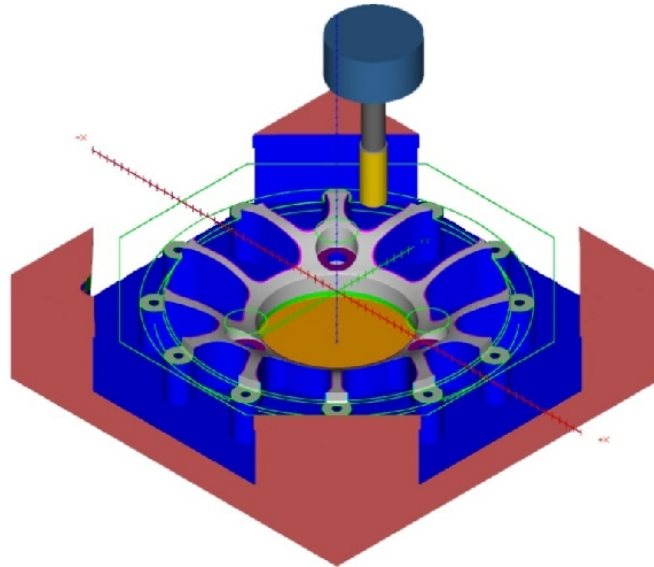
Mõlemad tootmisprotsessid, veljetsentri töötlemine ning veljevõru modifitseerimine, viiakse läbi Tallinna Tehnikakõrgkooli lõiketöötluslabori 3 teljelisel CNC freespinglil Bridgeport GX 1000. CAM programmid freesimiseks tehakse tarkvaraga MasterCam X7. Veljetsentri freesimiseks kinnitatakse toorik kõigepealt klambritega töölauale, freesitakse veljetsentri kõik poldiavad ning tsentriava. Poldiavade puurimiseks tuleb freesida ka veljevõrude ning veljetsentri ühenduspind. Peale puurimist avad ka keermestatakse. Ühtlasi töödeldakse ka kolm rattapoldi ava ning koonuspinnad rattanutrite jaoks. MasterCami simulatsiooni pilti nendest protsessidest saab näha Selet 7.3.



Sele 7.3. Esimese paigutuse tööoperatsioonid

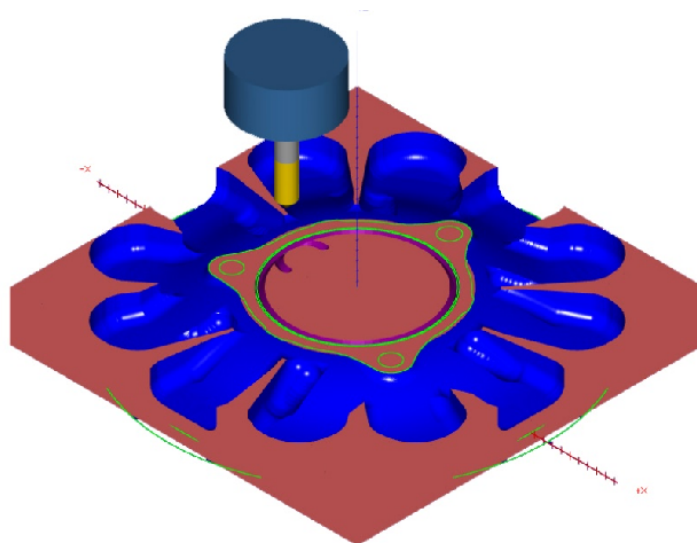


Seejärel kinnitatakse toorik alusplaadile läbi töödeldud poldiavade ning töödeldakse välimine kujupind ja lõigatakse välja kodarate vahelised alad. Ühtlasi lõigatakse välja ka veljetsentri välispind (Sele 7.4).



Sele 7.4. Veljetsentri töötlemine teises paigutuses.

Seejärel keeratakse toorik teistpidi, kinnitatakse jällegi alusplaadile läbi poldiavade ning töödeldakse veljetsentri tagumine pool. Alustatakse veljetsentri ning rattavõlli ühenduspinna töötlemisest. Teiseks operatsiooniks on veljetsentri kodarate tagumise kujupinna freesimine ning tsentriava serva faasi töötlemine. Nimetatud operatsioone iseloomustab Sele 7.5.



Sele 7.5. Veljetsentri tagumise poole freesimine

Selel 7.5 kujutatud protsesside illustreerimisel on ihtsustuse mõttes kasutatud toorikuna jällegi tavalist risttahukat. Reaalselt on selle paigutuse toorikuks eelmiste paigutuste tulemus.

Veljetsentri töötlemine tehakse kahes paigutuses ning freesi tööaeg kogu detaili töötlemiseks on 86 minutit ehk 1 tund ja 26 minutit.

Veljevõrude töötlemine on märgatavalt lihtsam. Võru kinnitatakse klambritega freespingi töölaua peale ning töödeldakse ühes paigutuses ära nii tsentriava kui ka 12 poldiava. Esimeste veljevõrude puhul on tsentriava taskutega ning tagumiste veljevõrude puhul on tsentriava ümmargune diameetriga 170 mm.

Detailide töötlemiseks vajalikud mõõdud, tolerantsid ning pinnasileduse näitajad on välja toodud käesoleva lõputöö lisa paiknevatel detailide tööjoonistel. Järgnevalt on näha valmistatud veljetsentri foto (Sele 7.6).



Sele 7.6. Valmis veljetsentrite foto

## 8. MAJANDUSLIK ARVUTUS

Käesolevas lõputöös projekteeritud ning valitud detailid peavad vastama täielikult Formula Student sarja reeglitele ja põhimõtetele. Seega on üheks väga tähtsaks osaks ka kõikide detailide kuluaruanne ehk *Cost Report*. Formula Studenti võistlustel nõutud kuluaruanne on dokument, mis sisladab kõikide vormelauto küljes olevate detailide hinda, valmistamiskulusid ning selleks vaja mineva rakistuse ning tööjõu kulusid. Kuluaruannet hinnatakse kahest põhilisest aspektist. Esiteks peab vormelauto prototüübi kogumaksumus olema võimalikult madal ning teiseks peab aruanne olema võimalikult täpselt koostatud. Kõikide detailide, töötlemisprotsesside, ostutoodete ning kasutatud rakiste maksumus peab olema korrektselt sisestatud.

Formula Studenti kuluaruandesse ei lähe kirja reaalsed kulutused detailide valmistamiseks. Sellisel juhul oleks meeskondade vahel suur ebavõrdsus. Hinnatakse nimelt tehniliste lahenduste ning töötlemismeetodite nutikust. Nii ostutoodete, tootlemisprotsesside, rakiste kui ka kinnitusvahendite ühikmaksumused on välja toodud Formula SAE poolt väljastatud tabelites. Tabelites olevad detailide ning protsesside maksumused on koostatud 1000-aatase tootmismahu korral. See tähendab, et kõikide meeskondade kuluaruanded on otseselt võrreldavad, kuna kõik on koostatud samadel alustel. Formula SAE ametlikuks rahaühikuks on dollar.

Käesolevas peatükis on esmalt toodud näide, kuidas kuluaruannet koostatakse. Seejärel on toodud välja nii esimese kui tagumise velje jaoks kasutatavate ostutoodete, kinnitusvahendite, rakistuse ning töötlemisprotsesside ning koostamise maksumus. Kuna vormelauto FEST14 velgede projekteerimise üheks eesmärgiks oli maksumuse vähendamine, siis lõpuks sai võrreldud eelneva veljelahenduse ning antud lõputöös väljapakutud veljelahenduse maksumusi kuluaruande tulemuste põhjal.

### 8.1. Kuluaruande näide

Kuluaruanne koostatakse järgmiselt. Esiteks koostatakse detailide valmistamisega seotud kulutuste tabelid ning seejärel koostatakse nendest detailidest koostude tegemiseks vajaminevate kulutuste tabelid. Velgede eelarvestamiseks on vaja esiteks koostada tabel veljetsentrite valmistamiseks vajaminevate kulutustega. Seejärel on vaja koostada tabel velje

koostamise kohta, kus on ostutootena kirjas veljevõrud. Lisaks sellele on koostutabelis kirjas ka koostamiseks vajalikud kinnitusvahendid ehk antud juhul M6 poldid ja seibid. Järgnevalt on toodud näide kuluaruande koostu- (Sele 8.1) ja detailitabelist (Sele 8.2).

Tabel 8.1. kuluaruande koostutabel

|                   |                        |  |                  |                        |  |  |  |  |              |    |  |  |                  |                 |
|-------------------|------------------------|--|------------------|------------------------|--|--|--|--|--------------|----|--|--|------------------|-----------------|
| <b>University</b> | Tallinn UAS            |  |                  |                        |  |  |  |  | <b>Car #</b> | 18 |  |  | <b>Part Cost</b> | \$ 27,93        |
| <b>System</b>     | Steering System        |  | <b>FileLink1</b> |                        |  |  |  |  |              |    |  |  | <b>Qty</b>       | 1               |
| <b>Assembly</b>   | Steering rack assembly |  | <b>FileLink2</b> |                        |  |  |  |  |              |    |  |  | <b>FileLink1</b> |                 |
| <b>Part</b>       | Rack                   |  | <b>FileLink3</b> |                        |  |  |  |  |              |    |  |  | <b>FileLink2</b> |                 |
| <b>P/N Base</b>   | 61001                  |  | <b>Full P/N</b>  | FSG-11-018-ST-61001-AA |  |  |  |  |              |    |  |  | <b>FileLink3</b> | <b>Extended</b> |
| <b>Suffix</b>     | AA                     |  |                  |                        |  |  |  |  |              |    |  |  |                  | \$ 27,93        |
| <b>Details</b>    |                        |  |                  |                        |  |  |  |  |              |    |  |  |                  |                 |

| ItemOrder | Material     | Use  | UnitCost | Size1 | Unit1 | Size2 | Unit2 | Area Name | Area | Length | Density | Quantity | Sub Total        |
|-----------|--------------|------|----------|-------|-------|-------|-------|-----------|------|--------|---------|----------|------------------|
| 1         | Steel, Alloy | Rack | \$ 2,25  | 1,00  | kg    |       |       |           |      |        |         |          | \$ 2,25          |
|           |              |      |          |       |       |       |       |           |      |        |         |          | \$ -             |
|           |              |      |          |       |       |       |       |           |      |        |         |          | \$ -             |
|           |              |      |          |       |       |       |       |           |      |        |         |          | <b>Sub Total</b> |
|           |              |      |          |       |       |       |       |           |      |        |         |          | \$ 2,250         |

| ItemOrder | Process                             | Use  | UnitCost | Unit | Quantity | Multiplier | Mult. Val. | Sub Total        |
|-----------|-------------------------------------|------|----------|------|----------|------------|------------|------------------|
| 1         | Machining                           | Rack | \$ 0,04  | cm^3 | 14       | 42CrMo4    | 3 \$       | 1,68             |
| 2         | Drilled holes < 25.4 mm dia.        | Rack | \$ 0,35  | hole | 4        | 42CrMo4    | 3 \$       | 4,20             |
| 3         | EDM-Wire                            | Rack | \$ 0,20  | cm   | 26,5     | 42CrMo5    | 3 \$       | 15,90            |
| 4         | Machining Setup, Install and remove | Rack | \$ 1,30  | unit | 3        |            |            | 3,90             |
|           |                                     |      |          |      |          |            |            | <b>Sub Total</b> |
|           |                                     |      |          |      |          |            |            | \$ 25,68         |

Tabel 8.2. kuluaruande detailitabel

|                   |                        |  |                 |                        |  |  |  |  |              |    |  |  |                  |                 |
|-------------------|------------------------|--|-----------------|------------------------|--|--|--|--|--------------|----|--|--|------------------|-----------------|
| <b>University</b> | Tallinn UAS            |  |                 |                        |  |  |  |  | <b>Car #</b> | 18 |  |  | <b>Asm Cost</b>  | \$ 145,14       |
| <b>System</b>     | Steering System        |  |                 |                        |  |  |  |  |              |    |  |  | <b>Qty</b>       | 1               |
| <b>Assembly</b>   | Steering rack assembly |  |                 |                        |  |  |  |  |              |    |  |  | <b>FileLink1</b> |                 |
| <b>P/N Base</b>   | A6001                  |  | <b>Full P/N</b> | FSG-11-018-ST-A6001-AA |  |  |  |  |              |    |  |  | <b>FileLink2</b> | <b>Extended</b> |
| <b>Suffix</b>     | AA                     |  |                 |                        |  |  |  |  |              |    |  |  | <b>FileLink3</b> | \$ 145,14       |
| <b>Details</b>    |                        |  |                 |                        |  |  |  |  |              |    |  |  |                  |                 |

| ItemOrder | Part                    | Part Cost | Quantity | Sub Total        |
|-----------|-------------------------|-----------|----------|------------------|
| 61001     | Rack                    | \$ 27,93  | 1        | \$ 27,930        |
| 61002     | Rack and pinion housing | \$ 33,68  | 1        | \$ 33,680        |
| 61003     | Steering pinion         | \$ 32,83  | 1        | \$ 32,833        |
| 61004     | Eccentric bushing       | \$ 4,28   | 1        | \$ 4,282         |
| 61006     | Steering rack bracket   | \$ 2,58   | 2        | \$ 5,152         |
| 61007     | Sensor Mounting         | \$ 1,31   | 1        | \$ 1,310         |
| 61008     | Bearing, Deep Groove    | \$ 6,86   | 2        | \$ 13,720        |
| 61009     | Bearing Linear Closed   | \$ 9,73   | 2        | \$ 19,460        |
|           |                         |           |          | \$ -             |
|           |                         |           |          | \$ -             |
|           |                         |           |          | \$ -             |
|           |                         |           |          | <b>Sub Total</b> |
|           |                         |           |          | \$ 138,367       |

## 8.2. Esimese velje kuluaruanne

Veljetsentri maksumus sõltub kahest kuluartiklist. Esimeseks on materjali maksumus. Materjaliks on alumiiniumi sulam 7075 T6, mille kilogrammi hind kuluaruande tabelite järgi on 4,2 dollarit kilogramm. Veljetsentri valmistamiseks on vaja 3,2 kg materjali. Teiseks kuluartikliks on materjali töötlemine. Töötlemisprotsessideks on freesimine ning keermestamine. Mõlemale protsessile on vaja juurde lisada ka seadistamiskulud. Freesimise hind arvestatakse eemaldatud materjali iga kuupsentimeetri kohta. Keermestamise maksumus tuleneb keermepikkusest. Järgnevas tabelis 8.3 on välja toodud kõikide veljetsentri valmistamiseks vajaminevate materjalide ning protsesside maksumused kuluaruande tabeli alusel.

Tabel 8.3. Esimese veljetsentri valmistamise kulutuste tabel

| Materjal      | Kasutusala   | Ühiku hind (\$) | Hulk | Ühik            | Maksumus (\$) |
|---------------|--------------|-----------------|------|-----------------|---------------|
| Al 7075 T6    | Veljetsenter | 4,20            | 3,0  | kg              | 12,60         |
| Protsess      | Kasutusala   | Ühiku hind (\$) | Hulk | Ühik            | Maksumus (\$) |
| Seadistus     | Freesimine   | 1,30            | 3    |                 | 3,90          |
| Freesimine    | Veljetsenter | 0,04            | 1180 | cm <sup>3</sup> | 47,20         |
| Keermestamine | Veljetsenter | 0,10            | 12   | cm              | 1,20          |
| <b>KOKKU:</b> |              |                 |      |                 | 64,90         |

Veljevõru valmistamise maksumus sõltub veljevõru tooriku hinnast, mis on kindlaks määratud kuluaruande materjalide tabelis. Seejärel tuleb toorikut töödelda. Töötlemine tähendab freesimis- ning puurimisprotsesse. Nii freesimisele kui puurimisele lisandub ka üks seadistusprotsess, kuna mõlemad töötused tehakse ühe paigaldusega. Puurimise maksumus tuleneb avade arvust. Järgnevas tabelis 8.4 on välja toodud veljevõru valmistamiseks tehtavad kulutused. Siinkohal tuleb mainida, et veljevõru hind on kuluaruande tabelis paari kohta. Ehk ühe (kahest veljevõrust koosneva) velje tegemiseks on vaja ühte ühikut.

Tabel 8.4. Esimese veljevõru valmistamise kulutuste tabel

| Materjal       | Kasutusala    | Ühiku hind (\$) | Hulk | Ühik            | Maksumus (\$) |
|----------------|---------------|-----------------|------|-----------------|---------------|
| 10" Veljevõrud | Esimeine velg | 57,50           | 1    | tk              | 57,50         |
| Protsess       | Kasutusala    | Ühiku hind (\$) | Hulk | Ühik            | Maksumus (\$) |
| Seadistus      | Freesimine    | 1,30            | 1    |                 | 1,30          |
| Freesimine     | Veljevõru     | 0,04            | 22   | cm <sup>3</sup> | 0,88          |
| Puurimine      | Veljevõru     | 0,35            | 12   | ava             | 1,20          |
| <b>KOKKU:</b>  |               |                 |      |                 | 60,88         |

Velje koostu jaoks on samuti vaja teha kuluaruande tabel. Koostutabel sisaldab detaile, mida on vaja koostuks, ning kinnitusvahendeid ja protsesse, mida on vaja koostamiseks. Detailideks on veljetsenter, veljevõru, ventiil ning M6 suuruses poldid. Protsesside alla kuuluvad koostamine, milleks on veljevõrude ning veljetsentri ühendamine, poltide kinnitamine ning ventiili paigaldamine veljele. Koostutabel (tabel 8.5) on tehtud kahe esimese velje koostamiseks. Selle tabeli kogusumma 264 dollarit ongi kahe esimese velje valmistamise maksumuseks.

Tabel 8.5. Esimese veljekoostu valmistamise kulutuste tabel

| <b>Materjal</b>   | <b>Kasutusala</b>       | <b>Ühiku hind (\$)</b> | <b>Hulk</b> | <b>Ühik</b> | <b>Maksumus (\$)</b> |
|-------------------|-------------------------|------------------------|-------------|-------------|----------------------|
| Veljetsenter      | Esimene velg            | 64,90                  | 2           | tk          | 129,8                |
| Veljevõru         | Esimene velg            | 60,88                  | 2           | tk          | 121,76               |
| Ventiil           | Esimene velg            | 1,0                    | 2           | tk          | 2,0                  |
| Polt M6           | Velje koostamine        | 0,05                   | 24          | tk          | 1,2                  |
| <b>Protsess</b>   | <b>Kasutusala</b>       | <b>Ühiku hind (\$)</b> | <b>Hulk</b> | <b>Ühik</b> | <b>Maksumus (\$)</b> |
| Koostamine        | Veljetsenter võru külge | 0,06                   | 4           | tk          | 0,24                 |
| Poldi kinnitamine | Veljetsenter            | 0,37                   | 24          | tk          | 8,88                 |
| Koostamine        | Ventiil võru külge      | 0,06                   | 2           | tk          | 0,12                 |
| <b>KOKKU:</b>     |                         |                        |             |             | 264,0                |

### 8.3. Tagumise velje kuluaruanne

Tagumise velje kuluaruande tabelid on suures plaanis samad, mis esimese velje puhul. Veljetsentri kulud on identsed esimese veljetsentriga. Veljevõru kulud on veidi erinevad esimese veljega võrreldes. Tagumise veljevõru valmistamiseks vajaminevad kulutused on kirjas järgnevas tabelis 8.6.

Tabel 8.6. Tagumise veljevõru valmistamise kulutuste tabel

| <b>Materjal</b> | <b>Kasutusala</b> | <b>Ühiku hind (\$)</b> | <b>Hulk</b> | <b>Ühik</b>     | <b>Maksumus (\$)</b> |
|-----------------|-------------------|------------------------|-------------|-----------------|----------------------|
| 10" Veljevõrud  | Tagumine velg     | 57,50                  | 1           | tk              | 57,50                |
| <b>Protsess</b> | <b>Kasutusala</b> | <b>Ühiku hind (\$)</b> | <b>Hulk</b> | <b>Ühik</b>     | <b>Maksumus (\$)</b> |
| Seadistus       | Freesimine        | 1,30                   | 1           |                 | 1,30                 |
| Freesimine      | Veljevõru         | 0,04                   | 15          | cm <sup>3</sup> | 0,60                 |
| Puurimine       | Veljevõru         | 0,35                   | 12          | ava             | 1,20                 |
| <b>KOKKU:</b>   |                   |                        |             |                 | 60,60                |

Tagumise velje koostamine käib identselt esimese veljega. Kõik kinnitusvahendid ja protsessid ning nende maksumused on samad. Ainuke erinevus on veljevõru maksumus. Kahe tagumise velje tootmise maksumuseks on 263,72 dollarit. Kulutused on välja toodud tabelis 8.7.

Tabel 8.7. Tagumise veljekoostu valmistamise kulutuste tabel

| Materjal          | Kasutusala              | Ühiku hind (\$) | Hulk | Ühik | Maksumus (\$) |
|-------------------|-------------------------|-----------------|------|------|---------------|
| Veljetsenter      | Tagumine velg           | 64,90           | 2    | tk   | 129,8         |
| Veljevõru         | Tagumine velg           | 60,60           | 2    | tk   | 121,76        |
| Ventiil           | Tagumine velg           | 1,0             | 2    | tk   | 2,0           |
| Polt M6           | Velje koostamine        | 0,05            | 24   | tk   | 1,2           |
| Protsess          | Kasutusala              | Ühiku hind (\$) | Hulk | Ühik | Maksumus (\$) |
| Koostamine        | Veljetsenter võru külge | 0,06            | 4    | tk   | 0,24          |
| Poldi kinnitamine | Veljetsenter            | 0,37            | 24   | tk   | 8,88          |
| Koostamine        | Ventiil võru külge      | 0,06            | 2    | tk   | 0,12          |
| <b>KOKKU:</b>     |                         |                 |      |      | 263,72        |

#### 8.4. Võrdlus eelneva mudeliga

Uue velje üheks projekteerimise eesmärgiks oli vähendada maksumust kuluaruandes. Järgnevas tabelis 8.8 on välja toodud võrdlus eelneva velje ning uue velje maksumuse vahel. Võrdluseks on võetud ainult esimese velje maksumused. Kuna esimeste ja tagumiste velgede hinnad on nii sarnased, siis tuleb ligilähedane maksumuse vahe ka tagumiste velgede puhul.

Tabel 8.8. Velgede maksumuste võrdlus

|                       | Eelnev lahendus | Uus lahendus |           |
|-----------------------|-----------------|--------------|-----------|
| Veljetsentri maksumus | 72 \$           | 64,90 \$     | - 7,1 \$  |
| Veljevõru maksumus    | 60,50 \$        | 60,88 \$     | + 0,38 \$ |
| Koostu maksumus       | 277,44 \$       | 264 \$       | - 13,4 \$ |

Nagu tabelist näha on, siis kahe uue esimese velje koostu maksumus on eelmise aasta lahendusest 13,4 dollarit ehk umbes 5% odavam. Erinevus tuleb peamiselt sellest, et uue veljetsentri tootmisel saab kasutada 30 mm paksust toorikut. Eelmise veljetsentri paksuseks oli 32 mm, mis tähendab, et toorikmaterjaliks pidi tellima 40 mm paksuse tooriku. Alumec 89 plaatide paksused on 10 mm sammuga [7]. Kogu auto peale tähendab see 26,8 dollarilist võitu.

## KOKKUVÕTE

Käesolevas lõputöös on käsitletud kõiki vormelauto FEST14 velje projekteerimise etappe. Alustatud on põhjaliku eelneva lahenduse analüüsiga, saamaks aru probleemidest ning puudujääkidest, mida on vaja uue lahenduse puhul parandada. Eelneva lahenduse analüüs annab hea stardiplatvormi uue lahenduse väljamõtleamiseks. Ühtlasi on analüüsitud ka eelneva lahenduse vastupidavust LEM tugevusanalüüsiga. Järgnevalt on kaalutud kõiki võimalikke uue lahenduse variante. Erinevad lahendused on koos põhjendustega üles reastatud ning leitud nendest kõige mõistlikum ja parim võimalik variant. Koostatud on erinevate lahenduste plusside ja miinuste tabel, et oleks kergem võrrelda erinevaid variante.

Edasi on lõputöös mindud juba projekteerimise juurde. Alustatud on esimese velje projekteerimisest. Detailsemalt on kirjeldatud kasutatud ostutooteid ning nendest CAD mudeli tegemist. Ühtlasi on tehtud uuele veljetsentri lahendusele nii aerodünaamiline- kui ka tugevusanalüüs. Lisaks sellele on kirjeldatud täpsemalt ka kasutatavaid materjale ning nende omadusi. Tehtud on ka materjalide tõmbekatsed, et veenduda nende tugevuse vastavuses spetsifikatsioonile. Katsed on tehtud nii ostutoodete materjalile kui ka materjalile millest valmistatakse käesolevas lõputöös projekteeritud veljetsentrid. Tugevusanalüüs on tehtud nii veljetsentri kui ka veljekoostule.

Peale esimese velje projekteerimist puudutavat peatükki tuleb analoogne peatükk tagumise velje projekteerimise kohta. Käsitletud on samu nüansse ning tehtud on samad lahenduskäigud. Kuna tagumiste pidurite ülekuumenemine ei ole probleemiks siis õhu voolavusanalüüsi tagumisele veljele ei tehta. Lõpetuseks on uut lahendust võrreldud eelnevaga.

Pärast projekteerimist on alustatud tootmist puudutavate küsimuste lahendamise ja tootmise peatükis on välja toodud kasutatavad toorikud ning üldine töötlemismetoodika. Kirjeldatud on tootmisprotsesside järjekorda ning välja on toodud ka tootmisajad. Kuna veljevõrude modifitseerimine on märgatavalt lihtsam protsess siis selles peatükis on kirjeldatud peamiselt veljetsentrite tootmist. Arvestades, et esimene ja tagumine veljetsenter on peaaegu identsed siis välja on toodud ainult esimese velje töötlemine. Töötlemisaeg esimesel ja tagumisele veljetsentril üldjoontes on sama.

Viimaseks peatükiks antud lõputöös on majandusliku arvutuse peatükk. Kõik arvutused on tehtud vastavalt Formula Studenti sarjas kasutusel olevatele kuluaruande koostamise reeglitele



ning tabelitele. Välja on toodud kõikide detailide valmistamise ja koostamise hinnad. Detailide, materjalide, kinnitusvahendite ja protsesside maksumused on võetud FormulaSAE kuluaruande (*Cost Report*) abitabelitest. Eraldi on kirjutatud esimese ja tagumise velje kohta. Lõpetuseks on võrreldud uut lahendust eelneva lahendusega. Kuna üks lõputöö eesmärkidest oli vähendada velje maksumust, siis majandusliku arvutuse peatükist selgub, et see eesmärk ka täideti. Uue velje lahenduse tootmine on kahe velje kohta 13,4 dollarit odavam eelmise aasta velje tootmisest. Kogu auto peale tähendab see umbes 26,8 dollarilist võitu.

Antud lõputöö tulemusena valmisid vormelauto FEST14 veljed. Lõputöö valmimise ajaks ei ole olnud veel võimalust uusi velgi korralikult testida, kuid ees ootab umbes kahekuuline testiperiood, mille jooksul selgitatakse välja, kas antud lahendus toimib nii, nagu lõputöös kirjeldatud või mitte. Positiivse tulemuse korral võistleb FS Team Tallinna prototüüp FEST14 nende velgedega ka 2014. aasta augustis Euroopa Formula Student võistlustel Austrias, Ungaris ja Itaalias.

Lõputöö autor näeb edasiste arenduste kohapealt võimalust valmistada ühest tükist süsinikkiud komposiitmaterjalist velg. Antud lõputöö raames projekteeritud ning valmistatud kolmeosaline alumiiniumvelg on küll väga vastupidav ning odav, kuid ühest tükist komposiitmaterjalist velg oleks märgatavalt kergem ning veel tugevam. Ainukene puudus on valmistamiskeerukus ning kõrge maksumus. Seega need on valdkonnad, mille uurimisele peaks tulevikus rohkem pühenduma. Tehnilises plaanis tähendaks komposiitmaterjalist velg seda, et oleks võimalik projekteerida õõnes profiiliga kodaraid ning ka veljevõru osa oleks võimalik ise projekteerida. Hetkel olid veljevõrud projekteerija jaoks suures osas muutmatud.

Autori arvates on lõputöö tulemused väga head. Leitud tehniline lahendus on eelnevast kergem ning odavam ja analüüside põhjal lahendab ka teataval määral piduritejahutuse probleeme. Veljetsentri innovaatiline disain vähendab velje massi ning suurendab jäikust. Lõpplahendus vastab sisuliselt kõikidele püstitatud eesmärkidele.

## SUMMARY

This masters thesis contains all the stages of wheels design for a Formula Student class racecar FEST14. Firstly the previous solution is thoroughly analysed to understand the problems and deficiencies of it. This analysis is a good platform to start the new design. The previous solution is also FEM analysed. After that all the possible solutions for the new design are discussed. All the different versions are analysed and based on that the most reasonable and functional one is chosen. To make the process easier a table with all the advantages and disadvantages of all the different solutions is made. This makes it possible to compare all the different layouts to one another.

The next big chapter in the thesis is the designing of the wheels. Firstly the front wheels. The following topics are described in detail: purchased products, CAD modeling of these products, CAD modeling of the self-designed wheel center, FEM analysis, materials and their mechanical propertise and also CFD analysis and FEM analysis for the wheel assembly. Material propertise are also verified by tensile tests to ensure the quality of the aluminium.

After the chapter about front wheel design comes the chapter about designing the rear wheel. In general this chapter is almost identical to the previous one. All the topics discussed are the same. Since overheating brakes are not a problem for the rear axle, CFD analysis is not taken into account in case of the rear wheel design. In the end of this chapter the new solution is compared to the previous one.

After designing the next chapter is about the manufacturing of the wheels. In this chapter the main topics are the stocks, manufacturing methods and CAM. Since modifying the purchased wheel rims is a very simple process mainly this chapter is about the milling of the self-designed wheel center. Because the front and the rear wheel center is almost identical this chapter includes only the manufacturing description for the front wheel. The machining time for the front and the rear wheel center is the same.

The last chapter in this masters thesis is the cost calculations. All the calculations and data is based on the official Formula Student Cost Report tables and rules. This chapter includes the calculations for the manufacturing of the wheel centers, wheel rims and the assembly of the entire wheel. The FormulaSAE Cost tables include the prices for all the materials, processes and fasteners. The tables are both for the front and the rear wheel. In the end of this chapter the cost of the new design and the previous solution is compared. Since one of the goal for

this thesis was to make the new design wheel with lower cost there is a table that shows the cost difference. New design wheel is 13,4\$ cheaper than the predecessor.

As a result of this thesis a complete new set of wheels were made for FEST14. If the wheels withstand the two month testing period and prove that they are infact as good as the thesis claim, this solution will be used by Formula Student Team Tallinn in the 2014 season. These wheels will be used in the official competitions in Austria, Hungary and Italy.

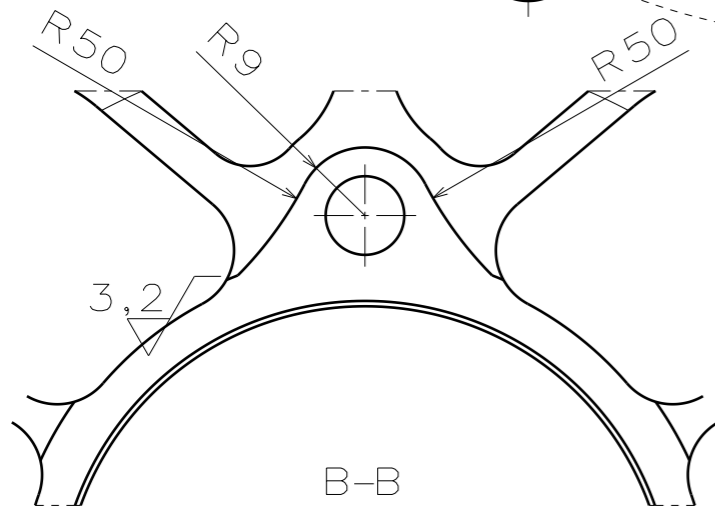
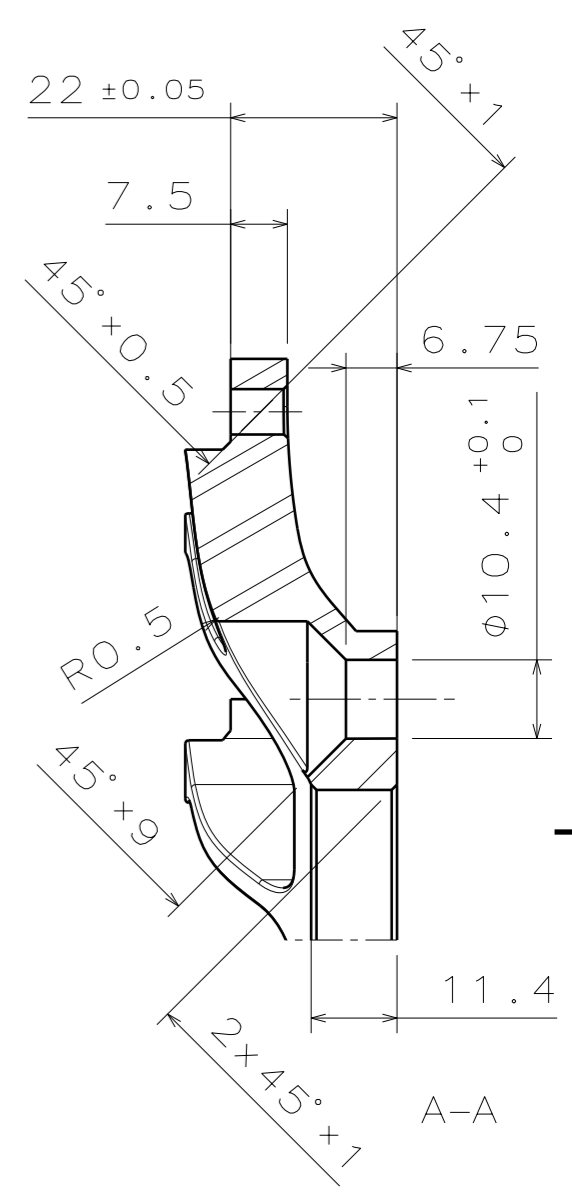
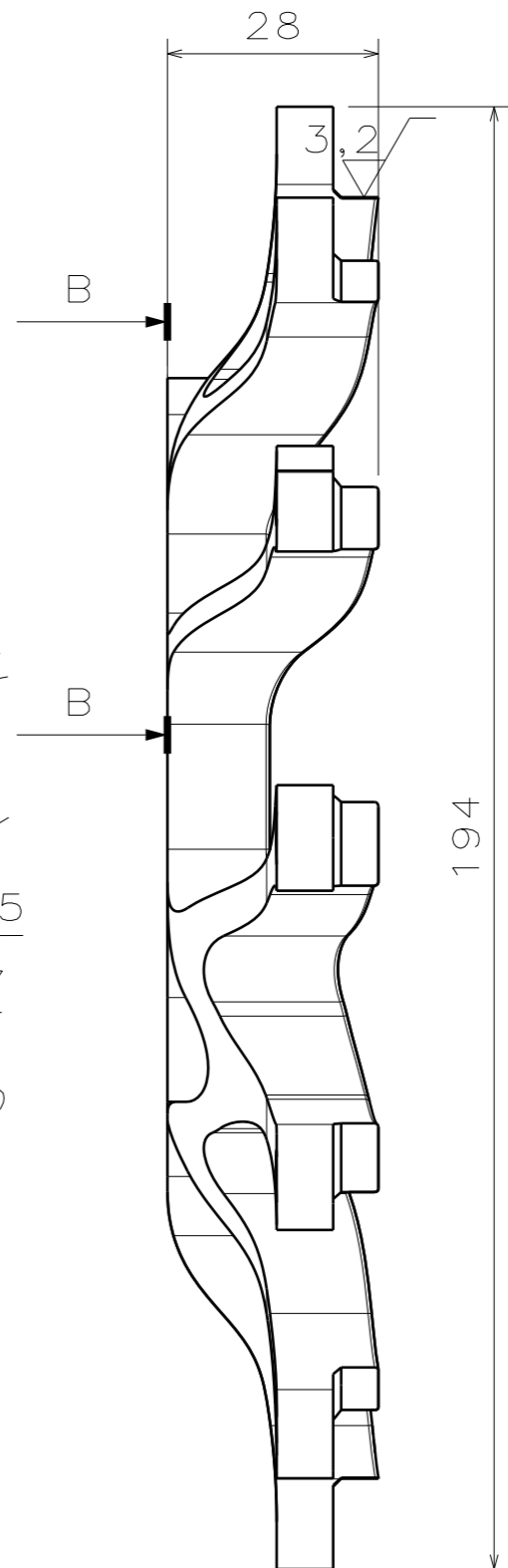
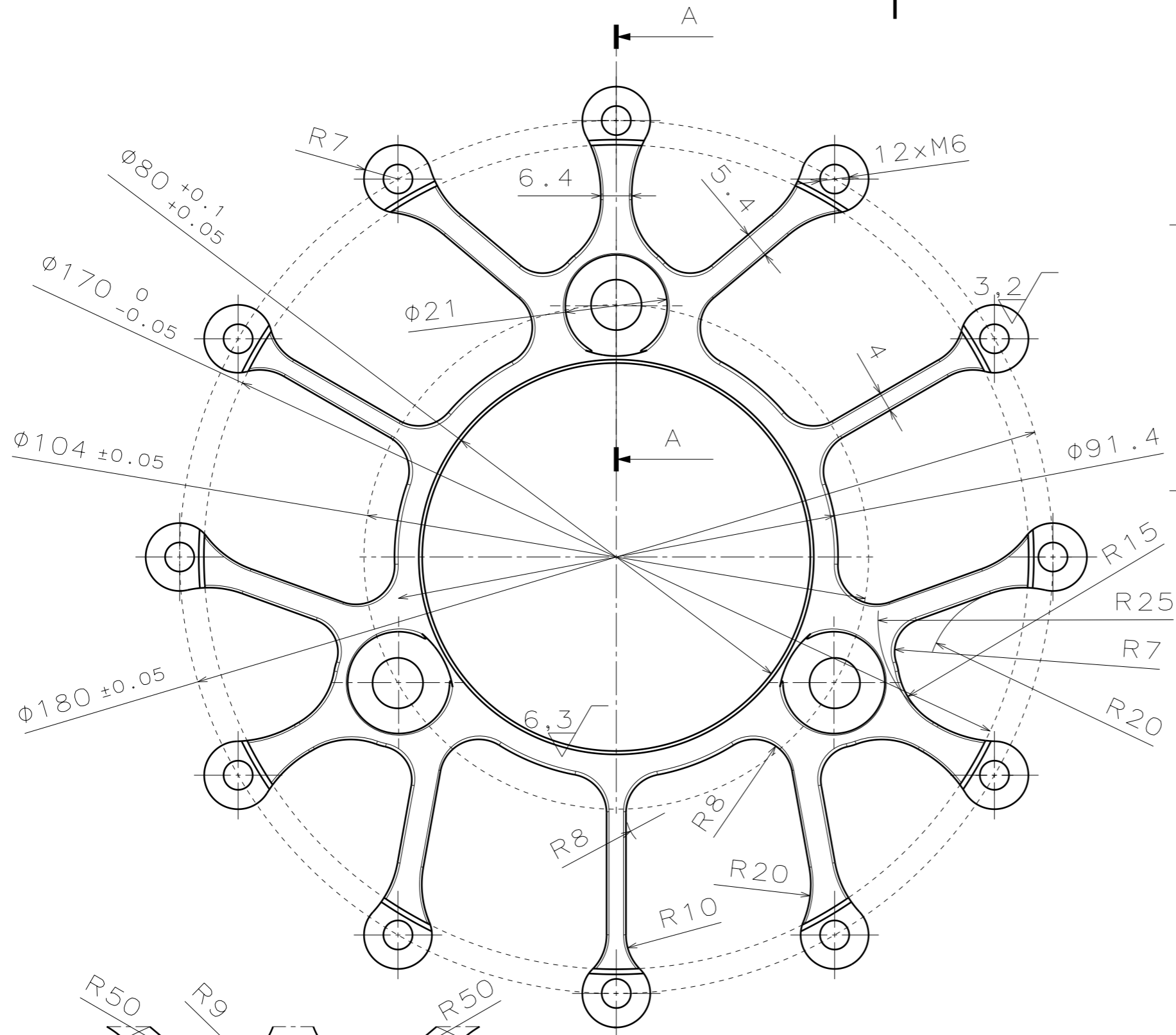
The author of this thesis sees that the next step in wheel design for Formula Student Team Tallinn should be a one piece carbonfibre wheel. The solution that was found in this thesis - a three piece aluminium wheel is durable and cheap but a one piece carbonfibre wheel could be stiffer and lighter. Although varbonfibre wheel is much more expensive and complicated to make. So these are the topics that need to be researched in the future.

Author finds that the results of this masters thesis are very good. The technical solution that resulted is lighter and cheaper than the previous one. Furhtermore it should also cure the brake overheating problem. The found solution meets all the set goals.

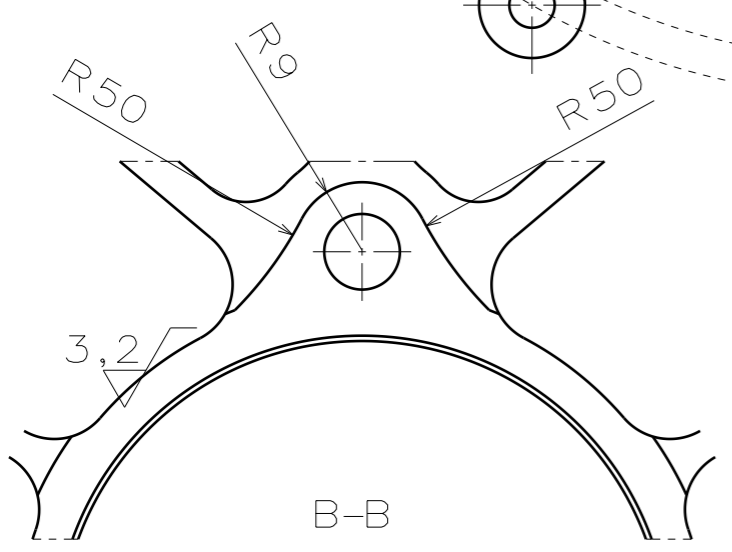
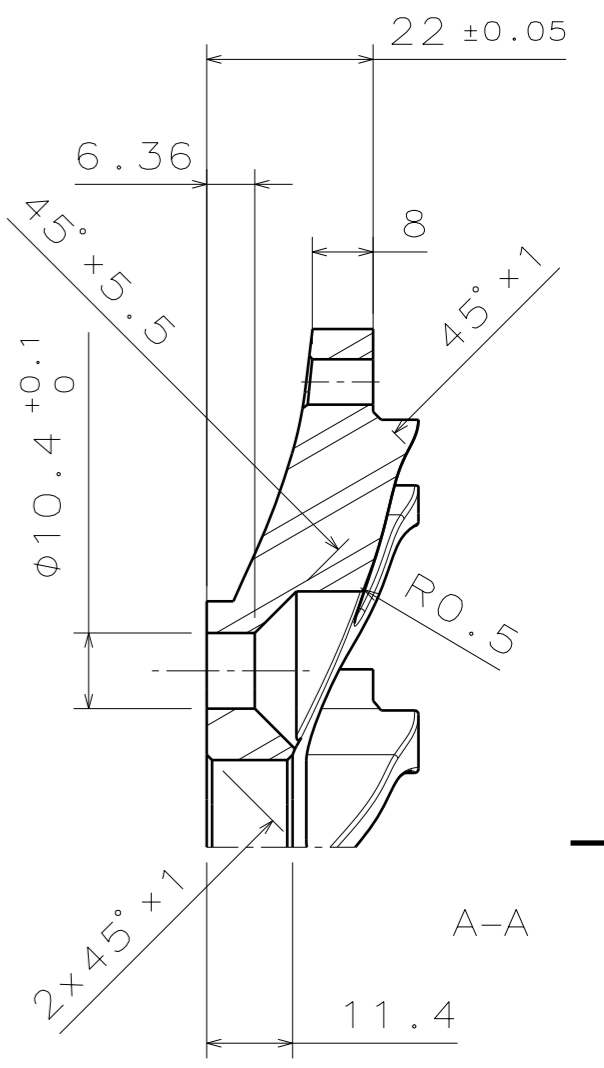
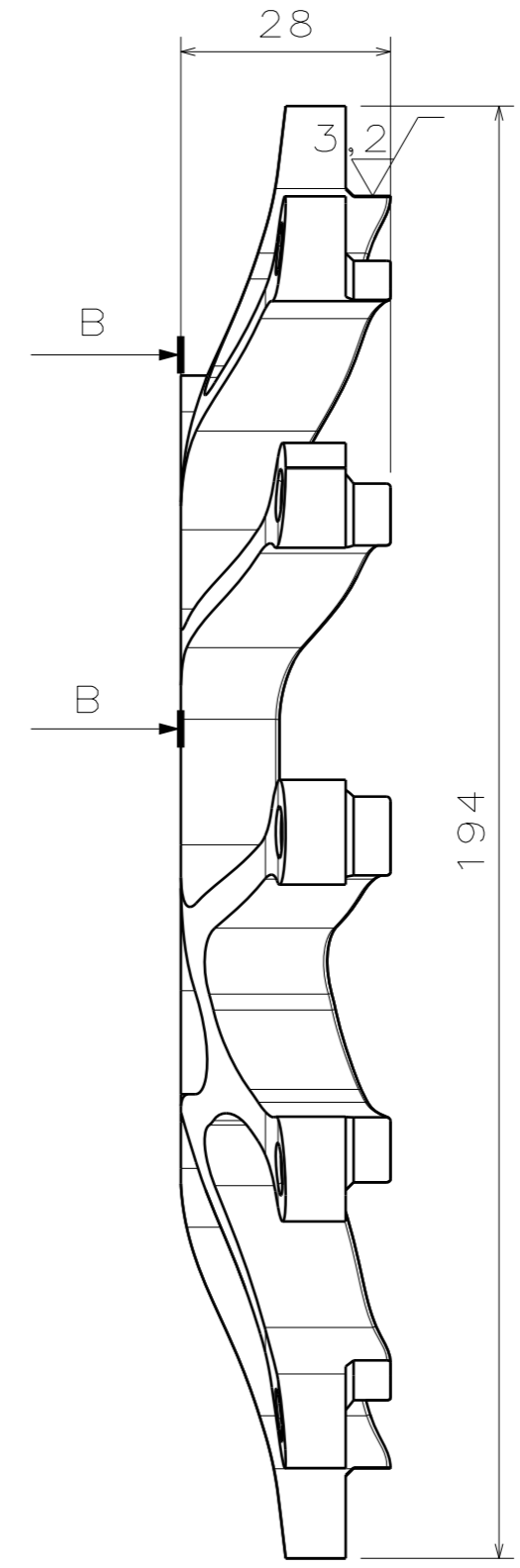
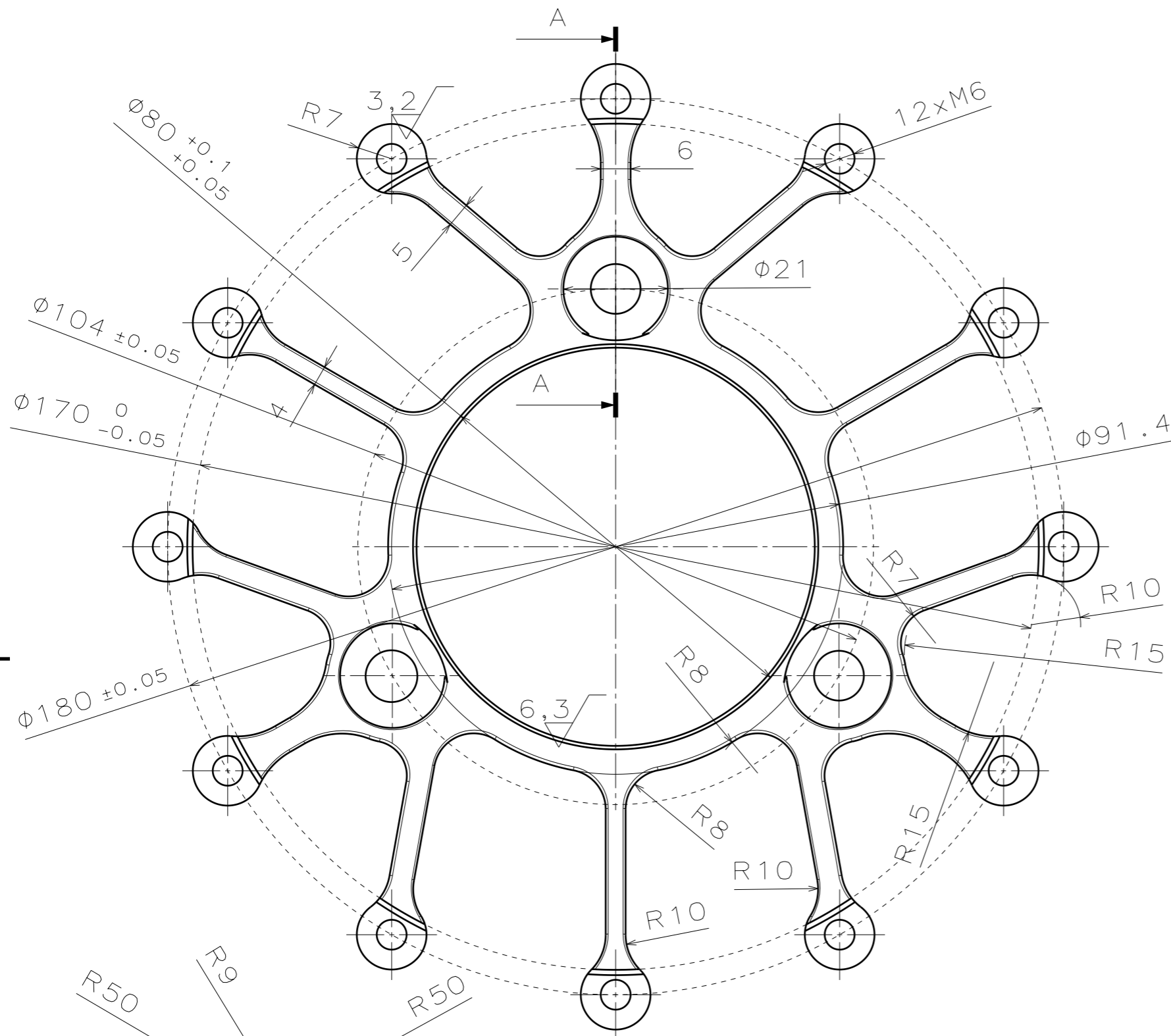
## KASUTATUD KIRJANDUS

1. Formula Studenti ning Formula Student Team Tallinna ajalugu [WWW]  
<http://formulastudent.ee> (23.05.2014)
2. Sats, A. Formula Student klassi võistlusauto FEST14 vedrustuse kinemaatika  
projekteerimine : 2013
3. Formula SAE 2014 üldreeglid [WWW]  
[http://students.sae.org/cds/formulaseries/rules/2014\\_fsae\\_rules.pdf](http://students.sae.org/cds/formulaseries/rules/2014_fsae_rules.pdf) (23.05.2014)
4. Uddeholmi materjali Alumec 89 infoleht [WWW]  
<http://uddeholm.ee/english/files/alumec-english.pdf> (23.05.2014)
5. Veljevõrude tootjapoolne info [WWW] <http://www.keizerwheels.com/flash.html>  
(23.05.2014)
6. Materjali alumiinium 6061 T6 infoleht [WWW]  
<http://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=MA6061t6>  
(23.05.2014)
7. Uddeholmi materjali Alumec 89 laoprogramm [WWW]  
[http://www.uddeholm.ee/english/files/Alumec\\_Stock\\_Standard.pdf](http://www.uddeholm.ee/english/files/Alumec_Stock_Standard.pdf) (23.05.2014)

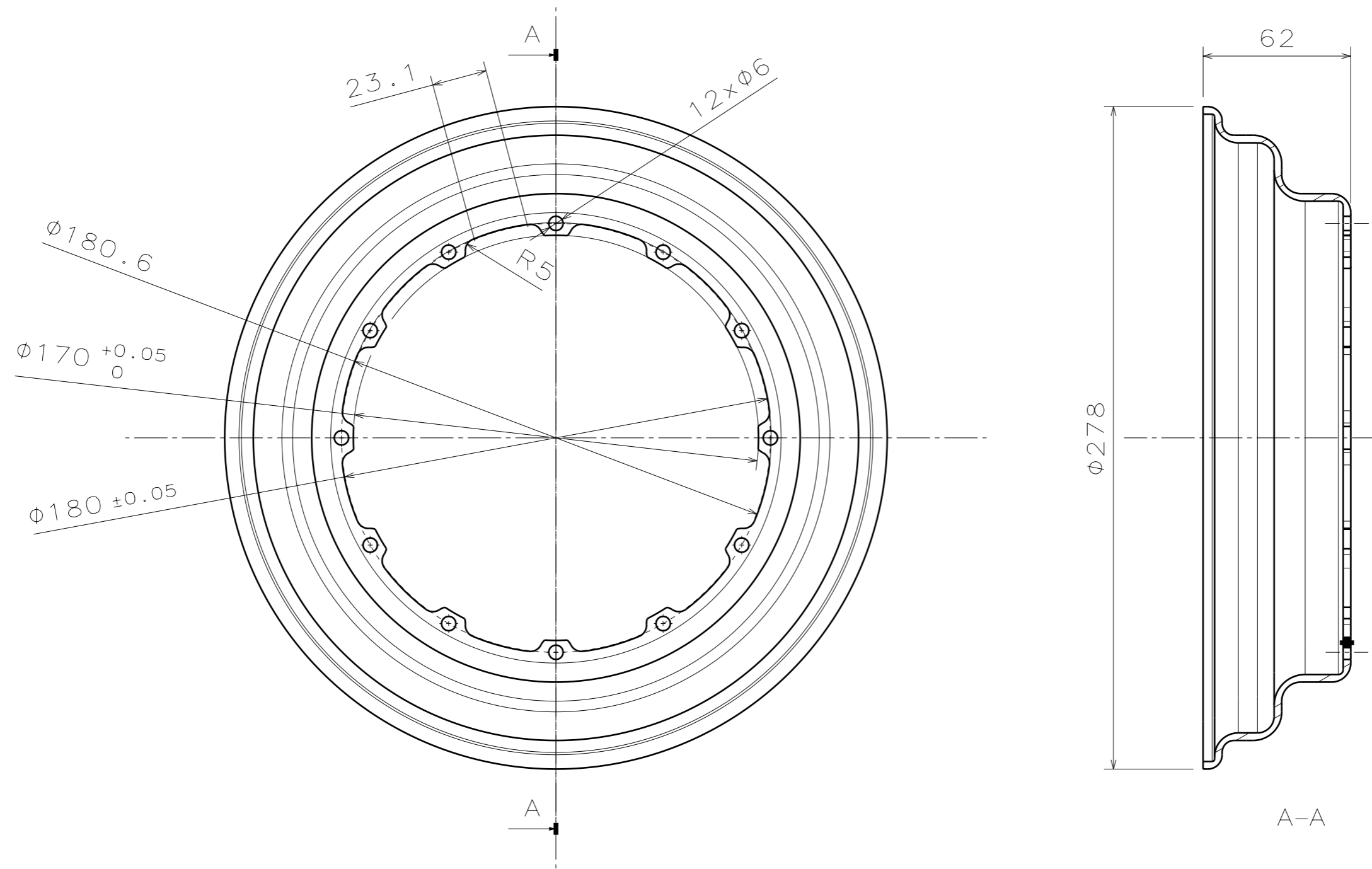
LISAD



|                              |           |                                  |                      |        |       |
|------------------------------|-----------|----------------------------------|----------------------|--------|-------|
|                              | Materjal: | Al 7075 T6                       | Varjatud piirhälbed: | Mass:  | Mõõt: |
|                              |           |                                  |                      | 0,23kg | 1:1   |
| Teostas:                     | S.Nõrme   | Nimetus:<br><br>Esivelje tsender |                      |        |       |
| Kontrollis:                  | R.Kõiv    |                                  |                      |        |       |
| Kinnitas:                    |           |                                  |                      |        |       |
| Formula Student Team Tallinn |           | Leht:                            | Tähis:               |        |       |

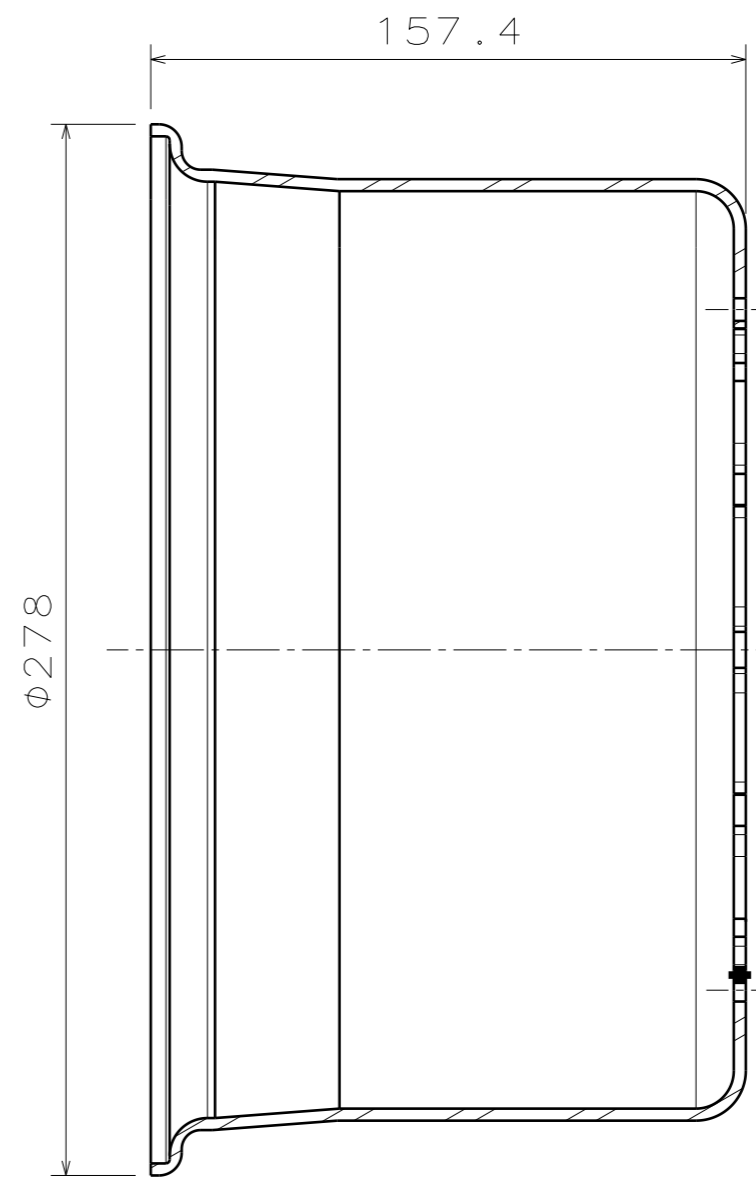
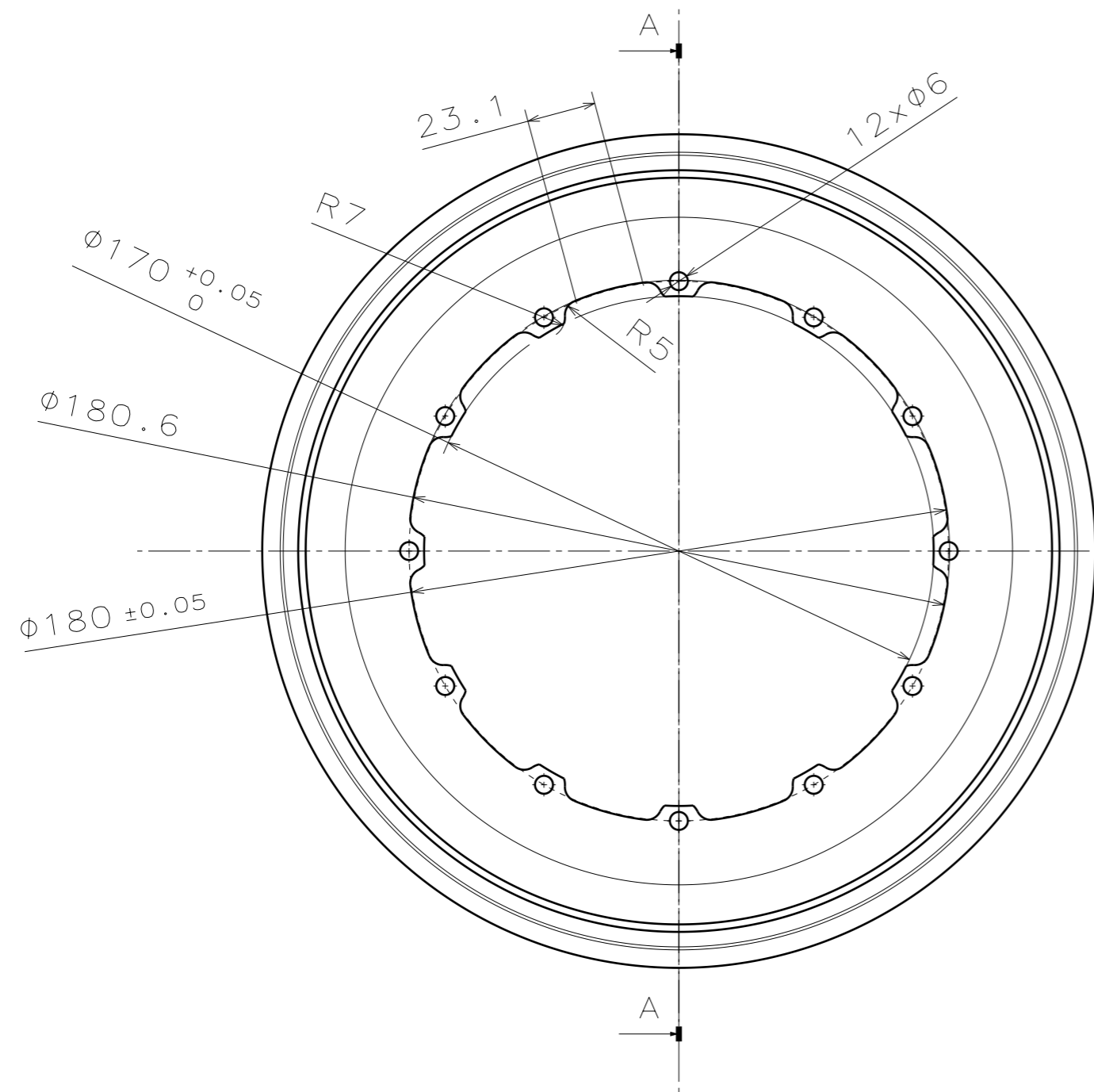


|                              |           |                                   |                      |        |       |
|------------------------------|-----------|-----------------------------------|----------------------|--------|-------|
|                              | Materjal: | AI 7075 T6                        | Varjatud piirhälbed: | Mass:  | Mõõt: |
|                              |           |                                   |                      | 0,22kg | 1:1   |
| Teostas:                     | S.Nõmme   | Nimetus:<br><br>Tagavelje tsender |                      |        |       |
| Kontrollis:                  | R.Kõiv    |                                   |                      |        |       |
| Kinnitas:                    |           |                                   |                      |        |       |
| Formula Student Team Tallinn |           | Leht:                             | Tähis:               |        |       |



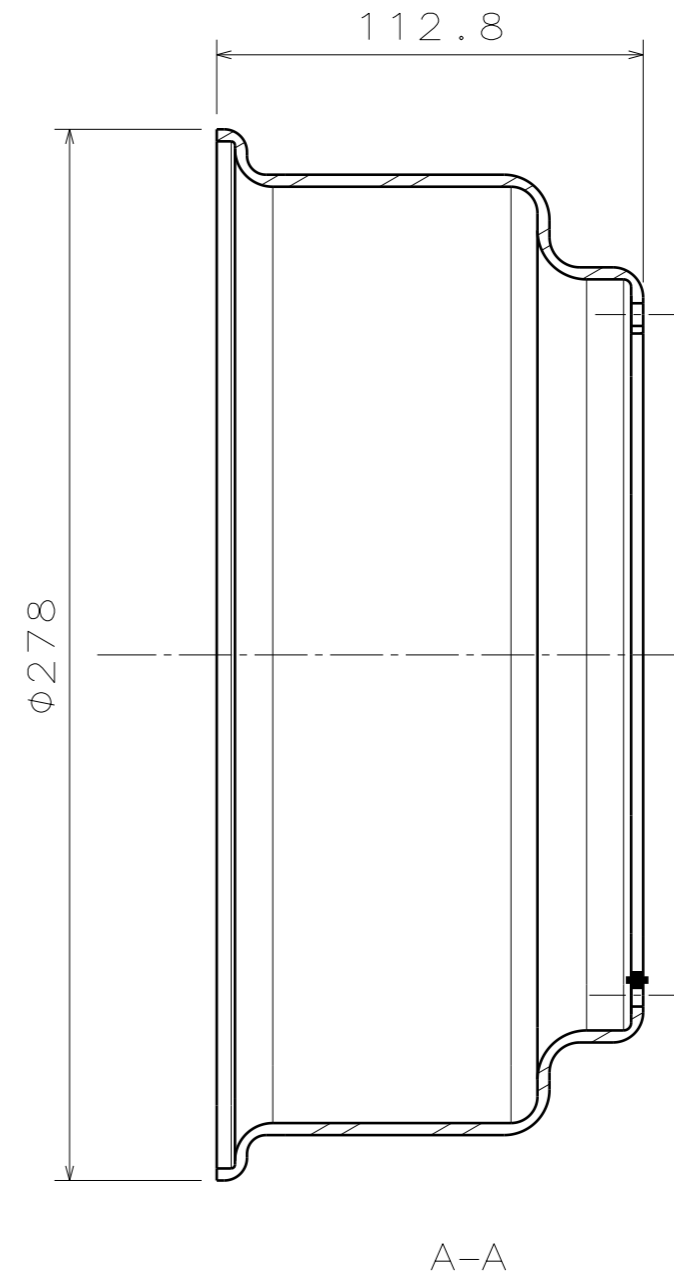
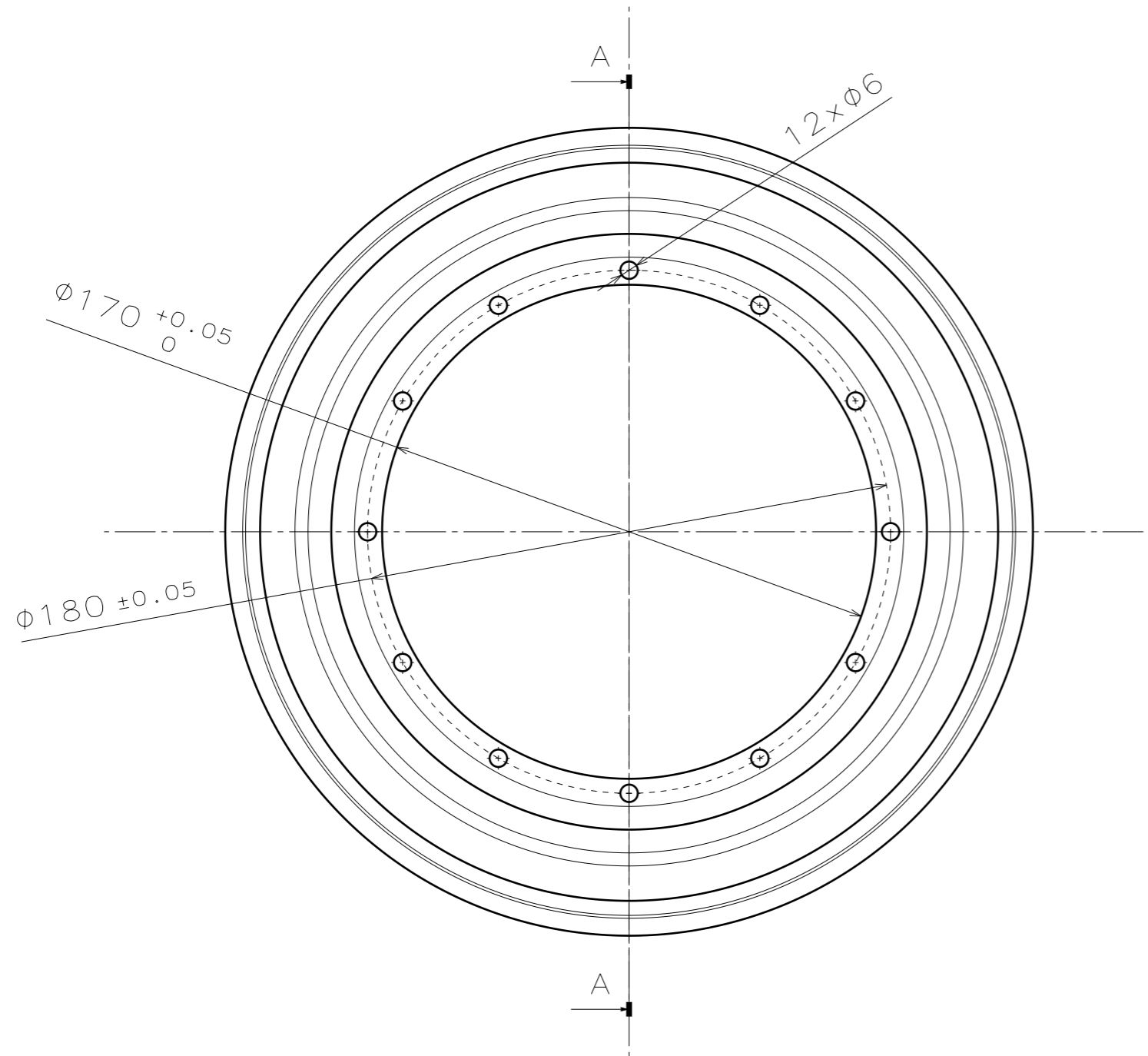
|                              |                      |   |                      |              |           |
|------------------------------|----------------------|---|----------------------|--------------|-----------|
|                              | Materjal: AI 6061 T6 |   | Varjatud piirhälbed: | Mass: 0,51kg | Mõõt: 1:2 |
|                              | Teostas: S.Nõmme     | Nimetus: Esimene välimine veljevõru 2'' |                      |              |           |
| Kontrollis: R.Kõiv           | Kinnitas:            |   |                      |              |           |
| Formula Student Team Tallinn |                      |   | Leht:                | Tähis:       |           |



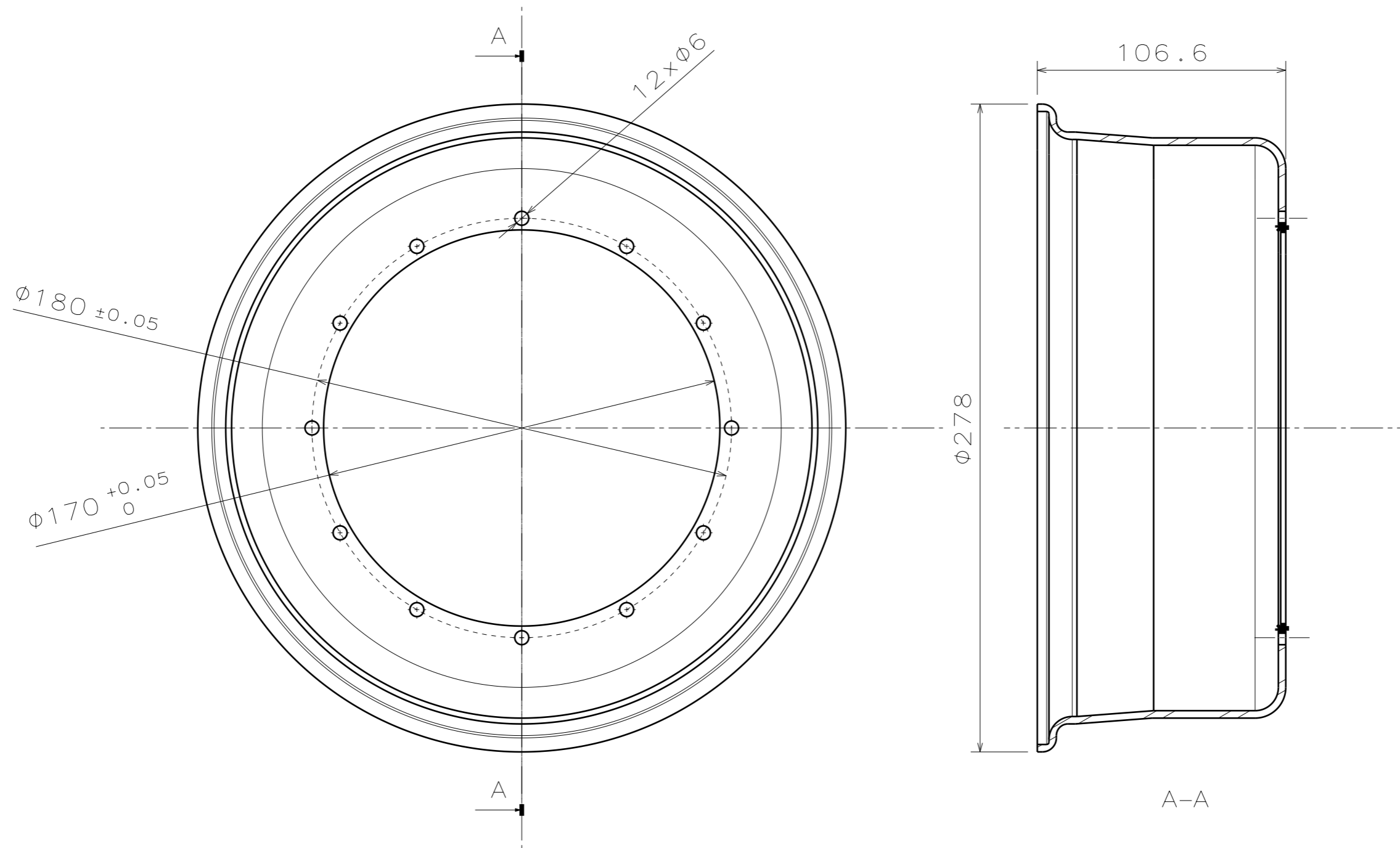


A-A

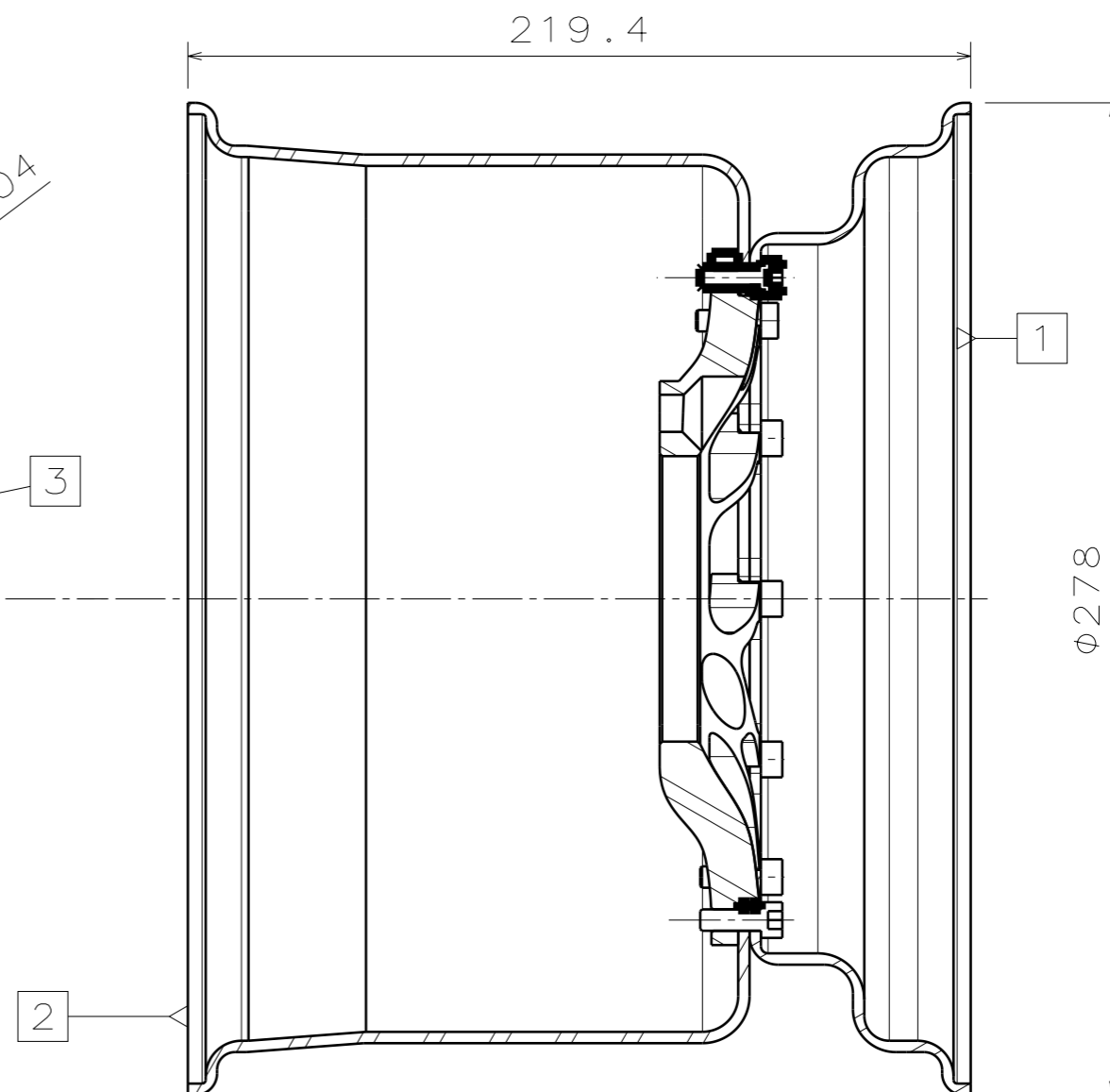
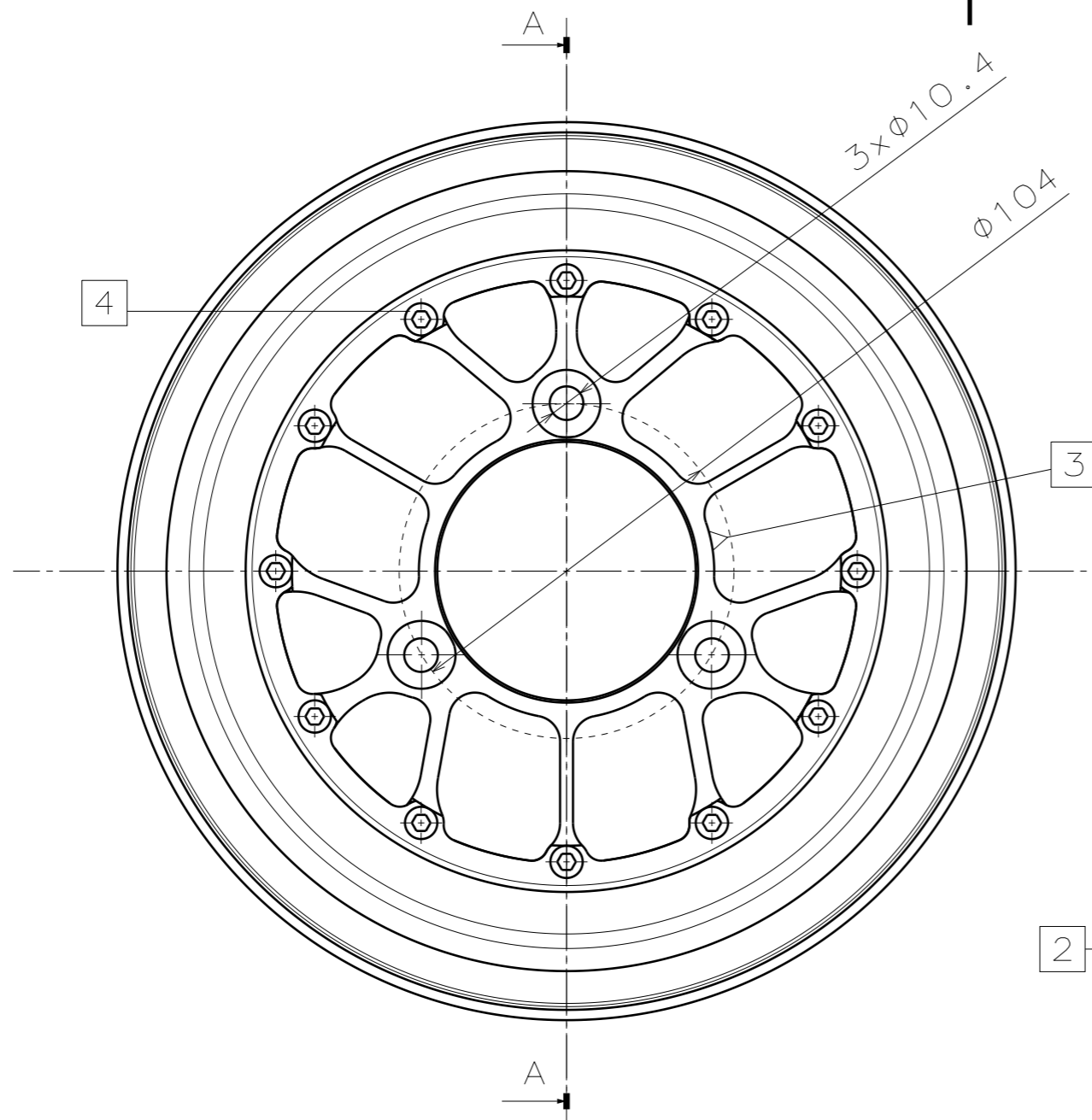
|                              |                      |   |                      |              |           |
|------------------------------|----------------------|---|----------------------|--------------|-----------|
|                              | Materjal: AI 6061 T6 |   | Varjatud piirhälbed: | Mass: 1,23kg | Mõõt: 1:2 |
|                              | Teostas: S.Nõrme     | Nimetus: Esimene sisemine veljevõru 6'' |                      |              |           |
|                              | Kontrollis: R.Kõiv   |   |                      |              |           |
| Kinnitas:                    | Leht:                | Tähis:                                  |                      |              |           |
| Formula Student Team Tallinn |                      |   |                      |              |           |



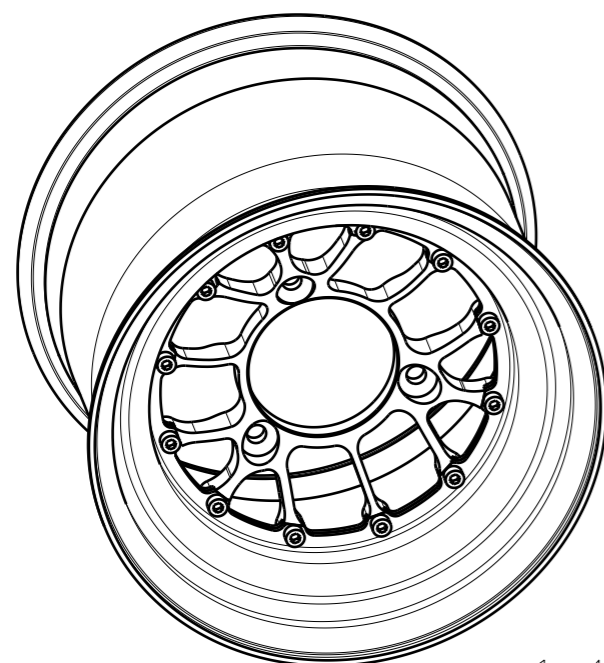
|                              |                      |  |                      |              |           |
|------------------------------|----------------------|--|----------------------|--------------|-----------|
|                              | Materjal: AI 6061 T6 |  | Varjatud piirhálbed: | Mass: 0,88kg | Mõõt: 1:2 |
|                              | Teostas: S.Nõmme     | Nimetus: Tagumine välimine veljevõru 4'' |                      |              |           |
| Kontrollis: R.Kõiv           | Kinnitas:            |  |                      |              |           |
| Formula Student Team Tallinn |                      |  | Leht:                | Tähis:       |           |



|                              |                      |  |                      |              |           |
|------------------------------|----------------------|--|----------------------|--------------|-----------|
|                              | Materjal: AI 6061 T6 |  | Varjatud piirhälbed: | Mass: 0,91kg | Mõõt: 1:2 |
|                              | Teostas: S.Nõrme     | Nimetus: Tagumine sisemine veljevõru 4'' |                      |              |           |
| Kontrollis: R.Kõiv           | Kinnitas:            |  |                      |              |           |
| Formula Student Team Tallinn |                      |  | Leht:                | Tähis:       |           |



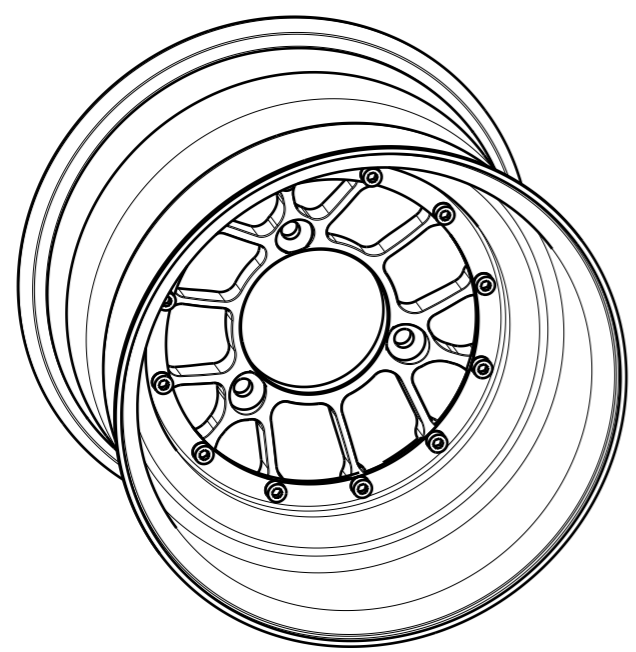
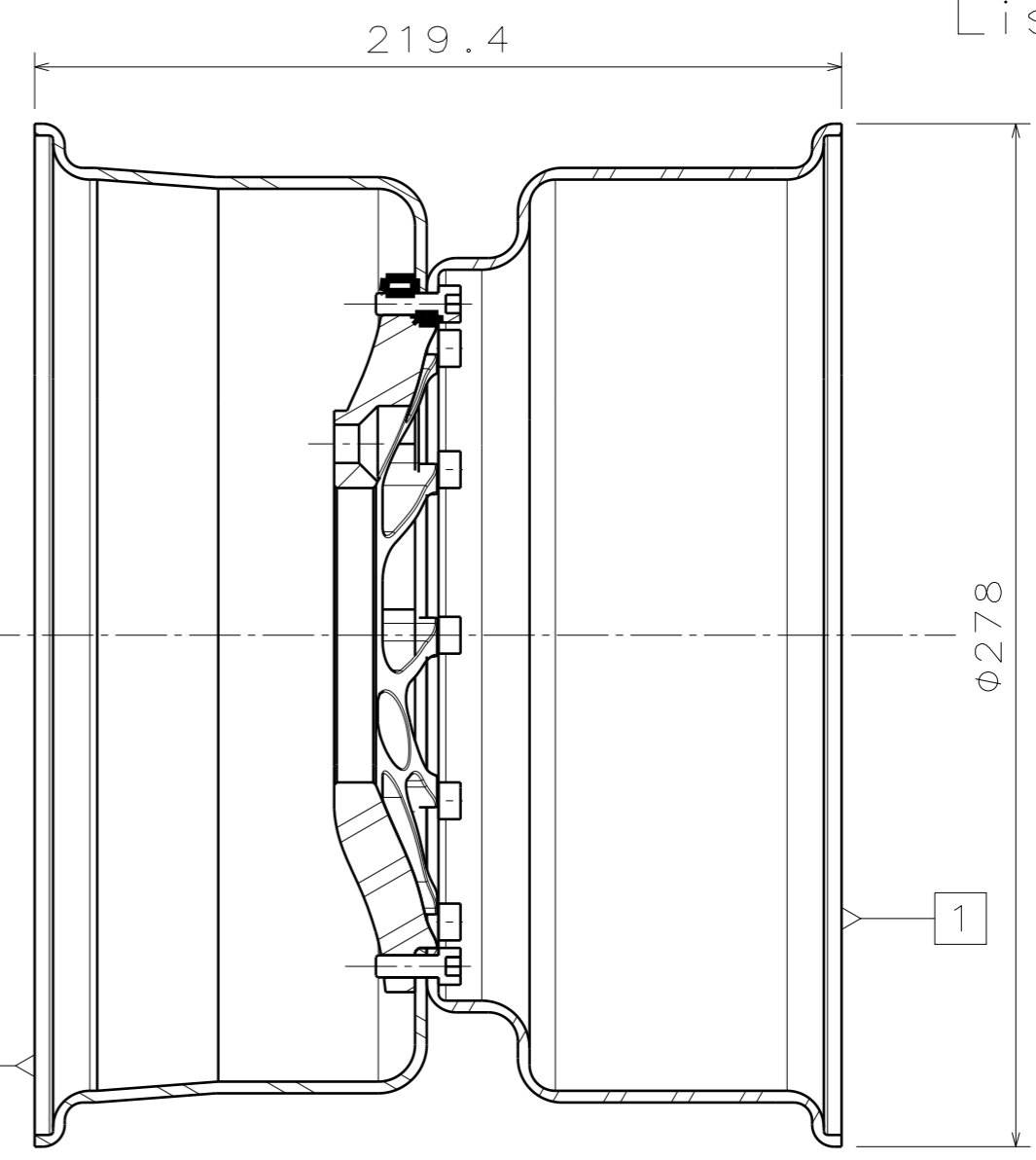
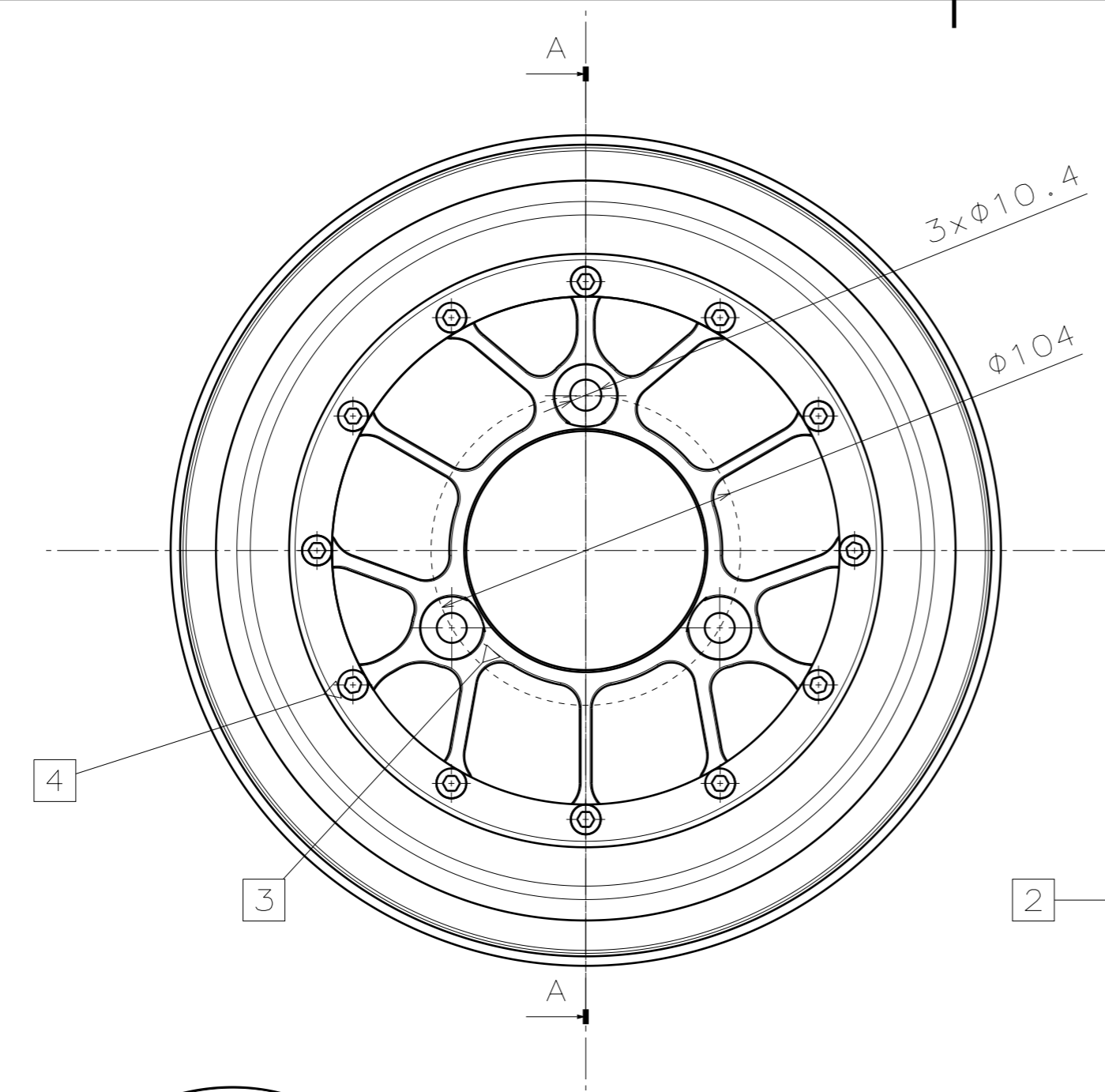
A-A



1:4

| Nr. | Nimetus                | Materjal     | Hulk |
|-----|------------------------|--------------|------|
| 1   | Välimine veljevõru 2'' | Al 6061 T6   | 1    |
| 2   | Sisemine veljevõru 6'' | Al 6061 T6   | 1    |
| 3   | Esimene veljetsenter   | Al 7075 T6   | 1    |
| 4   | Polt M6x17             | DIN 912-12.9 | 12   |

|                              |           |                                     |                      |        |       |
|------------------------------|-----------|-------------------------------------|----------------------|--------|-------|
|                              | Materjal: |                                     | Varjatud piirhälbed: | Mass:  | Mõõt: |
|                              |           |                                     |                      | 2,05kg | 1:2   |
| Teostas:                     | S.Nõrme   | Nimetus:<br><br>Esimese velje koost |                      |        |       |
| Kontrollis:                  | R.Kõiv    |                                     |                      |        |       |
| Kinnitas:                    |           |                                     |                      |        |       |
| Formula Student Team Tallinn |           | Leht:                               | Tähis:               |        |       |



1:4

| Nr. | Nimetus                | Materjal     | Hulk |
|-----|------------------------|--------------|------|
| 1   | Välimine veljevõru 4'' | Al 6061 T6   | 1    |
| 2   | Sisemine veljevõru 4'' | Al 6061 T6   | 1    |
| 3   | Tagumine veljetsenter  | Al 7075 T6   | 1    |
| 4   | Polt M6x17             | DIN 912-12.9 | 12   |

|                              |           |                                      |        |       |
|------------------------------|-----------|--------------------------------------|--------|-------|
|                              | Materjal: | Varjatud piirhälbed:                 | Mass:  | Mõõt: |
|                              |           |                                      | 2,1kg  | 1:2   |
| Teostas:                     | S.Nõrme   | Nimetus:<br><br>Tagumise velje koost |        |       |
| Kontrollis:                  | R.Kõiv    |                                      |        |       |
| Kinnitas:                    |           |                                      |        |       |
| Formula Student Team Tallinn |           | Leht:                                | Tähis: |       |