



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND
Mehaanika ja tööstustehnika instituut

TUDENGIVORMELI FEST22 NURGAKOOSTU PROJEKTEERIMINE

DESIGNING CORNER ASSEMBLY FOR STUDENT FORMULA FEST22

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Marten Teppan

Üliõpilaskood 221467MATM

Juhendaja: Martin Eerme, täisprofessor
tenuuris

(Tiitellehe pöördel)

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud.

Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

"....." 2024

Autor:

/ digiallkirjastatud /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

"....." 2024

Juhendaja:

/ digiallkirjastatud /

Kaitsmisele lubatud

".....".....2024

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina Marten Teppan

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose Tudengivormeli FEST22 nurgakoostu projekteerimine, mille juhendaja on Martin Eerme,
 - 1.1 reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil, sh Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;
 - 1.2 üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.
 2. Olen teadlik, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
 3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.
-

_____ (kuupäev digiallkirjas)

¹ Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal vastavalt üliõpilase taotlusele lõputööle juurdepääsupiirangu kehtestamiseks, mis on allkirjastatud teaduskonna dekaani poolt, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil. Kui lõputöö on loonud kaks või enam isikut oma ühise loomingu tegevusega ning lõputöö kaas- või ühisautor(id) ei ole andnud lõputööd kaitsvale üliõpilasele kindlaksmääratud tähtajaks nõusolekut lõputöö reprodutseerimiseks ja avalikustamiseks vastavalt lihtlitsentsi punktidele 1.1. ja 1.2, siis lihtlitsents nimetatud tähtaja jooksul ei kehti.

TalTech Instituudi nimetus
LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Marten Teppan 221467MATM
Õppekava, peeriala: MATM, Tootearendus ja Tootmistehnika (kood ja nimetus)
Juhendaja(d): Täisprofessor tenuuris, Martin Eerme, 511 1486 (amet, nimi, telefon)
Konsultant:(nimi, amet)
..... (ettevõtte, telefon, e-post)

Lõputöö teema:

Tudengivormeli FEST22 nurgakoostu projekteerimine
Designing corner assembly for Student Formula FEST22

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Nurgakoostu kontseptsiooni loomine
2. Nurgakoostu projekteerimine vastavalt nõuetele
3. Tootmiseks vajalike jooniste valmistamine

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Analüüs eelnevale aastale	01.09.21
2.	Kontseptsiooni loomine	05.09.21
3.	Mõjuvate jõudude andmetöötlus	01.10.21
4.	Detailide projekteerimine	01.10.21
5.	Tootmiseks vajalike failide edastamine	01.01.22
6.	Koostatud nurgakoostud	01.04.22
7.	Diplomitöö esitamine	20.05.24

Töö keel: eesti keel **Lõputöö esitamise tähtaeg:** 20. mai 2024 a

Üliõpilane: Marten Teppan 15. september 2023 a
/allkiri/

Juhendaja: Martin Eerme 15. september 2023 a
/allkiri/

Konsultant: ".....".....20.....a
/allkiri/

Programmijuht: ".....".....20.....a
/allkiri/

SISUKORD

Mina Marten Teppan	3
EESSÕNA	7
SISSEJUHATUS	8
1 TUDENGIVORMELI KONTSEPTSIOON	9
1.1 Tudengivormeli FEST22 kontseptsioon	9
1.2 FEST22 nurgakoostu kontseptsioon	10
2 FEST 22 AJAM	12
2.1 Mootori jahutus	13
3 MÕJUVAD JÕUD	14
4 LAAGRITE JA TIHENDITE VALIK	17
4.1 Laagrite välised mõõtmed	17
4.2 Laagrite positsioneerimine	19
4.3 Laagrite asukoht rehvi kontaktpunktist	19
4.4 Laagritele mõjuvate jõudude arvutus	20
4.5 Kaelustihend	22
5 NURGAKOOSTU DETAILIDE PROJEKTEERIMINE	24
5.1 Käänmiku nõuded	24
5.1.1 Mootor käänmikus	26
5.1.2 Jahtusvedeliku sulgemine käänmikus	27
5.2 Rattarummu projekteerimine	29
5.2.1 Laagri toetusvõrud	31
5.2.2 Piduriketta kinnitus	35
5.2.3 Tikkpoltide arvutus	40
5.3 Koostu analüüsimine	42
6 TESTIMISE TULEMUSED	48
7 NURGAKOOSTU OMAHIND	51
7.1 Projekteerimine	51
7.1.1 Eeltegevused	51
7.2 Valmistamine	52
7.2.1 Materjalide kulu	53
7.3 Nurgakoostu omahind	53

KOKKUVÕTE	55
SUMMARY	58
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU	60
LISAD	61
Lisa 1 AMK mootori jahutatav osa	61
Lisa 2 Joonised	62

EESSÕNA

Antud lõputöö teostati MTÜ Tudengivormeli organisatsioonis projekteerides nurgakoostu vormelautole FEST22. Antud koostu projekteerimisel on tehtud pidevat koostööd kinemaatika ja dünaamika eest vastutava meeskonna liikmega. Selleks, et välja töötada parim võimalik ja toodetav lahendus, on tehtud pidevat koostööd nurgakoostu detailide valmistajaga.

Lõputöö autor soovib tänada juhendajat Martin Eermet ja Tudengivormeli meeskonna liikmeid, kes aitasid konstruktiivse tagasiside ning aruteluga kaasa lõputöö valmimisele.

Soovitakse veel välja tuua TalTechi ja Tallinna Tehnikakõrgkooli poolset võimaldatud võimalust kasutada mehaanika arendamiseks vajalikke katsestende ja ka löiketöötaluslaborit, mis võimaldasid valideerida, toota ja koostada detaile.

Nurgakoost, projekteerimine, tugevusanalüüs, magistritöö

SISSEJUHATUS

Lõputöö teemaks on MTÜ Tudengivormeli ehk *Formula Student* Team Tallinna viieteistkümnenda vormelauto FEST22 nurgakoostu projekteerimine. Antud teema valiti, kuna tegemist on töö autori jaoks väljakutsuva ülesandega ning iga uue autoga suurenev kurvisuutlikus vajab ka nurgakoostus pidevaid muutuseid. Oluline on säilitada varutegurid, vähendada läbipainet ja võimalusel vähendada koostu massi.

Formula Student sari on loodud rahvusvaheliseks tootearendus võistluseks. Võistluste peamine eesmärk on anda tulevastele inseneridele reaalset kogemust toote arendamise, tootmise, testimise ja detailide disainimise protsessi esitlemisega. Võistlused koosnevad nii dünaamilistest kui ka staatilistest aladest. Dünaamilised alad on sõidualad, kus igal sõidualal peale kestvussõidu on neli katset meeskonna kohta. Kiirendus, mis on 75 meetrit pikk distants. *Skidpad*, millel on ringi diameeter 18.25m ja raja laius 3 meetrit, kus sõidetav rada on number kaheksa kujuline. Kvalifikatsioon, mis määrab ära startipositsiooni kestvussõiduks, kus distantsi pikkus on keskmiselt 800 meetrit. Kestvussõit, millel on distants 22 km ja läbitakse kahe piloodiga, kus poolel distantsil toimub juhtide vahetus.

Võistlustel staatilistest aladest üks on disaini kaitsmine, kus peab loodud vormeli erinevate koostude või detailide disaini kaitsma vestluse teel kohtunikuga. Järgnevad kuluaruanne ja äriplaan, kus aruandes peab välja tooma detailide maksumused ja kaitsma selle arvestuse loogikat kohtunikele [1] [2].

Lõputöö käigus projekteeritakse valmis tudengivormeli FEST22 nurgakoost nii esi kui ka tagumisele veosillale vastavalt *Formula Student Germany* 2022 aasta tehniliste tingimustele. Lõputöö eesmärk on projekteerida meeskonna viieteistkümnendale vormelautole nurgakoost, milles on kaheastmeline planetaarülekanne, maksimaalse võimsusega 35kw AMK elektrimootor, alumiiniumist välja freesitud rattarumm kui ka sisemise jahutusega käänmik. Nurgakoostu projekteerimisel käsitletavat teemad on FEM tugevusanalüüsid, erinevate mehaanika arvutuste läbi viimine, andmete kogumine, komponentide hermetiseerimine, laagrite arvutus ja nende valik, komponentide paigutus ja lõpetuseks tootmisjooniste tegemine.

1 TUDENGIVORMELI KONTSEPTSIOON

Tudengivormeli sarjas on võimalik võistelda nii sisepõlemismootoriga vormeliga kui ka elektrivormeliga. Võimalikud veoskeemid elektrivormelitel on nii nelik kui ka tagaveoline. Sisepõlemismootoriga vormelite puhul on peamine valik tagaveoline. Sisepõlemismootoriga vormelitel on võimalik kasutada ka hübriidajamit, mis tähendab mootori väntvõllile lisatud elektrimootorit, millega on võimalik ka energiat regenereerida pidurdamisel. Hübriidajamit on võimalik kasutada põhimootori väliselt, kus tagaveolise vormeli puhul kasutatakse elektrimootoreid esisillal.

Tudengivormeli jõuülekanne on üks osa lõplikust sõidukist, järgmiseks osaks on sõiduki kere. Kere peab vastu pidama reeglitega ette määratud jõududele, mis tagab avarii korral piloodi turvalisuse ning peab tagama vedrustuskomponentide kinnitusjäikuse. Peamiselt on autokered valmistatud terastorudest, teine levinum valik on monokokk, mille valmistamiseks kasutatakse süsinikkiudu ja vahematerjali. Levinumad vahematerjalid on vaht, alumiinium kui ka Nomex kärjed. Monokokk kerede puhul kasutatakse süsinikkiu asemel ka alumiiniumi vahtude sidumiseks.

1.1 Tudengivormeli FEST22 kontseptsioon

Projekti käigus lahendatakse eelmise Tudengivormeli FEST21 esinenud puudused ning teostatakse detailide edasiarendust. FEST22 puhul teadis meeskond mida sellel autol on vaja, kuna eelneva vormeliga FEST21 oli tavapärasemast pikem test- ja võistlusperiood. Vormel ehitatakse nelikveolisena, nelja elektrimootoriga ja kere materjaliks jääb süsinikkiust monokokk. Eesmärgid püstitati FEST22 aktiivmeeskonna poolt.

Peamised aspektid mille poolest FEST22 erineb eelmisest versioonist on suurema väändejäikusega kere, väiksem üldine mass, parem töökindlus ja stabiilsem aerodünaamiline balanss. Täiendavalt parendatakse aerodünaamika paketti, mis kokkuvõttes võib tekitada vähem surujõudu, kuid on stabiilsema aerodünaamilise balansi muutusega. Suuremast väändejäikusest tulenevalt peab silmas pidama ka vedrustuskomponentide jäikust, et need ei oleks vähem jäigad kui kere üldine jäikus ja kere lokaalne jäikus. Üldise massi vähendamine ei pruugi olla alati kergelt saavutatav kui eesmärgiks on ka jäikust suurendada, kuid massi vähendamiseks peab olema eesmärk varakult seatud, et kõik projekteeritavad detailid oleks selle massiga kooskõlas.

1.2 FEST22 nurgakoostu kontseptsioon

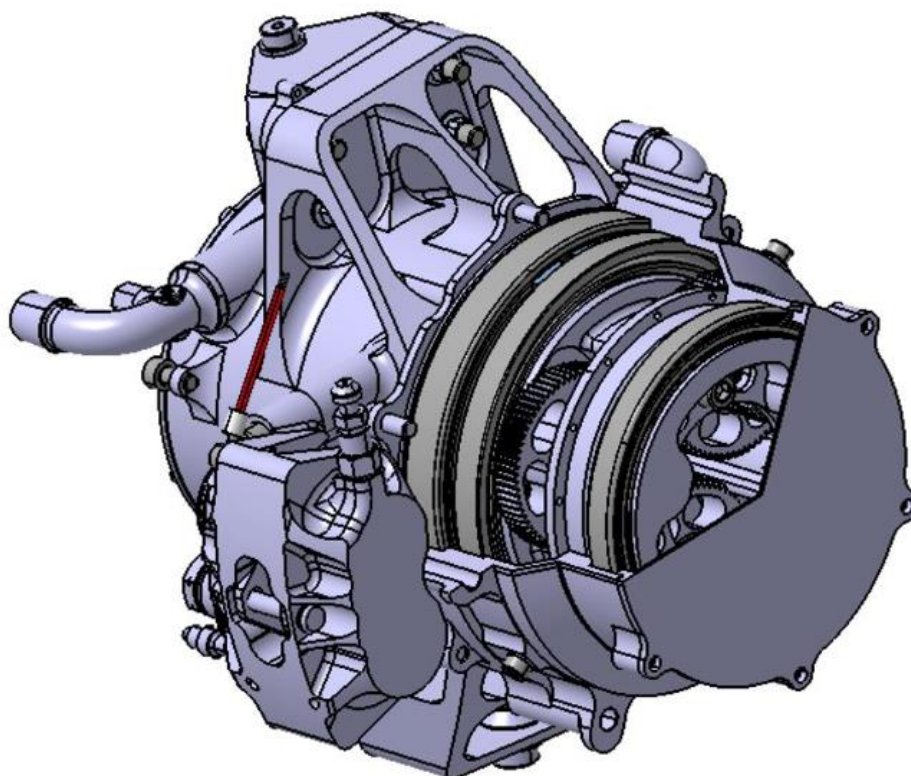
Nurgakoost on ratta pöörlemiseks ja fikseerimiseks vajalikest detailidest koosnev alamkoost, kuhu kuuluvad käänmik, rattarumm, laagri tugivõrud, laagrid, pidurisupport ja piduriketask. Kuna FEST22 on elektrimootoriga, kus mootor asetseb rattas, siis on vajalikud ka järgnevad detailid - elektrimootor, planetaarülekanne ja tihendid nii jahutusvedeliku kui ka õli hermetiseerimiseks.

Nurgakoostu kontseptsiooniga määratletakse üldine disain ja üldised parameetrid. Esmalt on teada, et vormeli kontseptsiooniks on kasutada nelja elektrimootorit ja need integreeritakse käänmike külge. Käänmiku külge integreerimise puhul tõuseb vedrustamata mass, kuid selle lahenduse eeliseks on vähem detaile jõuülekandes. Mootorit kinnitades kere külge tuleks jõuülekannet lahendada poolteljega. Pooltelge mahutades vormeli nurgakoostu muudaks kompleksemaks selle mahutamise õõtsuubade vahele, seda eriti juhul kui rattad esisillas välja pöörata. Keerates rattad välja ja kandes jõudu ülekandesse on vajalik spetsiaalne liigend, mis rooli pöörates kannaks momendi ülekandesse. Selline detail on kasutusel ka sõiduautodel, mis üldjuhul ei ole kõige minimalistlikum detail ja ühtlasi ei ole need ka vastupidavad. Dünaamika meeskonnalt on sisendiks, et on vaja nurgakoostu massikese saada võimalikult rehvi kontaktpinna tsentrisse. Sellise lahenduse saavutamiseks on oluline pidada silmas ühe kõige raskema nurgakoostu komponendi asetust, milleks on mootor. Mille massipunkt tuleks ideaalis saada rehvi kontaktpunktiga kattuma.

Ülekande projekteerimiseks on teada, et on vaja saavutada ülekande teguriks vähemalt 13 kuni 14 vahemikus, mis tähendab planetaarülekanne, kus mootorist tuleb 13 pöörtet siis ratas teeb ühe täispöörde. Ülekande puhul on veel oluline informatsioon, kas valida pöörlev planeedikandja või pöörlev hammasvöö, varasemalt on FEST 16-19 kasutatud pöörlevat planeedikandjat ja edaspidi pöörlevat hammasvööd. Pöörlev hammasvöö annab võimaluse projekteerida kompaktsema nurgakoostu ja väiksem on ka pöörlev mass. FEST 22 nurgakoostu projekteerides võetakse arvesse eelmistel aastatel kogutud kogemused ja nende teadmiste baasil valitakse pöörleva hammasvööga 1.5 kordselt redutseeriv liit-planeet planetaarülekanne, kus väljundiks on hammasvöö, sisendiks päike ja fikseeritud liige on planeedikandja. Hammasvöö kandjaks on rattarumm, päikse kandjaks mootor ja fikseeritud liikme kandjaks käänmik.

Järgmised kontseptsiooni mõjutavad faktorid on tingitud varasema aasta vormeli puhul detailid, millel oli puudusi. Oli teada, et jäigalt fikseeritud piduriketask põhjustas piduriklotside asümmeetrilist kulumist ja ketaste kõverdumist. Lisaks oli teada, et kaelustihendi tihenduseks jäetud ala pikkus oli ebapiisav. Valitud laagrid ei pidanud koormusele vastu ja viimaks ratast kinnitavad tikkpoldid murdusid peale 150 km läbimist. Antud detailidele pööratakse tähelepanu, kuna need probleemid võivad põhjustada ka võistlussõidu katkestamist, sest iga lekkinud määre või purunenud detail

tähendab reeglite poolest kohest diskvalifitseerimist [7]. Üldisteks parameetriteks on igal detailil vähemalt kahe kordne varutegur suurimate võimalike jõudude puhul ja läbipaine väiksem kui 0.15mm. Läbitavaks kilometraažiks määratakse 1000km. Nurgakoostu projekteerimise aluseks võetakse FEST21 nurgakoostus esinenud probleemid (Joonis 1.1).



Joonis 1.1 FEST21 nurgakoost

2 FEST 22 AJAM

FEST 22 jõuülekandes võetakse kasutusele AMK Group poolt välja töötatud FSAE racing kit, mis kujutab endast nelja kuni 35kw võimsusega elektrimootorit ja kontrolleriit [3]. Antud lahendus on ostutoode ja on spetsiaalselt välja töötatud tudengivormeli sarja jaoks, kus on täidetud nii turvalisus kui ka tehtud kogu arendus tarkvara poolest. See aitab väheste teadmiste korral sõiduki lihtsasti sõitma saada. Maksimalne lubatud võimsus on küll piiratud kuni 80kw peale, kuid sõites on võimalik mootorite võimsusi vastavalt olukorrale muuta - kas rohkem tagasillale või rohkem esisillale. Suurema eelise annab see kiirendades ja pidurdades kus vastavalt massi ümberkandumisele on ühel või teisel võimsust võimalik rohkem kasutada. Antud mootori arendatav vääne on maksimaalselt 22 Nm, arendatav pööre andmelehe järgi pea 19000 pööret, kuid meeskonna kogemuslik teadmine on, et saavutatav on ka 22000 pööret (Joonis 2.1).

Motorbeschreibung *motor description:*

Motorprinzip/motor principle:		synchron
Kühlart/cooling type:	Flüssigkeit 4l/min	liquid 4l/min
Bauform/mounting type:		IMB5
Schutzart/degree of protection:		IP 65
Isolierklasse/insulation class:		F

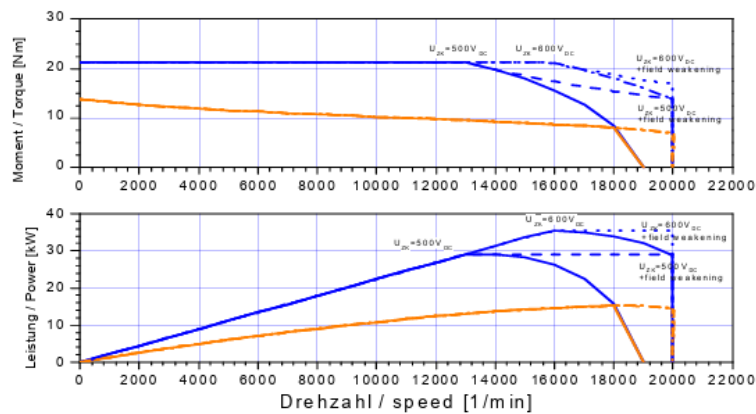
Leistungsdaten *performance data:*

Betriebsart/duty type:	S1 dT=100K
Dauerstillstandsmoment/continuous Stall Torque "Mo":	13,8 Nm
Maximales Moment/maximum torque "Mmax":	21 Nm
Bemessungsmoment/rated torque "Mn" (ID32771):	9,8 Nm
Bemessungsleistung/rated power "Pn":	12,3 kW
Bemessungsdrehzahl/rated speed "Nn" (ID32772):	12000 rpm
Theo. Leerlaufdrehzahl/theor. no-load-speed "No":	18617 rpm

Joonis 2.1 AMK mootori andmed

Teine oluline mootorit iseloomustav osa on jõukõver. Ideaalne jõukõver oleks absoluutselt lineaarne, kuna see tagab hea sõidetava omaduse vormelile (Joonis 2.2).

Motorcharacteristics performance - characteristics:



Joonis 2.2 AMK mootori jõukõver

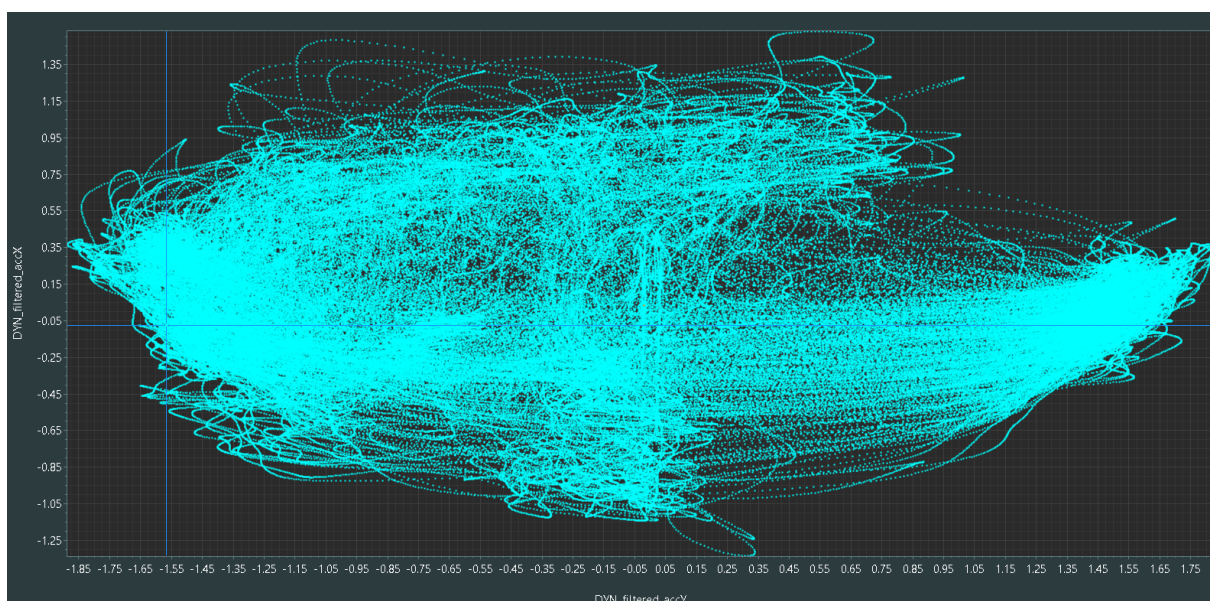
2.1 Mootori jahutus

Iga ajam genereerib lisaks võimsusele ka sooja, antud ajamile on tootja poolt ette määratud nõutav jahutatav ala (Lisa 1). Reeglitest tulenevalt on lubatud jahutada vormeli mootoreid kui ka kontrollerit elektrit mittejuhtiva vedelikuga, milleks saab olla destilleeritud vesi või õli [7]. Jahutatava ala pikkus on 84.2 mm, antud mõõde on leitav lisas mootori joonisest (Lisa 1) [4]. Mootori jahutamiseks vajaminev veevoolu hulk on leitud kogemuslikult eelmiste hooegade põhjal, kus on leitud milline on mootorist eralduv soojushulk. Antud soojushulk on jahutatav 3.5 l/min veevoolu hulgaga. Mootori jahutamiseks vajalik vett suunav geomeetria on välja töötatud meeskonnas koos jahutuse eest vastutava inseneriga, et disain oleks kooskõlas nurgakoostu võimalike geomeetriliste piirangutega, mis tekivad töö käigus.

3 MÕJUVAD JÕUD

Iga detaili puhul on mõjuvad jõud võetud meeskonna poolt välja arendatud vedrustusjõudude arvutusmoodulist programmis MS Excelist, mille aluseks on G-G diagramm. Jõudude tabelis on välja toodud pidamise ellipsi järgi, kus ellipsi kuju vastab rehvi suutlikkuse ja pidamisele. Sisestatud raskuskiirenduse piirmäärad on tuletatud rehvi suutlikkusest, auto massist ja aerodünaamika koosmõju parimatest juhtudest. Ühtlasi on antud piirmäärad saavutatud ideaalsetes tingimustes FS East võistlusel Ungaris. Raskuskiirenduse piirmäärad valitakse meeskonna üldkontseptsiooni järgi, kus määratakse ära 3G külgiirendust ja 2.4G pikikiirendust. Iga detaili projekteerimise puhul tuleb arvesse võtta 0.15mm maksimaalne läbipaine ja vähemalt kahekordne varutegur. Sellised väärtused tagavad vastupidavuse löökkoormustele, mis on oluline, kuna FSG võistlus Saksamaal toimub parkimisplatsil, kus on ka olukordi mil vormel kiirusel 70km/h kaotab kontakti rehvide ja asfaldi vahel.

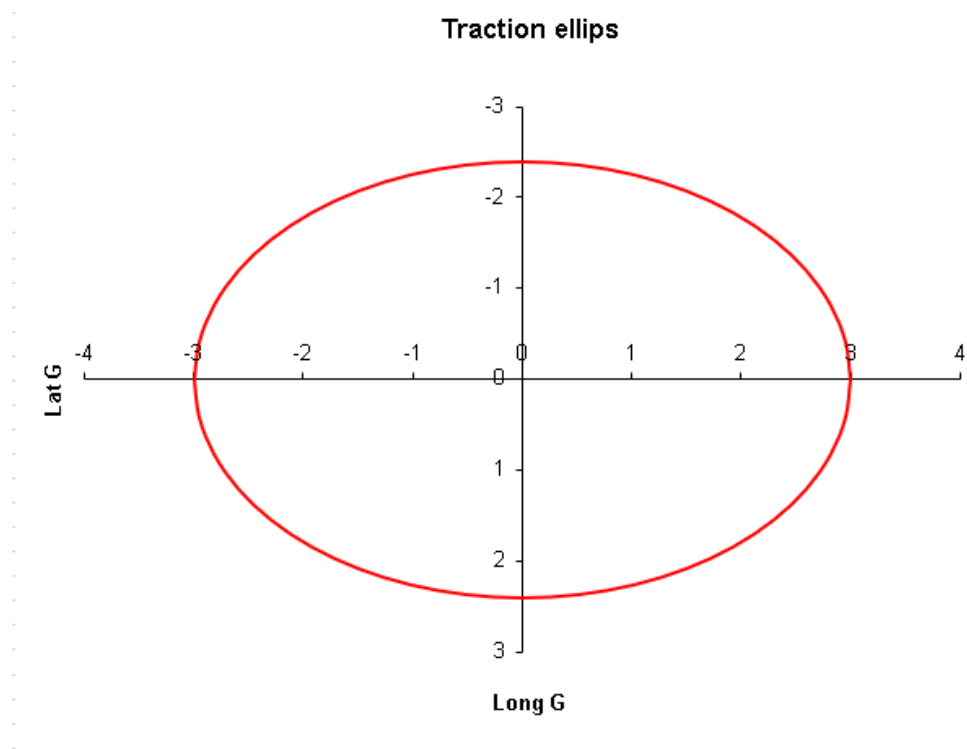
FEST21 FS East võistluste kestvussõidu andmestikust võetakse külgiirenduse (*DYN_filtreeritud_kiiY*) ja pikikiirenduse (*DYN_filtreeritud_kiiX*) andmed, millega luuakse XY telgede graafik, kus on näha rehvipidamise ellipsi kuju ja maksimaalseid saavutatud raskuskiirendusi. Graafikul oleva punktiiri tihedam osa näitab, milliste kiirenduste juures sõiduk kõige enam viibib. Andmed on filtreeritud, kuna vastasel juhul oleks kuju ebamäärasem. Ilma filtreerimata maksimaalseteks väärtusteks saadakse 2.8G külgiirendust ja pikikiirendust 1.4G. Filtreerimine annab parema ülevaate, kus filtreeritakse andurist tulevat müra ja ka löökkoormusi, see annab meeskonnale puhtama andmestiku millega tööd teha (Joonis 3.1)



Joonis 3.1 G-G diagramm

Tabel 3.1 Sõidukiga arendatavad jõud ja algandmed

Nimetus	Väärtus	Tähis
Pikki kiirendus (G)	2.5	Glat
Külgkiirendus (G)	3	Glong
Mass (kg)	248	m
Kaalujaotus (%)	50	pe
Teljevahe (m)	1.53	l
Rööbe (m)	1.23	te
Massikeskme kõrgus (m)	0.246	hrk



Joonis 3.2 Pidamise ellips, sisendiks vedrustusjõudude arvutusele

Võimalikke koormus olukordi on välja toodud 41 tk. Vaadates kõige koormavat olukorda, leitakse selleks olevat 38. olukord. X- suunaline jõud on sõiduki vasaku külje suunas, Y sõidusuunas ja Z otse üles (Tabel 3.2)

Tabel 3.2 Rehvile mõjuvad koormused kontaktpunktis

X- suunaline jõud	Y- suunaline jõud	Z- suunaline jõud
-1698 N	3673 N	-1414 N

Ühtlasi tuleb arvesse võtta pöördemomenti, milleks on mootorist arendatav 22Nm ja pidurite poolt arendatav moment 351Nm, mis saavutatakse 2G pidurduse juures mehaaniliste piduritega. Enamasti elektrivormelite puhul on kasutusel mootoritega kiirendamine ja pidurdamine, mis tähendab seda, et regulaarsemalt on koormatud nurgakoost +22Nm ja -22Nm momendiga.

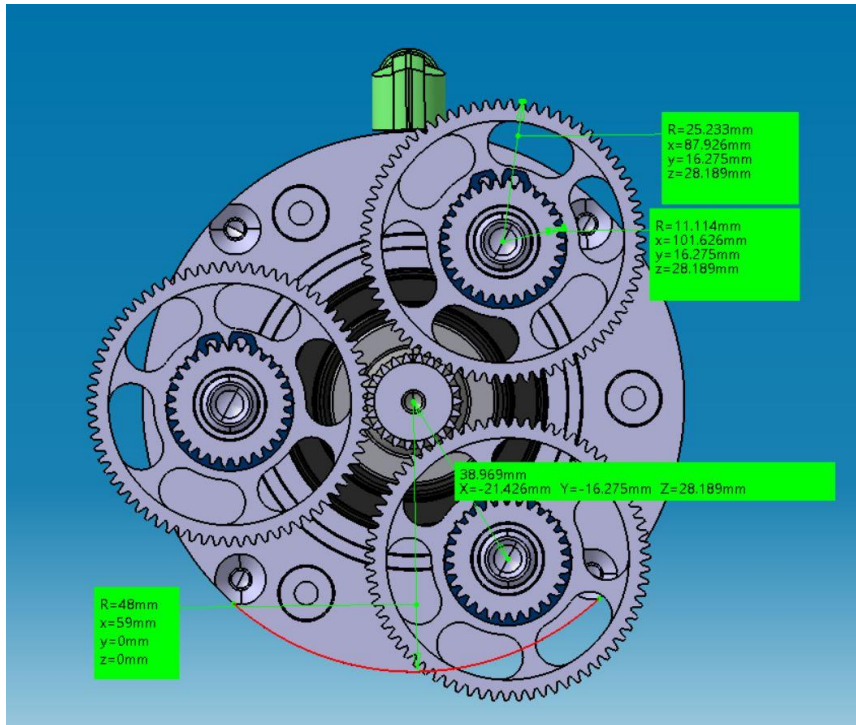
4 LAAGRITE JA TIHENDITE VALIK

Rattarummu laagrid võimaldavad rattarummul pöörelda ümber oma telje ja kannavad kogu rattale mõjuvat koormust käänmikusse edasi. Laagrid paigaldatakse käänmiku ja rattarummu vahele. Nurgakoostus rattalaagrite valiku puhul on oluline teada nurgakoostule mõjuvaid jõude ja laagrite asukohta jõu rakenduspunktist. Oluline on silmas pidada ülejäänud komponentide mõõtmeid, et valitud laager ei saaks liiga väike ega ka suur. Laagri väline diameeter määrab ära rattarummu välisdiameetri, mille ümber peavad mahtuma ka muud detailid nagu piduriketas ja pidurisupport. Valitud laagrid peavad vastu pidama esinevatele koormustele ja minimaalne varutegur, mis tuleks laagritele saavutada on 1.5 korda. Selline varutegur on tingitud sellest, et vormelile tehakse korraline hooldus iga läbitud 150km järel, kus paigaldatakse uued laagrid ja tihendid. Rattalaagriteks on kasutatud kogu meeskonna loodud sõidukite ajaloos kuullaagreid, kuna antud tüüpi laagrid on väikse massi ja piisava koormustaluvusega. Näiteks rullaager ei ole hea sihilise koormuse vastuvõtja ja koonusrull laager on hea nii sihilise kui ka radiaalse koormuse vastuvõtja, kuid on massilt küllaltki raske.

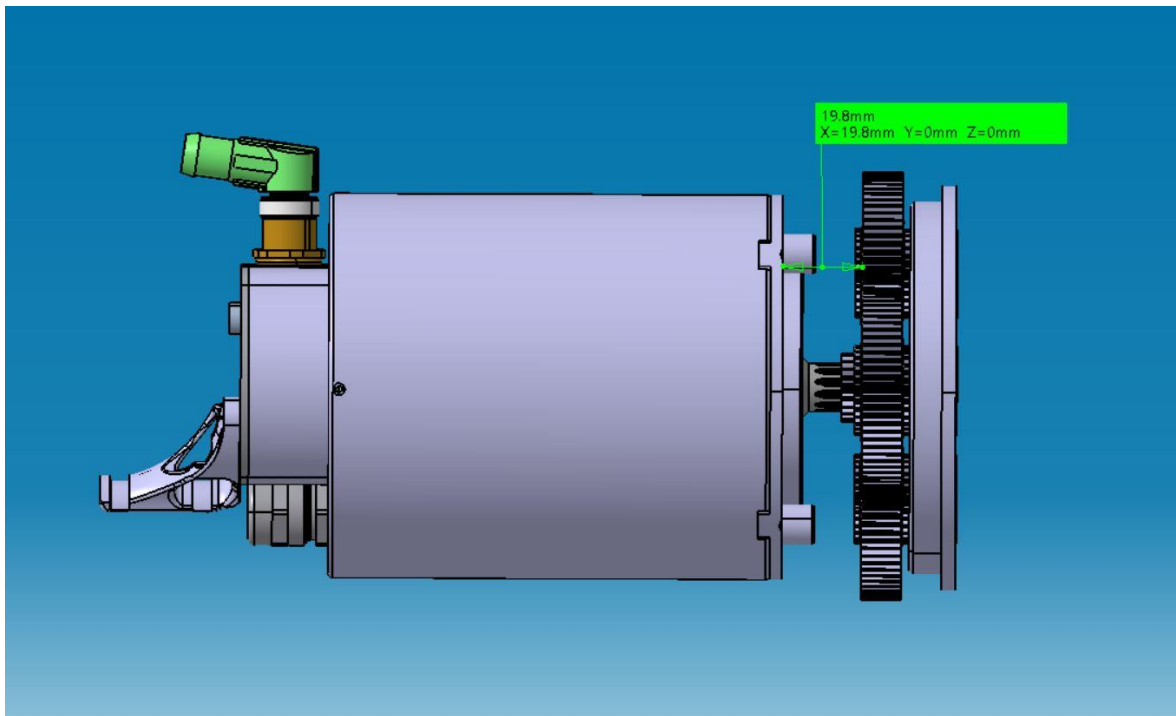
4.1 Laagrite välised mõõtmed

Kuna jõud on teada, mis sõidukile mõjuvad, siis tuleb teostada esimene diameetrite valik laagritele, mis aitab paigutada laagrid nurgakoostu, et aru saada milline jõuõlg laagritele olema saab. Kuna eesmärk on saada nurgakoost võimalikult kompaktselt, samas see peab mahutama endas ka planetaarülekanne, siis üks laager peab asetsema välimises otsas ja teine peale hammasvööd. Laagrid peaksid ümbritsema ülekanne, kuna tarvilik on vältida vähimatki läbipainde teket ülekanne hambumises.

Kuna planetaarülekanne tüübiks on pöörleva hammasvööga liitplanetaar planetaarülekanne, siis planeedid on võllidega koostatavad käänmiku külge. Võlli ja planeedi ühendamiseks on nõel- ja kuullaager laagrid. Planeedid on jaotatud 65.1 mm diameetriga jaotusringjoonele, esimese astme väline läbimõõt diameetriga 50,467 mm, teine aste diameetriga 22,2 mm. Käänmiku poolsem ehk sisemine laager peab olema sisemise ava diameetriga vähemalt 100 mm, kuna hammasvöö ja planeedid on koostatavad rattarummu sisse. Välimine saab olla suurem kui planeedivõlli jaotusringjoone diameeter ehk vähemalt 80 mm, kuna selle mõõtme sisse peab jaotama laagrikandjale planeedivõllide avad. Nendest mõõtudest lähtuvalt valitakse välimiseks laagriks esialgu SKF 61816 või ka 61817 ja sisemiseks SKF 61820 2RS1, kuna laager jääb väliskeskkonda.



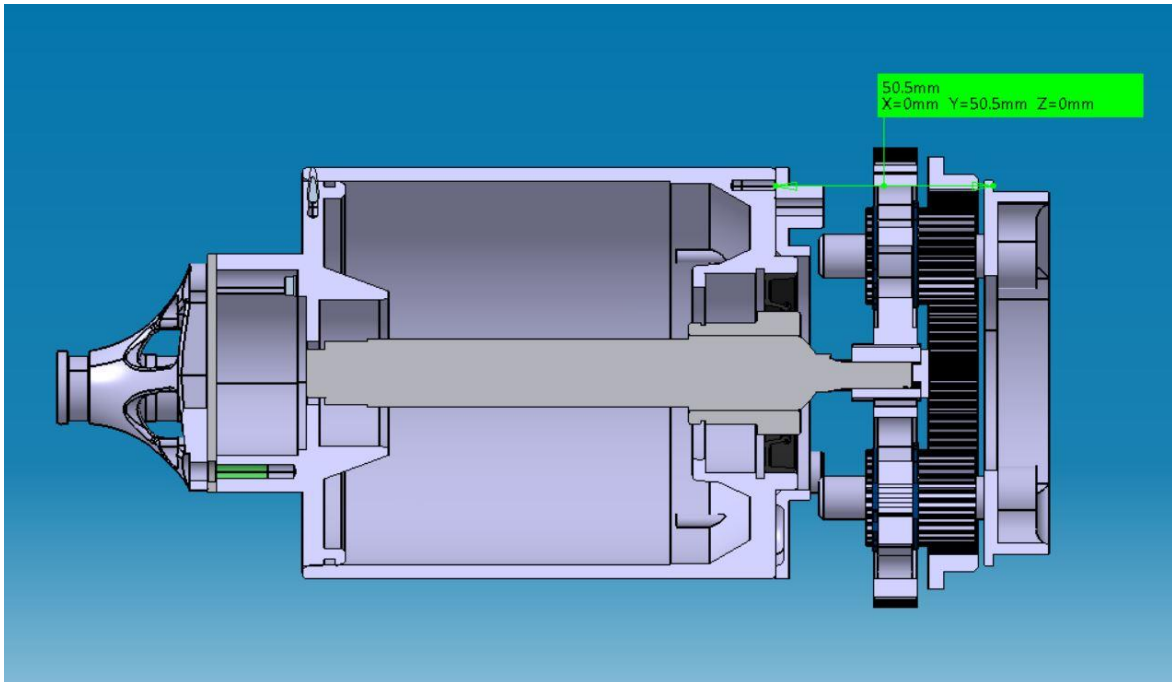
Joonis 4.1 Planetaarülekanne mõõtmed



Joonis 4.2 Planetaarülekanne kaugus mootorist

4.2 Laagrite positsioneerimine

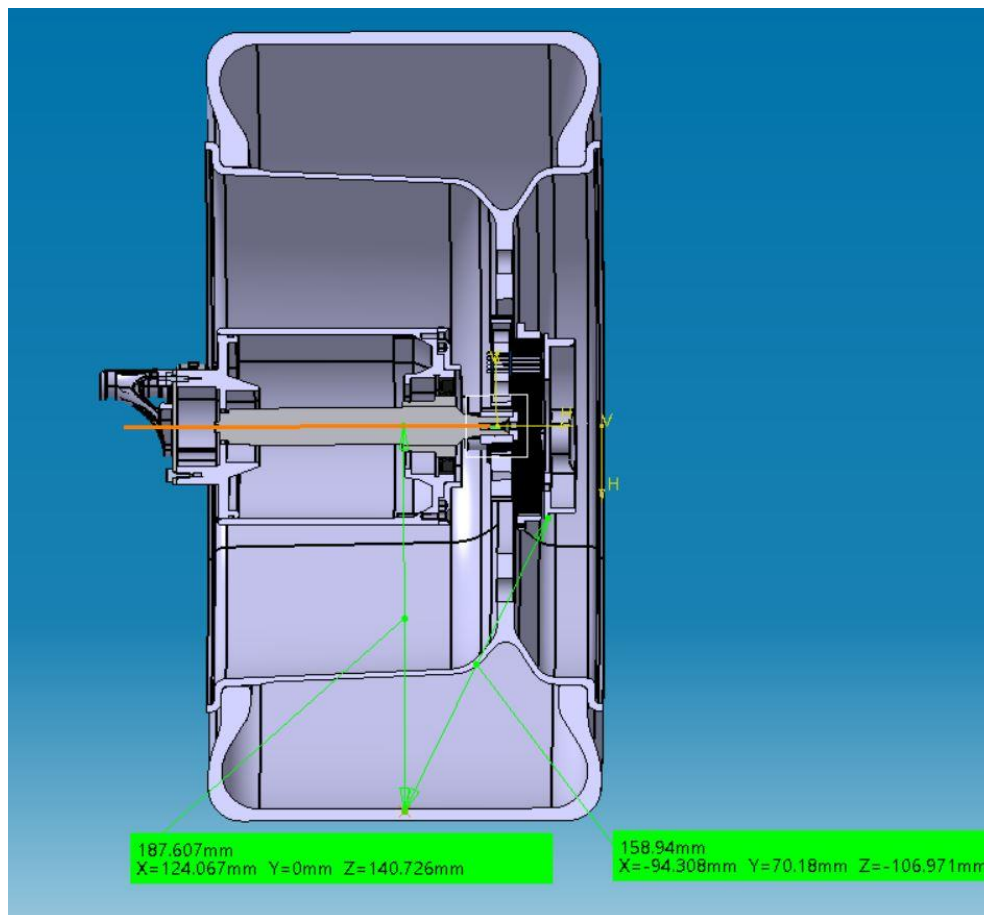
Järgmiseks tuleks teha esimene paigutus, et aru saada jõuõlast. Sisemisel laagri kõrvale tuleb arvestada ka kaelustihend, mis tihendab ülekannet, et ei pääseks õli väliskeskkonda. Ühtlasi peab mahtuma kaelustihendi ja laagri vahele lukustusrõngas, mis eemaldab laagri telgse liikumise. Välmise laagri puhul toimub fikseerimine kahe detaili vahele, mille primaarne eesmärk on fikseerida planeedivõllid, kuid fikseerib ka laagri. Esmane laagrite vaheline distantsiks saadi 50.5 mm. (Joonis 4.3)



Joonis 4.3 Välise toetusvõru kaugus sisemisest

4.3 Laagrite asukoht rehvi kontaktpunktist

Rehvi kontaktpunkt on rehvi laiuse ehk 170 mm suhtes keskoht. Kontaktpunkti on võimalik paika panna ka velje disainiga, kuid arvestama peab ka süsinikkiust velje puhul tema jäikust. Järgmine oluline faktor antud juhul on piduri ketta kui ka supporti mahutamine velje sisse. Support on kõige enam välja ulatuvam detail velje sees. Kolmas oluline faktor on jälgida *Formula Student Germany* reeglites määratud punkti, kus öeldakse, et välisest velje tasapinnast ei tohi ühtegi muud välja ulatuvat detaili olla kui rehvi [7]. Sellisel juhul pannakse paika velje kinnituspind rehvi kandva osa suhtes. Rehvi kontaktpunkt välise laagrist saab olema 70,2 mm. Dünaamika meeskonna andmestiku põhjal rehvi koormatud raadius on 187,6 mm (Joonis 4.4)



Joonis 4.4 Rehvikontaktpunkti asukoht

4.4 Laagritele mõjuvate jõudude arvutus

Laagri arvutused viiakse läbi kasutades MS Excelit, kus on koostatud töö autori poolt arvutusmoodul (Joonis 4.5). Arvutusmooduli sisendinfo aluseks on eelmistes peatükkides käsitletud info. Andmed on välja toodud allolevas tabelis.

Tabel 4.1 Laagritele mõjuvad rajatingimused

Nimetus	Väärtus	Mõõteühik
Pöörlemiskiirus	1650	RPM
Välimise laagri kaugus kontaktpunktist	0,07518	m
Sisemise laagri kaugus kontaktpunktist	0,01918	m
Külgkoormus F_y	3673	N
Vertikaalkoormus F_z	1414	N
Ratta koormatud veereraadius	0.192	m

Esiratta välimise laagri koormus

$$F_{e_v} = \frac{(F_{y_e} * R) - (F_{z_e} * l_{e_s})}{l_{v_s} - l_{e_s}}$$

$$F_{e_v} = \frac{(3673 * 0.187) - (1414 * 0.0192)}{0.0752 - 0.0192} = 12298 \text{ N}$$

Esiratta sisemise laagri koormus

$$F_{e_s} = F_{e_v} + F_{z_e}$$

$$F_{e_s} = 12298 + 1414 = 13712 \text{ N}$$

Tabel 4.2 Laagrite mõõtmed

Laager	Sisemine diameeter (mm)	Väliline diameeter (mm)	Laius (mm)	Dünaamiline koormus (N)	Varutegur
61817	85	110	13	19.5	1.6
61816	80	100	10	12.7	1.08
61820	100	125	13	17.8	1.35

Saadud tulemuste põhjal leitakse, et esialgsed valitud laagrid on sobilikud ka varutegurite poolest. Küll aga tuleb välimiseks laagriks valida SKF 61817, kuna varutegur 1.08 on liiga piiripealne ja eelnevate hooegade kogemusega saab öelda, et laagrite eluiga on umbes kaks korda väiksem kui planeeritud. Valitakse välimiseks laagriks SKF 61817 ja sisemiseks SKF 61829 2RS1 koos katetega, kuna laager asub väliskeskkonnas.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	
1	Laagrite arvutus									
2										
3	Radiaalne jõud	Fr	9.44							
4	Aksiaalne jõud	Fa	5							
5	Rummu rpm	rpm	1650		mm					
6	Väline kaugus rehvikontaktist	m	0.07518	le_v	75.18					
7	Sisemine kaugus rehvikontaktist	m	0.01918	le_s	19.18					
8	Fy	N	3673							
9	Fz	N	1414			732.33652		0.056		
10	Ratta raadius	m	0.192	R						
11										
12	Välisele laagrile mõjuv jõud	13077.43786	80 Sisene	13.07744						
13										
14	Sisemise laagrile mõjuv jõud	14491.43786	100 Sisene	14.49144						
15										
16		kood	Sisene (mm)	Väline (mm)	Laius	basic load	Aksiaalne (kN)	Dünaamiline Fr (Kn)	Mass (kg)	Varutegur
17		SKF 61815	75	95	10	10.8	5.4	12.5	0.14	0.955844726
18		SKF 61915	75	105	16	19.3	9.65	24.2	0.36	1.850515389
19		SKF 61816	80	100	10	11.2	5.6	12.7	0.15	0.971138241
20		SKF 61916	80	110	16	20.4	10.2	25.1	0.38	1.919336209
21		SKF 61817	85	110	13	16.6	8.3	19.5	0.26	1.491117772

Joonis 4.5 Laagrite MS Excel arvutusmoodul

4.5 Kaelustihend

Kaelustihendi eesmärgiks on hoida ära ülekandeõli lekkimine väliskeskkonda. Sisemine laager on valitud kinnine, kuid kõrgemal temperatuuril muutub valitud ülekandeõli niivõrd viskoosseks, et laagri katted õli lekkimist ära ei hoi. Kaelustihendi väline läbimõõt peab olema väiksem, kui valitud sisemise laagri väline diameeter. Selliselt on võimalik laagrile tekitada rant, mille vastu laager pressitakse ja ei ole vajadust täiendavate lukustusrõngaste jaoks. Kaelustihendi sisemine läbimõõt saab olla sama,

mis laagril. Valituks osutub neid parameetreid jälgides kaelustihend 100x120x10 HMSA10. HMSA 10 tähistab kahe huulikuga kaelustihendit, kus lisahuuliku eesmärk on täiendavalt hoida laagri poolt tulevat mustust ülekandeõlist eemal.

Kaelustihendi puhul on oluline huuliku ja selle vastaspinna omavaheline madal hõõrdumine. Selleks, et seda vähendada on vajalik kasutada kaelustihendi tootja poolset toodet SKF Speedi-Sleeve, mille seinapaksus on 0.25mm. See paigaldatakse huuliku tööpinnale ja on sisemise laagri kõrval käänmikul. Antud toode on tehtud terasest. Ilma spetsiaalset toodet kasutamata on võimalik alumiiniumil ära kuluda, mis isegi uue kaelustihendi paigaldamise korral kulunud alumiiniumiga hakkaks lekkima.

Kaelustihendi töötemperatuur on $-40 - 100\text{C}^{\circ}$, lühiajaliselt kannatab ka 120C° , mis kogemuste baasil on küllaltki piiripealne, kuna keskmine õlitemperatuur kestvussõidu lõpus vormelautol FEST21 oli 90C° .

5 NURGAKOOSTU DETAILIDE PROJEKTEERIMINE

Nurgakoost on vormeli alamkoost, mille eesmärk on ratas ühendada õõtshoobadega, mis omakorda seovad selle vormeli kerega. Nurgakoostu peamised komponendid on elektrimootor, käänmik, rattarumm, planetaarülekanne, laagri tugivõrud, laagrid, pidurisüsteem ja velg.

Projekteerimine teostatakse Catia P3 V5R21 programmis, kus tehakse ka üksikute detailide analüüsid ja tugevusanalüüsid Ansys 17.2 programmis. Üksikute detailide analüüsimine teostatakse projekteerimisprogrammis, kuna see kiirendab projekteeritud lahenduse valideerimisprotsessi.

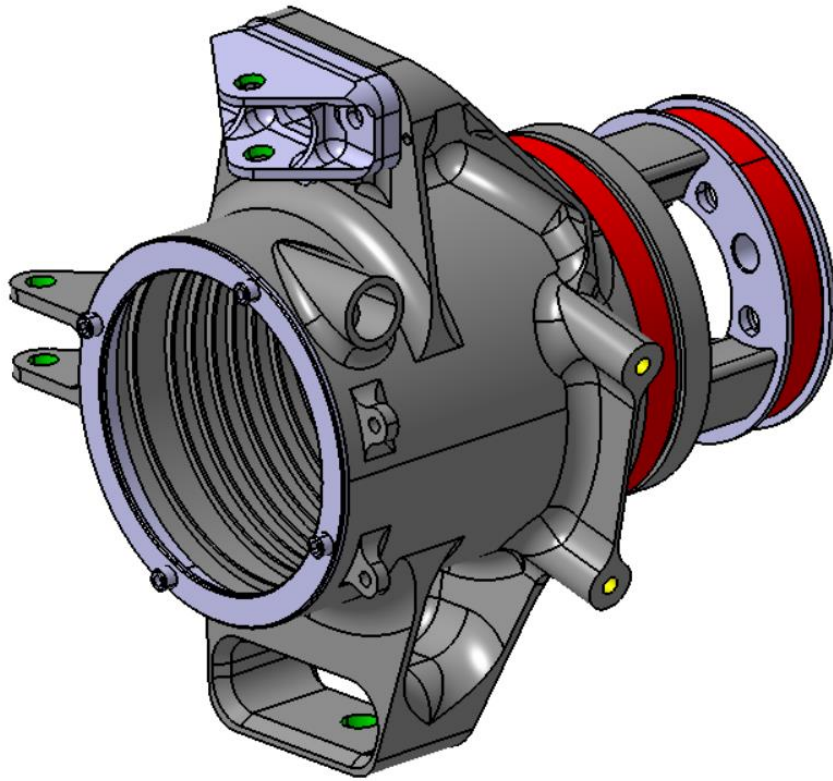
Iga FEM analüüsi puhul on oluline võrgustikku viia täpsemaks kuniks saadud tulemused ei muutu enam üle 5%, siis saame öelda et oleme saavutanud piisavate elementide arvudega võrgustiku detaili analüüsimiseks. Kriitilisemate detailide puhul kasutatakse peenemat võrgustikku, mis tagab parema ülevaate pingete hajuvusest ja näha potentsiaalselt mõra tekkekohti.

5.1 Käänmiku nõuded

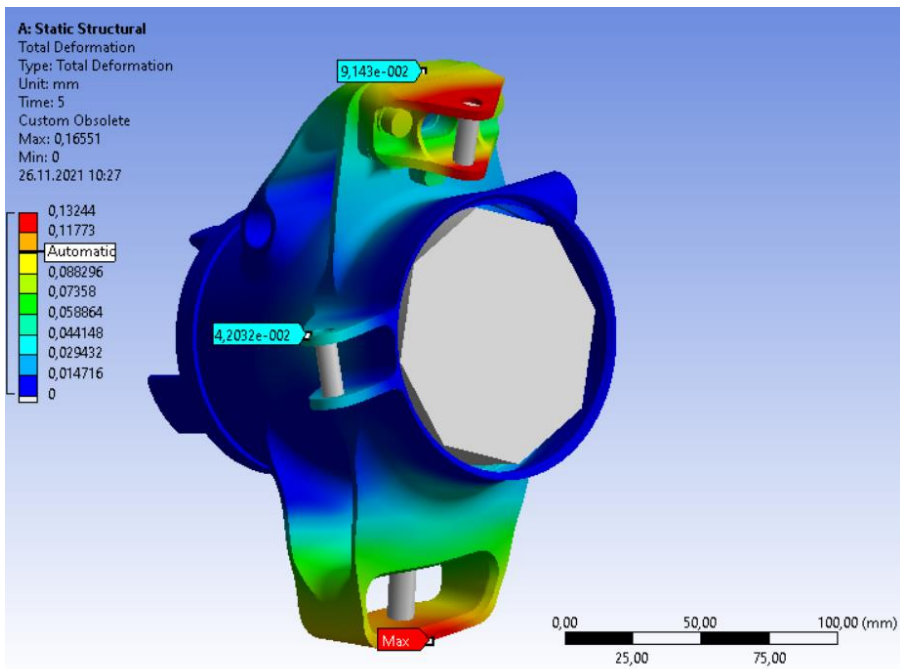
Käänmiku eesmärk on ühendada ülekanne, rattarumm ja mootor nii ratta kui ka õõtshoobadega. Käänmiku töötlus toimub CNC freesimise teel, kus lõiketööriista poolt tulevad ette ka maksimaalsed töötlussügavused. Ühtlasi tuleb käänmik disainida selliselt, et väsimusest tingituna antud detail ei puruneks, kuna materjaliks on valitud Alumec 89, mis ei ole keevitav. Projekteerimise tingimused püstitab lõputöö autor meeskonna liikmele, kes viib läbi käänmiku projekteerimise vastavalt tingimustele.

Käänmiku puhul on võimalik analüüsida antud detaili kinnitades käänmik laagripindadest ja jõud peale panna õõtshoova kinnituspunktidest, kus saab jõud suunata õõtshoova toru sihiliselt. Jõud võetakse vedrustusjõudude tabelist ja pidurite arvutusmoodulist leitakse ka tekitatav moment pidurikettale. Pidurdusmomendiga valideeritakse pidurisupporti kinnituskõrva vastupidavust.

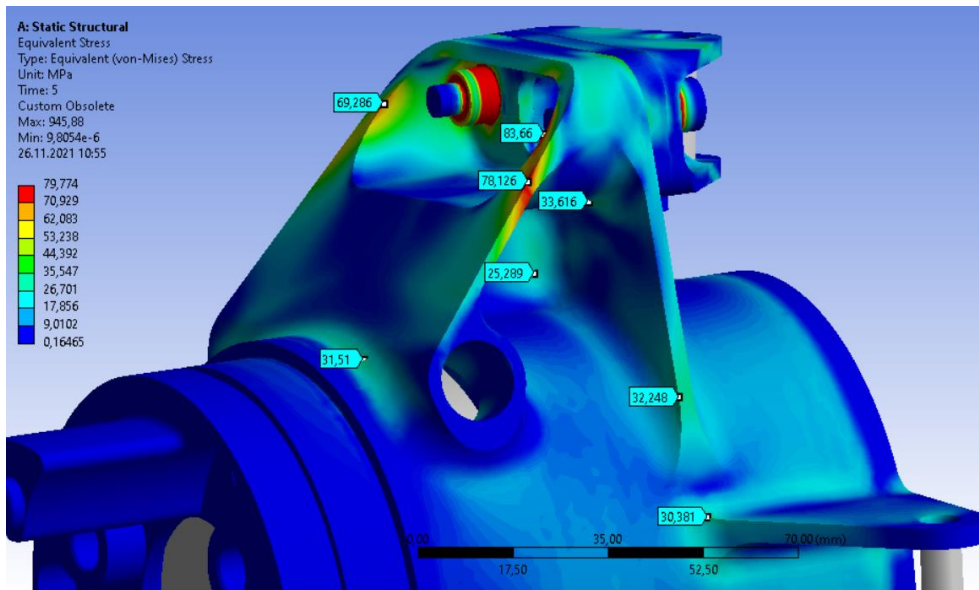
Analüüs teostati kinnitades käänmik punaselt märgitud pindadest ehk laagripindadest. Laagripindadest kinnitamiseks kasutatakse virtuaalset teljestikku pindade tsentris, kus detail kinnitatakse *remote displacementiga* ja piiratakse iga telje suunas liikumine. Jõud suunati roheliselt märgitud avadesse õõtshoova toru sihiliselt kasutades *remote pointe*. Pidurdusjõud pannakse peale efektiivse piduriketta diameetri pealt, mis on piduriklotsi kõrguspidine tsenter. Selle jõu rakendamiseks kasutatakse *remote pointi* (Joonis 5.1).



Joonis 5.1 Tugevusanalüüsi rajatingimused



Joonis 5.2 Käänmiku FEM analüüsi läbipaine

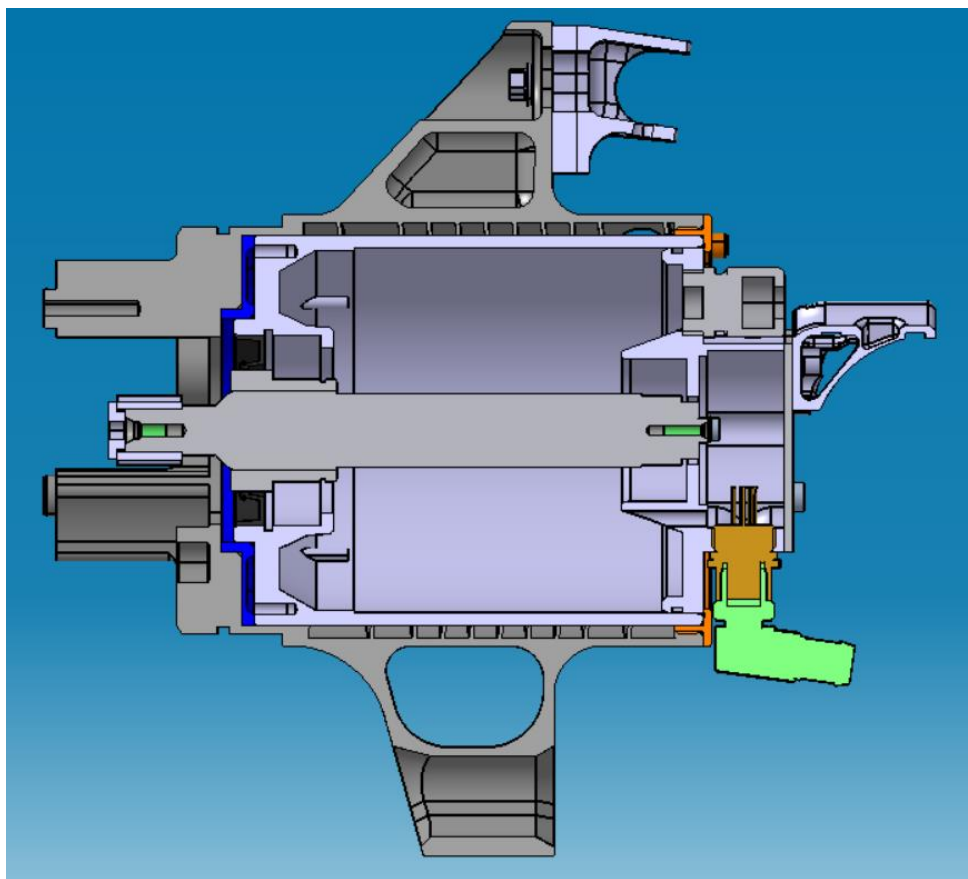


Joonis 5.3 Käänmiku FEM analüüsi pinged

Analüüsi tulemusena saab öelda, et käänmiku disain üksikdetailina on õnnestunud hästi, küllaltki lihtsustatud geomeetriaga ja ilma väiksemate lisaribideta detail on tootjale lihtsam ja ka vastupidav. Läbipaindeks 0.13mm (Joonis 5.2) ja maksimaalne pinge ilma kontaktpingeteta 80MPa (Joonis 5.3), need tulemused kontrollitakse üle koostuna analüüsides.

5.1.1 Mootor käänmikus

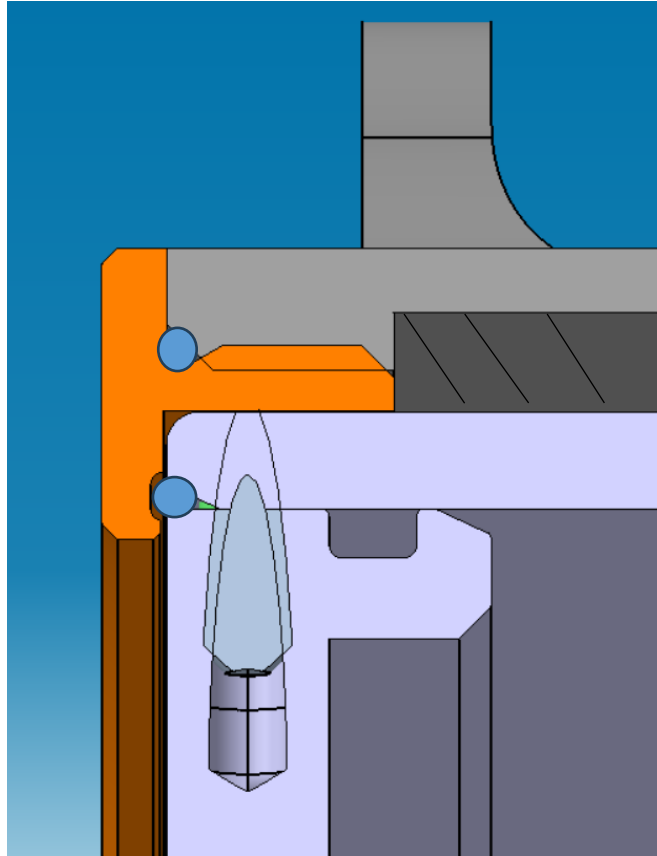
AMK mootor on võrdlemisi suure läbimõõduga kogu nurgakoostu vaates, mis tähendab et tuleb mootor viia võimalikult velje sisse, et oleks õõtshoobadel ruumi liikuda, lisaks sellele aitab mootori võimalikult velje sisse liigutamine nurgakoostu massikeskme parema asukoha peale rehvikontaktpunkti suhtes. Mootori korpus on 3mm alumiiniumist toru välise läbimõõduga 95.9 mm, mis tähendab et tegemist on mõjuvate jõudude suhtes jäiga elemendiga. Sellest tingituna on võimalik antud korpust kasutada käänmikule jäikust andva elemendina, küll aga on mootorikorpusele antud 95.9 0/+0.1 tolerants ja mootorikorpuse pikkus on 110 mm. Varasemalt on kasutatud jahutuskorpuse või käänmiku ja mootori vahel +0.4/+0.6 lõtkistu, kuid antud juhul on mõistlik vähendada antud lõtk nii minimaalseks, et mootor oleks endiselt paigaldatav käänmikusse. Arvestada tuleks ka materjali kokku tõmbamisega, mis võib tekkida olukorras, kus toorikust on eemaldatud suur osa materjali. Kokku tõmbumine toimub veel kuni paari nädala jooksul peale materjali eemaldamist, tootmises on vajalik ka jälgida materjali kujumuutust ja vajadusel töödelda antud ava viimases operatsioonis üle. Mootor seotakse käänmikuga üheks osaks otsmise mutri (oranži värvusega) ja kinnitusflantsiga (tumesinine) (Joonis 5.4).



Joonis 5.4 Mootor koos fikseeritavate detailidega käänmikis

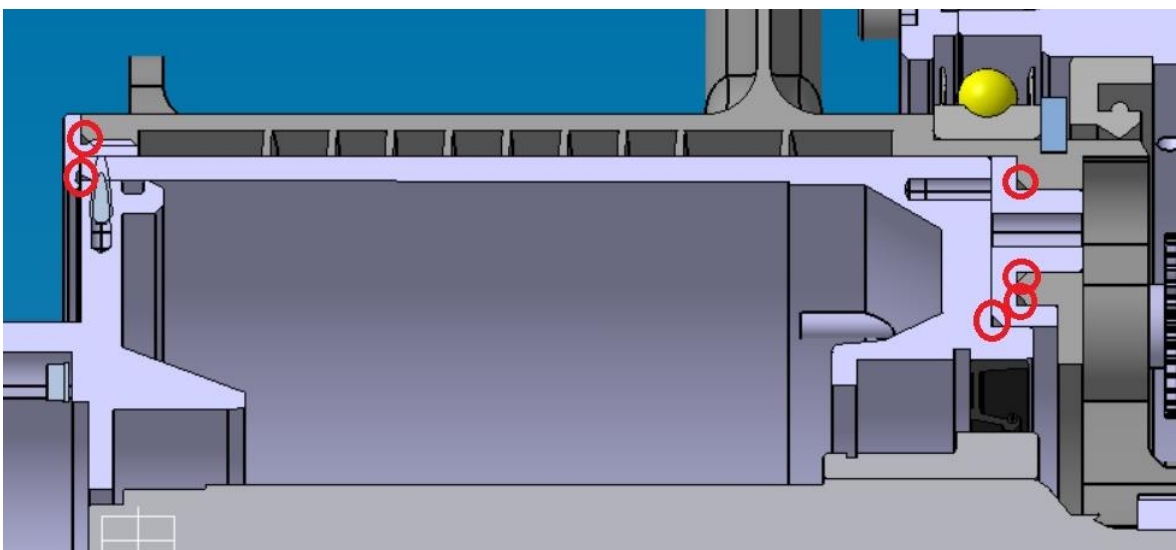
5.1.2 Jahutusvedeliku sulgemine käänmikis

Jahutusvedelik suletakse käänmiku otsas M100x1.5 keerrestatud mutriga, millel on keerme lõpus tihend ja mootori otspinna vastu toetaval pinnal o-rõngas tihend. Selline mutter tagab selle, et võimalik on tihendite pingsust kontrollida mutrit pingutades ja võimaldab võrreldes tavalise polditava flantsiga lihtsamini sulgeda vee käänmikusse. Käänmiku ja mootori ning mootorikinnitus flantsi mõõtmelised tolerantsid annavad kokku ligemale kuni $\pm 0.2\text{mm}$ asukoha erinevuse mootorile, kus flantsile peaks hakkama juba täiendavaid pabertihendeid lisama või sootuks kasutama tihendussilikooni. Silikooni eemaldada detaili küljest peale hooldust on ajakulukas, selle tulemusena soovitakse vältida sellist lahendust. O-rõngas tihendi puhul on oluline saavutada 10-15% kokkusurutavust ja võllile paigaldades kuni 5% venitust [5]. Järgneval pildil on märgitud o-rõngaste asukohad siniste ringidega. Jahutusvedeliku osa on märgitud mustade joontega (Joonis 5.5).



Joonis 5.5 Rõngastihendite asukoht jahutusvedeliku hermetiseerimiseks

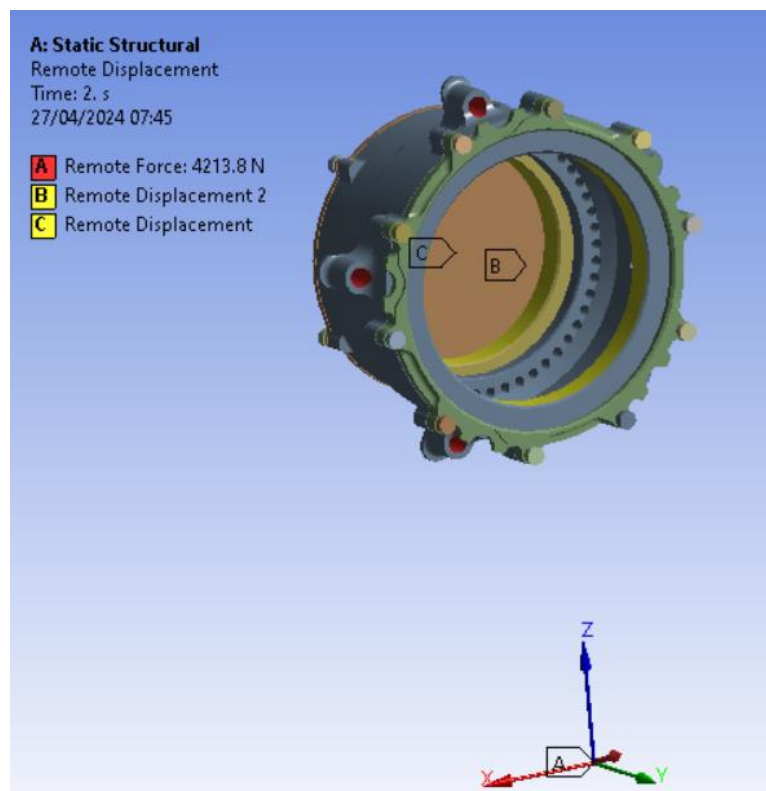
Mootorile on tootja poolt märgitud juurde ka ala, mida tuleb jahutada. Kuna jahutus on nõutud, siis mootorit mitte konstruktsiooni elemendiks tegemata, tuleks lisada jahutuskorpus, küll aga tähendaks see järjekordset detaili mida tuleb tihendada ja projekteerida. Valituks osutub käänmikusse mootori paigaldamine konstruktsiooni elemendina, selliselt et mootorit jahutatakse täispikkuses (Joonis 5.6).



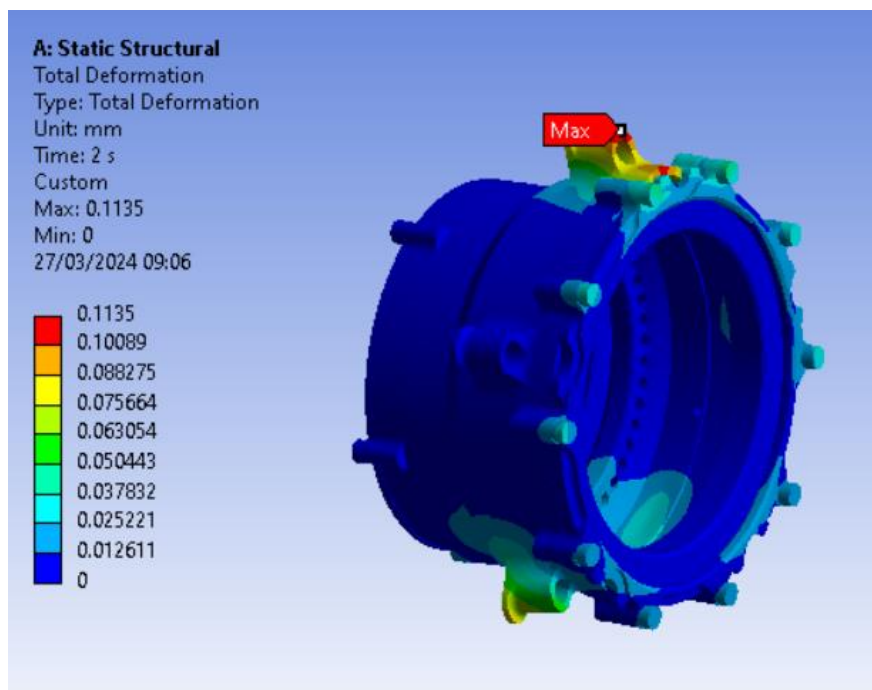
Joonis 5.6 O-rõngaste asukoht

5.2 Rattarummu projekteerimine

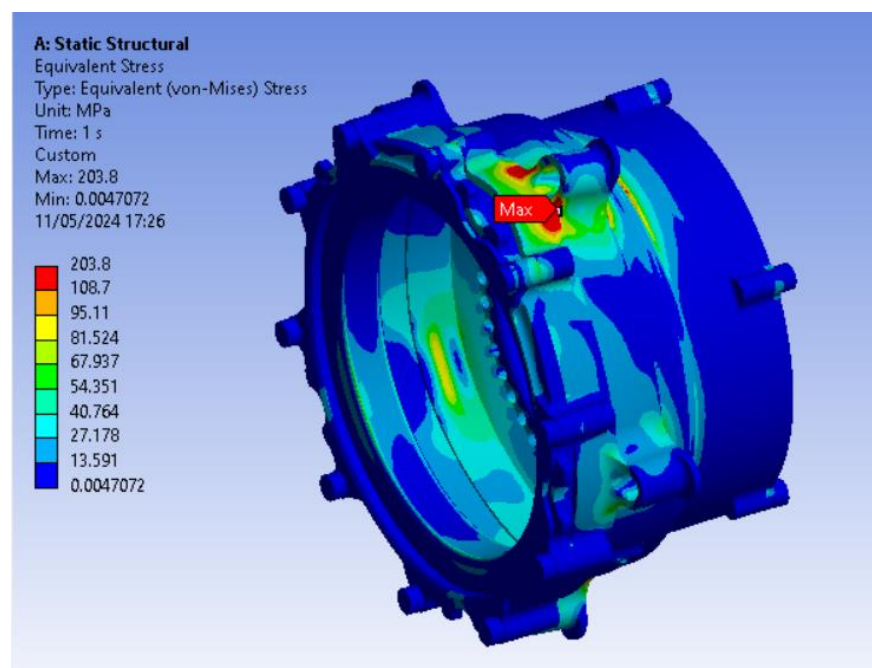
Rattarumm on nurgakoostus käänmiku ja ratast ühendav detail. Rattale mõjuvad jõud kantakse käänmikusse edasi läbi rattarummu, ühtlasi on rummu eesmärk ka ülekandest tekkivat momenti edasi kanda rattasse, kuna rummu külge kinnitub hammasvöö. Rattarummu sees on ka planetaarülekanne määrimiseks õli, mis tuleb hermetiseerida. Rattarummu külge kinnitatakse piduriketas, piduritest tekkiv pidurdusjõud kantakse läbi rummu rattasse. Valitud materjaliks on Alumec89, sellest tingituna tuleb silmas pidada 160mm väiksemat gabariitmõõtu, kuna antud mõõde on viimane ümartooriku diameeter. Ümartoorik on parem, kuna tõmbetugevus on 680N/mm^2 , võrreldes lehtmaterjaliga, mille paksus on 50-100mm, kus tõmbetugevus on 570N/mm^2 [8]. Teada on laagriarvutustest, et laagrite välimised läbimõõdud on 100mm ja 125mm, vastavalt siis 10mm ja 13mm laiad. Kaelustihendiks on valitud 100x120x10 HMSA10. Rattarummu tugevusanalüüs viiakse läbi vastavalt vedrustusjõududele, analüüsitakse vedrustusest tuleva jõuga (Tabel 3.2) ja pidurdamisest tekkivaid jõude. Lisaks rattarummule analüüsitakse toetusvõrusi ja piduriketta kinnitust.



Joonis 5.7 Rattarummu tugevusanalüüsi rajatingimused



Joonis 5.8 Rattarummu läbipaine



Joonis 5.9 Rattarummu pinged

Analüüsi tulemusena leitakse, et kriitilises kohas nagu tikkpoldi kinnituskõrval on maksimaalne pinge 203MPa, mis teeb varuteguriks 3.3kordse (Joonis 5.9). Läbipaine rummul on 0.11mm, mis on täpselt seatud eesmärgi piiril (Joonis 5.8).

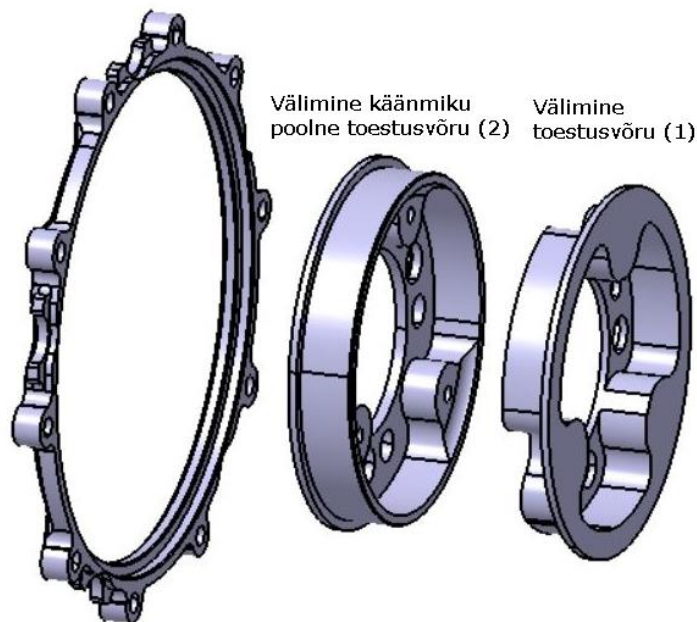
5.2.1 Laagri toetusvõrud

Laagri toetusvõruseid on kokku kolm, nende eesmärk on piirata ära aksiaalne rattarummu liikumine ratta sihis. Selleks et nurgakoost oleks koostatav, siis on vajalik antud detailid eraldi polditavad teha. Toetusvõru sisemine on suurima laagri vastas ja see polditakse rummu külge kümne M5 poldiga, kuna antud võru külge kinnitatakse ka piduriketask, siis antud poldid peavad kannatama ka löikele pidurdusjõudu (Joonis 5.10).

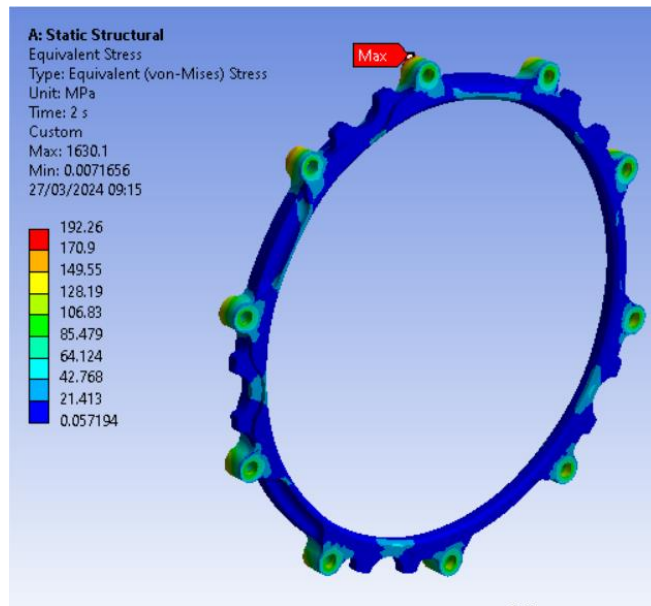
Välimised toetusvõrud koostatakse aga üksteise sisse, kuna võrul on kaks funktsiooni, positioneerida laagrit ja hoida rummu poolt planeedivõlde, mille külge koostatakse omakorda planetaarülekanne planeedid. Laagri sisemisele saarele on vaja aksiaalselt kahte piirajat ja teisalt on oluline võrude jäikus saavutada, kuna detailid polditakse käänmiku külge kolme M6 poldiga ja teisalt on oluline hoida ristseisu käänmiku ja laagritelje suhtes. Ristseis on oluline, et käänmik painduks ühena koos rummuga, vastasel juhul tekib ülekanne hambumises paindepinge, mille peale ei ole ülekanne projekteeritud.

Laagri toetusvõrude tugevusanalüüs on teostatud koos rattarummuga ja eraldiseisvana tugevusanalüüsi teostatud ei ole. Eraldiseisvana analüüsid saaks antud detaile vaid optimeerida, kuid saadavad grammid ei too suurt muutust nurgakoostu üldmassis.

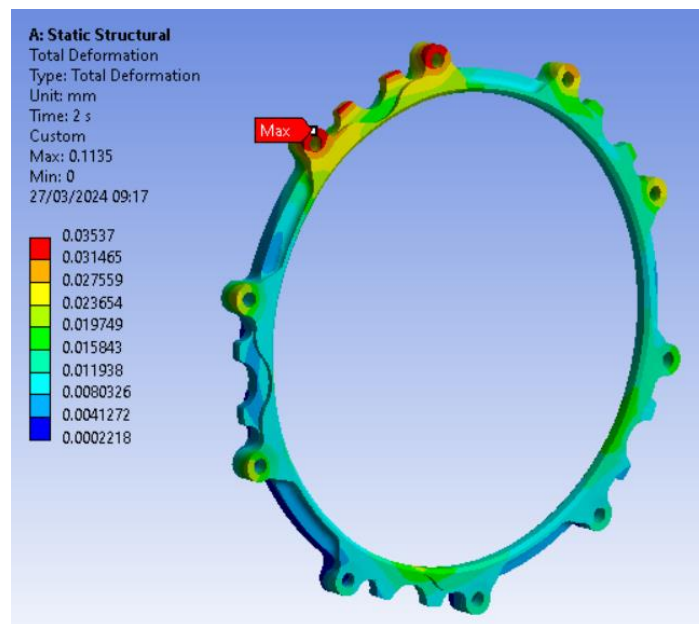
Sisemine toetusvõru (3)



Joonis 5.10 Laagri toetusvõrude loend

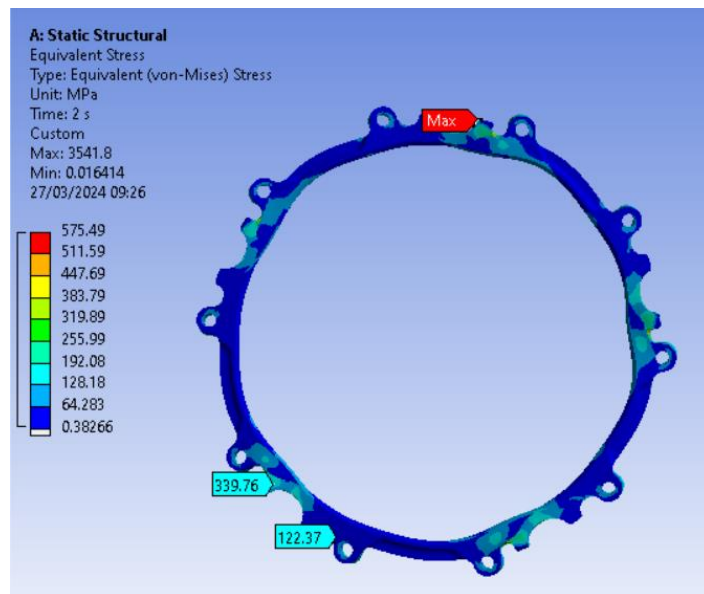


Joonis 5.11 Sisemise laagri toetusvõru pinged

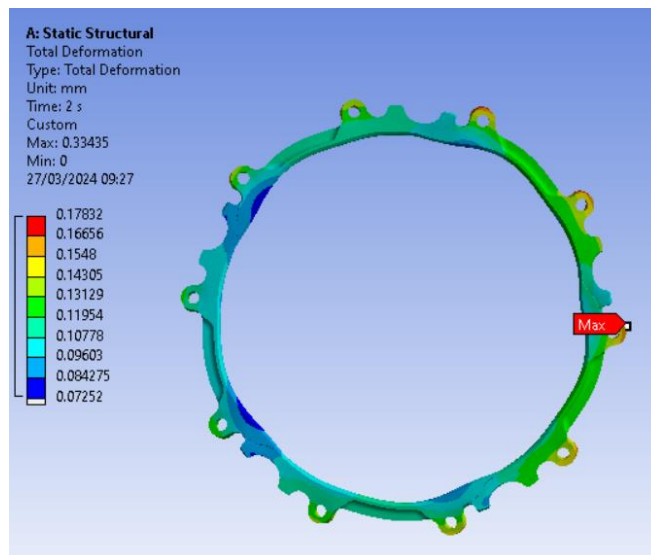


Joonis 5.12 Sisemise laagri toetusvõru läbipaine

Analüüsisdes sisemist laagri toetusvõru 38. vedrustusjõudude olukorraga (Tabel 3.2), saadakse tulemuseks 192MPa ja 0.03mm läbipainet, mis Alumec 89 materjali puhul tähendab 3.5kordset varutegurit. Küll aga pole selles olukorras kombineeritult ka pidurdamist sisse.



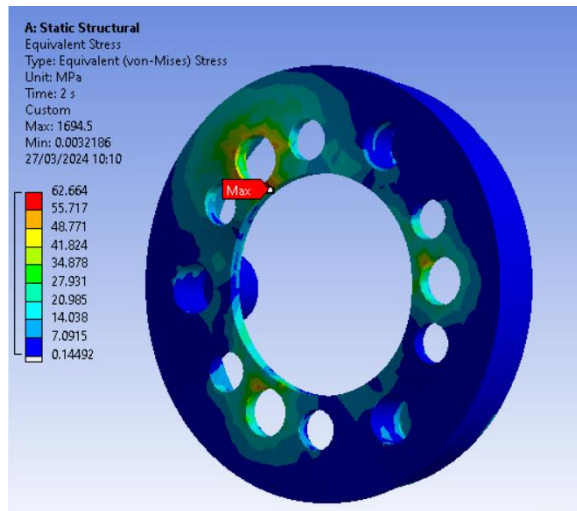
Joonis 5.13 Toetusvõru pinged pidurdusel



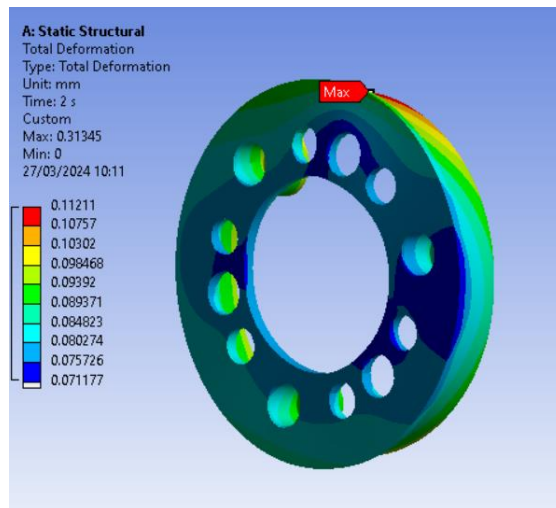
Joonis 5.14 Toetusvõru läbipaine pidurdusel

Analüüsis piduriketta kinnitust sisemise laagri toetusvõru küljes, kus koormuseks on pandud pidurikettale 351Nm väänat, millele on joonestatud piduriklotsi perimeeter, läbi mille jõud peale pannakse. Tulemuseks saadakse 575.5MPa ja 0.17mm läbipainet (Joonis 5.14). Selline tulemus annab varuteguriks 1.1kordse, mis tähendab, et detailil varutegur on väga piiripealne. Küll aga saab öelda, et antud olukord nõuab ideaalseid tingimusi, millest tingituna koormust see detail sellise jõu juures saab vähestel kordadel.

Välimiste laagri toetusvõrude FEM analüüs teostatakse koosteanalüüsis koos rummu ja laagritega, jõud suunatakse rehvikontaktpunktist rummul oleva velje toetuspinna.

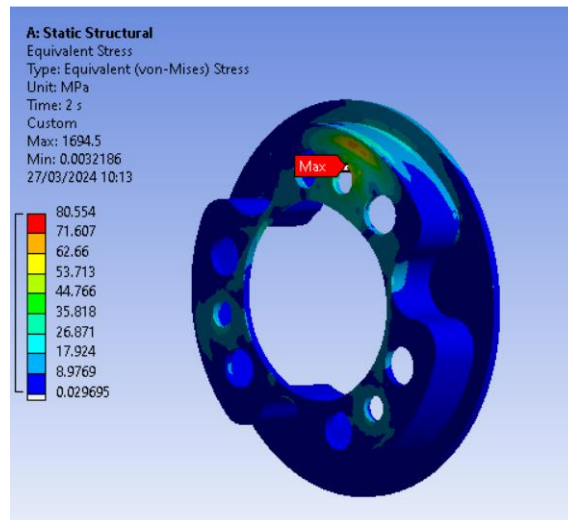


Joonis 5.15 Toestusvõru 2 pinged

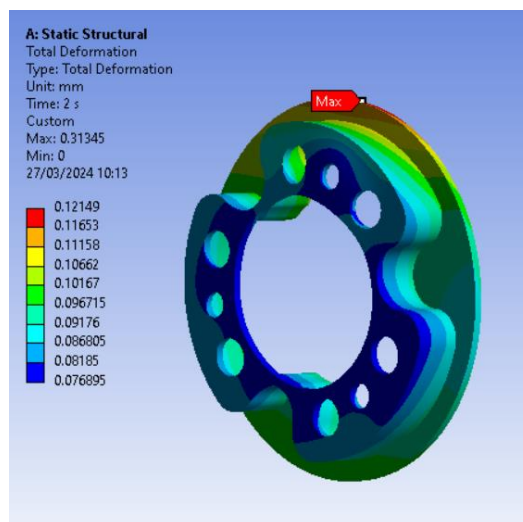


Joonis 5.16 Toestusvõru 2 läbipaine

Käänmiku liitepinnale toetuv detail, millel on suurimad pinged 62.6MPa ja läbipaine 0.11mm. Arvestada võib ka 55MPa suuruse pingega, kuna ava servas on võrgustikust tingituna suuremad pinged.



Joonis 5.17 Välamise toestusvõru 1 pinged



Joonis 5.18 Välamise toestusvõru 1 läbipaine

Laagri välimine toestusvõru, mille suurimad pinged on 80.5MPa ja läbipaine 0.12mm. Analüüsi tulemusena saab öelda, et antud detailidel on 8 kordne varutegur, kuna materjaliks on Alumeec 89 ja toorik on ümar [8]. Oluline on niivõrd suurt varutegurit hoida, kuna need detailid saavad ka kõige suurema koormuse nurgakoostu koostamisel, antud detailide pealt pressitakse hüdropressiga rumm käänmikule. Suurest varutegurist hoolimata on detailil 0.02mm suurem läbipaine kui seatud eesmärk, sellest tulenevalt toodetakse testperioodil juurde jäikust lisav element, mis välamise detaili sisse paigutatakse ja kinnitatakse poltidega.

5.2.2 Piduriketta kinnitus

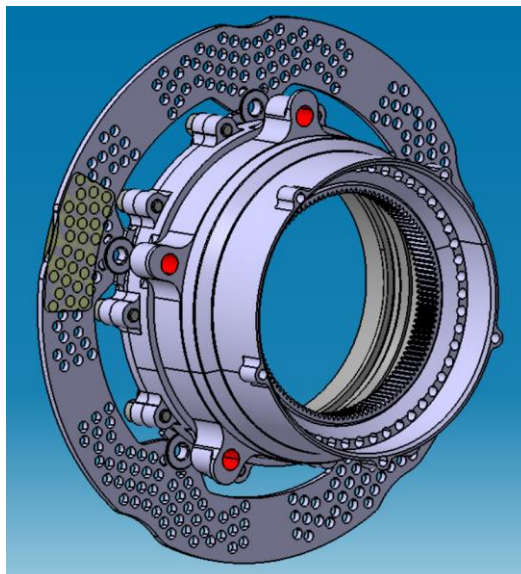
Piduriketas kinnitub rattarummu küljes olevale laagri tugivõrule, ketas on fikseeritud selliselt, et ei oleks võimalik liikuda rattarummu pöörlemistelje sihis. Momenti kannavad

üle spetsiaalsed sõrmed, mis jätavad ketta vabalt liikuma. Liikuvus on vajalik, et piduriketas temperatuuriga ei kõverduks ja ketta liikuvus aitab tagastada ka piduriklotse.

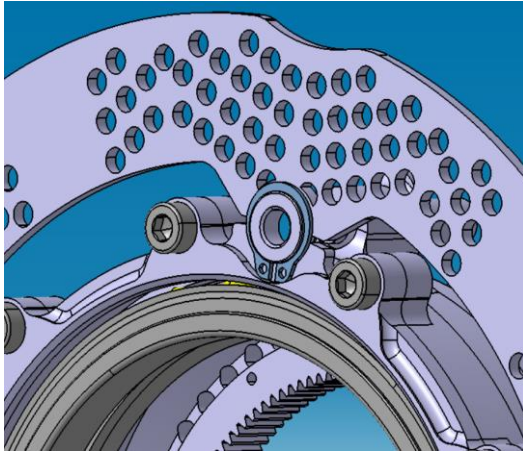
Disainist tulenevalt tuleb silmas pidada seda, et piduriketas ei saaks pöörlema hakata ja ei oleks võimalik pidurikettal aksialaselt rummu pealt maha tulla, kuigi liikuvus peab säilima. Selleks kasutatakse lukustusrõngaid, kuna otseselt koormust piduriketta telje sihiliselt ei ole. Sõrme teise otsa jäetakse krae, mis takistab sõrmel enda pesast välja tulekut.

Lisaks sõrmede tootmistolerantside õigele valimisele tuleb silmas pidada piisavat vahet piduriketta ja laagritoe vahel, kuna soojenedes alumiinium paisub rohkem kui Hardoxist piduriketas, siis selleks vaheks valitakse 1.5mm, et oleks ketast lihtsam ka paigaldada. Sõrmed valmistatakse titaanist Ti6Al4v, kuna titaanil on suur tihedus aga väike mass, lisaks sellele on titaan halb soojusjuht, mis takistab pidurikettast sooja ülekandumist rattarummu, mis aitab hoida pidurikettal temperatuuri. Lisaks pidurdamisest tekkiv soojus ei haju rattarummu, kus on ülekandeõli.

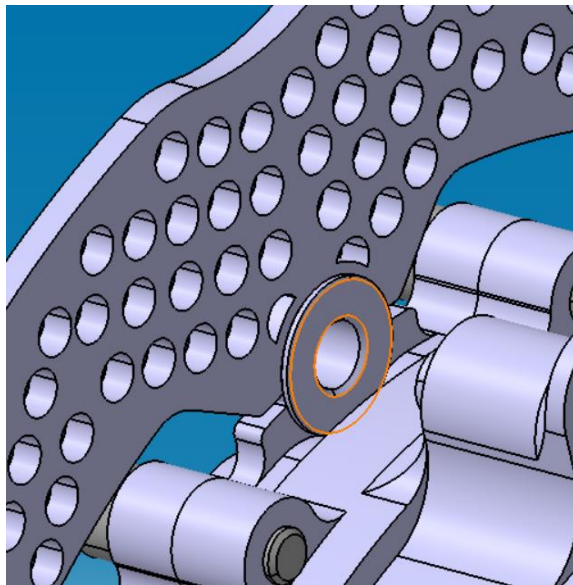
Analüüsimiseks joonistatakse pidurikettale pind, mis on piduriklotsi suurune ja läbi selle pinna pannakse peale jõud 6000N ketta pöörlemisihiliselt. Pind on märgitud kollaselt (Joonis 5.19). Rumm on kinnitatud läbi ratta kinnitusavade *remote pointi* abil ja seda läbi rehvikontakt teljestiku, avad on märgitud punaselt. (Joonis 5.19) Rummul ei ole lubatud pöörlemine, sellised tingimused on äärmuslikud, kuid oluline on analüüsida antud sõlme vastupidavust ka äärmuslikes tingimustes.



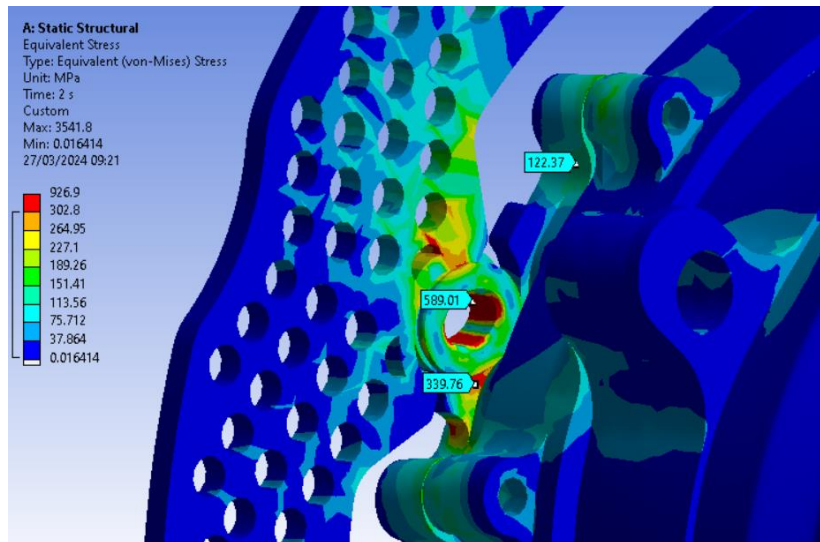
Joonis 5.19 Piduriketta kinnituse FEM analüüsi rajatingimused



Joonis 5.20 Lukustusrõngas sõrmel

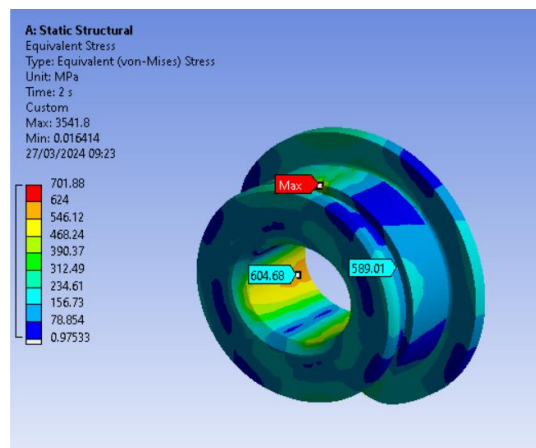


Joonis 5.21 Sõrme krae

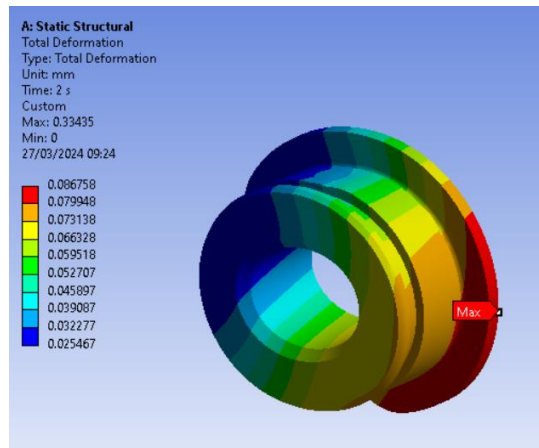


Joonis 5.22 Piduriketta kinnituse tugevusanalüüs

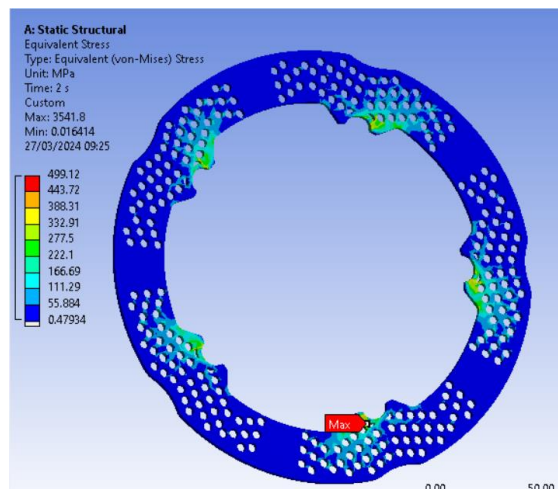
Koostuanalüüsis on nähtav kuidas detailid koormuse alla deformeeruvad, suurim pinge 927MPa (Joonis 5.22).



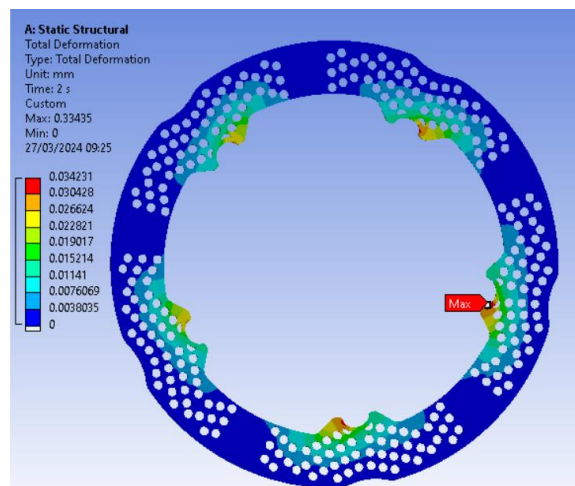
Joonis 5.23 Sõrme pinged



Joonis 5.24 Sörme läbipaine



Joonis 5.25 Piduriketta pinged



Joonis 5.26 Piduriketta läbipaine

Analüüsi tulemusena saab öelda, et selliselt piduriketta kinnitamine on võimalik. Suurimad lubatud pinged piduriketta fiksaator sõrmel on 701MPa ja läbipaine 0.086mm,

arvestades et detail on valmistatud materjalist Ti6Al4v on varutegur antud detailil 2 kordne.

Pidurikettal olev sõrme ava maksimaalne pinge on 499MPa ja läbipaine 0.03mm, ketas valmistatakse materjalist Hardox 450, mille voolepiir on 1250MPa, siis antud detailil on varuteguriks 2.5 kordne (Joonis 5.25) [6].

5.2.3 Tikkpoltide arvutus

Tikkpoldi peamine eesmärk on kinnitada ratas rummu külge. Tikkpoldile ei ole reeglitest tulenevalt mõõtmeid ette antud, kuid on ära määratud materjal milleks peab olema teras või võrdväärne materjal [7]. Varasemalt on kasutatud kuut M6 tikkpolti ühe ratta kinnitamiseks, mille pingutus momendiks on kasutatud 15Nm, toodetud on antud tikkpoldid 25CrMo4 ja ette on tulnud hooaja peale vähemalt viie tikkpoldi purunemist, siis tuleb antud juhul arvutused üle teha. Korralikult fikseeritud ratas vähendab velje ja rummu vahelist hõõrdumist, mis omakorda vähendab läbipainet. Hõõrdumise tagajärjena tekib matt alumiiniumi pind ja süsinikkiust veljel olev alumiiniumi värvus velje liitepinnal. Eelneva hooaja põhjal saab öelda, et kuus M6 polti ei hoia velge piisavalt kinni.

Võimalus on M6 poldid vahetada M8 poldide vastu välja, mis sisuliselt kahekordistaks pingutusmomenti 35Nm peale ja suurendaks jõudu, millega velge rummu küljes hoitakse. Kuue M6 keermega tikkpoldi ristlõikepindala kokku on 169.62mm², siis M8 puhul oleks see juba 301.62mm².

Tikkpoltide arvutades arvestatakse kaht suuremat olukorda, olukord kus sõiduk läbib kurvi keskmisekiirusega 55km/h ja külgkiirendusega 1.6G, teiseks olukorraks on löikejõud, ehk maksimaalse pöördemomendi korral mõjuv löikejõud.

Leitakse poldidele mõjuv tõmbejõud:

1. Rehvikontaktpunktis mõjuv jõud rehville:

$$F_{rehv} = \sqrt{(x^2 + y^2 + z^2)}$$

2. Ühe tikkpoldi mõjuv tõmbejõud:

$$F_{polt} = F_{rehv} * 0.2$$

Antud väärtused:

- X teljele mõjuv jõud: -1700 N
- Y teljele mõjuv jõud: 3672 N
- Z teljele mõjuv jõud: -1414 N
- Ratta diameeter: 384 mm

Leitame rehvikontaktpunktis mõjuva jõu rehville:

$$F_{rehv} = \sqrt{(-1700)^2 + 3672^2 + (-1414)^2}$$

$$F_{rehv} = 4402.5N$$

Seejärel arvutame ühe tikkpoldi mõjuva tõmbejõu:

$$F_{polt} = 4402.5 * 0.2$$

$$F_{polt} = 880.5N$$

Leitakse poltidele mõjuv löikejõud:

Ühe M8 poldi jaoks jaotusringjoonel 120 mm

$$Lõikejõud = \frac{285Nm}{0.06} = 4,750kN$$

Ratta kohta (viie M8 poldiga) jaotusringjoonel 120 mm

$$Lõikejõud ühele poldile = \frac{4750}{5} = 950N$$

Kasutatavaks materjaliks tehtud arvutuste põhjal valitakse 42CrMo4, mille tõmbetugevus on 900-1200N/mm², tõmbetugevuseks võetakse 1050N/mm². On teada, et ühele poldile mõjub löikejõud 950N, siis saame välja arvutada poltide vastupidavuse ühe löikepinnaga.

$$Ts = \frac{F}{S} = \frac{950}{36.6} = 26 N/mm^2$$

Kus,

F – Jõud lõikel

S – Pindala poldil

Saadud tulemuseks on 26N/mm², mis tähendab 40 kordset varutegurit ühe poldi kohta, mis on piisava varuga [9]. Tikkpoldi löike varutegur on oluline, kuna selline olukord võib tekkida mil rattamutrid on lahti jäetud või vibratsiooni tõttu nende pingutusmoment väheneb. Poltidele mõjub löikejõud ainult juhul kui mutrite pingutusmoment on vähene, vastasel juhul õige pingutusmomendiga ei lase velge pöörlema tekkinud hõõrdetegur velje ja rummu vahel.



Joonis 5.27 Tikkpolt peale töötlust

Selleks, et saavutada maksimaalne ristlõikepindala tikkpoldil lõikele, on rattarummu sisse tehtud täpne ava enne M8 keeret, mille sisse keeratakse tikkpoldi silindriline keermestamata osa. Tikkpoldi vasakus otsas olevad keermestamata osa on turvatraadi paigaldamiseks vajalikud, kuna tikkpolt on rattarummule niivõrd lähedal, et vastasel juhul ei ole traati võimalik paigaldada.

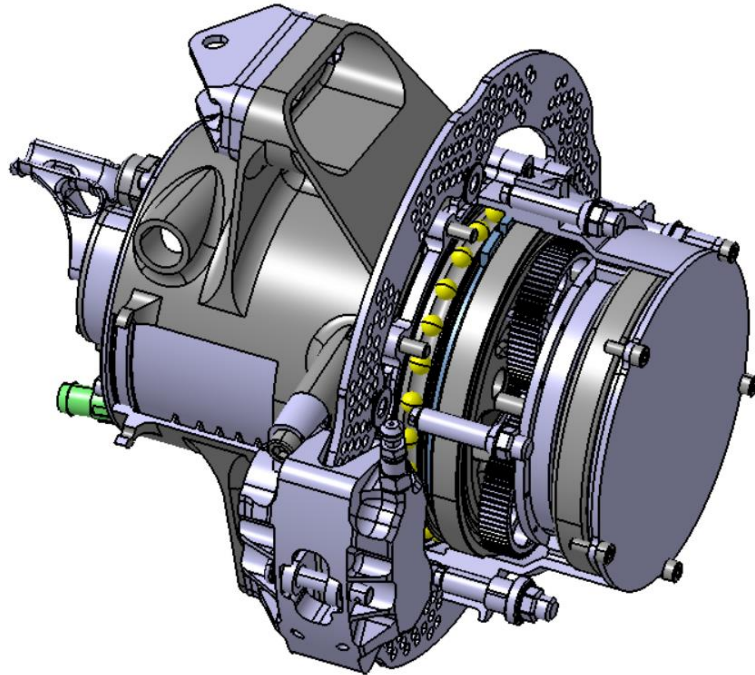
Tikkpoldi muutmise M6 keermelt M8 peale on näidanud, et purunenud tikkpolte pole olnud ja ka veljel olev kontaktpinnal rattarummuga ei ole jälge liikuvusest. Osalt aitas kaasa ka mutrite pingutusmoment 15Nm 35Nm peale, autot hooldavatel mehaanikutel ei ole võimalik keeret üle keerata enam niivõrd lihtsalt.

5.3 Koostu analüüsimine

Koostuna analüüsimisene on oluline, kuna see toob välja koostus kõige koormatuma detaili. Selliselt on võimalik ka aru saada juba varakult, millisele detailile on vaja enim tähelepanu pöörata, kus üks detail võib olla märgatavalt suurema pinge või läbipaindega kui üksikuna analüüsid. Nurgakoostu puhul on oluline leida tasakaal detailide läbipainetes, et koormus ei langeks vaid ühele detailile. Lisaks koormatuima detaili tuvastamisele annab see ka ülevaate summaarsest läbipaindest, mis võimaldab mehaanilise vedrustuse seadistuse puhul võtta arvesse läbipainet. Näiteks suurema läbipainde puhul on oluline staatiliselt lisada suurem rattakalle, kuna -0.5 kraadi rattakallet võib kaduda läbipainete peale ära.

Koostu analüüs on võrdlemisi mahukas ja kompleksne siis tuleb alati ka konservatiivselt hinnata saadud tulemusi, kuna pinged erinevatest ühenduste liikidest võivad varieeruda vastavalt võrgustiku täpsusele.

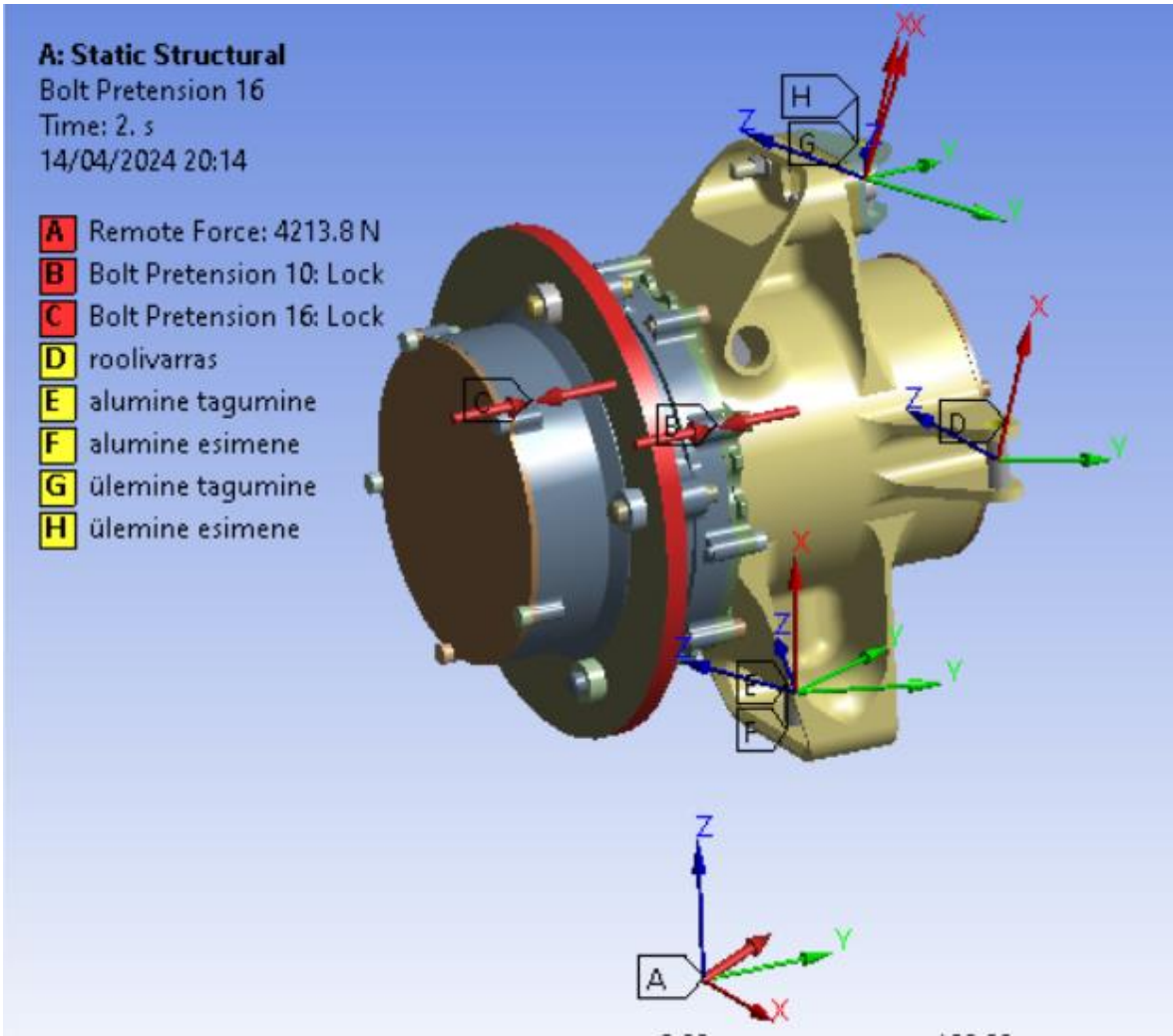
Analüüsi lihtsustamiseks on koostust eemaldatud laagrid, asendatud on need modelleeritud silindritega mis on mõõtetmetelt samad, eemaldatud on ülekande komponendid, kuna väikse mooduli tõttu oleks üldine võrgustiku elementide kogus suur ja pikendaks analüüsi protsessi, mootor on asendatud mõõtetmetelt sama suure detailiga, lisatud juurde on velje liitepinnast väiksem detail, et oleks olemas velje tsentriava rummu ümber, mis paindudes võib tekitada rummu servale kontaktpingeid (Joonis 5.28).



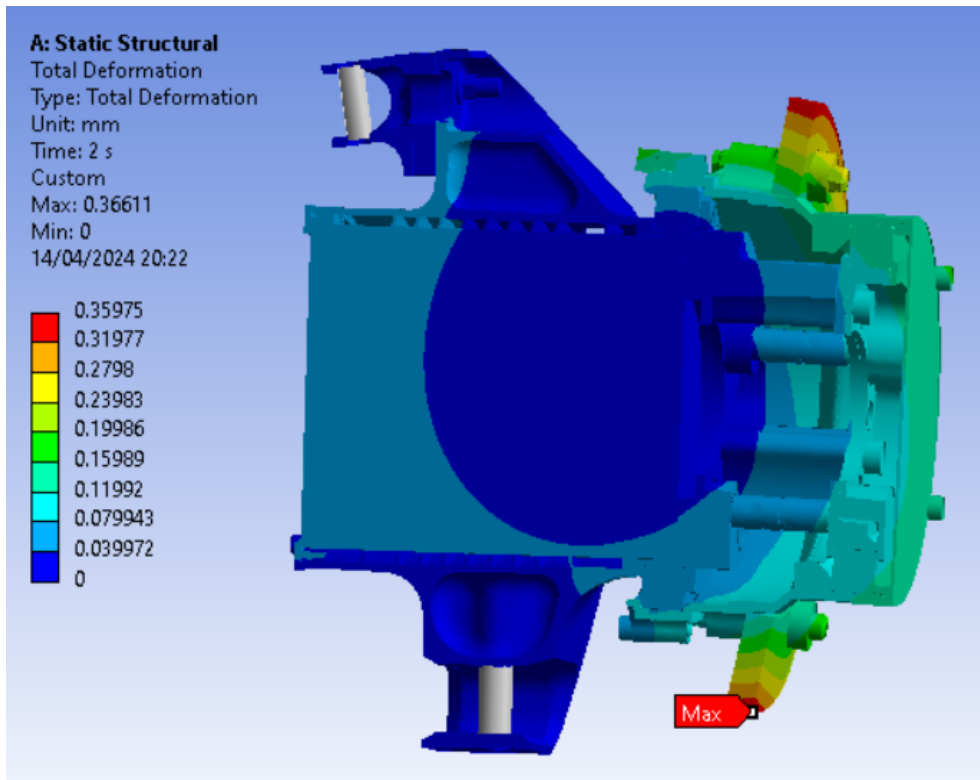
Joonis 5.28 FEST22 nurgakoost

Järgnevalt on välja toodud analüüsi ülesehitus (Joonis 5.29). Kus kuvatud teljestikud on määratud koormuspunktidesse. Teljestik A tähistab rehvikontaktpunktis olevat teljestikku, kus jõud on peale pandud vastavalt mõjuvatele jõududele. Ülejäänud teljestikud on vedrustuspunktides, kus on piiratud õõtsasihiline liikumine, ühtlasi on amordilt tuleva tõukurvarda sihiline liikumine.

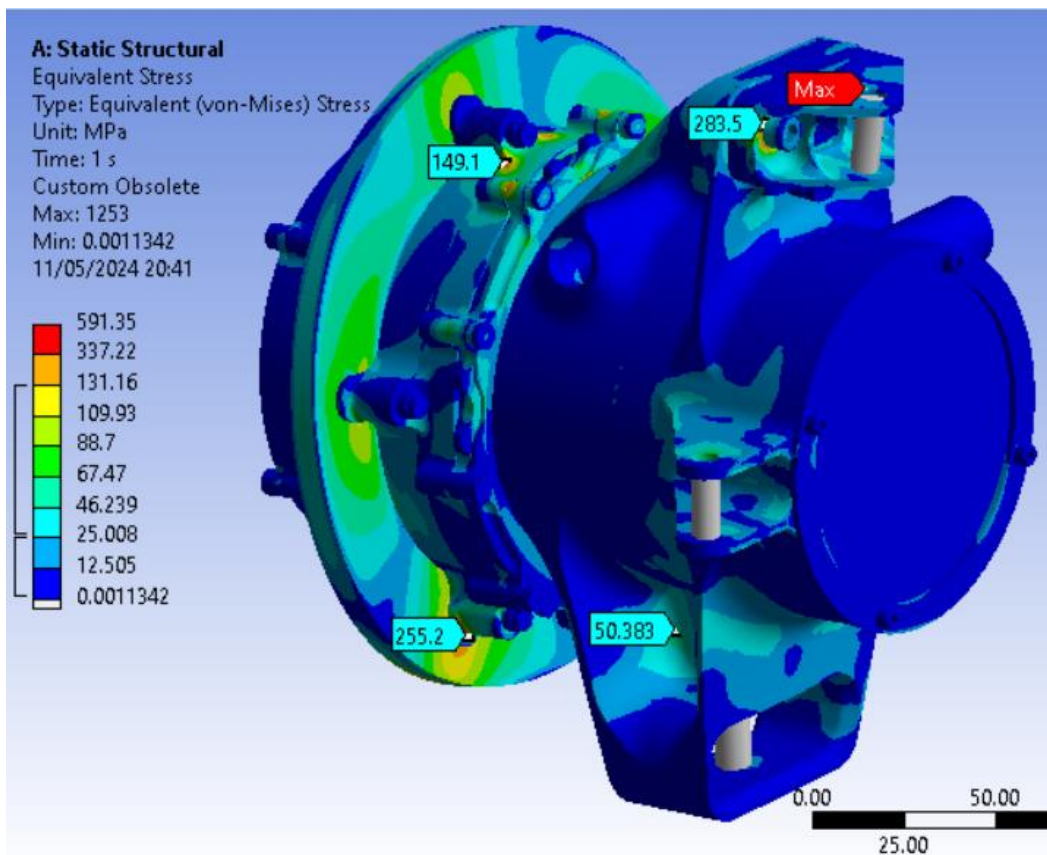
Kinnitusvahenditel on kasutatud poltide pingutusmomendist tulenevat jõudu, mis erineb vastavalt poldi läbimõõdule. Antud pingutusjõud piirab ära detailide paindumise poldipea alt. Poldipea ja detailide paindumise tulemusena võib kinnitusvahendi servadele tekkida kontsentreeritud pinged, mille tulemusena võib hakata detail möranema.



Joonis 5.29 Koostu tugevusanalüüsi rajatingimused

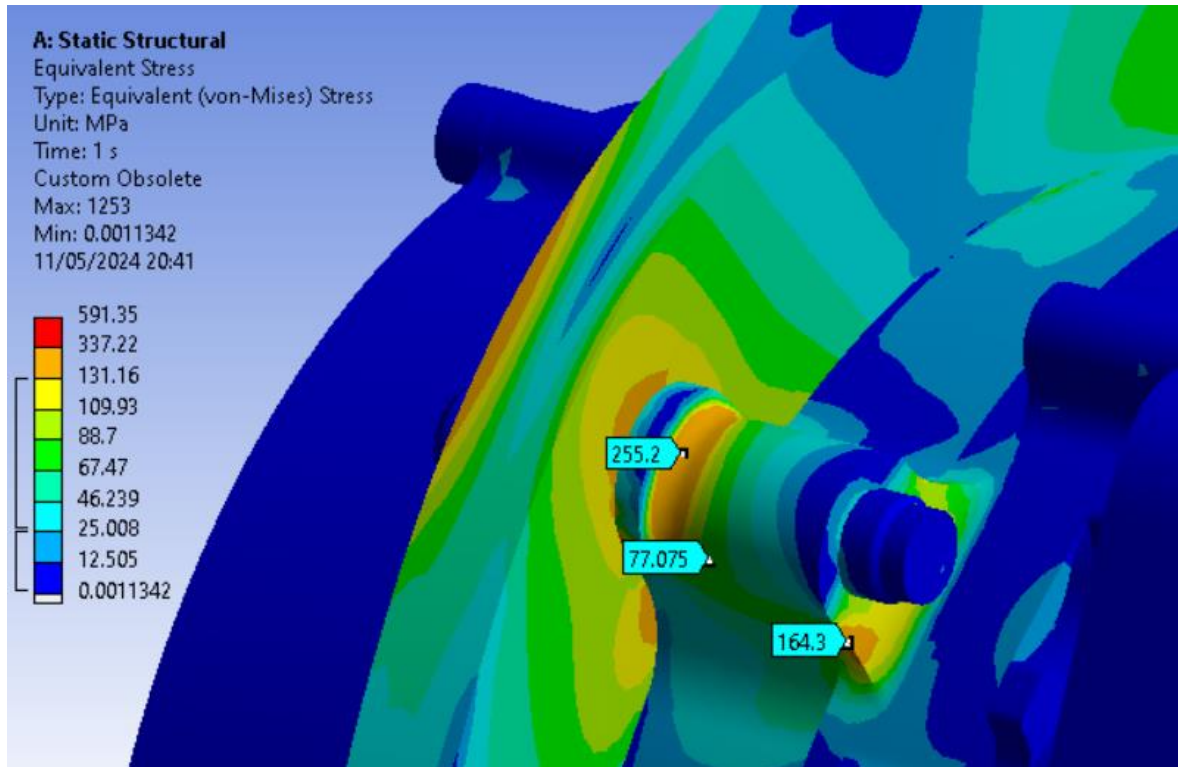


Joonis 5.30 Nurgakoostu läbipaine



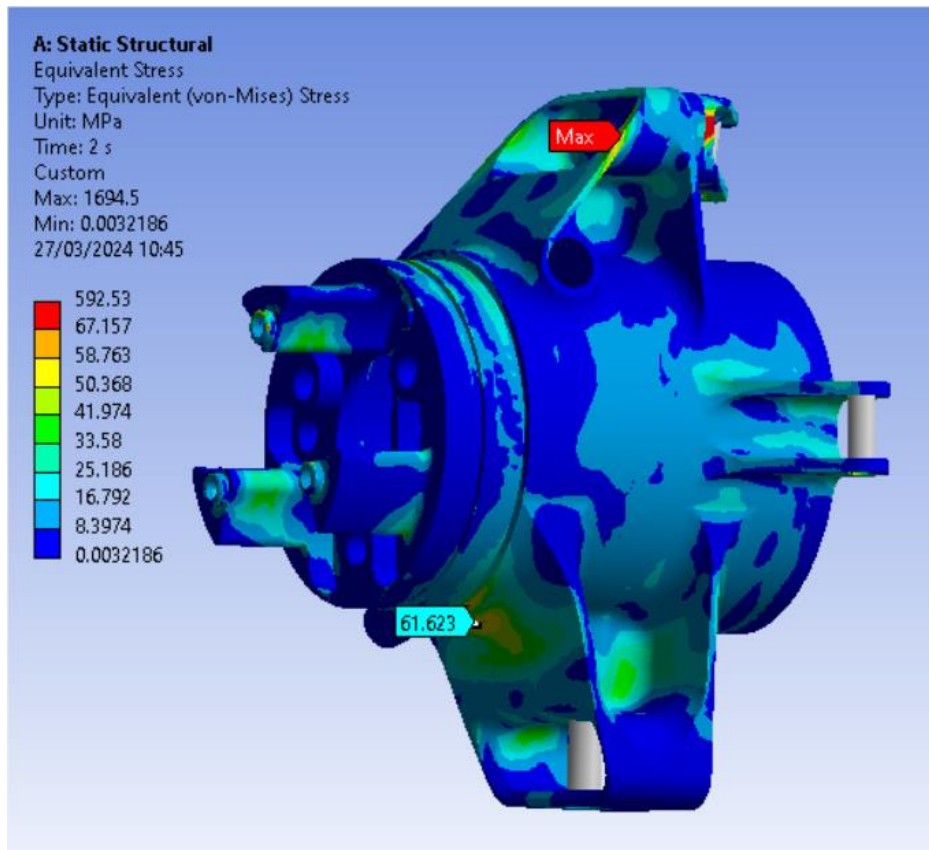
Joonis 5.31 Nurgakoostu pinged

Pingete poolest saab öelda, et koostuna analüüsid on suurim pinge 591MPa, mis on tingitud võrgustiku täpsusest ava serval. Kui maksimaalne pinge lugeda võrgustikust tingitud probleemiks, siis suurim arvestatav pinge antud kinnituskõrval on 283.5MPa. Rummul kõige suuremad pinged 255MPa. Rummu üksikdetailina analüüsid ilma velje keskmise osata olid pinged tikkpoldi kinnituskõrva servas 200MPa, nüüd mil see paremini jaotatud on pinged 164.3MPa.



Joonis 5.32 Maksimaalsed pinged rattarummul

Käänmik mis on kogu koostu kõige kriitilisem detail on jätkuvalt väga hea pingete jaotusega ja ei ole märgata kardinaalseid muutusi, küll aga saab öelda, et varasemalt olid maksimaalsed pinged ülemise kõrva toetusribil, siis nüüd on need alumisel kõrval, milleks on 61.6MPa.



Joonis 5.33 Käänmiku pinged

6 TESTIMISE TULEMUSED

Hooaja lõikes läbis antud sõiduk nii võistlus- kui ka testkilomeetreid kokku 600km. Selle tulemusena ei purunenud ükski projekteeritud detail, küll aga suurenenud kurvisuutlikuse tõttu saavutas sõiduk suuremat külgiirendust, millest tingituna oli ka nurgakoostu läbipaine suurem kui 0.288mm. Suurenenud läbipaine põhjustas purunevaid hammasrattaid, kus planeedi teise astme hambad ei olnud enam paralleelsed hammasvöö hammastega. Sellise olukorra tagajärjeks on 70HRC kõvadusega nitriiditud hammasrataste purunemine. Esimese partii hammasratastega oli nitriitimis protsessis viga, kus soovitud nitriiditud kihi paksus ei olnud piisavalt sügav, mille tulemusena hammasrattad purunesid (Joonis 6.1). Teise partii puhul saadi kätte soovitud sügavus, kuid muutunud nitriitimis protsessi pikkusest muutusid ka mõõtmed soovitud rohkem, mille tulemusena hammasrataste vaheline lõtk oli vähenenud.



Joonis 6.1 Purunenud päike

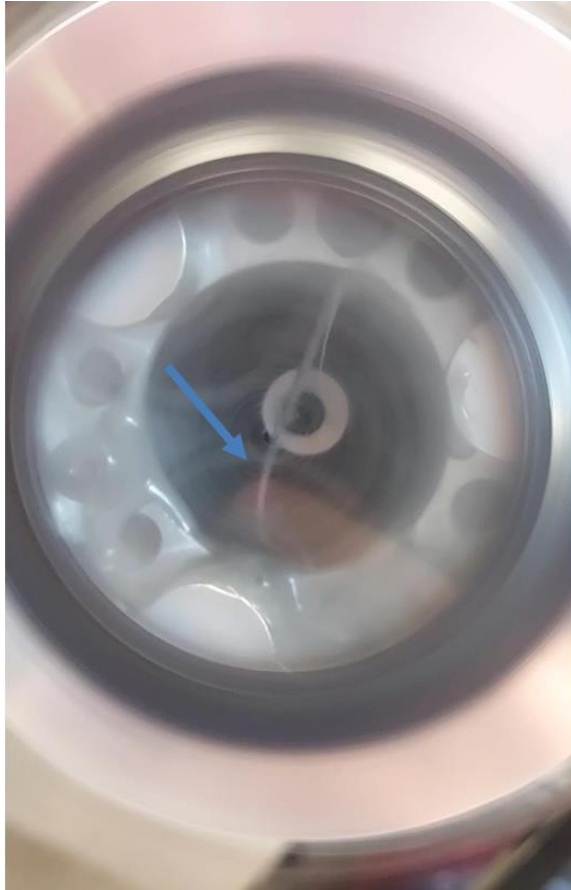
Hooaja lõpu poole, mil oli hammasrataste geomeetria ja materjali omadused saavutanud projekteeritud mõõtmed, oli nurgakoostu projekteeritud istud kulunud, mille tulemusena nurgakoostu läbipaine oli veelgi suurenenud.

Üheks olulise komponendina kontrolliti ka õli jaotumist rattarummu pöörlemisel nurgakoostus. Õli kogus on määratud selliselt, et õlitase oleks esimese kõige madalama hammasratta madalaimast punktist 5mm kõrgemal, et antud hammasrattaga hakataks õli mööda rattarummu laiali jaotama. Sellise testi läbi viimiseks tehti rummu kattele ava, millele liimiti pleksiklaas. Mootorile anti keskmine rajasõidu pööre, milleks

on 11000 pöört minutis (Joonis 6.2), ja täiendavalt vaadeldi kiirusel 16000 pöört minutis (Joonis 6.3), et tuvastada kuidas õli tagastus toimib. Testi tulemusena saab öelda, et kiirusel 11000 pöört minutis tagastub õli kõige alumise planeedi hambumisse, pöördel 16000 tagastub aga välimise laagri toetusvõrtele, kus õli peab tagastuma läbi laagri. Laagril tolmu katete eemaldamine või valides laager millel tolmu katteid ei ole tagab selle, et õli kindlasti läbi laagri tagasi jõuab. Laagrid, millel on katted, sealt õli ei tagastuks ja peaks tõenäoliselt õlitaset kõrgemaks tõstma. Valitud õli on võrdlemisi viskoosne, mis tagab, et hammasratastel on alati õli kiht olemas.



Joonis 6.2 Õli jaotumine pöördel 11000



Joonis 6.3 Õli jaotumine pöördel 16000

7 NURGAKOOSTU OMAHIND

Lõputöö majanduslikus osas leitakse nurgakoostude ligikaudne omahind. Nurgakoostu omahinna sisse arvestatakse ligikaudne projekteerimise ja koostamise protsessi kulu, kui ka materjalidele ja tootmisele läinud kulu. Kulud arvestatakse kahe eraldi kuluna, projekteerimine ja koostamine on töö autori teostatud ja materjalid koos tootmisega on teostatud partnerite abiga. Kulud on arvestatud nelja nurgakoostu kohta ja iga tunnihinna sisse on arvestatud 20% kulu mis läheb elektri, vee ja muude vajalike kommunikatsioonide katteks. Ühtlasi on projekteerimisel tunni hinna sisse arvestatud tarkvara litsentside maksumus.

7.1 Projekteerimine

Projekteerimise etapis võetakse arvesse kõik tegevused millega jõuti toimiva lahenduseni. Arvutused, FEM tugevusanalüüsid, CAD modelleerimine ja jooniste valmistamine loetakse põhiprotsessiks. Antud etapi alla kuulub kontseptsioon, komponentide valik ja detailide paigutus, need tegevused loetakse projekteerimise eeltegevusteks.

Tabel 7.1 Projekteerimine

Nimetus	Kogus (h)	Hind (€)	Maksumus (€)
Arvutused	4	35	140
CAD Modelleerimine	167	35	5845
FEM analüüs	200	40	8000
Tootmisjoonised	32	35	1120
Kokku	403		15105

7.1.1 Eeltegevused

Projekteerimise eeltegevused hõlpsustavad projekteerimist, kus kaardistatakse eelnevate hooaegadel ilmnunud probleemid. Komponentide valik annab ülevaate suurematest muutustest, mis tekitab arusaama ajalisest mahust, mida tuleb planeerida.

Tabel 7.2 Eeltegevused

Nimetus	Kogus (h)	Hind (€)	Kokku (€)
Probleemide kaardistamine	30	35	1050
Andmete töötlemine ja plaani koostamine	14	35	490
Kokku	44		1540

7.2 Valmistamine

Valmistamise peatükis käsitletakse projekteeritud detailide tootmist ning detailidele kulunud materjali hulka. Tootmise puhul arvestatakse eraldi masintöötlust ja CAM tarkvara kasutades tööradade genereerimist. Koostamisele ja ettevalmistamisele kulunud aega. Ettevalmistuse faasis grupeeritakse toodetud detailid ja valitakse istude järgi parimad kombinatsioonid, seejärel koostatakse antud detailid.

Tabel 7.3 Valmistamine

Nimetus	Kogus (h)/(kg)	Hind/kogus	Maksumus (€)
Masintöötlus	240h	31€/h	7440
CAM	373h	31€/h	11563
Nitriitimine	3.5kg	20€/kg	70
Kvaliteedi kontroll nitriitimisele	2h	150€/h	300
Ettevalmistus	4h	35/h	140
Koostamine	24h	35/h	840
Valmistamine kokku			20353

7.2.1 Materjalide kulu

Materjalide alla kuulub nii nurgakoostu detailide materjalid kui ka planetaarülekande alla kuuluvad materjalid. Nurgakoostu detailid valmistati Alumec 89 ja 42CrMo4 materjalist. Planetaarülekandes kasutatud teras on 34CrAINI7-10. Materjalide kulu alla arvestatakse ka kinnitusvahendid, rõngastihendid, laagrid kui ka kaelustihendid.

Tabel 7.4 Materjalid

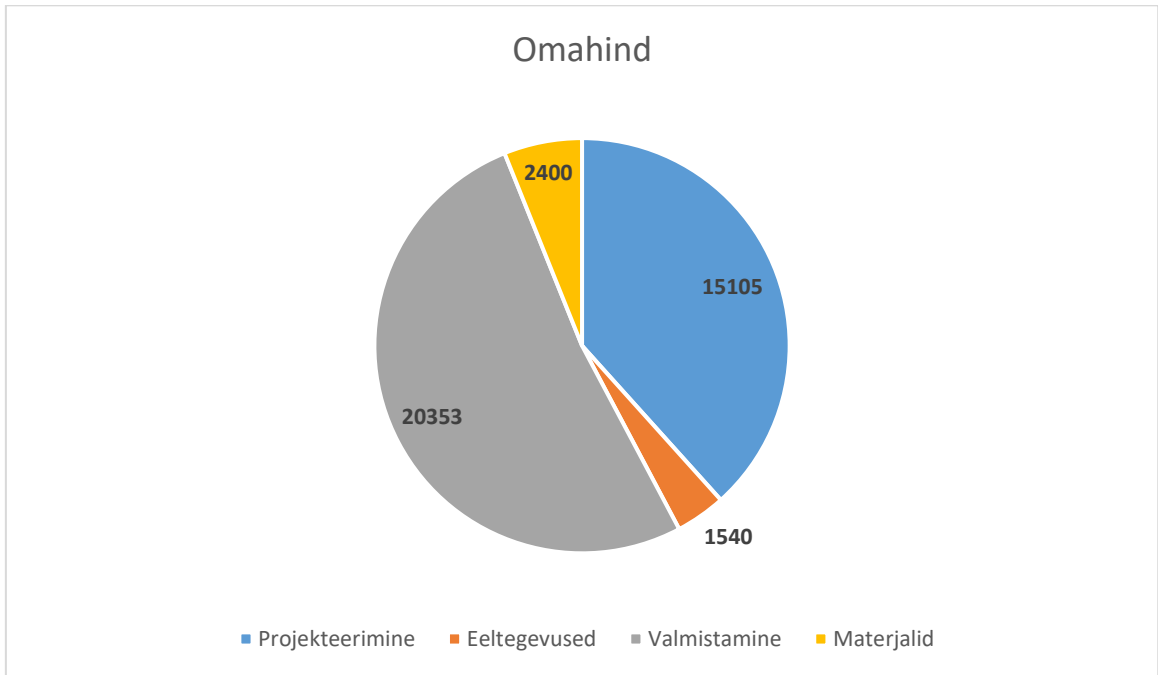
Nimetus	Kogus (tk)	Hind/kogus	Maksumus (€)
Materjal Alumec89	58.3kg	30€/kg	1749
Materjal 34CrAINI7-10	6.2kg	18.3€/kg	113.46
42CrMo4	1.08kg	14.1€/kg	15.228
Kinnitusvahendid	180tk	-	142
Laagrid	32	-	318
Kaelustihendid	4	-	62
Kokku			2400

7.3 Nurgakoostu omahind

Omahinna leidmiseks liidetakse kokku kulud, lõplikuks omahinnaks saadakse 39398 eurot. Suurim osa hinnas on masintöötlus ja selle tööradade valmistamine CAM tarkvaras. Ühe vormeli nurgakoostu ligikaudne omahind on 9850 eurot.

Tabel 7.5 Nurgakoostu omahind

Maksumuse liik	Ajakulu	Maksumus
Projekteerimine	403	15105
Eeltegevused	44	1540
Valmistamine	643	20353
Materjalide kulu	-	2400
Kokku	1090	39398



Joonis 7.1 Sektordiagramm omahinna jaotumisest

KOKKUVÕTE

Käesoleva lõputöö eesmärk on valmistada Tudengivormeli FEST22 võistlusautole nurgakoost, millel on käänmikusse integreeritud elektrimootor AMK ja kaheastmeline liitplanetaar ülekanne. Eesmärgiks on iga detaili varutegur vähemalt kahekordne ja nende detailide geomeetria lihtsustatud tootmise hõlbustamiseks. Mootori paigutamine käänmikusse vähendas detailide arvu nurgakoostus ja suurendas jäikust. Detailid saavutasid minimaalse lubatud kahekordse varuteguri ja nende geomeetria lihtsustati selliselt, et tootmine sujuks.

Esimesena määratleti Tudengivormeli FEST22 nurgakoostu kontseptsioon, millega pandi paika tegevuskava ja vajalikud arendustegevused nurgakoostu lihtsamaks tootmiseks ja parema vastupidavuse saavutamiseks. Eesmärgiks seati peamiselt lihtsustatum geomeetria ja vähemalt kahekordne varutegur igal kasutataval komponendil. Lisaks üldistele nõuetele oli oluline silmas pidada ka piduriketta ujuvus, pidades silmas vormeli vabajooksu ja piduri komponentide paremat säilivust. Kaardistada tikkpoltide purunemise probleem ja muuta antud sõlm vastupidavamaks.

Järgmises faasis kaardistati nurgakoostule mõjuvad jõud. Jõudude arvutuse aluseks võeti FEST21 rehvipidamise maksimaalne võimekus võistluste kestvussõidu andmestiku põhjal Ungarist. Sellest andmestikust joonistus välja G-G diagramm, mille andmed on sisendiks meeskonna vedrustusjõudude MS Excel tarkvaras arendatud arvutusmoodulile. Leitakse mõjuvad jõud rehvikontaktpunkti ja õõtsuhoova kinnituspunktidesse.

Kuna jõud olid teada, siis oli võimalik teostada esmane laagrite valik vastavalt mõõtmetele. FEST21 puhul kasutatud SKF 61820 ja 61816 laagrid olid mõõtmel sobivad, kuid 61816 laagril oli hooaja jooksul näha korduvalt laagri väsimust, mille tulemusena laagri lõtk märgatavalt suurenes ja vabajooks oli vähenenud. Selle kogemuse baasil oli oluline arvutada üle laagrite varutegurid ja sealjuures paigutada laagrid selliselt, et mõjuv jõud oleks võimalikult minimaalne läbi jõuõlgade. Laagrite arvutamiseks valmistati MS Excel tarkvaras laagritele arvutusmoodul ja võimalikele laagritele teostati varuteguri arvutused. Tulenevalt arvutustulemustele osutusid valituks SKF 61820 ja 61817 laagrid.

Laagrite valik oli teostatud, vastavalt nende mõõtmetele sai hakata detaile projekteerima. Esmalt määratleti käänmikule nõuded, mille alusel meeskonna liige hakkas projekteerima käänmiku. Vastavalt uurimisele valiti mootori paigutamine käänmiku sisse ja selle jahutamiseks vajalik veekeha projekteeriti käänmiku sisse. Selle tulemusena vähendati detailide arvu, kuid tootmise poolest muutus käänmik kompleksemaks. Kompleksema geomeetriaga käänmik, aga andis võimaluse AMK mootori korpuse jäikust kasutada nurgakoostu jäikuselemendina.

Välimise laagri suurema välise diameetri tõttu tuli täielikult ümber disainida rattarumm ja laagri toestusvõrud. Laagrite toestusvõrusi on kokku kolm, millest ühe eesmärk on kanda lisaks rummu fikseerimisele ka pidurikettast tulenevaid jõude rummu üle. Kuna pidurikettad vormelil FEST21 kõverdusid ja takistasid vormeli vabajooksu, siis valiti piduriketta kinnitustüübiks ujuvate sõrmede peal lahendus. Ülejäänute toestusvõrude disain on võrdlemisi lihtsustatud ja nende primaarne eesmärk on fikseerida laager käänmiku külge ja kinnitada planeedikandja võllid käänmikus. Tulenevalt eelneval hooajal esinenud ratta kinnituse tikkpoltide purunemisest teostati ka neile lõikele arvutus, et üle kontrollida nende vastupidavus. Kuna M8 tikkpoldi puhul oli varutegur pea 40kordne, siis valituks osutus viis M8 tikkpolti, et olla kindel, et velje mutreid pingutades ei ole võimalik tikkpolti puru keerata.

Projekteerimise lõpetuseks teostati koostu analüüs, mille eesmärgiks oli näha kõikide detailide summeeritud läbipainet ja näha potentsiaalset koormatuimat detaili nurgakoostus. Läbipaine on oluline, et vedrustust seadistades oleks võimalik arvestada nurgakoostu summaarset läbipainet. Näiteks kui on teada, et nurgakoost paindub dünaamilises olukorras läbi vertikaal telje suhtes 0.5 kraadi, siis staatiliselt on võimalik seda seadistust tehes arvestada. Koormatuima detaili tuvastamine annab ülevaate sellest, milliseid detaile tuleb enim jälgida sõidukit hooldades, et tuvastada võimalikud väsimusest tingitud mõrad.

Testimine tõi välja mõningad murekohad, kus projekteeritud ülekanne suurenenud kurvisuutlikkuse tõttu ei pidanud vastu. Lisaks suurenenud kurvisuutlikkusele purunesid hammasrattad ka kehva termotöötamise ja kehva tootmise tulemusena. Hammasrataste geomeetria mõõtmed kohandati küll vastavalt testpartiile, kuid suurema koguse puhul muutusid mõõtmed rohkem kui prognoositud. Teise partii hammasratastega saavutati küll soovitud vastupidavus, kuid nurgakoostu detailid olid oma projekteeritud istud kaotanud tänu mitmel korral vahetatud hammasratastele. Vähenenud istude tulemusena oli suurenenud läbipaine.

Lõpetuseks teostati majanduslikus osas nurgakoostu omahinna ligikaudne arvutus. Omahinna kalkuleerimiseks jaotati projekteerimine ja valmistamine eraldi. Kus projekteerimise alla lisati ka eeltegevused, milleks on näiteks kontseptsiooni loomine. Valmistamise puhul arvestati eraldi näiteks materjali kulud, mis annab parema ülevaate kulude jaotumisest. Ühe nurgakoostu lõplik omahind oli ligikaudu 9850 eurot, millest suurima osa moodustab tootmine.

SUMMARY

The aim of this thesis is to design a corner assembly for the Student Formula FEST22 racing car using an AMK electric motor and a two-stage compound planetary gear integrated into the upright. The goal is to ensure that each component has a safety factor of at least two and to simplify the geometry of these parts for easier manufacturing. Placing the motor inside the upright reduced the number of parts in the corner assembly and increased its rigidity. The components achieved the minimum allowed safety factor and their geometries were simplified to allow easier production.

First the concept of the corner assembly for the vehicle was defined, establishing a plan and necessary development activities for easier manufacturing and improved durability of the corner assembly. The primary objectives were simplified geometry and a safety factor of at least two for each component used. In addition to general requirements, it was important to consider a floating brake disc for better free rolling and longevity of the brake components as well as addressing the issue of stud bolt failure to make the assembly more robust.

In the next phase, the forces acting on the corner assembly were mapped. The force calculations were based on the maximum tire grip capability from the endurance race data of FEST21 in Hungary. From this data a G-G diagram was created, which served as input for the team's suspension force calculation module developed in MS Excel. The forces acting on the tire contact point and the attachment points of the control arms were determined.

With the known forces it was possible to select the bearings according to their dimensions. SKF 61820 and 61816 bearings used in FEST21 were dimensionally suitable but the 61816 bearing showed repeated signs of fatigue over the season, leading to increased play and reduced free rolling. Based on this experience it was important to recalculate the safety factors for the bearings and position them such that the acting force would be minimized through leverage. An MS Excel calculation module was prepared for the bearings and safety factor calculations were performed for potential bearings. Based on the results SKF 61820 and 61817 bearings were selected.

Requirements for the upright were defined, and a team member started designing the upright accordingly. The motor was placed inside the upright and a cooling water jacket was designed within the upright. This reduced the number of parts but made the upright more complex to manufacture. However, the more complex geometry of the upright

allowed using the rigidity of the AMK motor housing as a rigidity element in the corner assembly.

Due to the larger outer diameter of the outer bearing, the wheel hub and bearing support rings had to be completely redesigned. There are three bearing support rings in total with one designed to carry the forces from the brake disc in addition to fixing the hub. Since the brake discs on FEST21 deformed and compromised the free rolling of the car a floating pin mounting solution was chosen for the brake disc. The design of the other support rings was relatively simplified, with their primary purpose being to fix the bearing to the upright and attach the planet carrier shafts within the upright. Due to the failure of wheel mounting stud bolts in the previous season a shear calculation was also performed for them to check their durability. Since the M8 stud bolt had a safety factor of nearly 40 five M8 stud bolts were chosen to ensure that the wheel nuts could not break the studs when tightened.

Finally, an analysis of the assembly was performed to see the total deflection of all parts and identify the most loaded part in the corner assembly. The deflection is important so that when setting up the suspension the total deflection of the corner assembly can be considered. For example, if it is known that the corner assembly deflects 0.5 degrees dynamically about the vertical axis this can be accounted for during static setup. Identifying the most loaded part provides insight into which components need the most monitoring during vehicle maintenance to detect potential fatigue cracks.

Testing revealed some issues where the designed transmission did not withstand the increased cornering capability. Additionally, the gears failed due to poor heat treatment and manufacturing quality. Although the gear geometry was adjusted based on the test batch the dimensions varied more than anticipated in larger quantities. With the second batch of gears the desired durability was achieved, but the designed fits of the corner assembly parts were lost due to the multiple gear changes. The increased deflection resulted from the reduced fits.

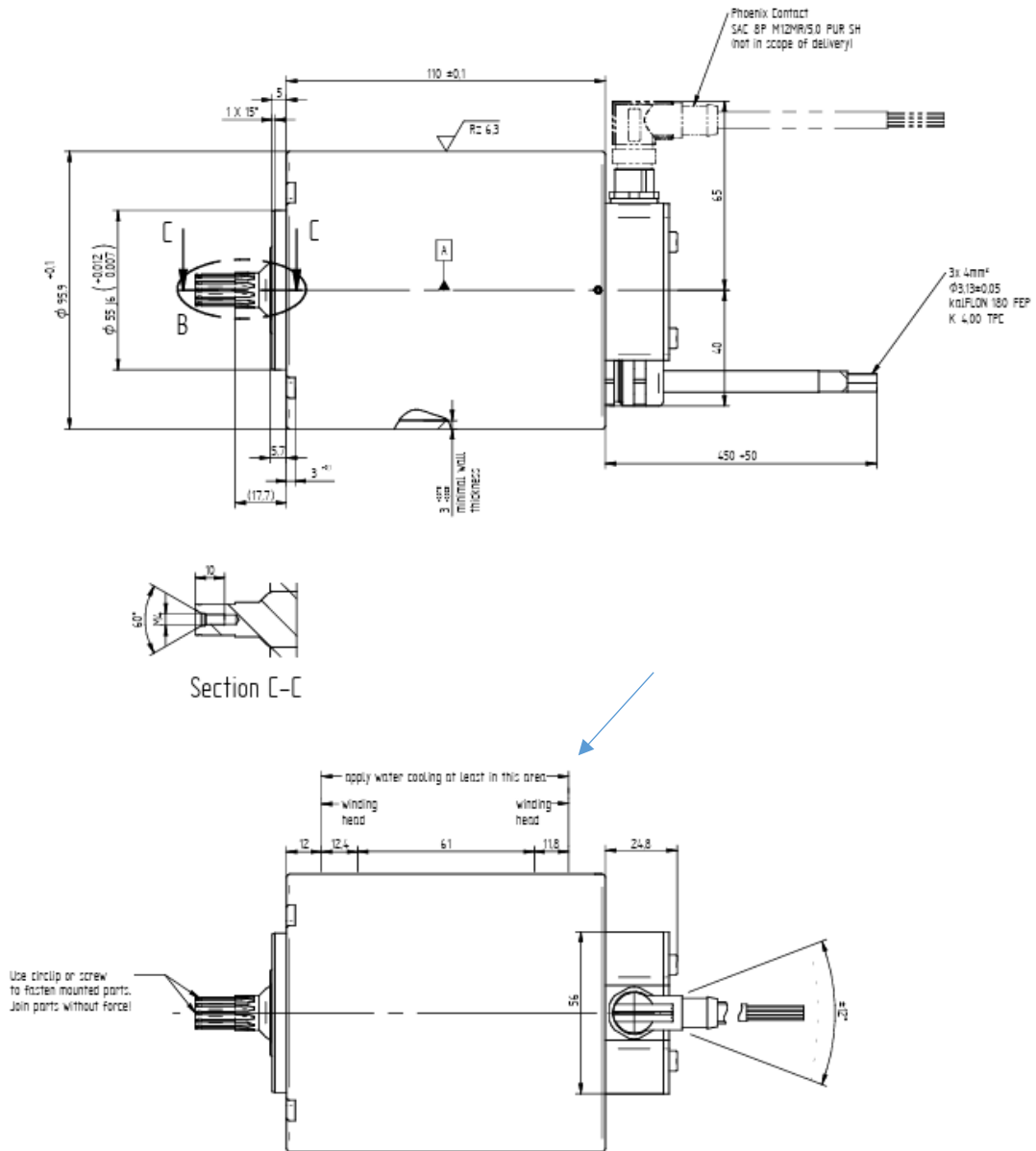
In conclusion, an approximate cost calculation of the corner assembly was performed in the economic part. The design and manufacturing were considered separately for the cost calculation including preliminary activities such as concept creation under design. For manufacturing material costs were calculated separately providing a better overview of cost distribution. The final cost of one corner assembly was approximately 9850 euros with the largest portion being the manufacturing cost.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

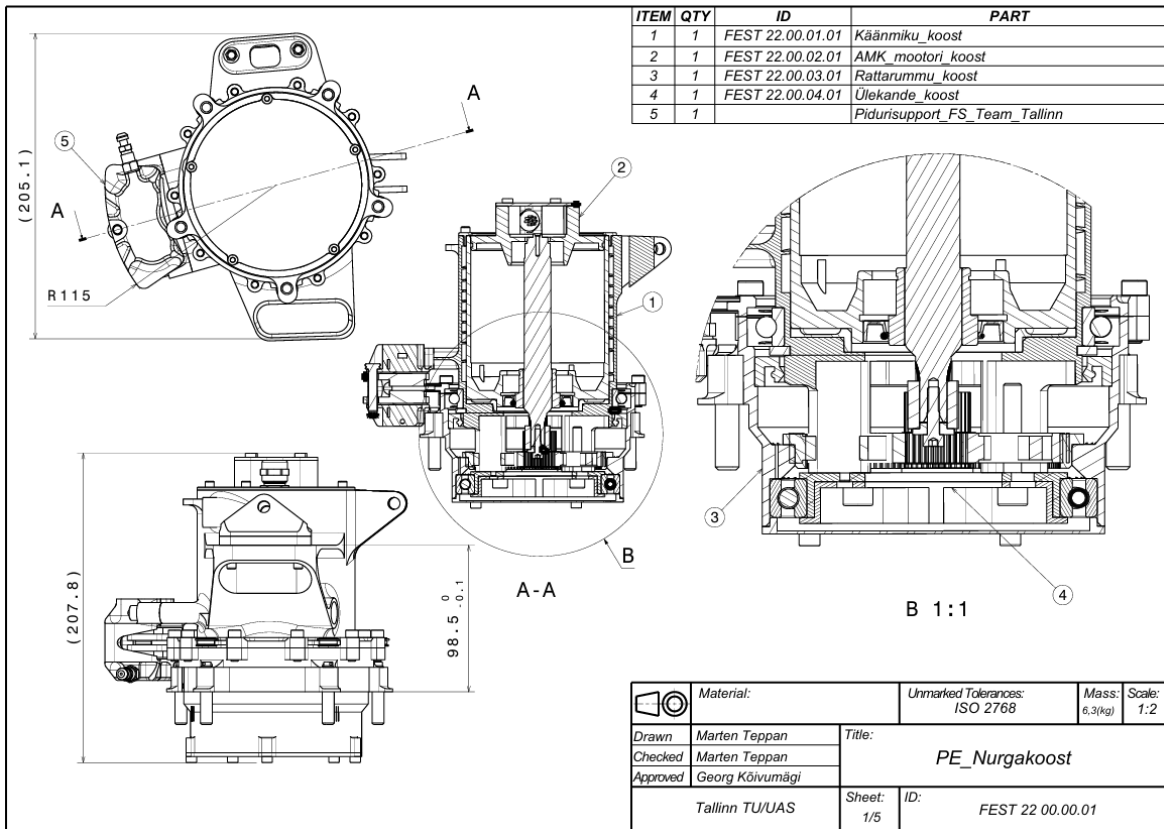
- [1] „Formula Student Germany: Concept”.
<https://www.formulastudent.de/about/concept/> (vaadatud 19. aprill 2024). [www]
- [2] „FORMULA STUDENT TEAM TALLINN”. [www] <https://www.formulastudent.ee/en/>
(vaadatud 19. aprill 2024).
- [3] „Motor-Datenblatt DD5-14-10-POW”.
https://amk-motion.com/sites/default/files/FSE/RK22en/02_Data_Sheets/motor_data_sheet_a2370dd_dd5.pdf [www] (vaadatud 12. aprill 2024).
- [4] „Technical drawing, motor A2370DD”. [www] https://amk-motion.com/amk-dokucd/dokucd/FSE/de/content/resources/pdf-dateien/fse/r06/technical_drawing_motor_a2370dd_dd5.pdf (vaadatud 12. aprill 2024).
- [5] Parker, PH, „Literature and reference materials,” 2024. [Vörgumaterjal]. Available: <https://parker.com/content/dam/Parker-com/Literature/O-Ring-Division-Literature/ORD-5700.pdf> (Vaadatud 3. märts 2024).
- [6] SSAB, „Hardox 450,” 2021. [Vörgumaterjal]. Available: <https://www.ssab.com/en/products/brands/hardox/products/hardox-450>. [Kasutatud 03 aprill 2024].
- [7] Formula Student Germany, GmbH, „Formula Student Rules 2022,” 2024. [Vörgumaterjal]. Available: <https://www.formulastudent.de/fsg/rules/>. [Kasutatud 03 aprill 2024].
- [8] Alumec, „Alloys and their uses,” 2024. [Vörgumaterjal]. Available: <https://www.alumec.com/en/alloys>. [Kasutatud 03 aprill 2024].
- [9] K. Karjust, J. Kers, J. Krustok, P. Kulu, H. Käerdi, A. Laansoo, H. Lend, T. Otto, P. Põdra, J. Riives, M. Saarna, F. Sergejev, T. Tiidemann, R. Veinthal, H. Kerranen, Mehaanikainseneri käsiraamat, Tallinn: TTÜ kirjastus, 2013.

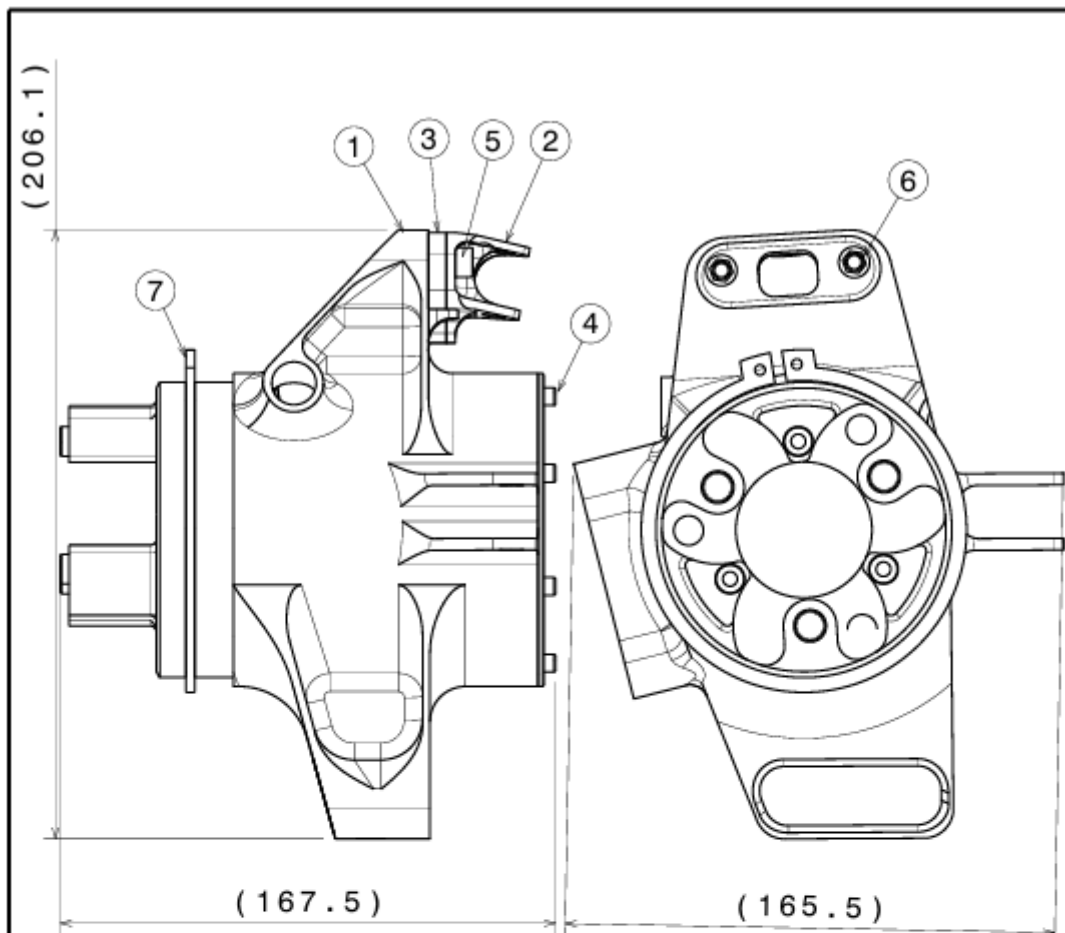
LISAD

Lisa 1 AMK mootori jahutataav osa



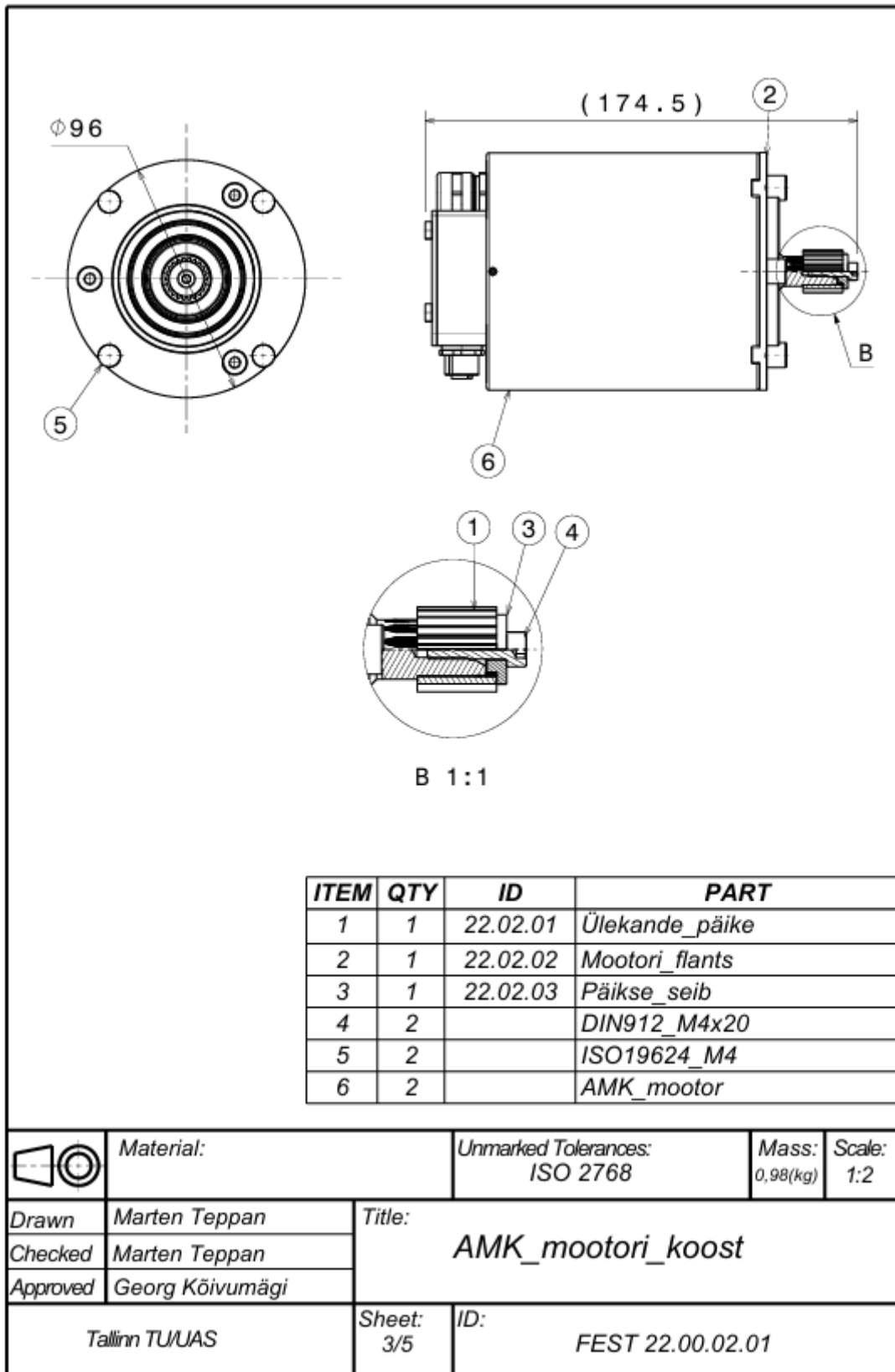
Lisa 2 Joonised

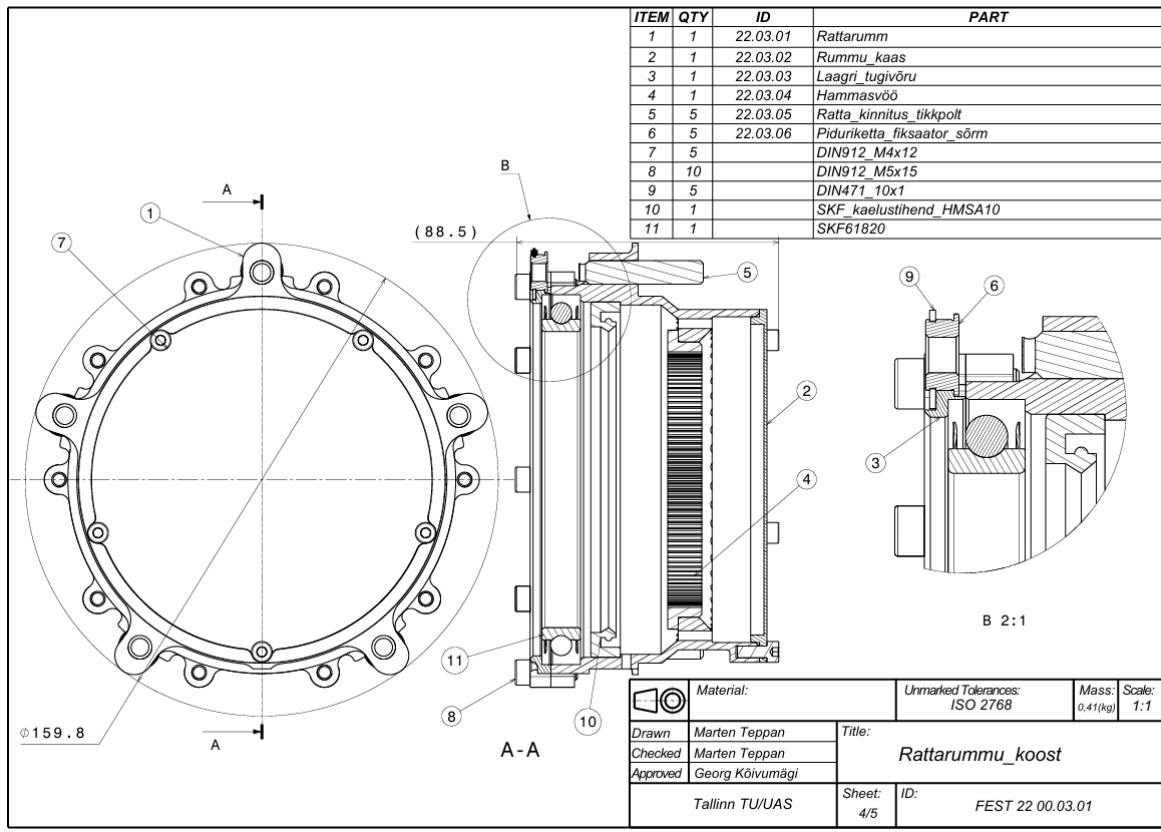




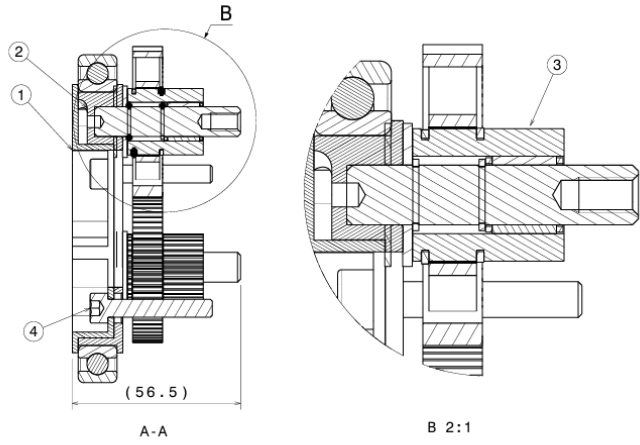
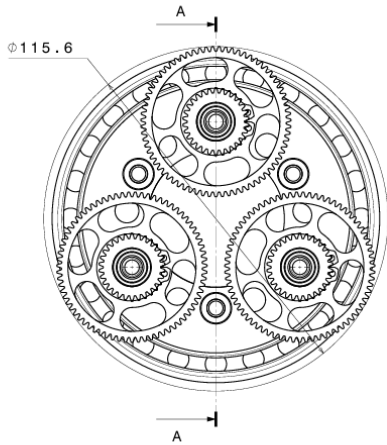
ITEM	QTY	ID	PART
1	1	22.01.01	Käänmik_PE
2	1	22.01.02	Ülemise õõtshoova_kinnitus
3	1	22.01.03	Reguleer_flants
4	2	22.01.04	Jahutuse_mutter
5	2		DIN912_M6x25
6	2		K_nut_M6
7	1		DIN471_100x4

	Material:		Unmarked Tolerances: ISO 2768		Mass: 0,98(kg)	Scale: 1:2
	Drawn	Marten Teppan	Title: Käänmiku_koost			
Checked	Marten Teppan					
Approved	Georg Kõivumägi					
Tallinn TU/UAS		Sheet: 2/5	ID: FEST 22.00.01.01			

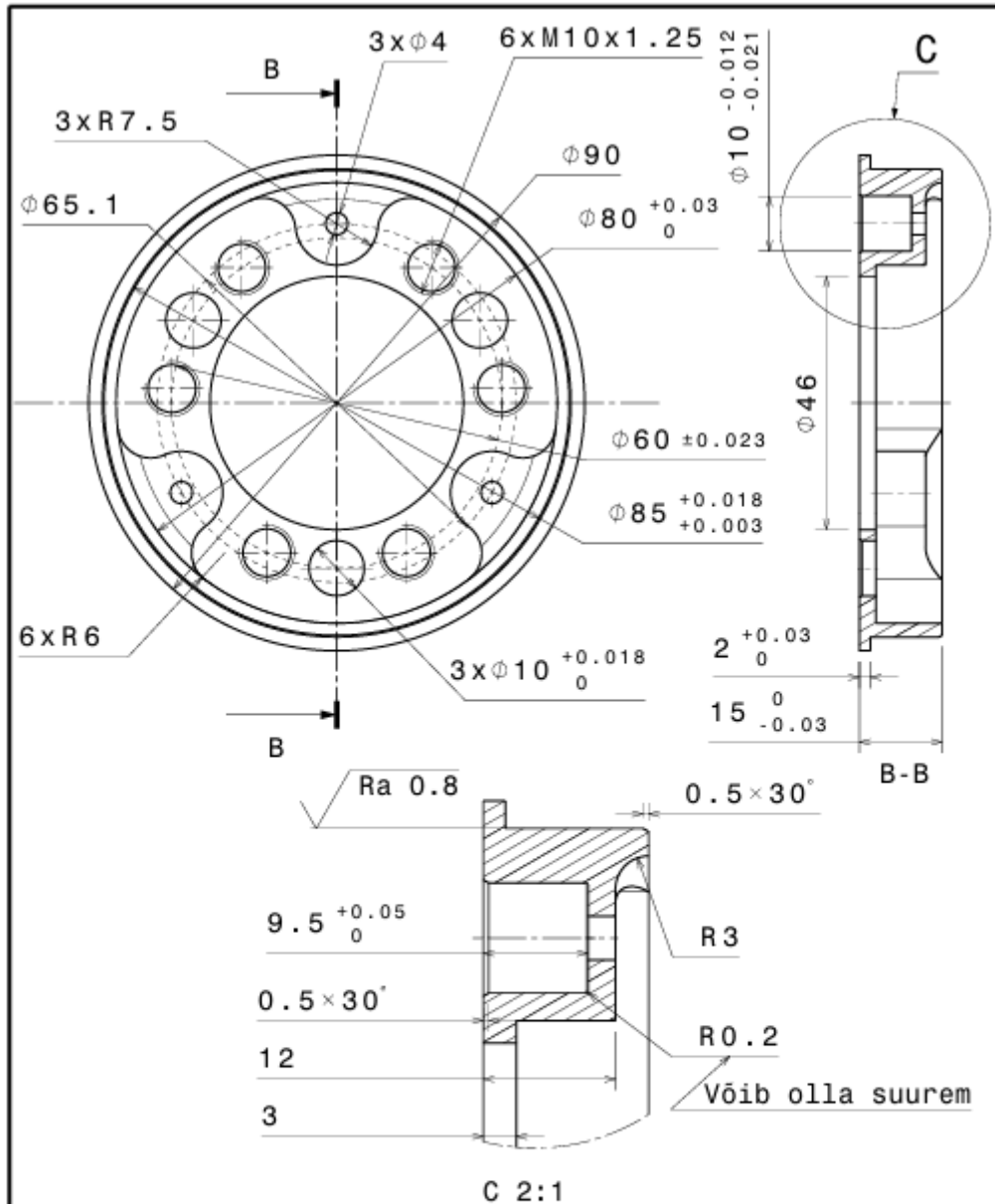




ITEM	QTY	ID	PART
1	1	22.04.01	Välmine laagrikandur
2	1	22.04.02	Sisemine laagrikandur
3	3	22.04.03	Planetaarülekande hammasratta koost
4	3		DIN912_M6x35

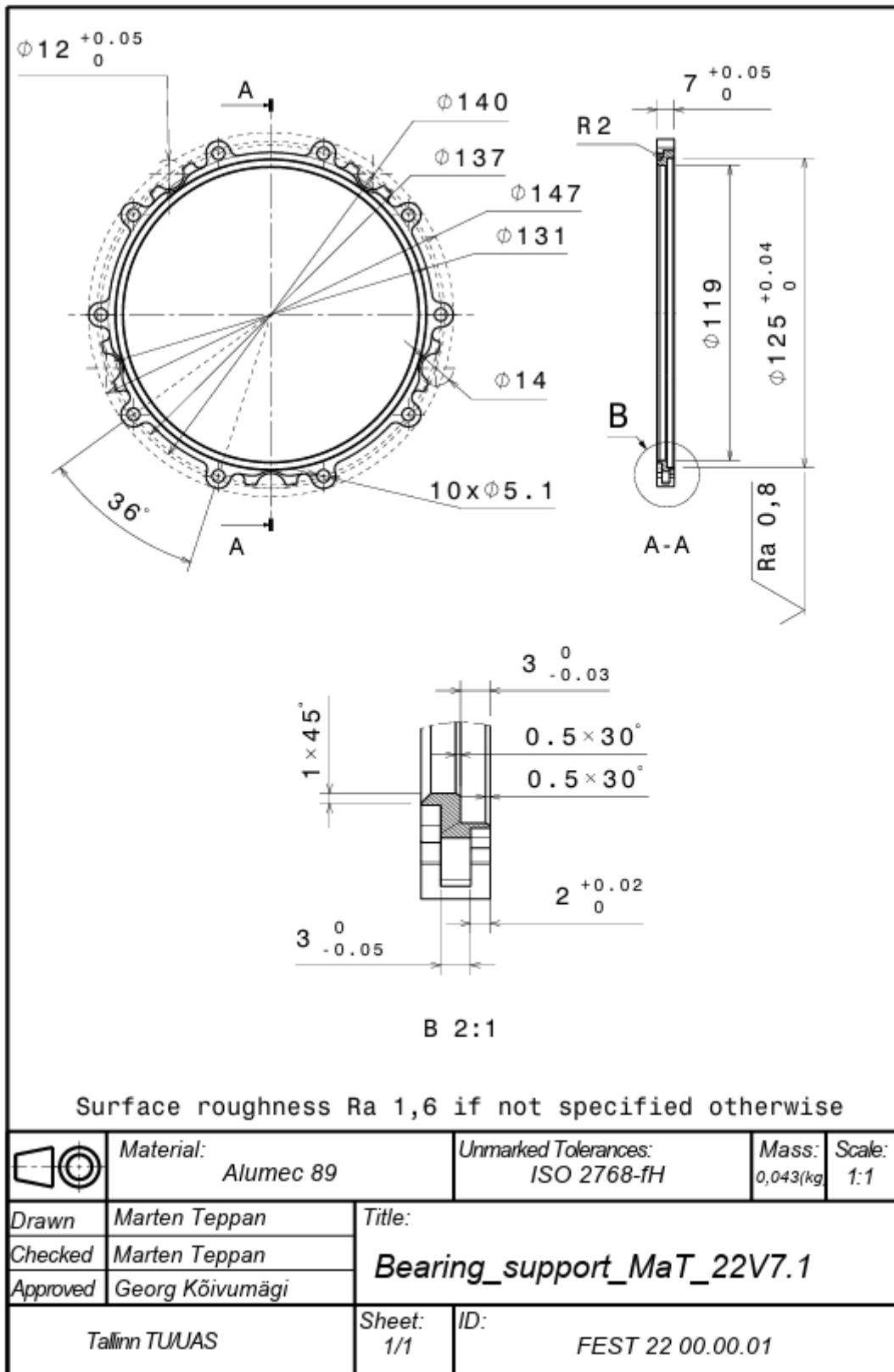


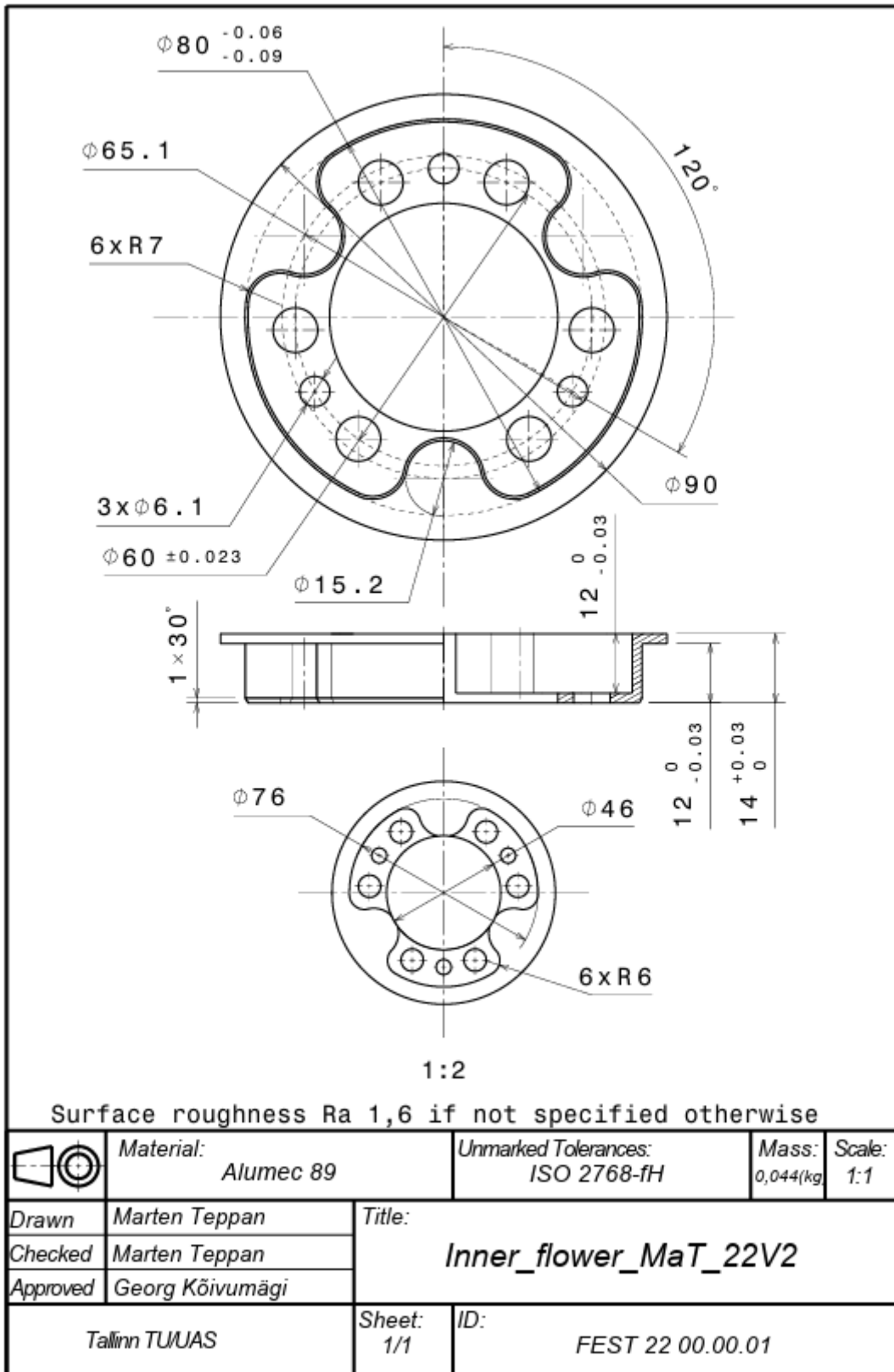
	Material:	Unmarked Tolerances: ISO 2768	Mass: 0.16(kg)	Scale: 1:1
Drawn	Marten Teppan	Title: Ülekande_koost		
Checked	Marten Teppan			
Approved	Georg Kõivumägi			
Tallinn TU/UAS		Sheet: 5/5	ID: FEST 22 00.04.01	

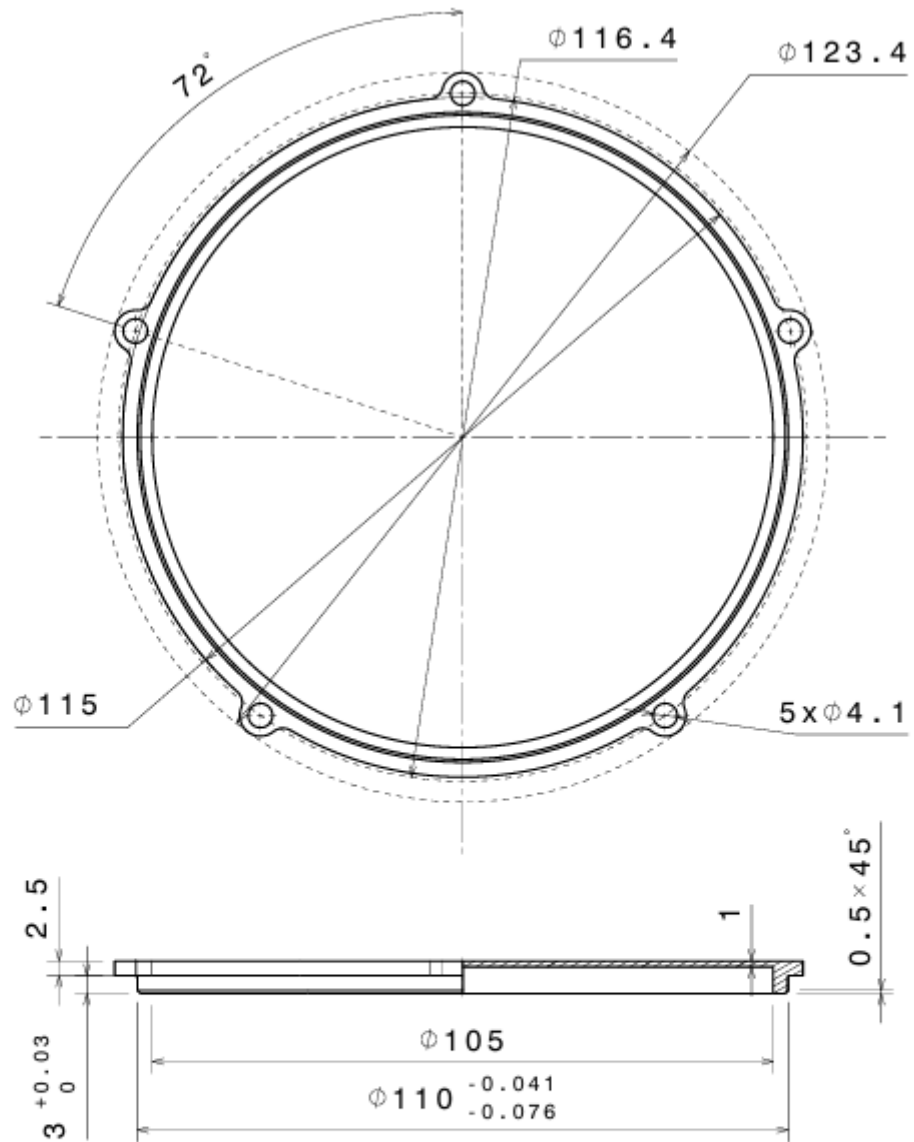


Surface roughness Ra 1.6, if not specified otherwise

	Material: Alumec 89	Unmarked Tolerances: ISO 2768-fH	Mass: 0,066/kg	Scale: 1:1
Drawn	Marten Teppan	Title: Bearing_flower_MaT_22V2		
Checked	Marten Teppan			
Approved	Georg Kõivumägi			
Tallinn TUUAS		Sheet: 1/1	ID: FEST 22 00.00.01	

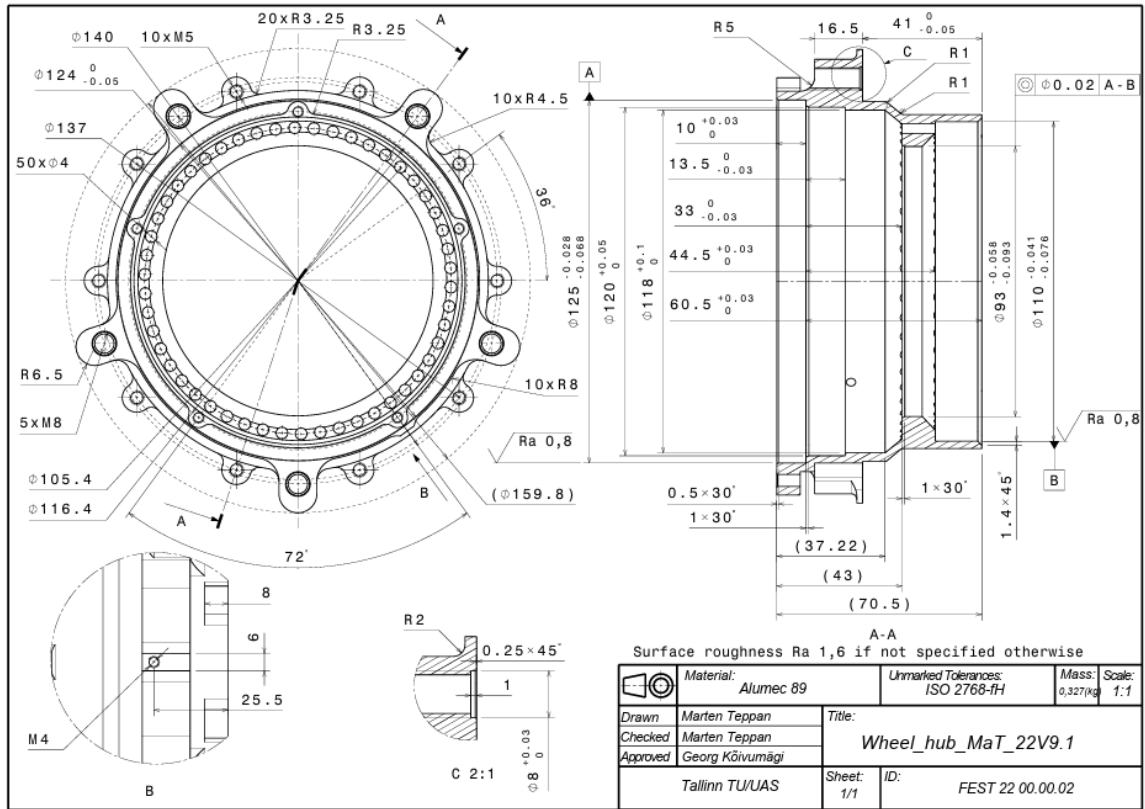


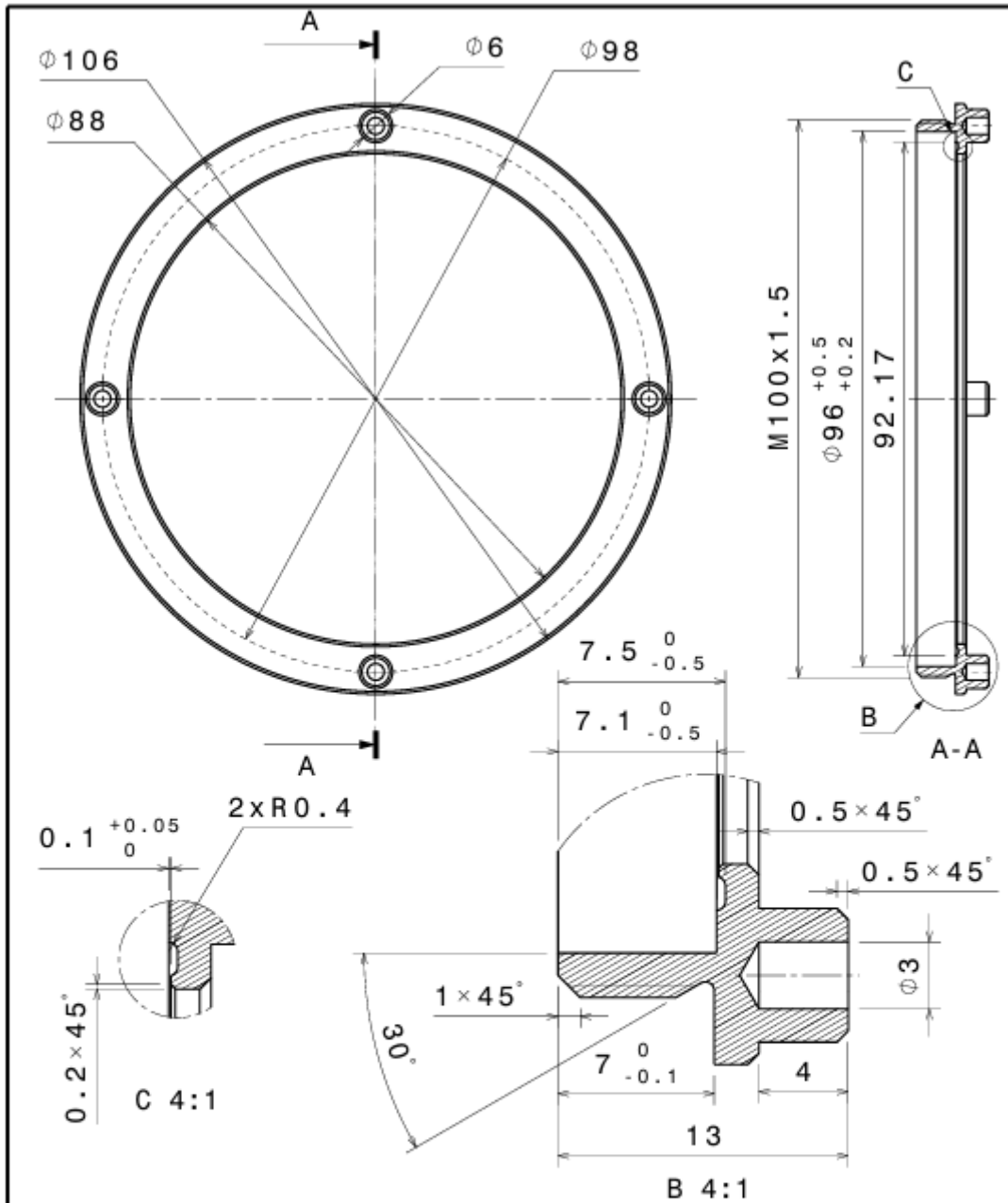




Surface roughness Ra 1.6, if not specified otherwise

	Material: <i>Alumec 89</i>	Unmarked Tolerances: <i>ISO 2768-fH</i>	Mass: <i>0,044(kg)</i>	Scale: <i>1:1</i>
	Drawn <i>Marten Teppan</i>	Title: <i>Wheel_hub_cover_MaT_22V3.1</i>		
	Checked <i>Marten Teppan</i>			
Approved <i>Georg Kõivumägi</i>				
Tallinn TUJAS		Sheet: <i>1/1</i>	ID: <i>FEST 22 00.00.01</i>	





Surface roughness Ra1.6, if not specified otherwise

	Material: Alumec 89	Unmarked Tolerances: ISO 2768-f	Mass: 0,026(kg)	Scale: 1:1	
	Drawn Marten Teppan Checked Marten Teppan Approved Georg Kõivumägi	Title: Cooling_nut_MaT_22V2			
Tallinn TUUAS		Sheet: 1/1	ID: FEST 22 00.00.01		