



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

TUDENGIVORMELI FEST19 KÄÄNMIKE PROJEKTEERIMINE

DESIGNING FORMULA CAR FEST19 UPRIGHTS

BAKALAUREUSETÖÖ

Üliõpilane: Tario Raimond Meerbach

Üliõpilaskood: 164564MAHB

Juhendaja: Martin Eerme, Mehaanika ja
tööstustehnika instituudi professor

Tallinn, 2019

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.

“.....” 201.....

Autor:

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

“.....” 201.....

Juhendaja:

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

“.....”201... .

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE

Autor: Tario Raimond Meerbach

Lõputöö liik: Bakalaureusetöö

Töö pealkiri: Tudengivormeli FEST19 käänmike projekteerimine

Kuupäev: 15.05.19

44 lk (lõputöö lehekülgede arv koos lisadega)

Ülikool: Tallinna Tehnikaülikool

Teaduskond: Inseneriteaduskond

Instituut: Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

Töö juhendaja(d): Professor Martin Eerme

Sisu kirjeldus:

Bakalaureusetöö eesmärgiks on projekteerida 2019 aasta tudengivormelile käänmikud. Projekteerimiseks kasutatakse raalprojekteerimistarkvara CATIA ning tugevusanalüüsiks lõplike elementide meetodi tarkvara ANSYS. Esmalt analüüsitakse eelmise aasta käänmikku, mille põhiprobleemiks on suured läbipainded sõidu ajal. Uuendatud vedrustuspunktide järgi projekteeritakse uus käänmik ning tehakse tugevusanalüüsid. Lõputöö tulemusena vähendati analüüsi järgselt esimeste käänmikute ülemise osa läbipainet 0,81 millimeetri pealt 0,20 millimeetrini.

Märksõnad: tudengivormel, käänmik, lõplike elementide meetod, raalprojekteerimine

ABSTRACT

Author: Tario Raimond Meerbach

Type of the work: Bachelor Thesis

Title: Designing formula car FEST19 uprights

Date: 18.03.2019

18 pages

University: Tallinn University of Technology

School: School of Engineering

Department: Department of Electrical Power Engineering and Mechatronics

Supervisor(s) of the thesis: Professor Martin Eerme

Abstract:

The aim of this bachelors thesis is to design suspension uprights to the FEST19 formula car. For designing computer aided design software CATIA is used. Validation of design is done on finite element method software ANSYS. Analysis was done on the FEST18 uprights, the main issue was the high deformation under load. New uprights were designed to the updated suspension points. Analysis showed reduction of the deformation in the upper wishbone attachment point from 0,81 millimeters to 0,20 millimeters.

Keywords: Formula student, uprights, ANSYS, CATIA, Finite element method

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Lõputöö teema:	Tudengivormeli FEST19 käänmike projekteerimine
Lõputöö teema inglise keeles:	Designing formula car FEST19 uprights
Üliõpilane:	Tario Raimond Meerbach 164564MAHB
Eriala:	Mehhatroonika
Lõputöö liik:	bakalaureusetöö
Lõputöö juhendaja:	Martin Eerme
Lõputöö ülesande kehtivusaeg:	
Lõputöö esitamise tähtaeg:	21.05.2019

Üliõpilane (allkiri)

Juhendaja (allkiri)

Õppekava juht (allkiri)

1. Teema põhjendus

Formula Student sarja eesmärgiks on igal õppeaastal projekteerida ning valmistada võistlussõiduk. Vormelile omaselt peab iga detail olema võimalikult kerge. Iga-aastane sõiduki massi vähendamine lõi olukorra kus FEST18 sõiduki katsetused näitasid, et veermikus on liiga suured läbipained, mille üheks põhjuseks võis olla käänmiku ebapiisav jäikus. Et vormeli veermik töötaks korrektselt, on ülimalt tähtis, et vedrustuspunktid vastaksid projekteeritule ning ei erineks neist ka kurviolukorras. Töö raames analüüsitakse uudseid käänmiku ning kinnituskõrva lahendusi ning luuakse mudel ning joonised, mille alusel käänmik toodetakse.

2. Töö eesmärk

Antud bakalaureusetöö eesmärgiks on projekteerida uutele vedrustuspunktidele käänmikud FEST19 võistlussõidukile, mis oleksid jäigemad kui varasemad lahendused.

3. Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:

Analüüsida FEST18 vormeli käänmikku lõplike elementide meetodi tarkvaraga ANSYS ning välja tuua käänmiku suurte läbipainete põhjuseid. Projekteerida käänmikud vastavalt uutele vedrustuspunktidele ning analüüsida. Likvideerida projekteerimisvead ning muuta käänmikud toodetavaks freesimise läbi.

4. Lähteandmed

Analüüsijärgsete läbipainete eesmärk püstitati koostöös tiimiliikmetega. Käänmikele mõjuvad jõud võeti MS Excel arvutusmoodulist. Käänmiku materjali omadused pärinevad tootja poolt pakutavast andmelehest.

5. Uurimismeetodid

Käänmike tugevusanalüüs teostatakse lõplike elementide meetodi tarkvaras ANSYS. Luuakse uutele punktidele käänmiku mudel ning analüüsitakse taaskord. Katsetatakse erinevaid muudatusi, et näha kuidas muudatus mõjutab analüüsijärgseid läbipaindeid.

6. Graafiline osa

Graafiline osa on peamiselt töö põhiosas ning annab ülevaate, kuidas lõpliku käänmiku disainini jõuti. Lisas on välja toodud A3-formaadis esimese ja tagumise käänmiku tootmisjoonised.

7. Töö struktuur

1. KÄÄNMIKE PROJEKTEERIMISE PIIRANGUD JA LÄHTEANDMED

- 1.1 Käänmik
- 1.2 Vedrustusepunktid
- 1.3 Veljed
- 1.4 Pidurid
- 1.5 Tootmismeetod
- 1.6 Käänmiku materjal

2. FEST 18 KÄÄNMIKU ANALÜÜS

- 2.1 FEST18 käänmiku hinnang
- 2.2 Varasemate käänmikute tugevusanalüüs
- 2.3 Kinnituskõrva analüüs ning modifitseerimine

3. FEST19 KÄÄNMIKU PROJEKTEERIMINE

- 3.1 Projekteerimise lähteandmed
- 3.2 Esimese käänmiku disainimine
- 3.3 Tagumise käänmiku projekteerimine
- 3.4 Täiendav analüüs
- 3.5 Käänmike vead ja lõplik disain

4. KINNITUSKÕRVADE VALMISTAMINE

KOKKUVÕTE

8. Kasutatud kirjanduse allikad

Peamiseks allikaks on võistlussarja reeglistik. Lisaks võistlussarja ajaloost ülevaate andmiseks on viidatud Formula Student Team Tallinna kodulehele. Materjali omadused on pärit Uddeholmi lehelt.

9. Lõputöö konsultandid

Praktilise osa valmimisel olid konsultantideks Formula Student Team Tallinna veermiku tiimi kapten ning kogenumad tiimiliikmed. Teoreetilise osa valmimisel ning analüüside kohta käivates küsimustes abistas lõputöö juhendaja Martin Eerme.

10. Töö etapid ja ajakava

Käänmiku disaini „külmutamine“ (01.12.2018). Käänmike jooniste ning valmis mudelite tootmisesse saatmine (01.01.2019). Kinnituskõrvade valmimise tähtaeg (01.03.2019). Lõputöö teoreetilise osa valmimine(13.05.2019).

SISUKORD

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE.....	3
ABSTRACT	4
LÕPUTÖÖ ÜLESANNE	5
EESSÕNA.....	10
LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU	11
SISSEJUHATUS	12
1. KÄÄNMIKE PROJEKTEERIMISE PIIRANGUD JA LÄHTEANDMED	13
1.1 Käänmik.....	13
1.2 Vedrustusepunktid.....	13
1.3 Veljed	13
1.4 Pidurid	14
1.5 Tootmismeetod.....	14
1.6 Käänmiku materjal	14
2. FEST 18 KÄÄNMIKU ANALÜÜS	15
2.1 FEST18 käänmiku hinnang	15
2.2 Varasemate käänmikute tugevusanalüüs.....	15
2.3 Kinnituskõrva analüüs ning modifitseerimine	18
3. FEST19 KÄÄNMIKU PROJEKTEERIMINE	19
3.1 Projekteerimise lähteandmed	19
3.2 Esimese käänmiku disainimine	19
3.3 Tagumise käänmiku projekteerimine	29
3.4 Täiendav analüüs	31
3.5 Käänmike lõplik disain ja vead	33
4. KINNITUSKÕRVADE VALMISTAMINE.....	36
KOKKUVÕTE	39

SUMMARY	41
KASUTATUD KIRJANDUS	42
LISAD	43
Lisa 1 Käänmike tootmisjoonised	43

EESSÕNA

Antud lõputöö on teostatud tudengivormeli projekti raames. Tiimis on tudengeid nii Tallinna Tehnikaülikoolist kui ka Tallinna Tehnikakõrgkoolist. Lõputöö teema valiti kõrgendatud huvist mehaanika ning tootmistehnika alal ning soovist end õppetöö väliselt proovile panna ning seeläbi saada praktilisi kogemusi inseneeria valdkonnast. Eesmärgid projekteerimisel püstitati koostöös veermiku alamtiimiga.

Soovin tänada kogu veermiku tiimi abivalmiduse, meeldiva seltskonna ning heade soovitude eest. Samuti sponsorit Radius Machining OÜ'd käänmike tootmise eest.

LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU

CAD	Raalprojekteerimine (<i>Computer aided design</i>)
FEM	Lõplike elementide meetod (<i>Finite element method</i>)
NC	Arvprogrammjuhtimine (<i>Numerical control</i>)
CAM	Raaltootmine (<i>Computer aided manufacturing</i>)

SISSEJUHATUS

Formula Student on tootearendusvõistlus mille eesmärgiks on anda tehnikateaduste tudengitele reaalne kogemus võidusõiduauto projekteerimises ning valmistamises. Võistluse idee on pärit Ameerika Ühendriikidest, kus on mõõtu võetud juba ligi 30 aastat. Euroopas on võisteldud alates 1998. aastast. Võistlussari on jõudnud ka Jaapanisse, Austraaliasse ning Brasiiliasse. [1] Võisteldakse üheistmelise vormeliga nii dünaamilistel kui ka staatilistel aladel. Mõõtu võetakse nii sisepõlemismootoriga, elektrimootoriga kui ka isesõitva vormeli (*driverless*) klassis. Dünaamilisteks aladeks on 75 meetri kiirendus, number kaheksa kujulisel raja läbimine, kvalifikatsioonisõit ning juhivahetusega 22-kilomeetrine kestvussõit. Staatilistel aladel hinnatakse vormeli tehnilisi lahendusi, kuluaruannet ning projekti äriplaanina. [2] Formula Student Team Tallinn on tegutsenud alates 2006. aastast. Meeskond on korduvalt olnud võidukas üleeuroopalistel võistlustel. Antud töö puudutab elektrivormeli ehitamist, kuigi 2019. aastaks on püstitatud ka ambitsioonikas eesmärk võistelda mehitamata sõidukiga *driverless* klassis FEST18 baasil ehitatud vormeliga. [1]

2013 valmistati tiimis esimene elektrivormel. Alates 2015. aastast on vormelauto igal rattal oma elektrimootor, mida juhitakse kontrolleri abil. Käänmiku laagrikorpuse sees on planetaarülekanne ning käänmiku külge kinnituvat tagakaane külge kinnitub ka mootor ning jahutuskorpus.

Antud lõputöö raames projekteeritakse FEST19 käänmikud uutele vedrustuspunktidele. Töö eesmärgiks on disainida käänmik, mis oleks jäigem kui varasemad kuid samas on ka kerge ning peaks vastu tervele võidusõiduhooajale. Bakalaureusetöö teostamisel omandatakse praktilisi kogemusi detailide projekteerimisest, tugevusanalüüsist programmis ANSYS ning piirangutest detaili valmistamisel freesimise läbi.

1. KÄÄNMIKE PROJEKTEERIMISE PIIRANGUD JA LÄHTEANDMED

1.1 Käänmik

Käänmiku ülesandeks on ühendada rattarumm õõtsade kaudu vormeli kerega. Esimene ning tagumine käänmik on erinevate kinnituspunktide tõttu erinevad. Projekteeritakse ainult parema poole detailid, mis hilisemalt peegeldatakse, seega on kõik 4 käänmikut erinevad. Käänmiku ülemine kinnituskõrv on vaheplaatidega reguleeritav, et ratta külgakallet saaks vajadusel reguleerida. Käänmiku keskmine osa on omakorda ülekandekorpuseks, ülekandearvu muutumise tõttu muutus võrreldes eelmise aasta käänmikuga keskmise osa diameeter väiksemaks. Ülekandekorpuse ning laagrite tugipindade mõõdud pandi paika ülekandega tegeleva tiimi liikme poolt. AMK elektrimootori kinnitamiseks käänmiku külge kasutatakse teise tudengi poolt projekteeritud tagakaant. Tootmise lihtsustamiseks on kõik 4 tagakaant ühesugused, ning käänmiku projekteerimisel tuleb jälgida, et kinnitused asuks samas asendis kõigi nelja käänmiku külge.

1.2 Vedrustusepunktid

Vormelil kasutatakse topeltõõtshoobadega tõukurvarrastega vedrustust. Võistlussarja reeglite järgi peab vedrustuse käik olema vähemalt 50 mm ning auto kere madalaim koht vähemalt 30 mm kõrgusel maapinnast. [2] Tiimi kinemaatikainsener paneb paika vedrustusepunktid ning modifitseerib MS Excel arvutusmoodulit, et leida jõud, mis mõjuvad õõtshoobadele. Käänmike toimimise seisukohalt on tähtis, et vedrustuspunktid vastaksid tegelikkusele ning sõiduolukorras ei tohi kinnituspunktide asukohad läbipainete tõttu liialt muutuda. Meeskonnaga koostöös püstitati eesmärk saada analüüsijärgsed maksimaalsed läbipained alla 0,1 mm. Ülemise kinnituspunkti reguleerimise vahemaaks lepiti kokku mõlemas suunas 5 mm.

1.3 Veljed

Vormeli all kasutatakse kolmeosalisi 10 tollise läbimõõduga velgi, mille veljevõru on valmistatud süsinikkiust. Veljetsentrid projekteeriti tiimiliikme poolt ning toodeti sponsorettevõttes. Vedrustusepunktide määramisel on oluline, et õõtshoovad ja tõukurvardad ei puutuks üheski asendis kokku veljevõruga. FEST18 vormeli käänmikul tekkis probleem ülemise õõtsa kinnituspoldi ja velje ebapiisava vahega. Lahendusena lihviti poldipead madalamaks, kuid uue käänmiku projekteerimisel sooviti vältida õõtsade, käänmikute ja muude detailide kokkupuuteid. CAD-mudelist mõõdeti velje sisemiseks diameetriks 230 mm, seega käänmiku ning kinnituskõrva kõige kaugem punkt peaks seega jääma alla 115 mm kaugusele ülekandekorpuse tsentrist.

1.4 Pidurid

Käänmiku külge projekteeritakse pidurisuportite kinnitused. Kasutatakse ISR pidurisuporteid, esiteljel neljakolvilisi ning tagateljel kahe kolviga. Kasutatakse samu pidurisuporteid mis FEST18 vormelil. Rattarummu külge kinnitatakse piduriketas ujuvate puksidega, mis lubab ketta asendi mõningat muutust. Käänmiku projekteerimisel tuleb arvestada, et jääks piisavalt ruumi ketta ning käänmiku osade vahele.

1.5 Tootmismeetod

Käänmikud toodetakse freesimise teel sponsorettvõttes. Valmis freesitud detail pritsitakse klaaskuulpritsis, et saada matt pinnaviimistlus ning samas vähendatakse sellega pinnadefekte. Ülemised kinnituskõrvad toodetakse tiimi enda poolt Tallinna Tehnikakõrgkooli freespinkidel. Kinnituskõrvade tootmiseks vajalik freespingi NC-programm teostatakse töö autori poolt tarkvara Fusion360 abil. Kuna käänmikud ja kinnituskõrvad freesitakse, on projekteerimise lõppfaasis vaja jälgida, et sisenurkade raadiused oleks piisavalt suured. Mudelis ei tohi olla kohti, kuhu freesiga töötlemata ei mahu. Koostöös sponsorettvõtte töötajatega vaadatakse mudel üle ning vajadusel modifitseeritakse kohti, mis ei ole hõlpsalt freesitavad.

1.6 Käänmiku materjal

Käänmiku ning kinnituskõrvade valmistamise materjalina kasutatakse alumiiniumsulamit Uddeholm Alumec 89. Sulamit on kasutatud vormeli ehitusel juba aastaid ning tiimil on head kogemused materjali kasutamisel. Alumec 89 on väga hea löiketöödeldavusega kõrgtugev sulam. Lehtmaterjali paksusega 10-50 mm voolepiir on 550 N/mm^2 , seega on materjal tõmbetugevuse poolest suurepärase käänmike valmistamiseks, tihedus 2830 kg/m^3 tagab aga detailide väikese massi. Projekteerimisel tuleb arvestada, et materjali elastsusmoodul on 71500 N/mm^2 , mis on ligi 3 korda madalam kui terasel ning seetõttu on detaili jäikus madalam, kui terasest toodetul. [3]

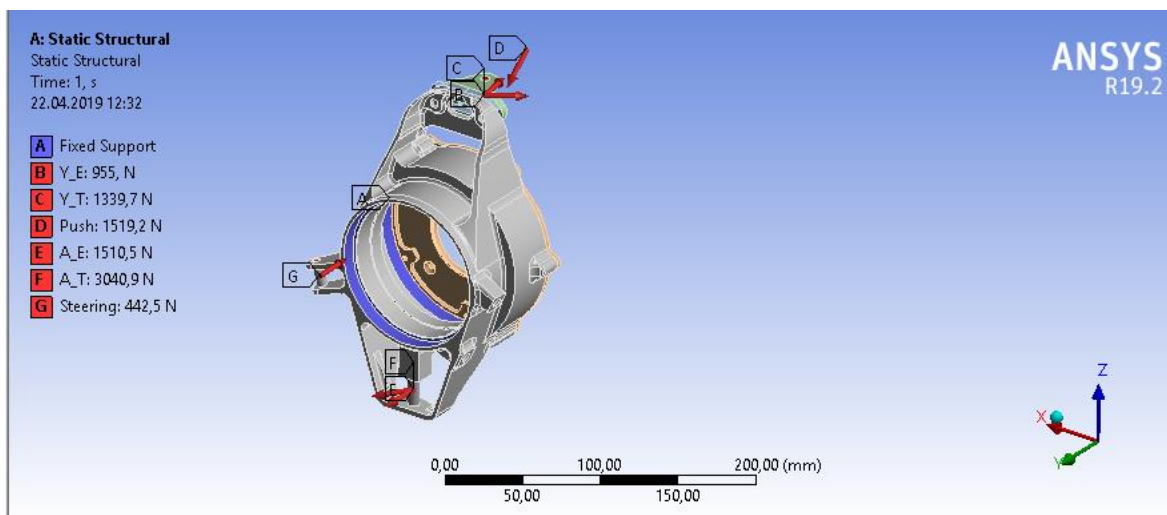
2. FEST 18 KÄÄNMIKU ANALÜÜS

2.1 FEST18 käänmiku hinnang

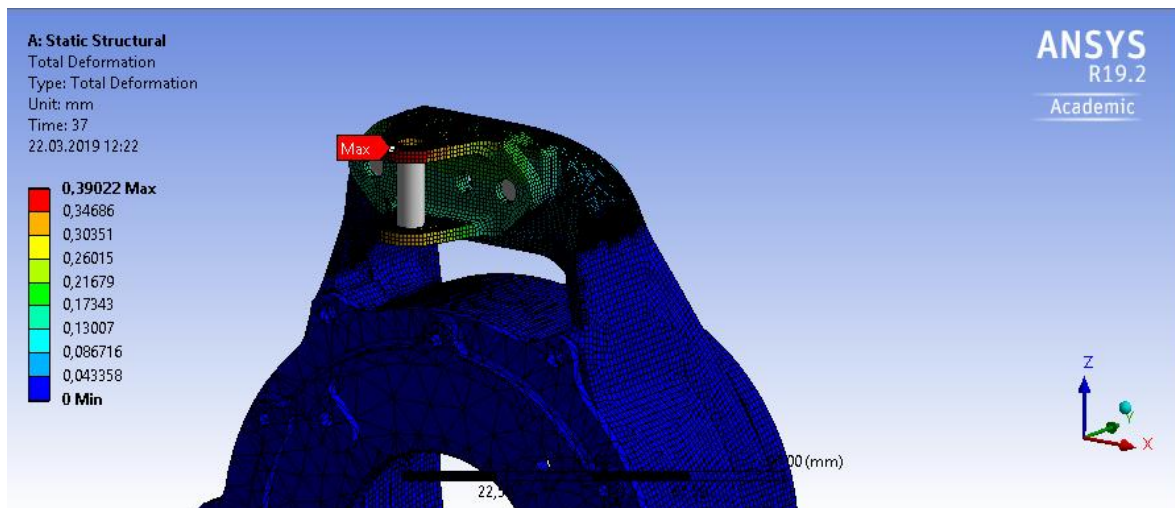
FEST 18 käänmikud toimisid korrektselt terve hooaja ning ei näidanud märke väsimuspragude tekkest. Sellest järeldati, et pingete analüüsi programmis ANSYS võib kasutada uue käänmiku projekteerimisel. Roolivarda ja käänmiku alumise poole vahele jäi ebapiisav vahe ning uue käänmiku projekteerimisel sooviti, et antud probleem lahendataks. Pidev iga-aastane nurgakoostu massi vähendamine lõi olukorra, kus käänmiku ja ülemise kinnituskõrva jäikus ei olnud piisav.

2.2 Varasemate käänmikute tugevusanalüüs

Käänmiku analüüsimiseks kasutati tarkvara ANSYS. Analüüsi ning projekteerimist alustati esimese parempoolse käänmikuga. Analüüsimisel käänmiku laagripinnad fikseeritakse kasutades *fixed support* funktsiooni. CAD- mudelis loodi iga kinnituspunkti juurde teljestikud, kus x-telg vastas õõtsa sihile. Nii sai hõlpsalt rakendada käänmikele õõtsasihilised jõud kasutades *Remote force* funktsiooni. Jõudude arvväärtused võeti *MS Excel* arvutusmoodulist. Esmasel analüüsil kasutati poltide asemel virtuaalsete poltide loomise *Beam* funktsiooni, kuna see kiirendab oluliselt analüüsi aega. Analüüsis kasutati 37 erinevat jõudude kombinatsiooni ning tulemustest valiti suurima läbipainde korral mõjuv jõudude kombinatsioon.

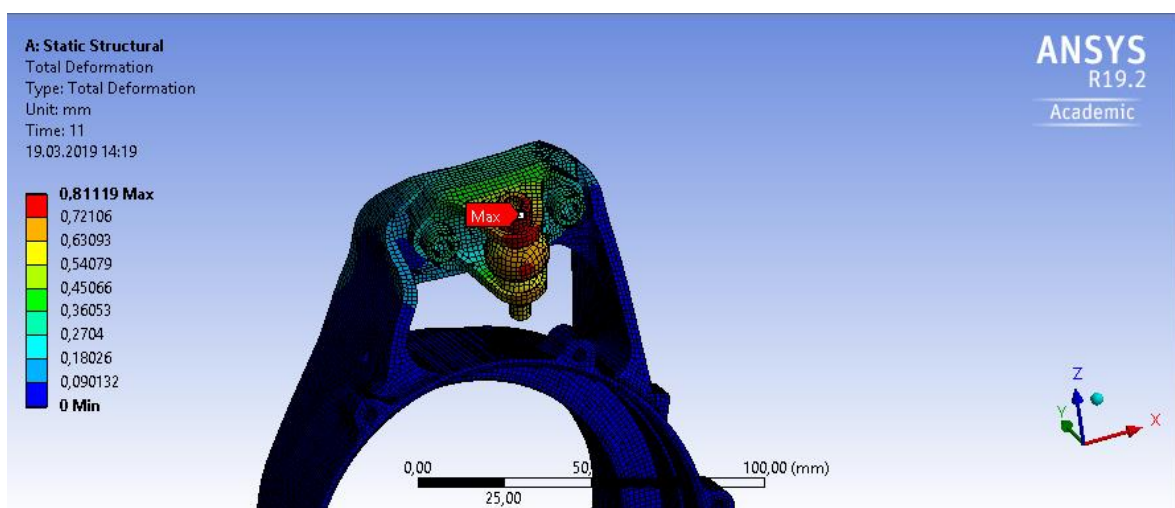


Joonis 2.1 Rajatingimused analüüsil



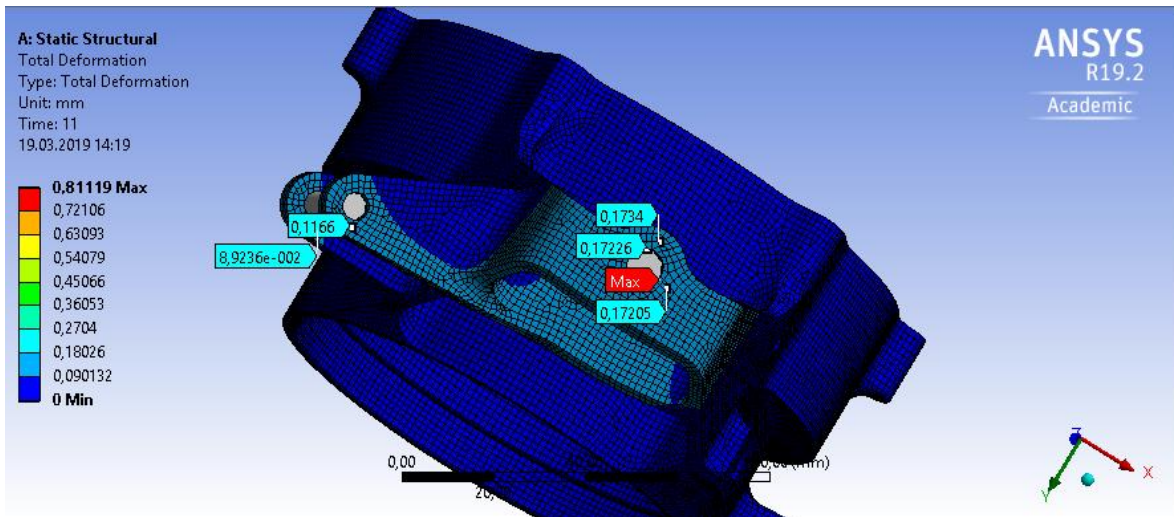
Joonis 2.2 FEST18 käänmiku maksimaalne läbipaine virtuaalsete poltidega

Teise analüüsina lisati CATIA koostu keskkonnas ülemise kinnituskõrva poldid ning mutrid lihtsustatud mudelina, kus poltidel ja mutritel puudus keere. Kinnituskõrva vahele lisati koostus koonusseibide ja vedrustuse kuulliigendi mudel. Analüüsis kasutati *Beam* funktsiooni asemel polte koos *pretension* funktsiooniga. Kasutatakse 1,5 mm suurusega *hex dominant* tüüpi Meshi. M6 poldil kasutati eelpingestamise tõmbejõudu 13500 N ning jõud kantakse poldile 10 astmega. Kõik peale poldi ja mutri vahelise kontakti defineeritakse funktsiooniga *frictional*, kasutades hõõrdetegurit 0,2. Poldi ja mutri vaheline kontakt defineeritakse *bonded* funktsiooniga, mis ei lase mutril poldi suhtes liikuda.



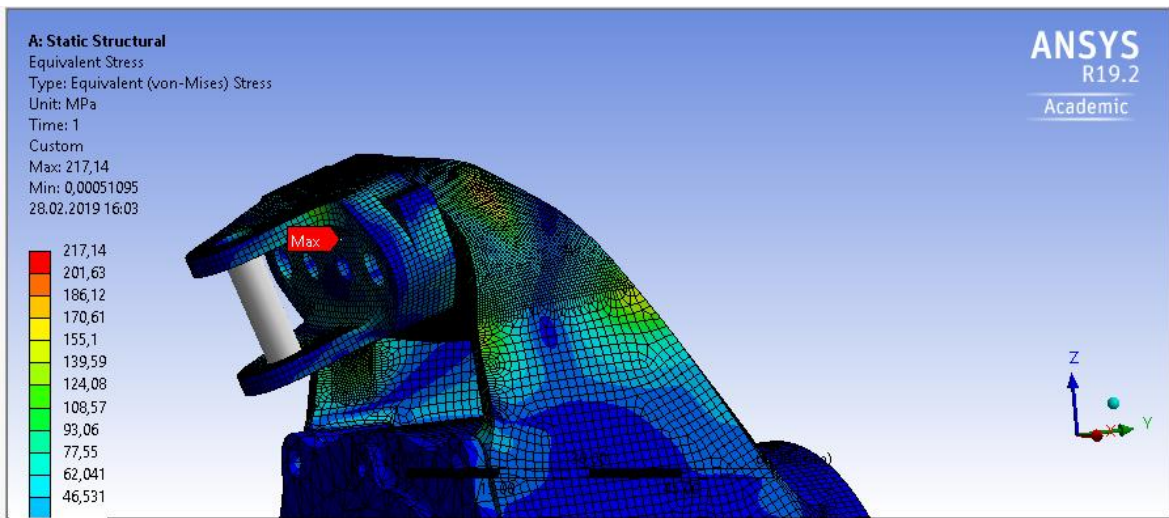
Joonis 2.3 Ülemise kõrva läbipained 20 kordse võimendusega eelpingestatud poltidega

Analüüsi tulemus 0,81 mm (joonis 2.3) annab mõista, et suur osa veermiku läbipainetest on pärit käänmikust ja ülemisest kõrvast. Arvesse tuleb võtta ka asjaolu, et virtuaalsete poltidega ning eelpingestatud poltidega analüüside tulemused on suure erinevusega.



Joonis 2.4 Käänmiku alumise kõrva ja roolivarda kinnituse läbipaine 20 kordse võimendusega

Analüüs näitab, et ka käänmiku alumise kõrva läbipaine ületab eesmärgina püstitatud 0,1 mm. Töö autori hinnangul saaks vähendada läbipainet ka roolivarda kinnituskõrval. Uue käänmiku projekteerimisel tuleb seetõttu lisada materjali nii roolivarda kinnituskõrvale kui ka alumisele kinnituskõrvale.

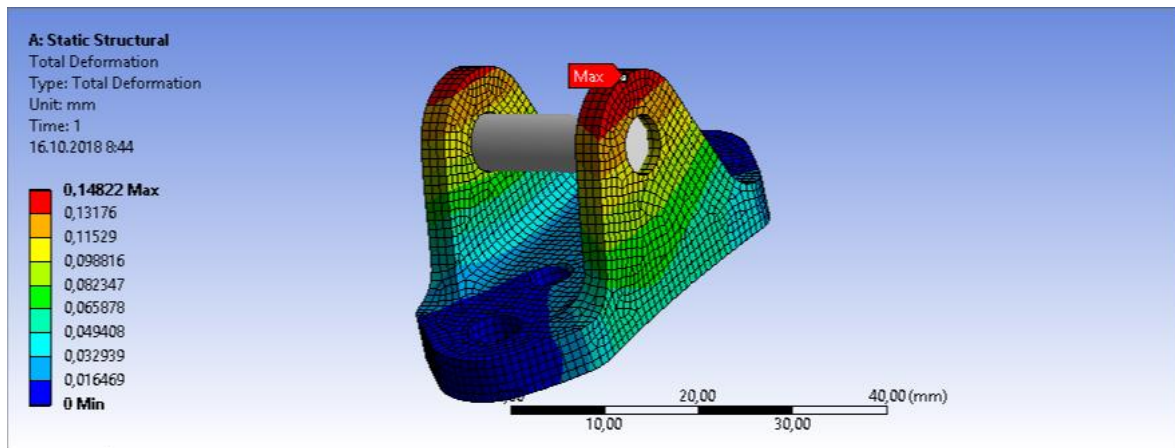


Joonis 2.5 Pinged käänmiku ülemises otsas

Suurte läbipainete põhjuseks võib olla suurte pingetega alad käänmiku ülemise kinnituskõrva ja tsentri vahel olevate püstiste ribide servade ligidal. Pingeid ja sellega ka läbipaindeid saaks vähendada ribide paksuse suurendamisega. Lisaks võib ülemisest otsas teha ribi laiemaks, et viia materjali painde keskteljest kaugemale.

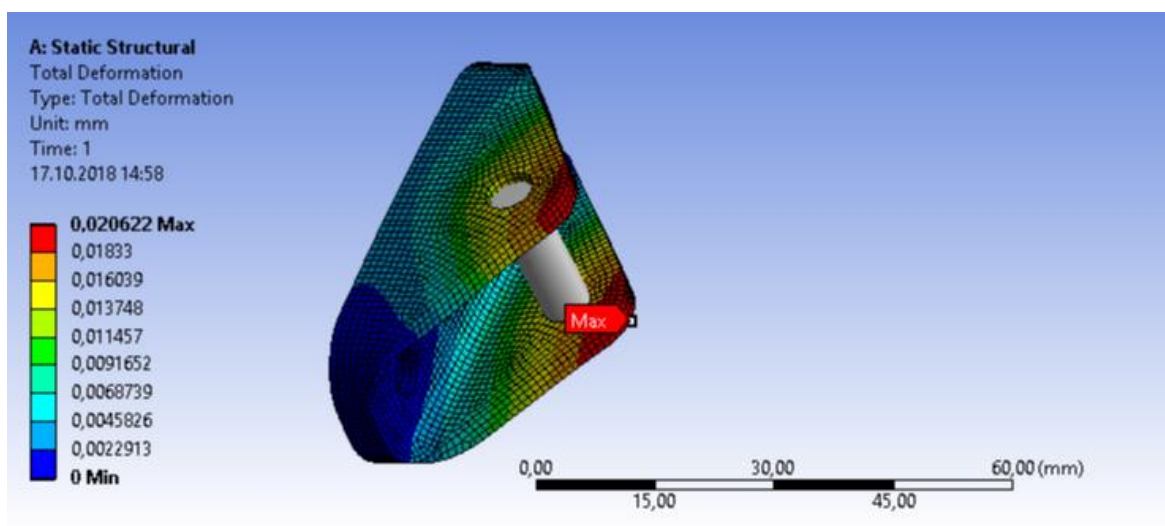
2.3 Kinnituskõrva analüüs ning modifitseerimine

FEST18 ülemise kinnituskõrva peal viidi läbi eraldi analüüs. Kinnituskõrv kinnitati *fixed support* funktsiooniga poldiavadest. Antud analüüs peaks ilmestama reaalset olukorda, kus kinnituskõrv on kinnitatud poldidega. Analüüsis kasutati kõiki ülemisele kõrvale mõjuvad jõude.



Joonis 2.6 Ülemise kõrva läbipaine, kinnitatuna poldiavadest

Analüüsist selgub, et suur osa läbipaindest tekib juba kinnituskõrvas endas. Kuna antud hetkeks uued vedrustuspunktid ei olnud veel lõplikult paigas ning uue käänmiku projekteerimisega veel ei saanud alustada, siis katsetati kõrva muudatusi. Uus analüüs identselt eelmisele teostati ning leiti, et minimaalne muutus muutis väga drastiliselt kõrva läbipainet 0,148 mm (joonis 2.6) pealt 0,02 millimeetrini (joonis 2.7).

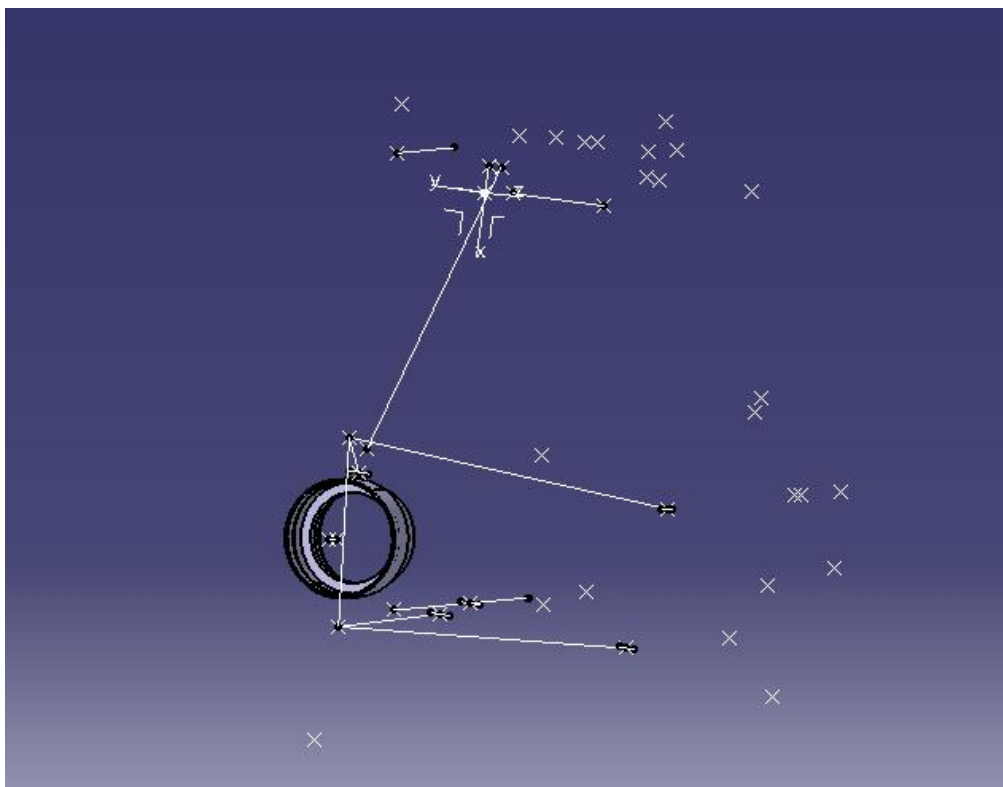


Joonis 2.7 Muudetud kinnituskõrv sarnasel analüüsil

3. FEST19 KÄÄNMIKU PROJEKTEERIMINE

3.1 Projekteerimise lähteandmed

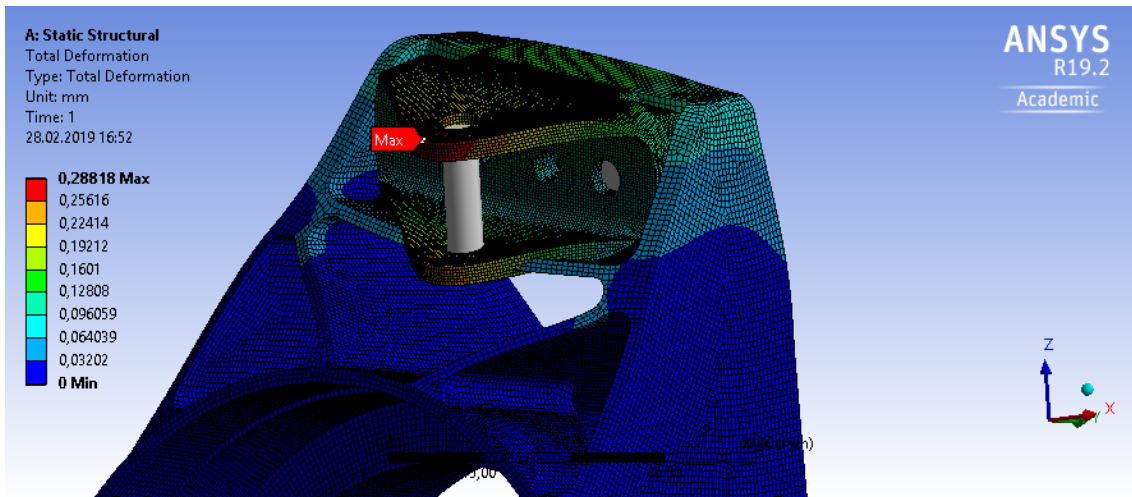
Kinemaatikainseneri poolt kinnitatud punktidele disainiti uus käänmik. Töö autor sai tiimiliikmetelt koostu, kus oli kokku viidud ülekandekorpus, mis on käänmiku keskosas ning vedrustusepunktid.



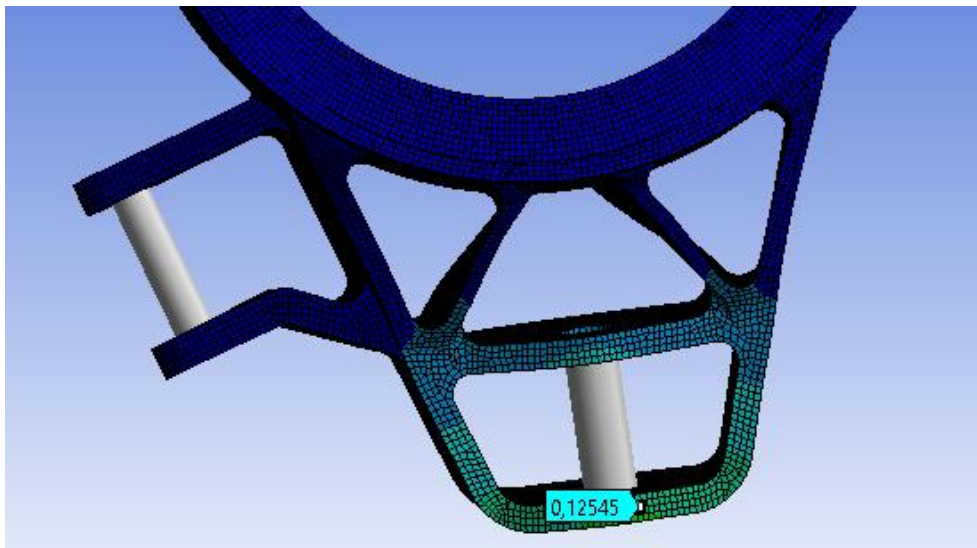
Joonis 3.1 Käänmiku projekteerimise lähtemudel

3.2 Esimese käänmiku disainimine

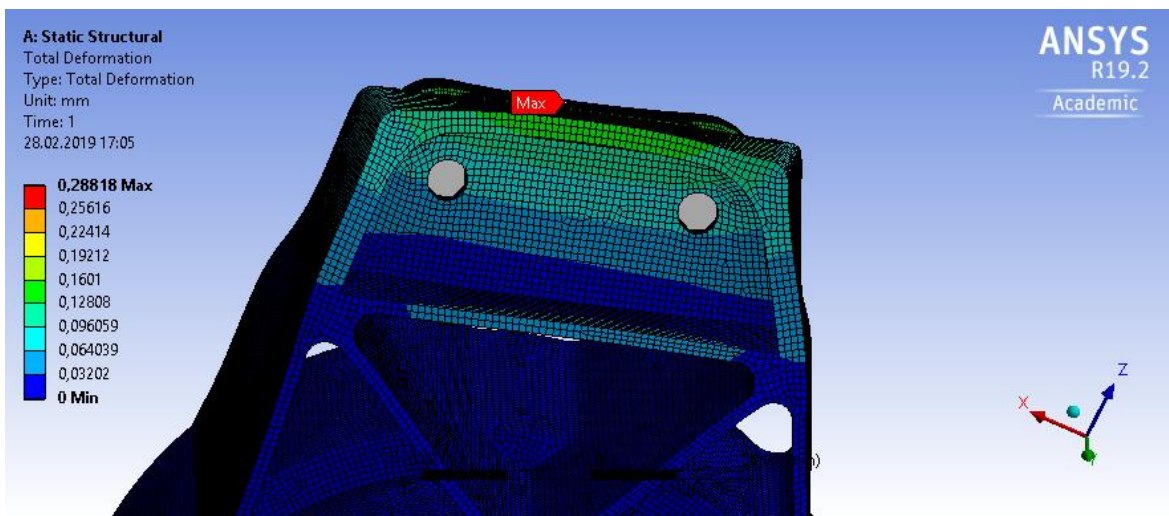
Õõtshoova kinnitamise poldiava tsentri kaugus kinnituskõrva põhjast mõõdeti eelmise aasta mudelist. Uue käänmiku projekteerimisel üritati kasutada võimalikult palju sirgeid seinu, et jõudude mõjumisel piki detaili osa ei tekiks painutavat momenti. Ülemisele ja alumisele poolele lisati ka diagonaalsed tugevdusribid. Jõudude arvutuse tabelit modifitseeriti uute punktide jaoks ning seejärel arvutati uued jõud. Koostati analüüs uue käänmiku jaoks sarnaselt eelmistele analüüsidele. Algse disainimise jaoks kasutati taaskord virtuaalseid polte *beam* funktsiooni näol. Kinnituskõrva ja vaheplaadi vahel kasutati *bonded* kontakti ning vaheplaadi ja käänmiku vahel *no separation* kontakti, mis lubab pindadel üksteise suhtes nihkuda, kuid pinnad ei eemaldu üksteisest.



Joonis 3.2 Uue käänmiku esimese variandi ülemise otsa läbipaine

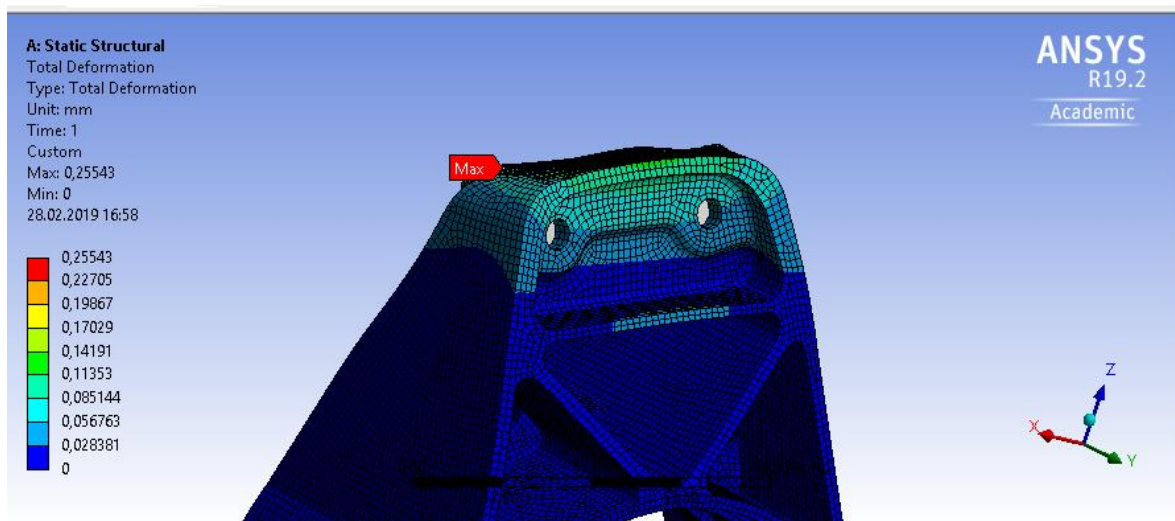


Joonis 3.3 Esmase käänmiku alumise otsa läbipaine



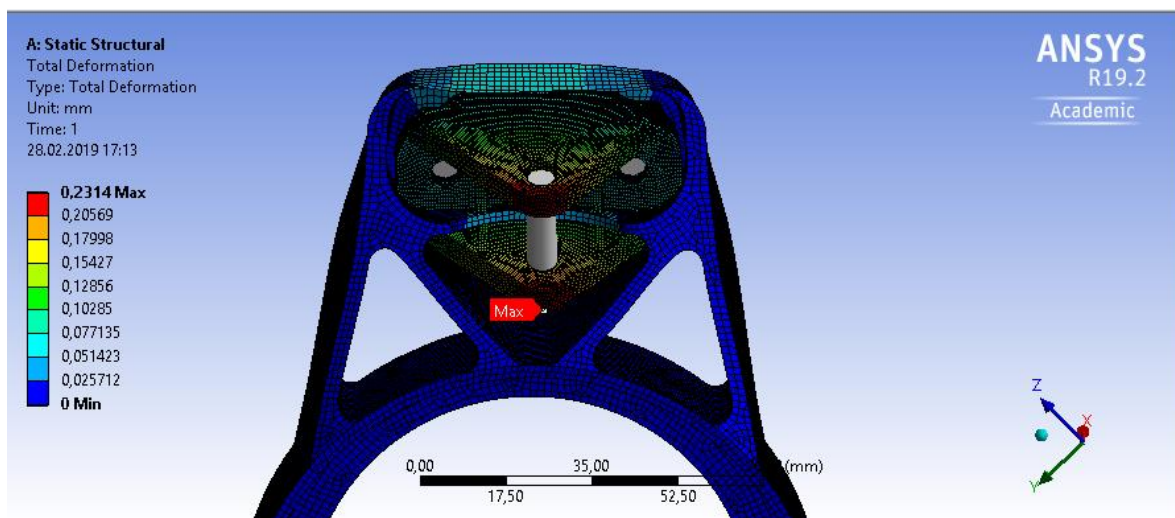
Joonis 3.4 Esmase käänmiku ülemise osa tagumine vaade

Analüüsist selgub, et esialgne käänmik on jäigem, kui varasem käänmik. Maksimaalne deformatsioon 0,39 mm (joonis 2.2) on vähenenud 0,28 millimeetriini (joonis 3.4). Alumise kinnituskõrva läbipaine on vähenenud 0,05 mm (joonis 2.4 ja joonis 3.3). Käänmikul tehakse mõned muudatused ülemise kinnituse koha pealt, lisatakse materjali poldiavade ümbrusesse tagumisel küljel. Muudetakse ka ribide seinapaksusi suuremaks. Seejärel analüüsitakse mudelit samade jõududega. Kogu disainimise vältel hoitakse kogu analüüsi parameetreid võimalikult sarnased, et näha kuidas üksikud muutused mõjutavad detaili läbipainet ja pingeid.



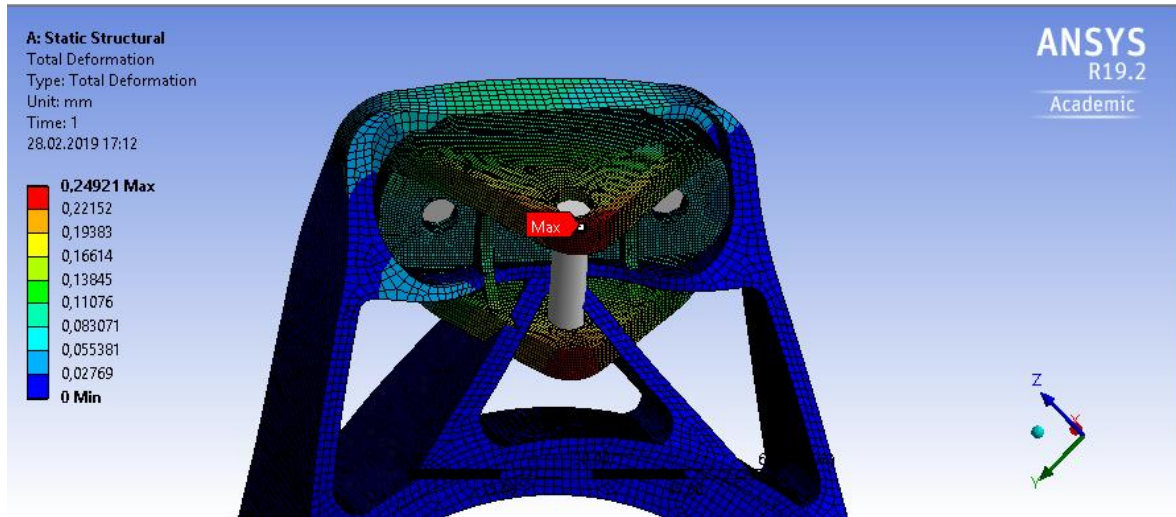
Joonis 3.5 Muudetud seinapaksuste ja lisamaterjaliga käänmiku läbipaine

Materjali juurde lisamisega on saavutatud taaskord 0,03 mm deformatsiooni vähenemist. Ülemisele kinnituskõrvale lisati kahe kõrva vahele tugevdusribid. Kinnituskõrva välimisele küljele lisati serva ligidusse lisamaterjali, et saavutada deformatsioonide vähenemine.



Joonis 3.6 Muudetud kinnituskõrva analüüsi deformatsioonid võimendatuna

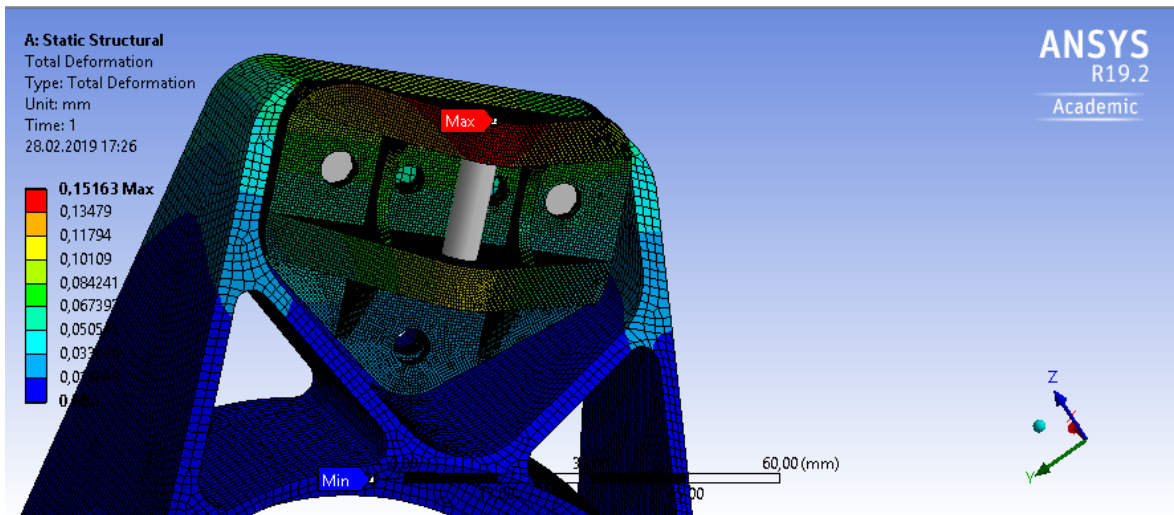
Analüüsist selgub, et muudatus vähendas läbipainet üle 0,02 mm. Tiimi liikmete poolt tuli idee proovida diagonaalsete tugevdusribide ümberpöörämist, et näha kummal viisil on deformatsioonid väiksemad. Mudelis pöörati ringi diagonaalsed tugevdusribid ning seejärel teostati analüüs.



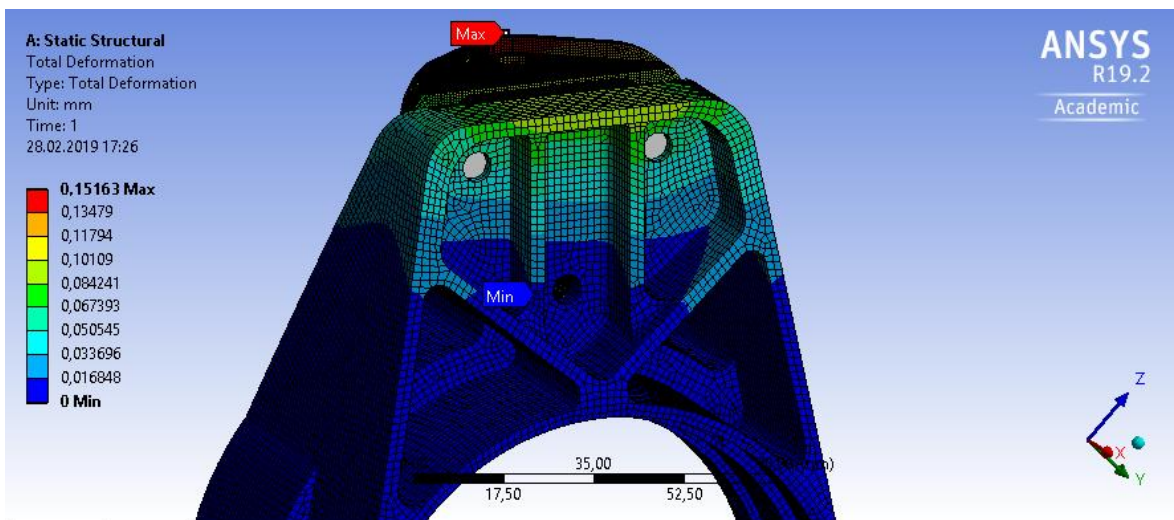
Joonis 3.7 Pööratud diagonaalsete ribidega käänmiku läbipaine võimendatuna

Analüüsist selgub, et algne idee, kus diagonaalsed ribid olid V-kujuliselt, oli ainult deformatsioone arvesse võttes parem.

Korduvatest muudatustest ning analüüsitulemustest selgub, et antud disaini juures ei ole võimalik väiksemate muudatustega saavutada ülemise kõrva läbipaindeid alla 0,1 mm. Probleemi põhjuseks on asjaolu, et vedrustuse tõukurvarras kinnitub ülemise õõtsa külge ning surub kõrva allapoole. Eesmärgi täitmiseks otsustati mudelis lisada ülemisele kinnituskõrvale kolmas kinnituspolt kõrva alumisse poolde. Lisaks disainiti käänmiku ülemise osa tagumisele küljele vertikaalsed tugevdusribid.

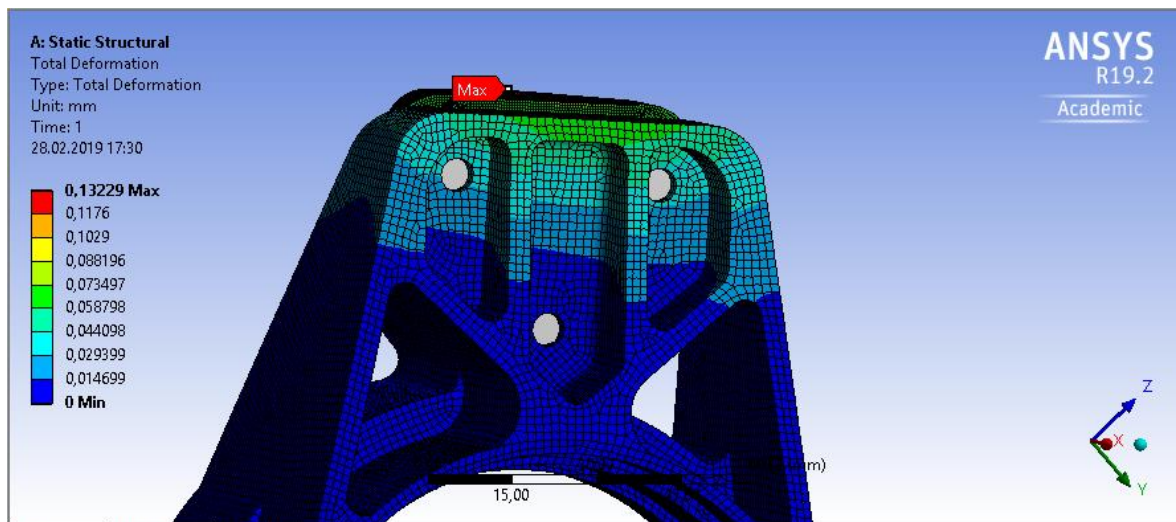


Joonis 3.8 Kolme poldiga kinnituskõrva analüüs



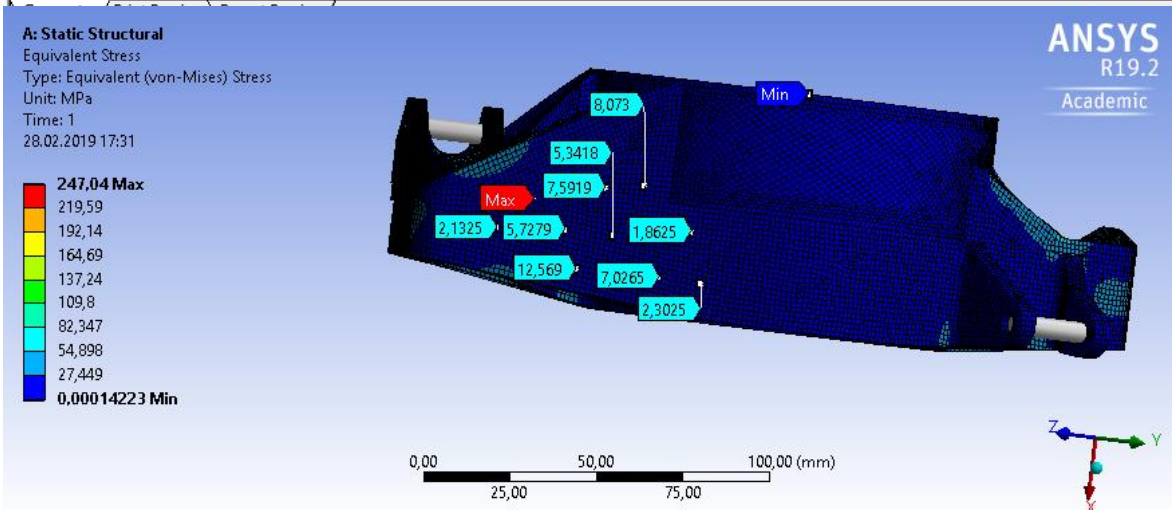
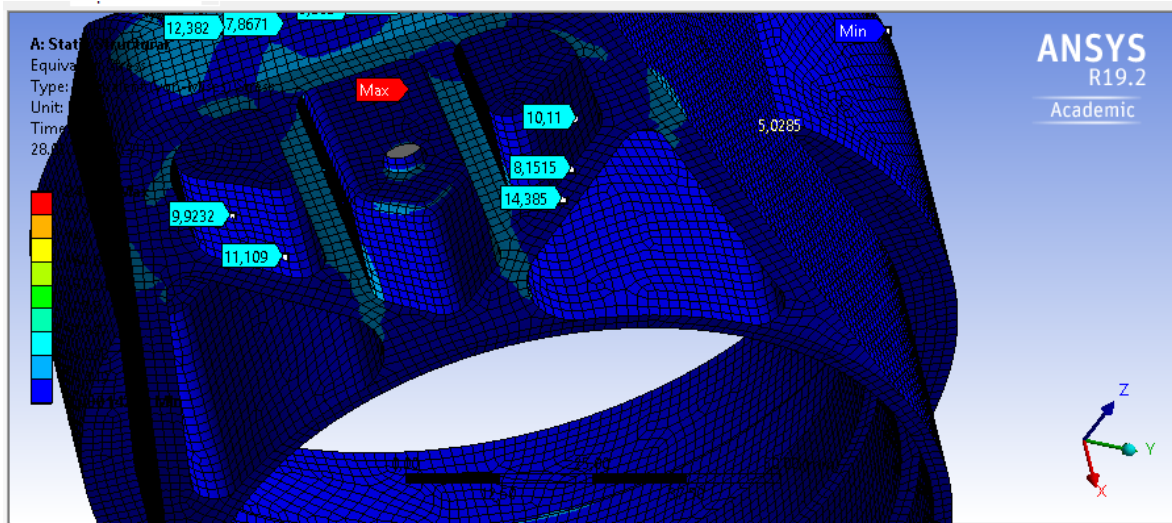
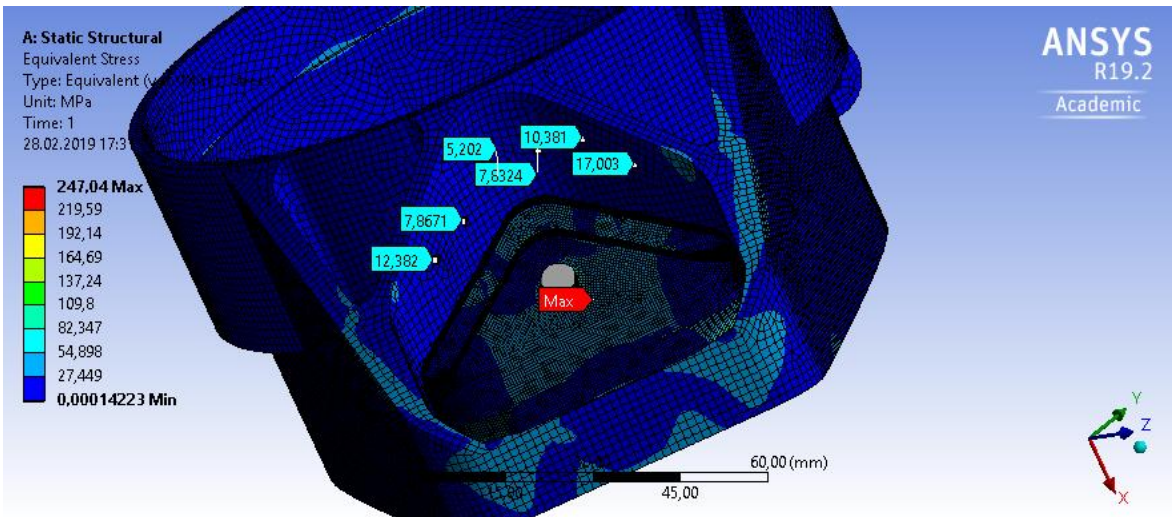
Joonis 3.9 Kolme poldiga käänmik tagantpoolt

Kolme poldiga kinnituskõrvaga oli analüüsis läbipainde tulemuseks 0,15 mm (joonis 3.9). Kolmanda kinnituspunkti lisamine suurendas küll käänmiku ning kinnituskõrva massi ning lisaks tuleb arvestada ka kinnituspoldi ja mutri kaalu, kuid samas vähendas analüüsis läbipainet ligi 0,1 mm. Et täita lõplikult eesmärki katsetati paksemate seinapaksustega ning paksemate ja kõrgemate tugevdusribidega mudeli analüüsi.



Joonis 3.10 Modifitseeritud seinapaksustega käänmik

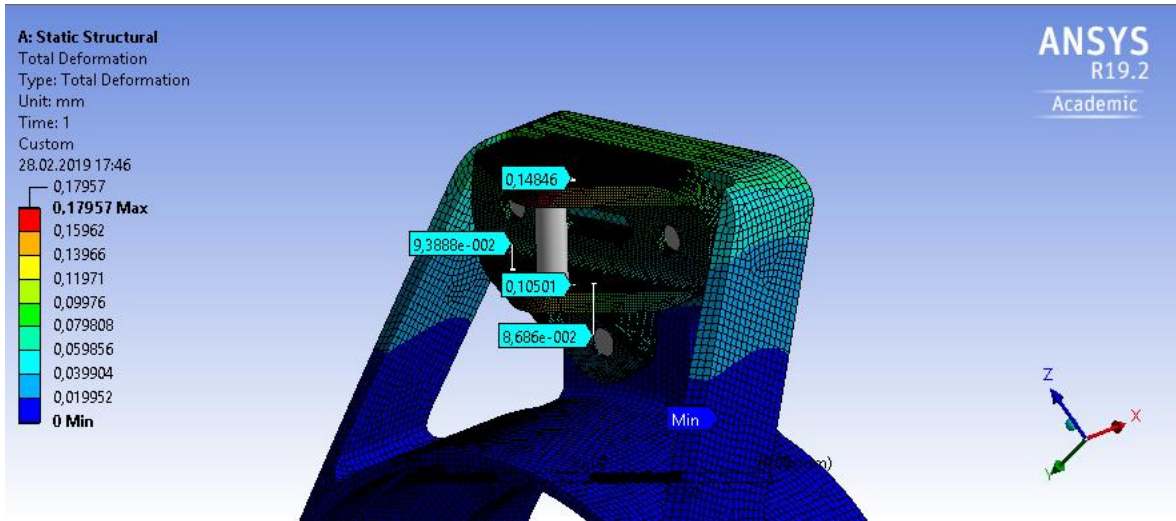
Läbipainete poolest oli antud käänmiku ning kinnituskõrva mudel juba peaaegu eesmärkidele vastav. Mõõtes mudeli massi selgus, et lisandunud oli ligi 110 grammi materjali käänmiku kohta. Käänmikke on vormeli all neli ning kogu sõiduk oleks ligi pool kilogrammi raskem. Tiimiliikmete hinnangul oli uus käänmik ja kinnituskõrv antud lahenduses liiga raske ning meeskonna soov oli võimaluste piires kaalu vähendada. Analüüsist materjali sees tekkivate pingete hindamisel selgub, et mitmes kohas on pinged minimaalsed ning jäävad nullilähedaseks.



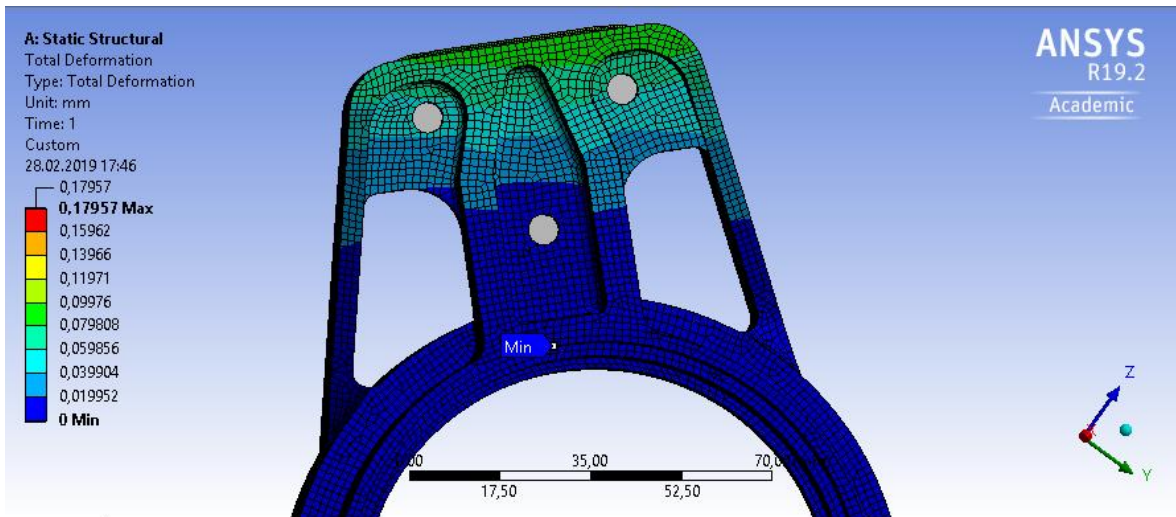
Joonis 3.11 Pinged käänmiku ülemise kõrva osadel

Kuna pinged püstiste ribide keskel ning diagonaalide servades jäid alla 20 MPa, siis otsustati mudelis need massi vähendamiseks eemaldada. Töö autor soovis lõigata püsti olevate ribide keskossa nõ kolmnurgad, kuna painde korral materjalis tekivad suurimad pinged perimeetri lähedusse ning keskosas on pinged nullilähedased. Tiimikaaslastega konsulteerides laideti antud

idee maha, kuna see oleks freesimisel tekitanud veel kahe paigalduse lisandumist ning oleks oluliselt suurendanud freesimise aega ning keerukust. Selle asemel lõigati ära terve püstise ribi tagumine osa ning alles jäi ainult esimene serv. Sellise mudeli puhul ei tekkinud vajadust täiendavate freesimise paigalduste jaoks, kuid samas vähenes mudeli mass märgatavalt. Analüüsi muutuse läbinud käänmiku läbipaindeid.



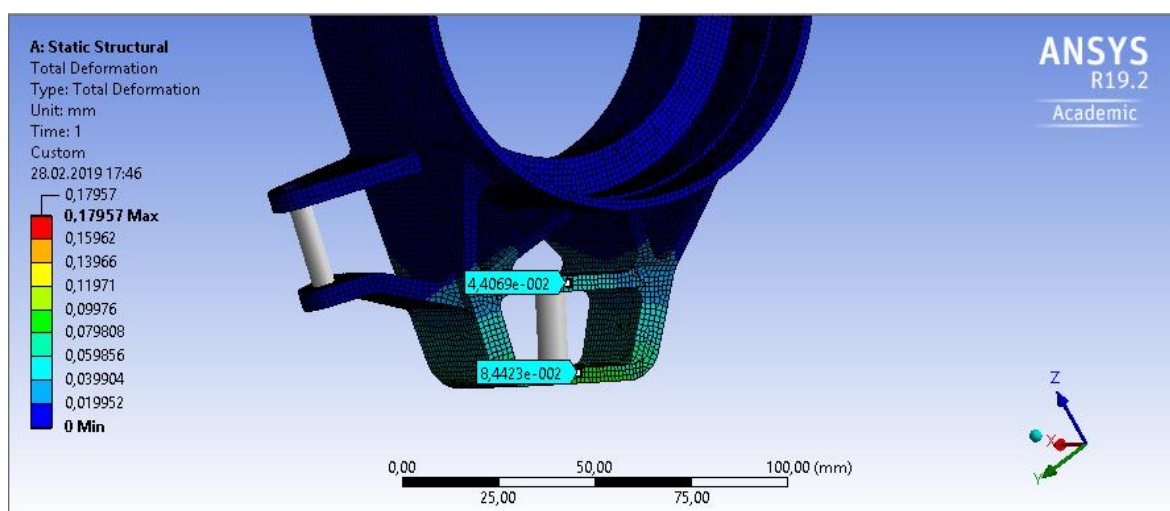
Joonis 3.12 Lõigatud ribide ja diagonaalidega käänmiku läbipainded



Joonis 3.13 Käänmik tagantpoolt

Materjali eemaldamine suurendas läbipainet ligi 0,05 mm. Siiski on *probe* tööriistaga näha, et õõtsa kinnituspunkti läbipaine jääb vahemikku 0,1..0,15 mm (joonis 3.12). Töö autor otsustas jätta selle lahenduse lõplikuks, kuna oluliselt vähendati käänmiku massi ning samas oli lahendus väga lähedane püstitatud eesmärgile.

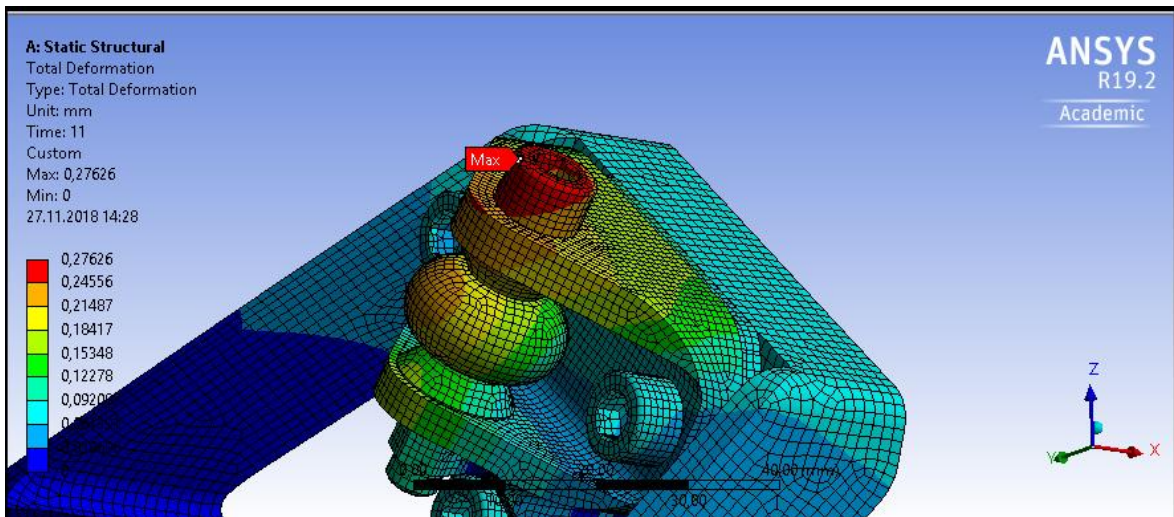
Disainimise käigus tuli kinnitusavade ümbrusesse jätta piisav ruum, et mahuks hõlpsalt padrunvõtmega mutreid keerama. Kuna M6 mutri kinnitamise jaoks kasutatakse 10 mm võtit, siis mõõdeti padrunvõtme välisdiameeter ning tulemuseks saadi 14,5 mm. Kõikide avade ümbrusesse jäeti seetõttu vähemalt 15 mm, et vähendada käänmiku rikkumise riski poltide kinnitamisel.



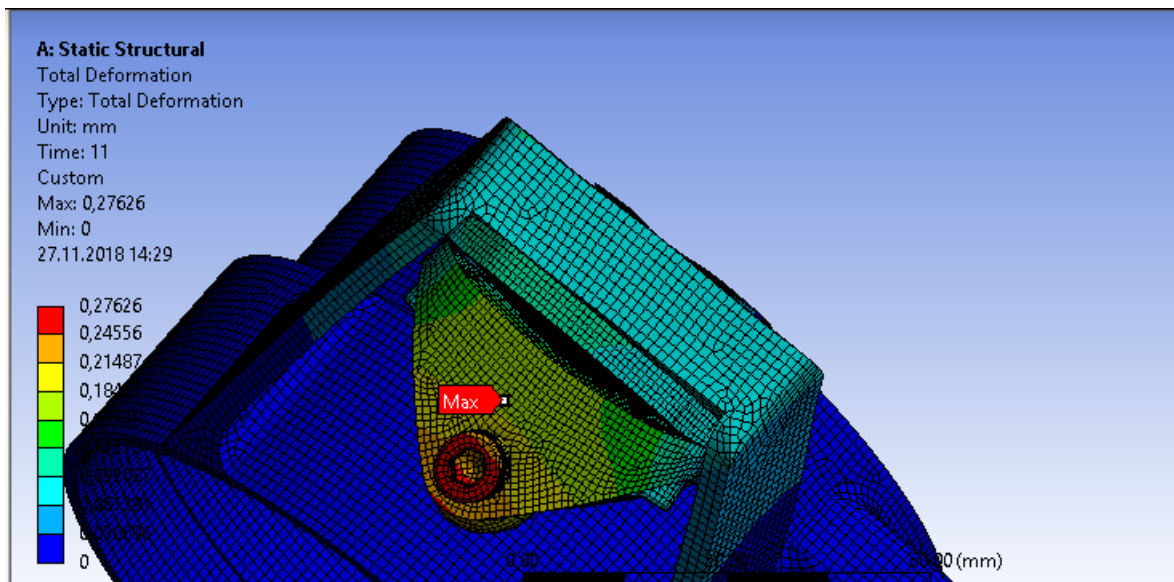
Joonis 3.14 Alumise õõtsa kinnituskõrva analüüs

Alumise kõrva läbipainded olid juba esialgse mudeli puhul 0,1 mm lähedased. Seetõttu kulutati vähem aega alumise kõrva ümber disainimisele ning seinapaksuste suurendamise ja kinnituskõrva etteossa ribide lisamisega saadi analüüsi järgsed läbipainded eesmärgile vastavalt alla 0,1 mm. Lõplik alumise õõtsa kinnituspunkti läbipaine jääb vahemikku 0,044...0,084 mm (joonis 3.14).

Antud analüüsi tulemuste põhjal olid tiimiliikmed ning töö autor käänmikuga piisavalt rahul. Kuna analüüsid olid tehtud kõik kasutades *virtual beame* siis teostati analüüs eelpingestatud kinnituspoltidega. Kinnitusmutri ja poldi vahelised kontaktid defineeriti kasutades *bonded* käsku ning kõik ülejäänud kontaktid *frictional* käsuga kasutades hõõrdetegurid 0,2. Kõikide poltide pingutusjõuks on taaskord 13500 N.



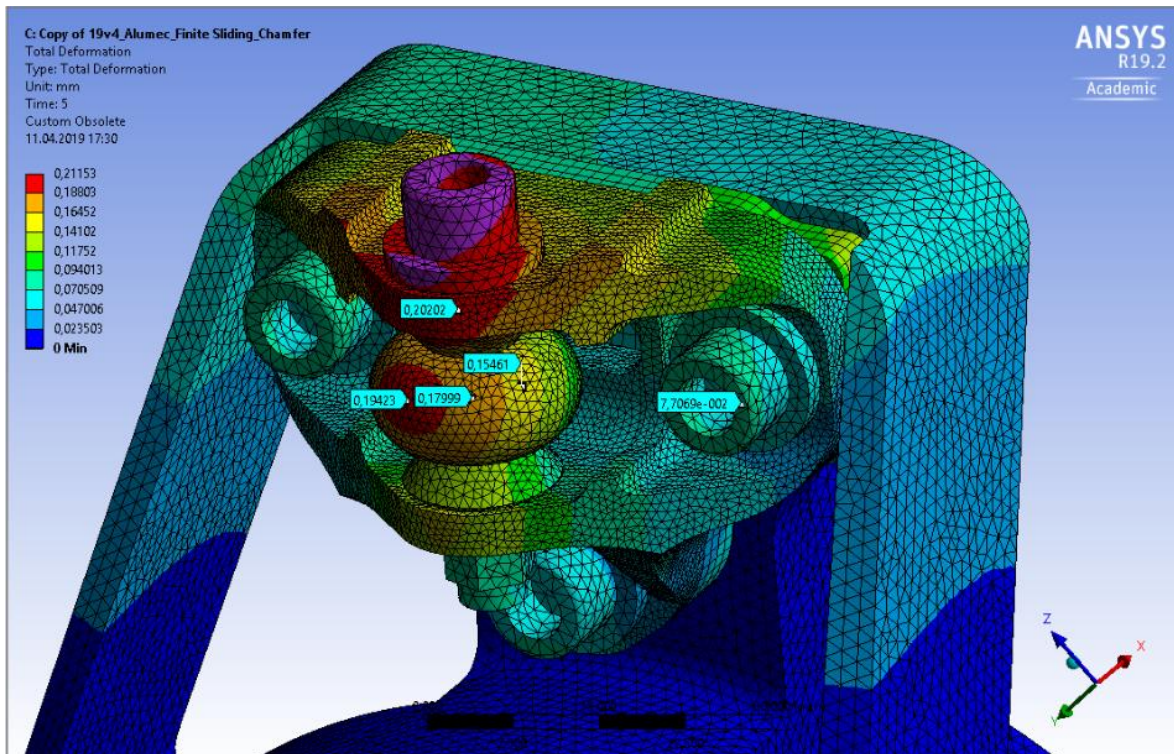
Joonis 3.15 Eelpingestatud poltidega käänmiku analüüsi tulemus



Joonis 3.16 Eelpingestatud poltidega analüüsi tulemus võimendatuna

Virtuaalsete poltidega ning eelpingestatud poltidega analüüsid on läbipainete poolest taaskord väga erinevad. Töö autori hinnangul jälgendab eelpingestatud poltidega analüüs reaalselt läbipainete olukorda täpsemini kui virtuaalpoltidega analüüs. Selgub, et eesmärgi läbipainete alla 0,1 mm saamisest ollakse siiski väga kaugel. Kahe kinnituspoldi vahe on piisavalt suur, et kinnituskõrva keskosal on võimalik käänmikust eemale painduda ning see põhjustab õõtsuhoova kinnituspunkti suuri deformatsioone.

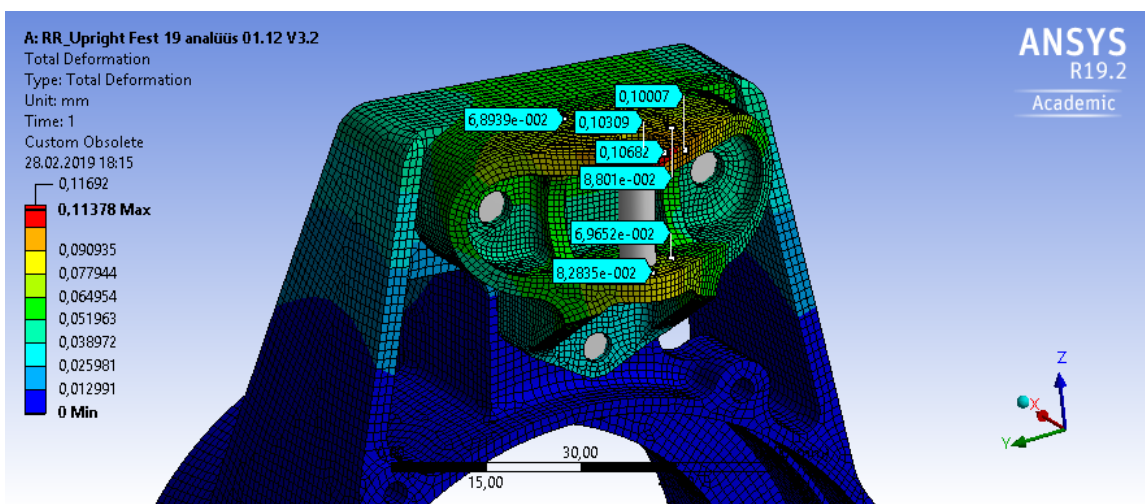
Suurte läbipainete vähendamiseks soovis teine veermiku tiimi liige ise kinnituskõrva disaini edasi arendada. Kõrva lõpliku disainiga teostati viimane analüüs ning tulemuseks saadi läbipainde vähenemine 0,27 mm (joonis 3.15) pealt 0,20 mm peale (joonis 3.17).



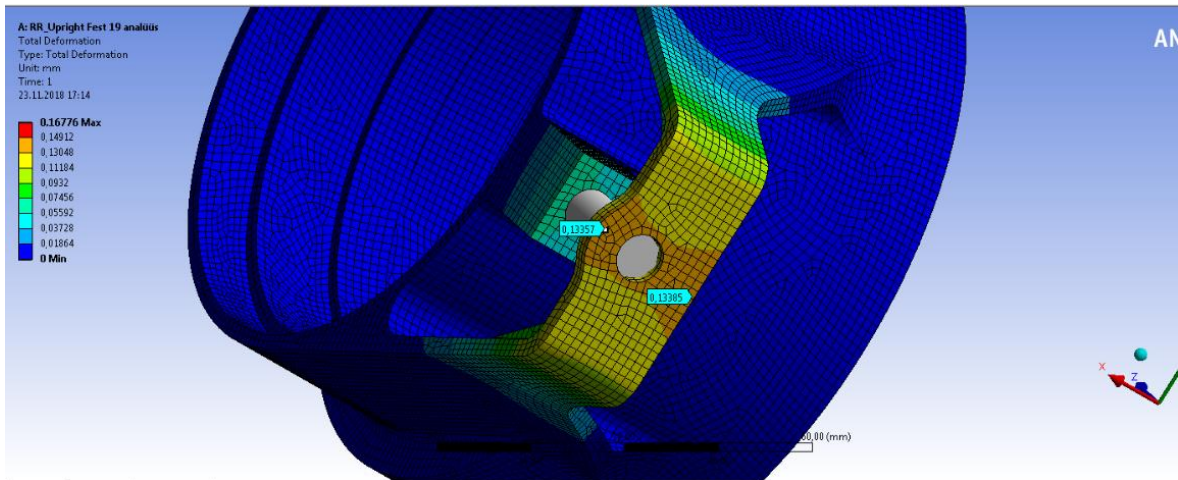
Joonis 3.17 Lõpliku kõrvaga läbipainde analüüs

3.3 Tagumise käänmiku projekteerimine

Tagumise käänmiku ülemine ots disainiti identselt esimese käänmiku ülemise otsaga, kasutatakse samamoodi kolme kinnituspolti. Algselt sooviti hoida kõik 4 kinnituskõrva identsed, et lihtsustada tootmist, kuid kuna esimese ja tagumise käänmiku kinnituskõrva projekteerisid eri tiimiliikmed, siis lõplik disain on neil erinev. Tagumine käänmik on juba algselt väiksemate läbipainetega, kuna mõjuvad jõud ning kinnituspunktid on erinevad. Ülemine kinnituspunkt on võrreldes esimese käänmikuga lähemal ülekandekorpuse tsentrile.

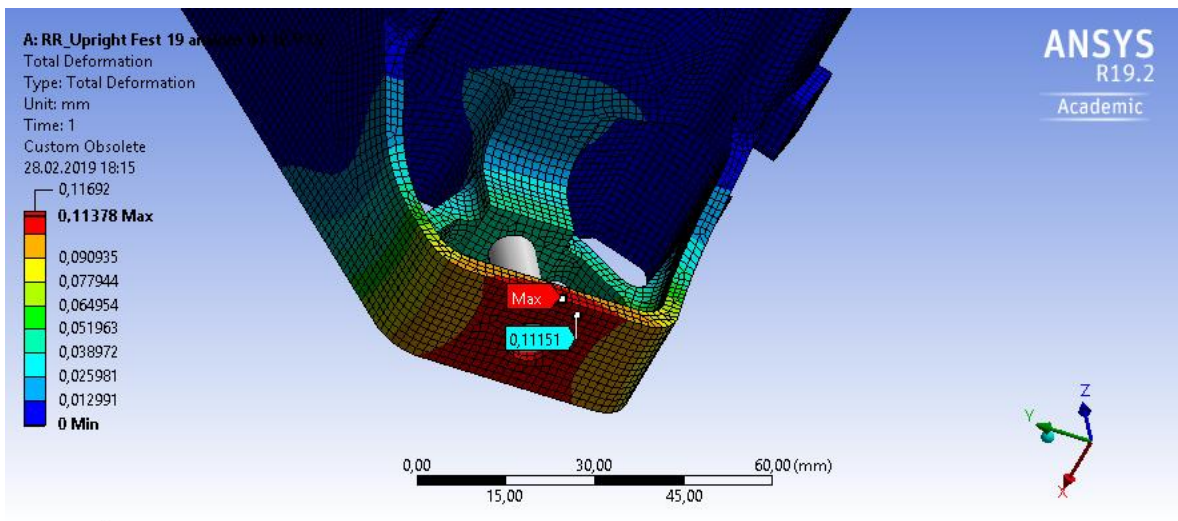


Joonis 3.17 Tagumise käänmiku ülemise otsa läbipainded



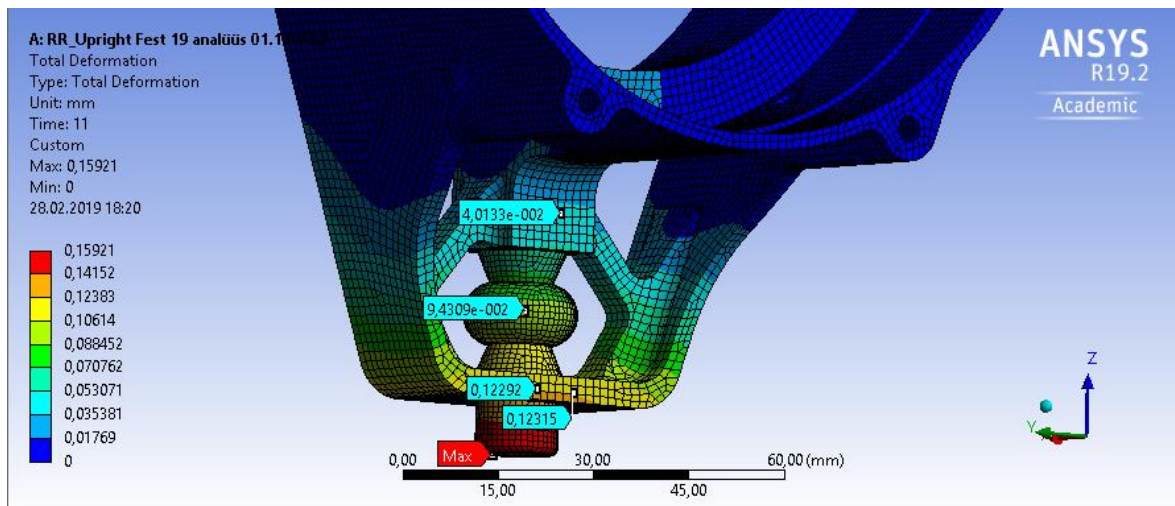
Joonis 3.18 Tagumise käänmiku alumise otsa läbipained

Deformatsioonid analüüsis on väga lähedal püstitatud eesmärgile alla 0,1 mm. Alumine käänmiku osa on erinev esimesest ,kuna õõtshõõva kinnituspunkt on väga lähedal pidurikettale. Disainimisel võeti eeskuju eelmise aasta tagumise käänmiku alumisest osast. Et veelgi läbipaindeid vähendada lisati tugevdusribid.

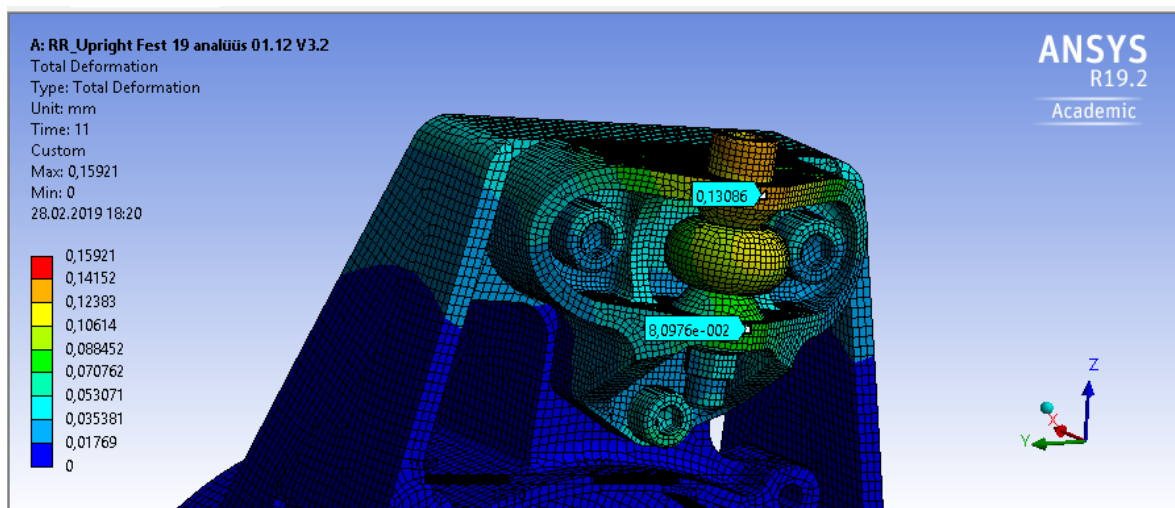


Joonis 3.19 Alumise osa läbipained koos tugevdusribidega

Analüüsist selgub, et koos tugevdusribidega on maksimaalne läbipaine tagumisel käänmikul 0,11 mm (joonis 3.19). Teostatakse analüüs, kus *virtual beamid* on asendatud eelpingestatud poltidega, et saada teada lõplikud läbipained.



Joonis 3.20 Tagumise kääniku alumise otsa läbipainded eelpingestatud poltidega



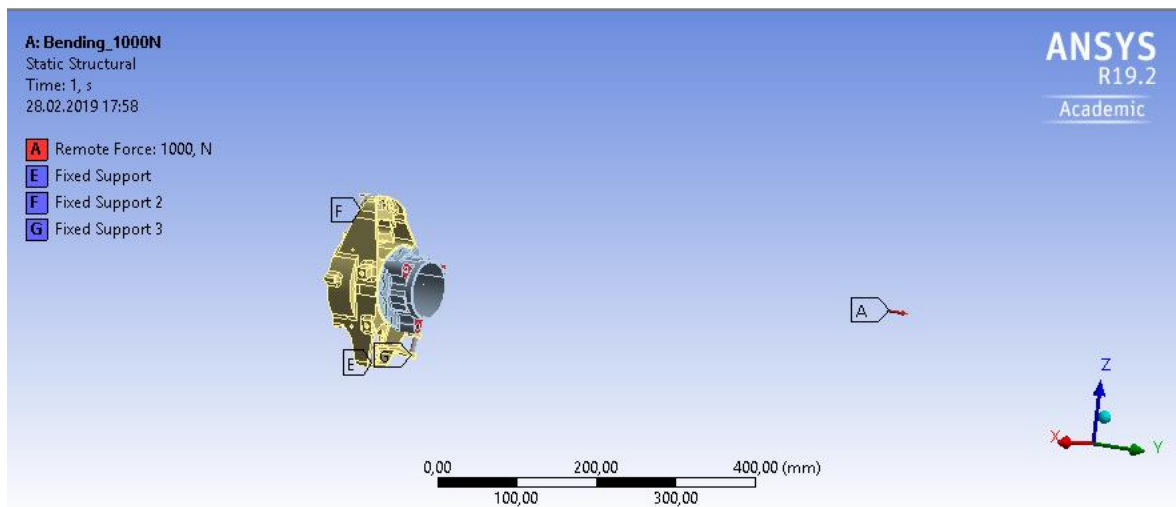
Joonis 3.21 Tagumise käänmiku ülemise otsa läbipainded eelpingestatud poltidega

Eelpingestatud poltidega analüüsist on näha, et jõtud on väga lähedale alla 0,1 mm läbipainete saavutamiseks. Vahe eelpingestatud poltide ja virtuaalpoltidega analüüsides vahel on väiksem, kui esimese käänmiku puhul. Kuna lõpliku disaini korral jääb ülemise kinnituspunkti läbipaine vahemikku 0,08...0,13 mm (joonis 3.21) ja alumise kinnituspunkti oma vahemikku 0,04...0,12 mm (joonis 3.20) siis lähenevate tähtaegade tõttu rohkem disaini ei muudetud ning pühenduti käänmike mudelite lõpetamisele ning toodetavaks tegemisele.

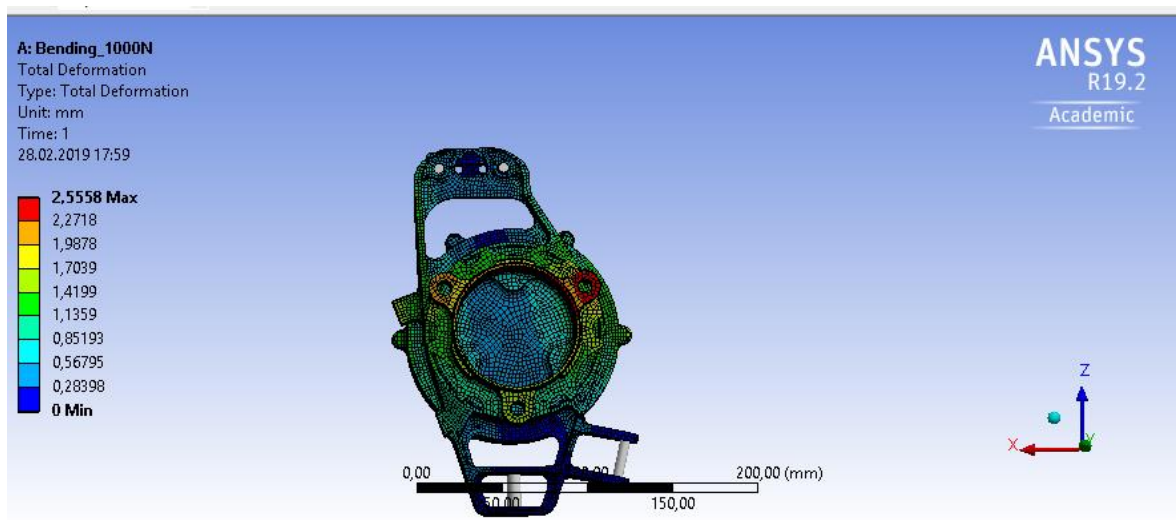
3.4 Täiendav analüüs

Mõistmaks kuidas muutused on mõjutanud läbipaindeid teostati täiendav analüüs esimesele nurgakoostule, kus õõtsade ja roolivarraste kinnituspunktid pandi paika *fixed support* käsuga ning rummu kinnituspunktile pandi mõjuma jõud 1 kN horisontaalselt ühe meetri kaugusele rummu

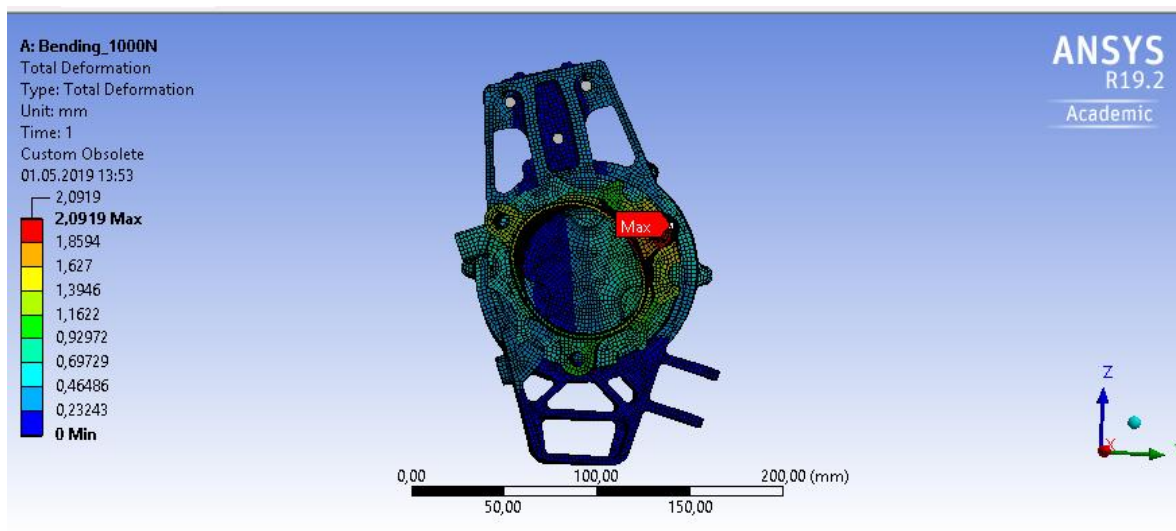
tsentrist *remote force* funktsiooni abil. Rummu ja käänmiku vahele asetati lihtsustatud laagrite mudelid.



Joonis 3.22 FEST18 nurgakoost, jõud 1 m kaugusel tsentrist



Joonis 3.23 Paindeanalüüsi tulemus FEST18 nurgakoostu puhul

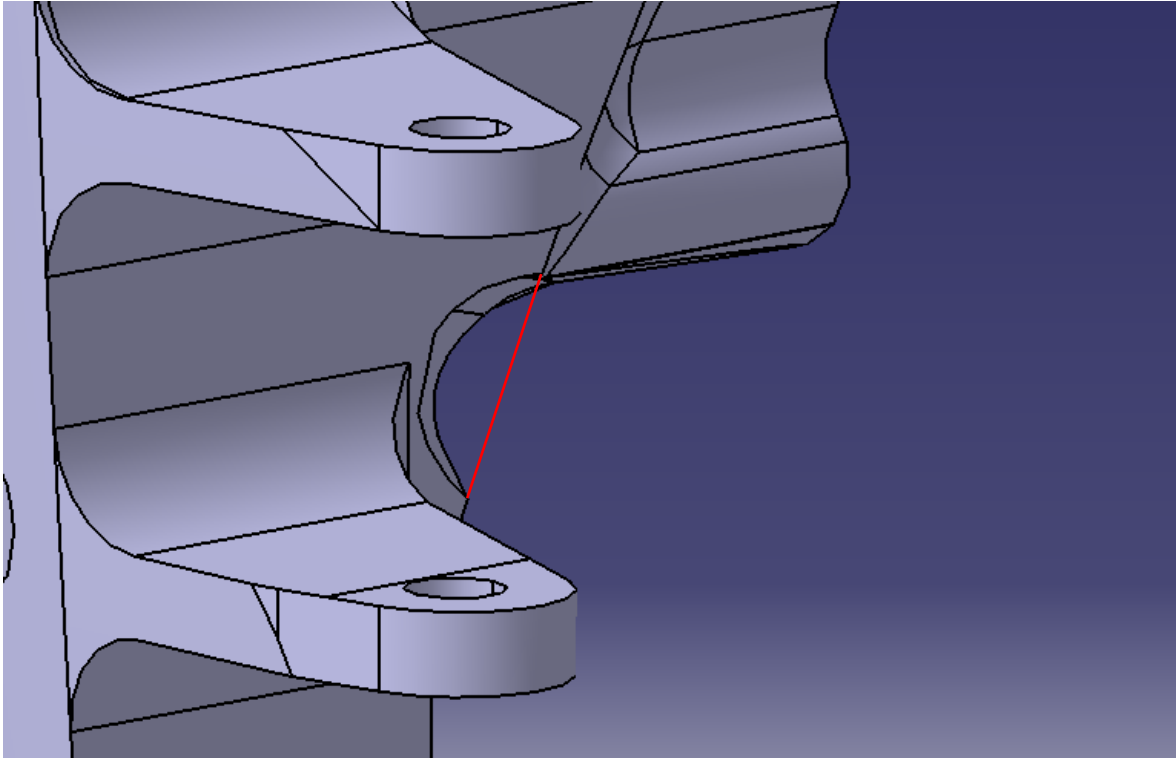


Joonis 3.24 Paindeanalüüsi tulemus FEST19

FEST19 nurgakoostu paindeanalüüsi deformatsiooni tulemus on ligi 0,5 mm madalam kui FEST18 puhul. Analüüsist selgub, et kuigi maksimaalne rummu deformatsioon on veel üsna kõrge, siis käänmik ise on märgatavalt jäigem ning käänmiku enda läbipaindeid vähendati ligikaudu poole võrra. Suure maksimaalse läbipainde põhjuseks võib olla rummu ja käänmiku sidestus või ebapiisav rummu jäikus. Analüüsi tulemus ei pruugi olla reaalselt olukorda jäljendav, kuna veljetsenter muudab rummu jäigemaks.

3.5 Käänmike lõplik disain ja vead

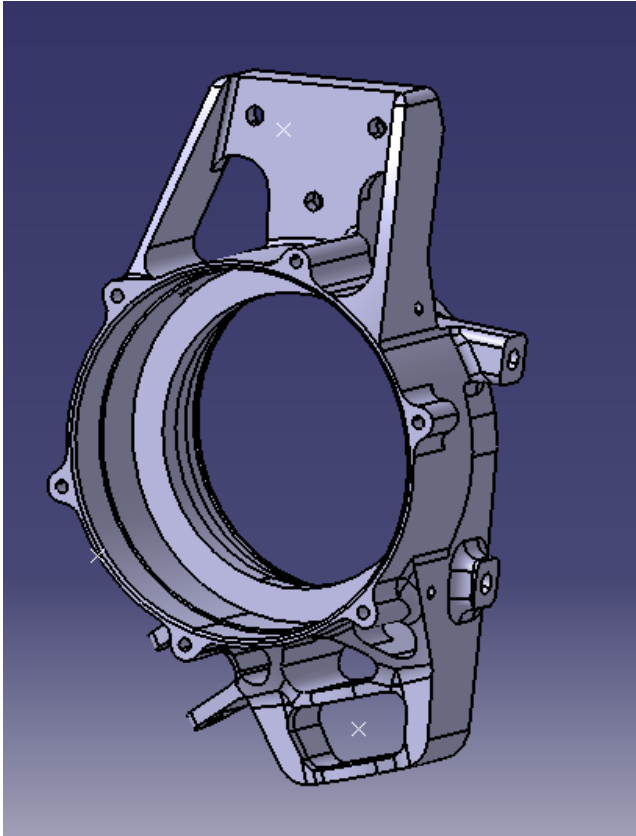
Liikivas koostus selgus, et esimene käänmik ning roolivarras puutuvad teatud asendites kokku. Algse lahendusena muudeti roolivarda otsa tiimiliikme poolt peenemaks. See aga ei olnud piisav ning lisaks teise lahendusena lõigati esimese käänmiku alumisest poolest välja piisava suurusega osa, et ei tekiks kokkupuudet üheski asendis. FEST 19 vormeli puhul kasutatakse süsinikkiust õõtsasid ning roolivardaid, mis võivad ka vähimagi detailide lõikumise (*interference*) korral puruneda.



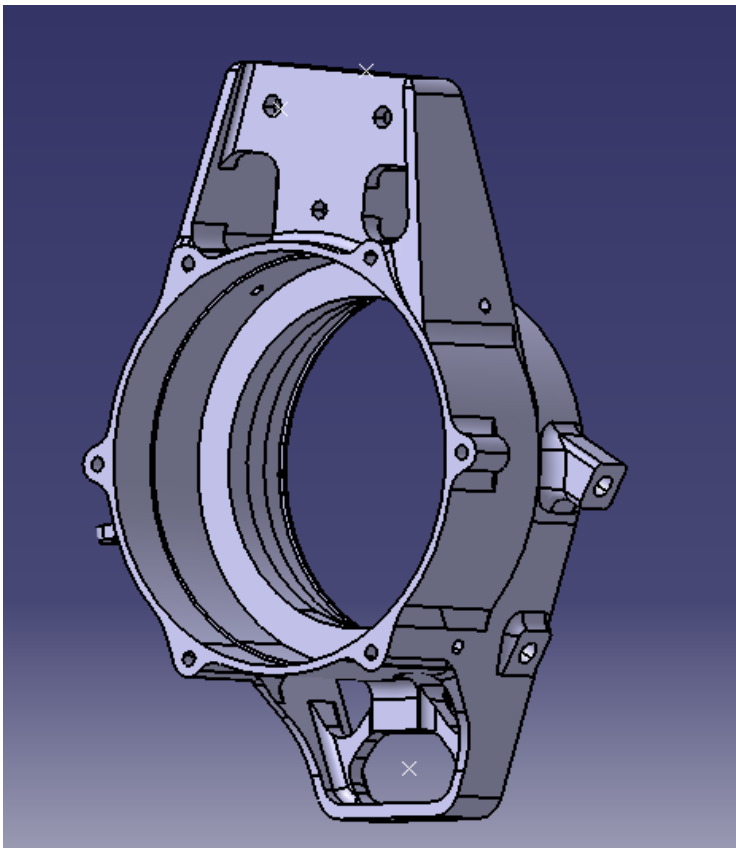
Joonis 3.25 Käänmiku alumise osa väljalõige

Mudelisse lisati tagakaane kinnituskohad. Tagakaane kinnitamiseks kasutatakse M5 mõõdus polte. Jälgida tuli, et kinnituspunktid asetseksid vertikaaltasandi suhtes sümmeetriliselt, kuna käänmiku külge kinnituvad tagakaaned on tootmise lihtsustamiseks samad ning tagakaane külge kinnituva jahutuskorpuse sisend- ja väljundavad peavad jääma õigesse asendisse. Viimaste etappidena käänmikute projekteerimisel lisati käänmikutele temperatuurianduri ava ning õli sisse- ja väljalaskeavad. Lisada tuli mudelisse ka pidurisuportite kinnitused. FEST19 kasutatakse samu pidurisuporteid, mis FEST18 sõidukil, seega kinnituste asukoht ja kaugus tsentrist mõõdeti eelmise aasta mudelist. Piduritega tegeleva liikme soov oli esimeste suportite kinnituseid viia 1 mm ketta tsentrile radiaalselt lähemale.

Tootmise seisukohalt oli tähtis, et mudel jääks ka pärast kinnituskohade projekteerimist toodetavaks freesimise läbi. Mudelis vaadati üle ning korrastati kõik kohad, mis tootmisettevõtte töötajaga konsulteerides mittetoodetavateks arvati. Sisemiste nurkade raadiused viidi võimalikult suureks, et töötlus toimuks maksimaalse läbimõõduga freesiga. Tiimiliikme nõuanne oli, et freesi lõikesügavus ei tohiks ületada kolmekordset freesi diameetrit. Seejärel tehti tootmisjoonised ning saadeti koos mudelitega tootmisettevõttesse.



Joonis 3.26 Lõplik esimene käänmik

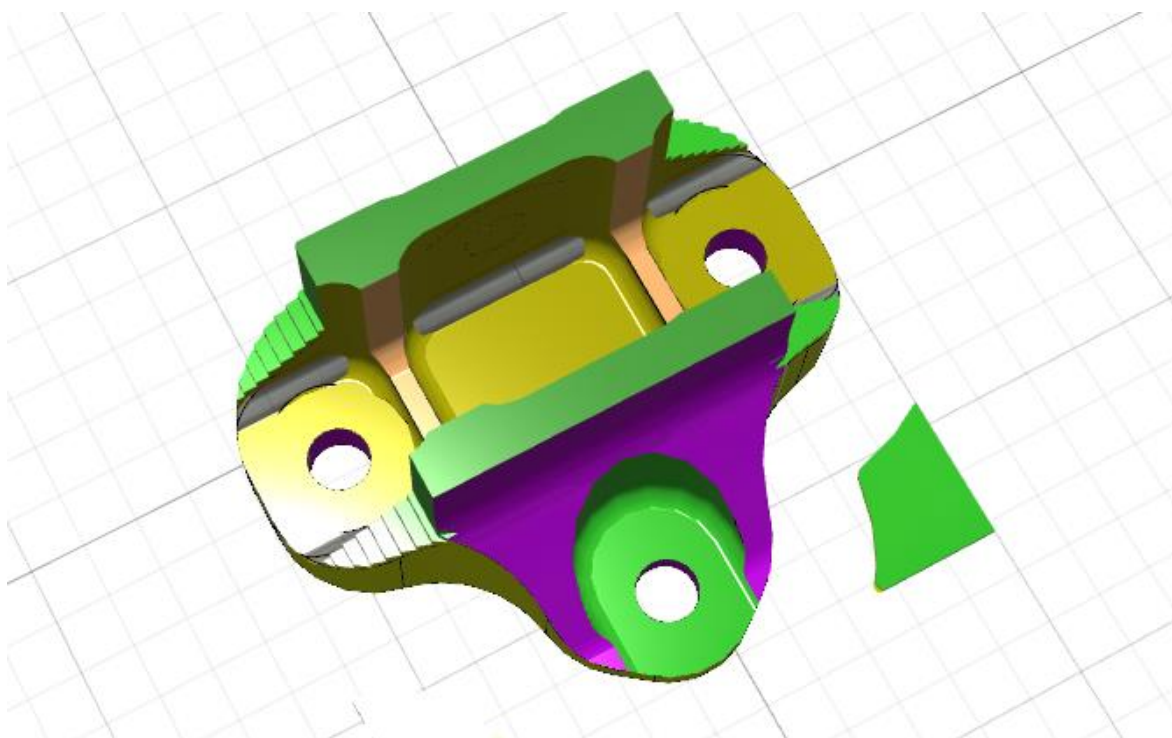


Joonis 3.27 Tagumise käänmiku tootmismudel

4. KINNITUSKÕRVADE VALMISTAMINE

Lihtsamad veermiku detailid valmistatakse tiimiliikmete poolt Tallinna Tehnikakõrgkooli tööpinkidel. Kinnituskõrvade valmistamise ülesanne usaldati vaatamata varasemate kogemuste puudumisele töö autorile. CAM-tarkvarana kasutati Autodesk FUSION360 programmi kuna veermiku tiimi liikmetel oli piisavalt kogemusi antud tarkvaraga ning kuna õppetöök kasutatavana on FUSION360 tasuta saadaval.

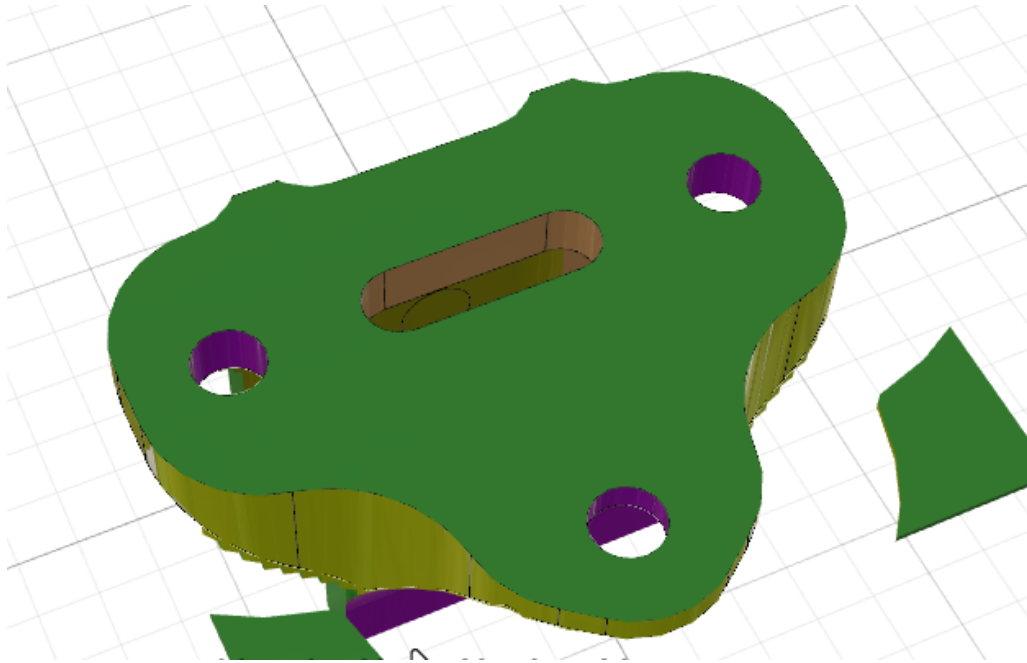
Kõrvade materjaliks on sarnaselt käänmikele sulam ALUMEC89 ning freesimine teostatakse HAAS Mini Mill'il. Kinnituskõrvade valmistamiseks 3-teljelisel freespingil tuli teostada kolm paigaldust. Tooriku kinnitamiseks kasutatakse kruustange. Esimeses paigalduses freesitakse välja enamus kinnituskõrvast ning puuritakse 3 kinnitusava.



Joonis 4.1 Kinnituskõrv pärast esimest paigaldust

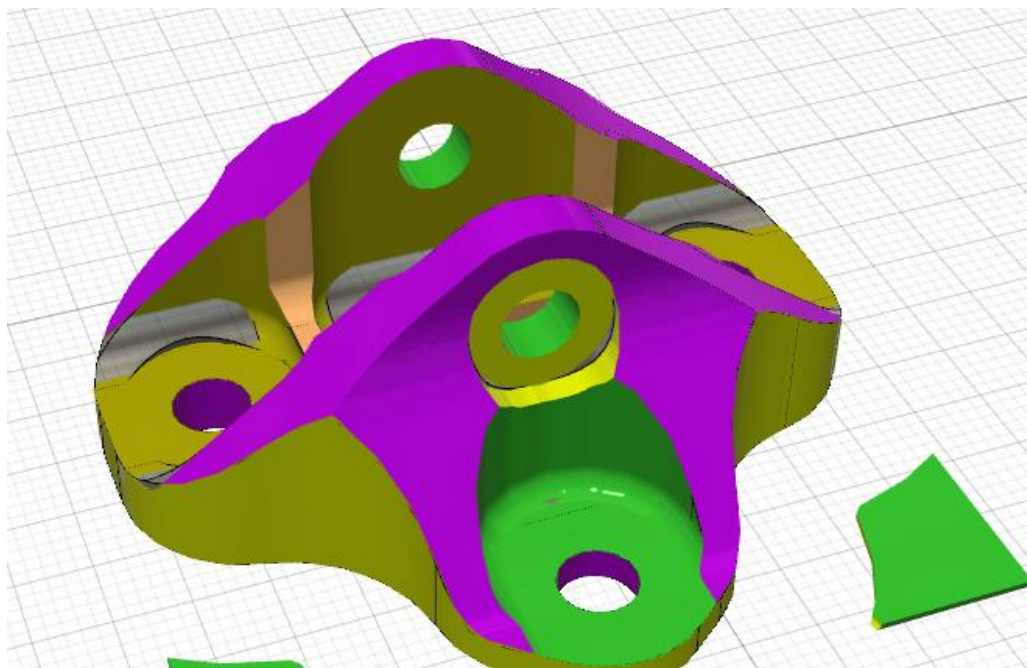
Esimese paigalduse freesimisel kasutati 10 mm ja 8 mm sõrmfreese ning 8R2 nurgaraadiusega *bullnose* freesi, et saavutada põhja nurkadesse 2 mm raadius. Kujupindade freesimiseks kasutati 6 mm *ballend* freesi. Ettenihked ning kiirused valiti tiimikaaslasega koostöös. Pildil nähtav freesimata vertikaalsed osad on vajalikud teise paigalduse kinnitamiseks.

Teises paigalduses eemaldatakse üleliigne materjal kinnituskõrva tagaküljelt ja freesitakse sisse soon. Soone freesimist ei oleks saanud teostada esimeses paigalduses, kuna soon jääb liiga kaugele esimesest küljest.



Joonis 4.2 Kinnituskõrv pärast teist paigaldust

Teises paigalduses freesiti enamik materjali 10 mm *flatend* sõrmfreesiga. Soone, laiusega 6 mm freesimiseks kasutati 4 mm freesi.



Joonis 4.3 Kinnituskõrv pärast kolmandat paigaldust

Kolmandas paigalduses freesitakse ära kinnituskõrva esimesele servale jäänud lisamaterjal. Lisaks puuritakse sisse õõtsade kinnitusava ning hiljem freesitakse mutri kinnitamiseks süvend. Freesimine toimub taaskord 10 mm *flatend* freesiga ning avade jaoks kasutati 6 mm puuri. Detaili kinnitamiseks kruustangide vahele tuli teha rakis. Rakis koosnes lihtsast ruudukujulise ristlõikega alumiiniumprofiili jupist, kuhu puuriti kolm ava ning keermestati. Kinnituskõrv polditi seejärel rakise külge ning asetati kruustangide vahele.

Tagumise kinnituskõrv on sarnane esimesele. Siiski on kõrvad erinevad ning ka NC-programm erinev. Tagumine kõrv freesitakse samuti kolmes paigalduses. Töö teostamiseks kasutati samu freese, rakis tuli poldiavade vahe erinevuse tõttu ringi teha.

Väheste kogemuste tõttu toimusid freesimise käigus ka mõned ebaõnnestumised. Kokku oli vaja 4 kinnituskõrva. Esimese toorikuga tekkis probleem teiseks paigalduseks kinnitamisel. Kruustangide kinnitamisel koos esialgse rakisega keerates tuli detaili mõra ning edasine freesimine ei oleks olnud otstarbekas. Seetõttu muudeti NC-koodi ning detaili esiküljele jäid kinnitamiseks vastavad servad. Ühe kinnituskõrva puhul tekkis detaili viimasel paigaldusel nullpunkti määramisel viga ning ava asukoht oli nihkes. Siiski suudeti piisava täpsusega toota 4 kinnituskõrva. Seejärel viidi kinnituskõrvad sponsorettevõttesse klaaskuulpritsi ning paigaldati käänmiku külge.

KOKKUVÕTE

Antud lõputöö eesmärgiks oli projekteerida käänmikud FEST19 võistlussõidukile. FEST18 vormeli käänmikud ei olnud piisavalt jäigad ning seetõttu oli tiimi poolt püstitatud eesmärgiks vähendada läbipaindeid ANSYS analüüsis alla 0,1 mm. Võistlussõidukile omaselt peavad detailid olema kerged ning loodud lahendus peab olema vastupidav terve testperioodi ning võistlushooaja vältel. Eelmise aasta käänmikud ei näidanud märke väsimusest või purunemisest, seega pingete analüüsi võib mõneti usaldada.

Töö esimeses peatükis toodi välja käänmiku materjali, ALUMEC89 omadused, tootmise meetod ning mõningad lähteparameetrid mille järgi projekteerimine saab alguse.

Seejärel näidati ära analüüsi rajatingimused ning analüüsiti eelmise aasta käänmikku FEM-tarkvaras ANSYS 19.2. Välja toodi mõned põhjused, mille tõttu võis varasema käänmiku jäikus ebapiisav olla. Samas näidati ära ka virtuaalpoltidega ning eelpingestatud poltidega analüüside läbipainete erinevused. Eraldi teostati analüüs kinnituskõrvale ning näidati, et kinnituskõrv ise on suurte läbipainete põhjuseks.

Töö kolmanda peatüki alguses algas uue käänmiku projekteerimine. Välja toodi lähtemudel, mille alusel hakati projekteerima. Alustati esimesest käänmikust kuna seal on analüüsijärgsed deformatsioonid suuremad. Algse käänmiku disain oli märgatavalt jäigem kui varasemalt. Kolmas peatükk sisaldab peamiselt analüüsimist ja põhjendusi ning samm-sammult lõpliku disainini jõudmist. Välja toodi ka projekteerimise käigus välja tulnud vead ning nende lahendused. Vähem tähelepanu pöörati tagumisele käänmikule, ülemine ots käänmikust teostati sarnaselt esimesele ning tagumise puhul tuli kasutada eelmise aasta käänmikule sarnast lahendust piduriketta läheduse tõttu.

Töö viimane peatükk andis ülevaate kinnituskõrvade tootmisest freesimise läbi. CAM tarkvaraks kasutati Autodesk FUSION360. Välja toodi pilt toorikust pärast iga freesimise paigaldust ning välja toodi ka freeside valik. Vaatamata vähestele kogemustele ja tekkinud probleemidele suudeti toota 4 toimivat kinnituskõrva, mis hilisemalt klaaskuulpritsis üle pritsiti ning käänmiku külge kinnitati. Tootmisprotsessis osalemine andis töö autorile väga head baaskogemused NC-programmi teostamises ning freespingiga opereerimises.

Töö lõpptulemusena saavutati esimese käänmiku analüüsijärgsed läbipainded 0,81 mm pealt 0,20 millimeetrini. Eesmärk analüüsijärgsed läbipainded alla 0,1 mm saavutada jäi FEST19 käänmike puhul saavutamata. Tagumise käänmiku puhul jäi lõplikuks analüüsijärgseks deformatsiooniks 0,12 mm.

Käänmiku disain on kaugel optimaalsest ning jäikuse saavutamise eesmärgil lisatud materjal ei ole kohati vajalik. Järgnevatel aastatel on võimalik detaile veelgi optimeerida ning samas jäigemaks saada. Põhjalikult peaks uurima ANSYS tarkvaraga kaasa tulevat topoloogia optimeerimise paketti ning tulevikus hoopis võimaluse korral 3D-printima terve käänmiku.

SUMMARY

The aim of this bachelor thesis is to design uprights to the F19 formula car. F18 uprights had problems with compliance and the main goal of new uprights was to reduce total deformation in FEM analysis under 0,1 mm. The new design needs to be light and rigid. F18 uprights showed no cracks or other signs of fatigue therefore stress analysis in ANSYS could aid the design of new uprights.

The first chapter of thesis outlines mechanical properties of the upright material, Alumecc 89 and explains the method of manufacturing of the uprights and other design input parameters.

Second chapter mainly consists of analysis of the F18 uprights. The analysis was done on ANSYS 19.2 software. The author suggested some of the causes of the high deformations. Analysis with virtual beams and bolts with pretension showed different results and a conclusion was made that the pretension analysis simulates real situations better. Camber pickup was analysed separately and minor design improvements were done, which reduced deformation significantly.

Third chapter begins with designing of new upright. A picture of the assembly containing of suspension points and bearing housing of upright was shown. The work began on front upright because the initial deformations were higher than on rear upright. Chapter includes step by step analysis, conclusions and design improvements which resulted in final upright model. Author brings out interference issues in the corner assembly and the solutions for these. Rear uprights' upper half was designed the same as front. The lower half was designed was copied from F18 rear upright due to lack of distance between suspension point and brake disc.

The last chapter gives an overview of the milling of camber pickups. CAM software Fusion360 was used. Despite lack of experience and occurred problems 4 camber pickups within tolerances were manufactured in time.

The resulting design reduced total deformations from 0,81 mm to 0,20 mm. The goal of deformations under 0,1 mm was not met. The rear upright maximal deformation in analysis was 0,12 mm.

In upcoming years the upright design could be optimized further. ANSYS topology optimization combined with metal 3D printing should be studied thoroughly and this might be the breakthrough in upright design.

KASUTATUD KIRJANDUS

- [1] „FS Team Tallinn,“ MTÜ Tudengi Vormel, 2019. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.formulastudent.ee/>. [Kasutatud 14 05 2019].
- [2] „Formula student rules 2019, Version 1.1, Rev-713,“ 2019. [Võrgumaterjal]. Available: https://www.formulastudent.de/fileadmin/user_upload/all/2019/rules/FS-Rules_2019_V1.1.pdf. [Kasutatud 14 05 2019].
- [3] Uddeholm, „alumec engelsk_p_1101_e,“ 2019. [Võrgumaterjal]. Available: https://www.uddeholm.com/files/PB_alumec_english.pdf. [Kasutatud 14 05 2019].

LISAD

Lisa 1 Käänmike tootmisjoonised