



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL  
MEHAANIKATEADUSKOND

Masinaehituse instituut

Tootearenduse õppetool

MES70LT

*Joonas Eamets*

TUDENGIVORMELI FEST16 MONOKOKK KERE PROJEKTEERIMINE

Autor taotleb

tehnikateaduse magistri

akadeemilist kraadi

Tallinn

2016

## AUTORIDEKLARATSIOON

Deklareerin, et käesolev lõputöö on minu iseseisva töö tulemus.

Esitatud materjalide põhjal ei ole varem akadeemilist kraadi taotletud.

Töös kasutatud kõik teiste autorite materjalid on varustatud vastavate viidetega.

Töö valmis professor Martin Eerme juhendamisel

“.....”.....201....a.

Töö autor

..... allkiri

Töö vastab magistritööle esitatavatele nõuetele.

“.....”.....201....a.

Juhendaja

..... allkiri

Lubatud kaitsmisele.

..... eriala/õppekava kaitsmiskomisjoni esimees

“.....”.....201... a.

..... allkiri

## **MAGISTRITÖÖ ÜLESANNE**

2016 aasta kevad semester

Üliõpilane: Joonas Eamets 143760MATM

Õppekava: MATM 02/11

Eriala: Tootearendus

Juhendaja: professor Martin Eerme

Konsultandid: Marek Lentsius, õhusõiduki ja jõuseadmete mehaanik, +372 523 4525

### **MAGISTRITÖÖ TEEMA:**

(eesti keeles) Tudengivormeli FEST16 monokokk kere projekteerimine

(inglise keeles) Formula Student Car FEST16 Monocoque Chassis Design

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

<b>Nr</b>	<b>Ülesande kirjeldus</b>	<b>Täitmise tähtaeg</b>
<b>1</b>	<b>FEST 15 kere väändejäikuse mõõtmine</b>	<b>21.10.2015</b>
<b>2.</b>	<b>Kere CAD mudeli loomine</b>	<b>24.12.2015</b>
<b>3.</b>	<b>Külgkokkopõrke laminaadi analüüsimine ja katsetamine</b>	<b>01.01.2016</b>
<b>4.</b>	<b>Kere tugevusanalüüs</b>	<b>01.02.2016</b>
<b>5.</b>	<b>Liimliite katsetamine</b>	<b>01.03.2016</b>

**Lahendatavad insenertehnilised ja majanduslikud probleemid:** Töö käigus analüüsitakse tudengivormeli meeskonna viimase vormeli kere. Projekteeritakse FEST16 kere mudel. Proovitakse leida lahendusi massi alandamiseks, teostatakse uute laminaatide tugevusanalüüs ning katsed. Leitakse kere poolte liitmiseks sobiv liimliide ning otsitakse lahendus nõutud elektrijuhtivuse saavutamiseks.

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

**Töö keel:** Eesti kell

Kaitsmistaoetus esitada hiljemalt 16.05.2016

**Töö esitamise tähtaeg**.....

**Üliõpilane** Joonas Eamets /allkiri/ .....

kuupäev.....

**Juhendaja** Martin Eerme /allkiri/ .....

kuupäev.....

# Sisukord

Sissejuhatus .....	7
1.2 Ülesande püstitus .....	9
1. FEST15 mass ja väändejäikuse mõõtmine .....	10
1.1 FEST15 mass ja võrdlus arvutusmudeliga .....	10
1.2 FEST15 kere väändejäikuse mõõtmine .....	10
1.3 FEST15 kere tootmise analüüs .....	13
2. FEST16 kere komponentide paigutus .....	14
2.1 Sõitja asend .....	14
2.2 Akukasti paigutus .....	16
2.3 Mootorikontrolleri paigutus .....	19
2.4 Turvakaared .....	20
2.4.1 Nõuded esimesele turvakaarele .....	20
2.4.2 Nõuded peamisele turvakaarele .....	22
2.4.3 Esimese turvakaare materjali ja profiili valik .....	22
2.5 Roolisüsteem .....	25
3.6 Vedrustus .....	26
3. Kere materjalide valik .....	28
4. Kere modelleerimine .....	31
5. Tugevusanalüüs .....	34
5.1 Reeglid .....	35
5.1.1 Kolme punkti painde katse .....	37
5.1.2 Nihkekatse .....	38
5.2 Külgkokkupõrke laminaat .....	38
5.2.2 Mudeli loomine .....	40
5.2.3 Esimese paigutuse analüüs .....	42
5.2.4 Esimese laminaadi katsetus .....	45
5.2.5 Laminaadi uuendamine .....	48
5.2.6 Paigutuse 2, 3 ja 4 katsetamine .....	53
5.2.7 Nihkekatse .....	54
5.2.8 Külgkokkupõrke laminaadi valik .....	56
5.3 Teised kerel kasutatavad laminaadid .....	56
5.4 Kere laminaatide paigutus .....	57
5.4.1 Kere tugevusanalüüs .....	58
6. Liimliide .....	63

<b>7. Elektrijuhtivus .....</b>	<b>66</b>
<b>8. Tootmine.....</b>	<b>68</b>
<b>8.1 Kere kokku liimimine.....</b>	<b>70</b>
<b>8.2 Termotöötlus .....</b>	<b>71</b>
<b>8.3 Lõpptulemus.....</b>	<b>72</b>
<b>Kokkuvõte .....</b>	<b>73</b>
<b>Summary.....</b>	<b>76</b>
<b>Lisad .....</b>	<b>81</b>
<b>Lisa 1.....</b>	<b>81</b>
<b>Lisa 2.....</b>	<b>82</b>
<b>Graafiline osa.....</b>	<b>87</b>

## EESSÕNA

Antud töö on valminud tudengivormeli meeskonna Formula Student Team Tallinn algatusel. Töö koostamine käis Tallinna Tehnikaülikoolis. Katsed viidi läbi Tallinna Tehnikaülikooli Materjalitehnika instituudi katselaboris. Soovin avaldada tänu enda juhendajale, professor Martin Eermele, samuti konsultant Marek Lentsiusele ning kõikidele tudengivormeli meeskonna liikmetele, kes olid abiks selle magistritöö valmimisel. Ühtlasi sooviksin avaldada tänu Tallinna Tehnikaülikooli Materjalitehnika instituudi tehnikule Endel Esinurmele, kes oli alati abiks katsete läbiviimisel.

## Sissejuhatus

Tudengivormel (Formula Student) on tudengitele mõeldud tootearendusvõistlus, mille eesmärk on õpetada osalejaid läbi praktilise kogemuse ning samuti suurendada tudengite konkurentsivõimet tööturule sisenedes. Projekti eesmärk on projekteerida ja valmis ehitada iga aasta uus tudengivormeli reeglitele vastav prototüüp, millega saab osaleda võistlustel üle maailma. Reeglite järgi on lubatud ühe ja sama autoga osaleda võistlustel 12 kuu jooksul. Uue vormeli iga-aastane ehitus nõuab projekti arendust ning tagab tudengite pideva õppimise. Maailmas on hetkel üle 600 tudengivormeli meeskonna.

Tudengivormeli võistlused koosnevad kahte tüüpi võistlusaladest- staatilised ja dünaamilised. Staatilistel aladel tuleb meeskonna liikmetel kaitsta kohtunike ees prototüübi tehnilisi lahendusi, samuti tuleb esitada projekti kuluaruanne. Dünaamilistel aladel pannakse proovile vormeli kiirendus, pidurdus ja kurvisuutlikkus.

Eesti tudengivormeli meeskond FS Team Tallinn on tegutsenud aastast 2006, kui valmis esimene tudengivormeli virtuaalne mudel. Antud mudeliga käidi võistlemas Inglismaal Silverstone ringrajal peetud võistlusel kus saavutati omas klassis neljas koht. Alates 2007 aastast on meeskond iga aasta valmistanud reaalse prototüübi ning antud töös käsitletav vormel, FEST16, on meeskonnal järjekorras üheksas.

Meeskonna esimesed viis vormelit olid ehitatud toruraamile ning kasutasid sise põlemismootorit. Antud kontseptsiooni arendati viis aastat ning 2012 hooajal saavutati häid tulemusi Inglismaal ja esikoht Ungari võistlustel. Peale edukat hooaega otsustati, et sise põlemismootoriga tudengivormeli arengus on saavutatud tipp ja edasi liikumiseks on vaja viia sisse kontseptsiooni muudatusi. Otsustati minna üle elektrilisele jõuallikale. Nimelt on tudengivormeli sarjas jõuallikana lubatud kasutada ka elektrimootoreid ning juba sel ajal oli näha, et antud lahendus lubab valmistada veelgi kiirema sõiduki. Aastatel 2013 ja 2014 valmisidki meeskonnal prototüübid FEST13 ja FEST14, millest viimasega saavutati klassivõit Itaalia võistlustel.

Tudengivormeli sarja reeglid ei määra vormeli miinimum massi, mis tähendab, et kasutusele on võimalik võtta massi vähendamiseks kõiksugu materjale ja inseneritehnilisi lahendusi. Kergeimad sarjas võistlevad prototüübid kaaluvad 170 kg. FS Team Tallinna 2014 hooaja auto kaalus 250 kg. Massi tuli alandada. 2015 hooajal otsustati minna toruraamilt üle süsinik monokokk kerele. Otsus tulenes asjaolust, et sarjas kasutatavad monokokk kered jäävad

vahemikku 17-35 kg. Viimane meeskonna valmistatud toruraam kaalus 37 kg. Kere kontseptsiooni muutusega loodeti massi alandada vähemalt 10 kg.

Monokokk tüüpi kere on maailma autospordis kasutatud juba alates 1962. aastast, kui konstrueeriti esimene metallmonokokk [1]. Aastal 1981 konstrueeriti esimene komposiitmaterjalist monokokk kere.[2]. Tänapäeval on komposiitkerede kasutus levinud üle maailma erinevatele tehnikaspordi aladele ning on kasutusel ka superautode tootmisel, millistes mass ja jäikus on olulised.

Esimene FS Team Tallinna süsinik- monokokk kere valmistati prototüübile FEST15. Tegemist oli meeskonna esimese antud tüüpi kerega, seetõttu keskenduti projekteerimisel ja tootmisel vastupidavusele. Kuna Eestis puuduvad kogemused monokokk kere valmistamiseks, siis suurem osa lahendustest tuli meeskonnal otsida internetist ning konsulteerides teiste tudengivormeli meeskondadega. Samuti olid abiks Tallinna Tehnikaülikooli õppejõud. FEST15 kere otsustati valmistada ühes tükis vältimaks kokku liimimisest tulenevaid võimalikke ebatäpsusi. Lõpptulemusena valminud kere kaalus 37 kg ilma peamise turvakaareta. Meeskonna viimane toruraam kaalus kokku 36 kg, kuid kuna monokoki projekteerimisel pandi rõhku pigem vastupidavusele ja jäikusele, kui väiksele massile, siis tulemusega võis rahule jääda. FEST15 kere põhjal tehti järeldused, et järgmise kere puhul tuleks alandada massi ning muuta tootmine lihtsamaks.

Kere väändejäikus näitab, kui hästi reageerib auto suunamuutustele mida juht rooliga läbi rataste tekitab. Suurem väändejäikus tagab auto kiirema reageerimise ja parema juhitavuse. Endise tudengivormeli meeskonna liikme Ruben Lennu tehtud uurimusest selgub, et puudub praktiline vajadus saavutada kere väändejäikust üle 2000 Nm/deg[3]. Nimelt, kui sõiduki kere on jäigem, kui vedrustus siis on edaspidine jäikuse kasvatamine vaid lisamassi tekitamine ja ei paranda enam sõiduomadusi. Kere väändejäikuse mõõtmiseks fikseeritakse sõiduki üks telg ja samaaegselt teatud koormusega teist telge surudes tekitatakse vääne. Mõõdetakse jõudu, mida on vaja, et väänata kere ühe kraadi võrra. Sellest tulenevalt saab välja arvutada kere väändejäikuse.



## 1.2 Ülesande püstitus

Antud magistritöö ülesanne on projekteerida ja valmistada tudengivormeli FEST16 kere.

Projekteerimisel tuleb arvestada komponentide paigutust ja sõitja asendit, samuti tudengivormeli sarja reegleid. Rõhku tuleb panna ergonoomikale, vajadusel valmistada sõiduasendi proovimiseks rakis.

Uurida tuleb meeskonna eelmise monokoki omadusi ning tootmismeetodit. Selleks tuleb läbi viia kere väändejäikuse analüüs. Vajadusel tuleb pakkuda välja uusi lahendusi.

Keres kasutatavatele laminaatidele tuleb teostada tugevusanalüüs ning viia läbi vajalikud katsed. Valmistada tuleb vajalikud katsekehad. Valitud laminaatide põhjal teostatakse kere mudelile väändejäikuse analüüs.

Valmis projekteeritud kere peab mahutama piisava ruumivaruga ja täpsusega kõiki komponente, sisaldama kahte turvakaart. Arvestama peab tudengivormeli reeglitega nõutud šabloonidega, mis peavad mahtuma läbi kere teatud sektsioonide.

Töös kasutatakse raalprojekteerimis tarkvara CATIA V5 ning Ansys Composite Prepost (ACP). Programmi CATIA V5 kasutatakse nii modelleerimiseks, kui lõplike elementide (LEM) meetodil tugevusanalüüsi teostamiseks. Komposiitmaterjalide tugevusanalüüs viiakse läbi ACP keskkonnas LEM meetodil.

Eesmärgini jõudmiseks jaotati töö peatükkideks:

- FEST15 kere väändejäikuse ja massi mõõtmine
- FEST16 kere komponentide paigutus
- Kere materjalide valik
- Kere modelleerimine
- Kere tugevusanalüüs
- Kere liimliite analüüs
- Kere elektrijuhtivuse tagamine
- Kere tootmine

## **1. FEST15 mass ja väändejäikuse mõõtmine**

### **1.1 FEST15 mass ja võrdlus arvutusmudeliga**

Enne kui alustati vormeli kere projekteerimisega, tuli selgitada välja eelneva kere puudused ja parendamist vajavad aspektid. FEST15 kere massi mõõtmisel selgus, et lõplikuks kaaluks peale kere vormist välja võtmist kujunes 37 kg. FS Team Tallinna endise liikme, Marek Lentsuise koostatud tugevusanalüüsi mudeli massist 22,5 kg erines lõplik tulemus rohkem, kui 10 kg võrra [4]. Tuli välja selgitada, millest võis tekkida niivõrd suur massierinevus arvutusmudeli ja lõpliku toote vahel. Arvutusmudeli põhjal saadud esialgne mass lubas suurt kaaluvõitu viimase valminud toruraami ees, mis koos külgedel paiknevate akusid mahutavate konstruktsioonidega kaalus 35,4 kg.

### **1.2 FEST15 kere väändejäikuse mõõtmine**

Peale massi mõõtmist tuli valideerida arvutusmudelis saadud kere väändejäikuse tulemus reaalsel kerel, et selgitada välja võimalikud puudused.

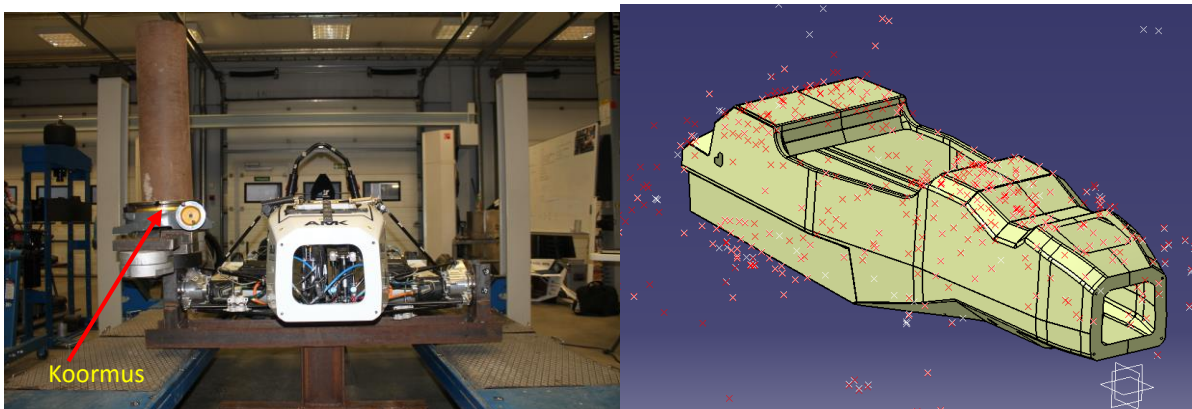
Selleks, et mõõta reaalse kere väändejäikust kasutati juba esimese hooaja FS Team Tallinna liikmete poolt loodud rakist, mida kohandati sobima FEST15 ratta rummudega.

Korraldati „Hub to hub“ katse mille käigus terve auto kinnitatakse rakisesse nii, et esi- ja tagatelg on jäigalt seotud. Üks telgedest on omakorda jäigalt kinni maa või mõne muu jäiga elemendi küljes. Seekord kinnitati auto tõstuki külge vormeli tagumine telg. Teine telg, mis on samuti jäigalt seotud, paigutatakse nii, et see saab ümber kere tsentrijoone kõikuda. Selleks toetub esitelg spetsiaalsele alusele ning telje rakise ja aluse vahele on paigutatud kuullaagri kuul. Amortisaatorite vedrud asendati katse ajaks jäikade torudega, et vältida mõõtetulemuse moonutamist vedrustuse poolt.



Sele 1.1. Väändejäikusrakisesse paigutatud vormel FEST15

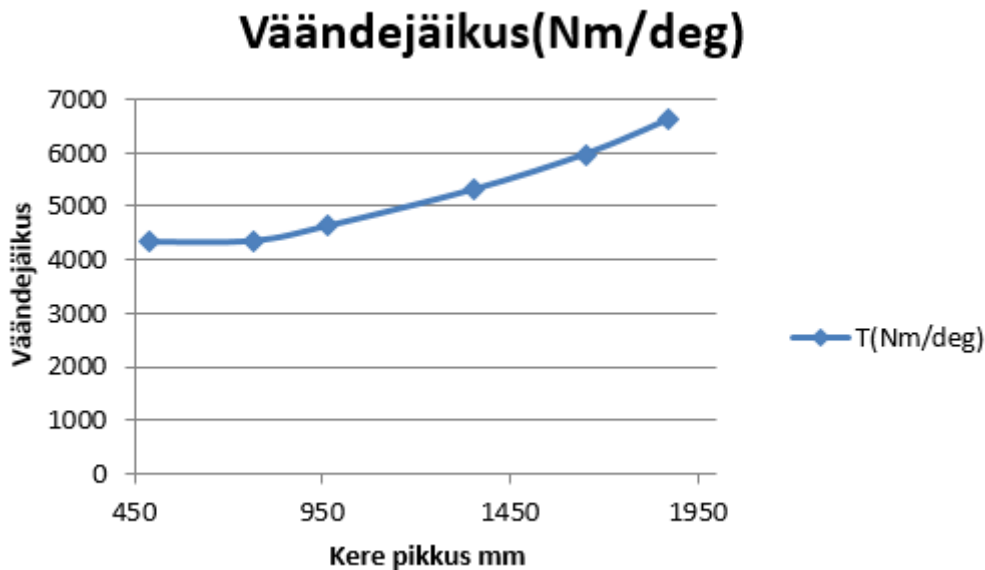
Kui vormel oli paigutatud rakisesse, väänati kere paigutades esitelje ühele poole rakisele massi. Koormusolukorrad enne ja peale massiga koormamist pildistatati üles 3D pildistamise seadmega „Tripod“, tootjalt GOM, Tallinna Tehnikaülikooli nooremteaduri Henri Lennu poolt. Antud 3D pildistamise tehnoloogia kasutab spetsiaalseid markereid, mida tarkvara suudab koordinaatsüsteemis positsioneerida, kui pildistada mingit objekti erinevate nurkade alt. Jälgima peab, et markerid oleksid nähtavad mitmel järjestikusel pildil. Samuti tuli kerele paigutada eraldi markerklepsud, mille tarkvara suudab paigutada kolmemõõtmelisse koordinaadistikku. Pildistamise tulemusena tekib punktipilv mis on võimalik salvestada .igs failiformaati, et paigutada ühte faili kaks koormusolukorda ja ka vormeli kere mudel.



Sele 1.2. 266,5 kg koormatud kere ja 3D mudel koos mõõtepunktidega

Piltidelt on näha eestpoolt pildistatud kere väändejäikusrakises koos koormusega ning 3D koordinaatpildistamise lõpptulemusena valminud kahe koormusolukorra punktivilved koos FEST15 kere cad-mudeliga.

Mõõtmistulemusena valmis CATIA V5 programmis mudel, kus olid koos nii koormatud, kui koormamata olukorra punktid ja ka kere mudel. Nii oli võimalik mõõta erinevates punktides tekkinud deformatsioone ja arvutada välja kere väändejäikus.



Sele 1.3. Kere väändejäikus eest taha

Graafikult on näha, et kere väändejäikus kasvab eest taha kuna tagumine telg ei liikunud. Miinimum väärtus on 4300 Nm/deg. Meeskonna viimase toruraami sama näitaja oli 2640 Nm/deg mõõdetuna LEM analüüsi mudelist [5]. Nagu näha, siis monokokk, kere ja toruraami näitajad erinevad ligikaudu 1700 Nm/deg. Kuna meeskonnal ei olnud probleeme tingituna väikse väändejäikusega kerest, siis võis eeldada, et monokokk kere oli liialt jäik. Liialt jäik kere tähendab ühtlasi ka liigset massi. Kuna FEST15 kere mass oli viimasest toruraamist 1,6 kg raskem, on näha, et projekteerides kere väiksemale väändejäikusele on võimalik toota piisavalt jäik, kuid kergem kere.

### 1.3 FEST15 kere tootmise analüüs

FEST 15 kere otsustati toota ühes tükis, et saavutada maksimaalne jäikus ning võimalikult väike mass. Ühes tükis tootmine tähendas, et kere sai lamineerida ainult läbi vormis oleva kokpiti ava ning kere ees- ja tagaosas paikneva avause, mis osutus äärmiselt keerukaks ja aeganõudvaks. Samuti kannatas mõnevõrra tootmistäpsus, kuna kahe süsiniku laminaadi kihi vahel kasutatud vahust vahekihi tükke ei olnud piiratud liikumisruumi ja nähtavuse tõttu võimalik piisavalt täpselt vormi paigutada. Seetõttu ei sobitunud vahutükid omavahel täpselt kokku ja tekkisid tühimikud, mille täitis lõpuks vaak, mis tähendas liigset massi.

Antud töös käsitletava kere tootmist tuli lihtsustada. Vormidele ligipääsetavus pidi olema parem ning vahekihi tootmine täpsem. Kriteeriumite saavutamiseks võeti vastu otsus toota kere kahes osas- ülemine ja alumine. Võimalik valikuvariant oli ka jagada kere vasakuks ja paremaks pooleks, kuid miinusena võib välja tuua kere poolte omavahelise positsioneerimise täpsuse. Kere jagamisel ülemiseks ja alumiseks pooleks on võimalik kõik vedrusutse kinnitused paigutada ühe poole külge, mis tõstab geomeetria täpsust.

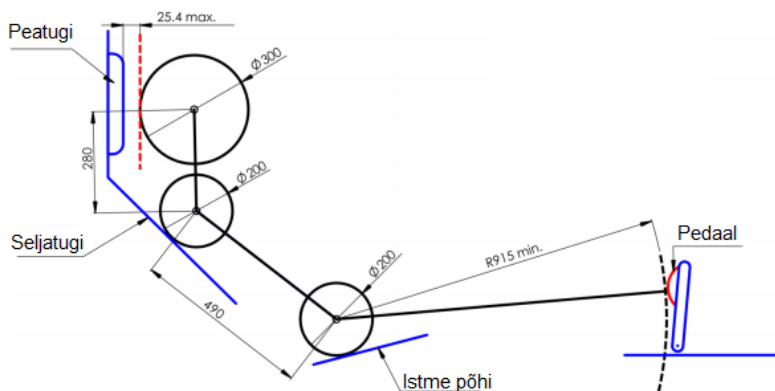
Kahes osas kere valmistamine tõi kaasa poolte liitmise probleemi. Liimimisest tuleb juttu antud töö peatükis „7 Liimliide“.

## 2. FEST16 kere komponentide paigutus

### 2.1 Sõitja asend

Esmalt tuli vormelisse paika panna sõitja. Lisaks sellele, et piloot peab ennast sõites mugavalt tundma, peab ta ulatama ka erinevate nuppudeni, ning vajadusel kiiresti välja saama. Samuti peab sõitjal olema autos ohutu asend (sele 2.2).

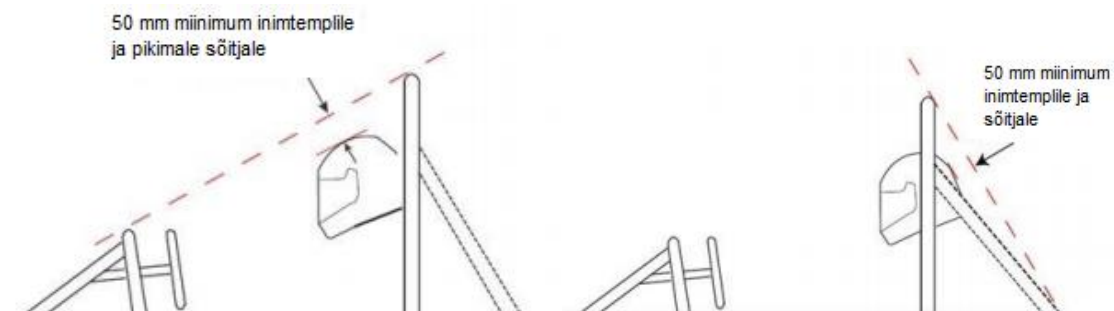
Sõitja asend peab vastama ka reeglitele, mis kontrollitakse vastava šablooniga.



Sele 2.1. Juhi šabloon

Šabloon vastab 95% inimese suurusele ning peab mahtuma vormelisse nii nagu on näidatud seel 2.1.

- Ohutuse tagamiseks peab kere sisaldama kahte turvakaart
- Turvakaarte vahelise sirge ja juhi šablooni vahele peab jääma vähemalt 50 mm vahe
- Peatoe ja kiivri vahel võib olla maksimaalselt 25 mm vahe, kui sõitja on normaalses istesendis
- Kõik mõõtmised teostatakse juhi šablooniga ning ka meeskonna kõige pikema piloodiga, kiiver peas.



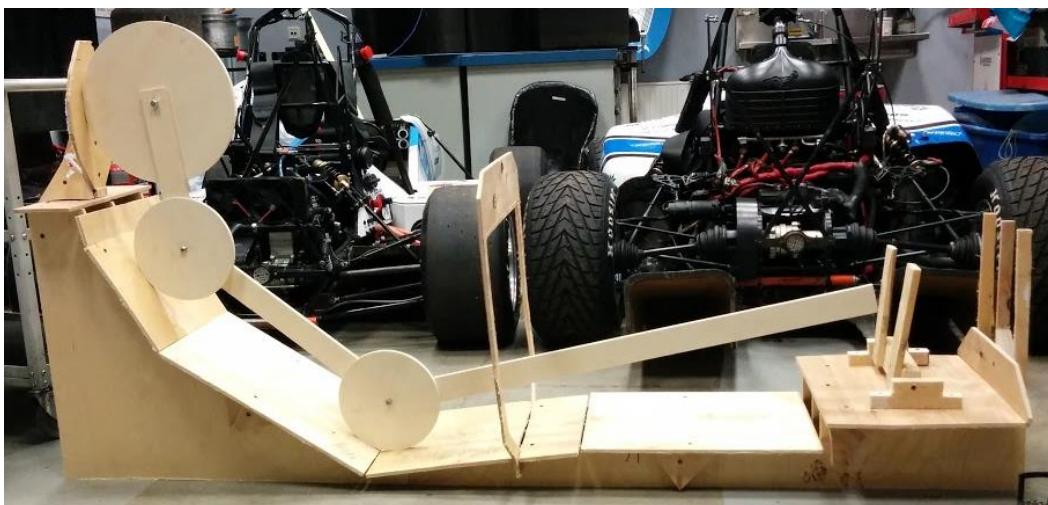
Sele 2.2. Turvakaare distantsinõuded

Sõitja asendi paika panemist alustati eelmiste vormelite asendi analüüsist. Küsiti eelnevatelt pilootidelt, kas nad tahaksid midagi muuta või korrigeerida. Ainuke probleem, millele tähelepanu juhiti, oli asjaolu, et küünarnukid läksid rooli suure nurga alla pöörates vastu jalgu. Kuna tulevasel vormelil oli plaanis tõsta esiosa kõrgust, siis esimese asjana katsetati asendit, kus jalad on kõrgemal kui varasemalt, kuna see parandab aerodünaamilist survejõudu vormeli eesosas. Selleks pandi vanema vormeli iste maha sama nurga alla, kui vormelis ja jalad tõsteti kõrgemale kasutades vormeli rehvi (sele 2.3). Asend ei tekitanud ebamugavust. Kere projekteerimisel otsustati lähtuda analoogselt asendist.



Sele 2.3. Esialgne isteasend tõstetud jalgadega

Sõitja asendi lõplikuks kontrolliks valmistati rakis kus kontrolliti üle nii turvakaarte sobivus kui ka pedaalide asendi reegilpärassus (sele 2.4). Rakisega pandi paika ka peatoe asukoht.



Sele 2.4. Lõplik sõitja asendi rakis

## 2.2 Akukasti paigutus

Akukasti paigutamiseks vormelisse on kasutusel kaks võimalust:

- Külgedel
- Juhi selja taga

Akukasti paigutus	Eelised	Puudused
<b>Külgedel</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lihtne ligipääsetavus</li> <li>• Akukasti ei pea avamiseks vormeli küljest eemaldama</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kaks eraldi akukasti nõuab dubleeritud elektroonikakomponente</li> <li>• Suurem inertsmoment ümber vormeli z- telje</li> <li>• Kõrgem raskuskeskme asukoht</li> <li>• Halvem aerodünaamika</li> </ul>
<b>Juhi seljataga</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Väiksem inertsmoment</li> <li>• Madalam raskuskeskme asukoht</li> <li>• Vähem elektroonikat</li> <li>• Parem aerodünaamika</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Raske ligipääsetavus</li> <li>• Laadimiseks vaja akukast vormelist eemaldada</li> <li>• Keeruline vormelist eemaldamine</li> </ul>

Tabel 2.1. Akukasti paigutus

Eelneval vormelil, FEST15, oli kasutusel akukasti paigutus juhi seljataga. Akukast eemaldati autost läbi kere tagumises otsas oleva avause, mida kattis kerega sama tugev komposiitplaat. Antud paigutus tagab väiksema vormeli inertsmomenti ümber x ja z telje kuna akukasti raskuskese on auto raskuskeskmele lähemal. Samuti, kuna akukasti sai paigutada otse kere põhja, oli ka kogu vormeli raskuskese madalam, kui vormelil FEST14, mille akukastid olid külgedel. Juhi taga asetseva akukasti puhul on võimalik vormeli kere projekteerida kitsam, mis tagab voolujoonelisema kuju ja väiksema õhutakistuse. Kitsam kere omakorda tähendab vähem massi.

Paigutuse miinustena võib välja tuua, et akukasti oli tülikas vormelist eemaldada. Eemaldamiseks oli alati vaja vormel üles tõsta, ning keerata lahti kinnitused, mis asusid põhja all. Samuti tuli eemaldada kere tagumine sein, et nähtavale tuua avaus, mille kaudu akukast välja käis.



Kuna FEST15 puhul tagas akukasti paigutamine juhi seljataha raskuskeskme alanemise 43 mm võrra ning vähenes ka vormeli inertsmoment, siis otsustati koostöös vedrustuse ja akukasti projekteerijatega, et ka FEST16 kerel jääb akukasti asukoht samaks, ehk juhi selja taha vormeli kere põhjale.

Järgnevalt tuli lahendada akukasti välja võtmise küsimus. Akukasti on antud paigutuse korral võimalik vormelist välja saada kolmel viisil: põhja alt, läbi vaheseina, kere tagant läbi avause.

<b>Akukasti eemaldamise viisid</b>	<b>Plussid</b>	<b>Miinused</b>
<b>Põhja alt</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vedrustuse kinnitused saab kinnitada kere tagumise otsa külge</li> <li>• Võimalik valmistada lühem kere</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nõuab kinnitusava ääres tugeva flantsi olemasolu, mistõttu tuleb kere laiem projekteerida</li> <li>• Akukasti eemaldamiseks vaja vormel üles tõsta</li> <li>• Kinnituse projekteerimise tulemusena võib tõusta kere raskuskese</li> </ul>
<b>Läbi vaheseina</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kerele ei ole vaja lisa avasid, kuna vahesein peab olema nagunii eemaldatav.</li> <li>• Võimalik projekteerida kergem kere</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kokpiti ava piiritleb ära akukasti suuruse</li> <li>• Tõenäoliselt tekkiv suur ruumipuudus akukasti eemaldamisel</li> <li>• Keeruline akukasti eemaldamine</li> <li>• Akukasti eemaldamiseks vaja vormel üles tõsta</li> </ul>
<b>Läbi kere tagumise ava</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Akukasti saab eemaldada ka siis, kui vormel on ratastel</li> <li>• Vajab eemaldamiseks kolme inimese asemel kahte</li> <li>• Võimaldab kasutada kõige suuremat akukasti</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vajab lisa ava kere tagaossa</li> <li>• Ei saa kinnitada vedrustust kere tagumise seina külge</li> <li>• Akukasti eemaldamiseks vaja vormel üles tõsta</li> </ul>

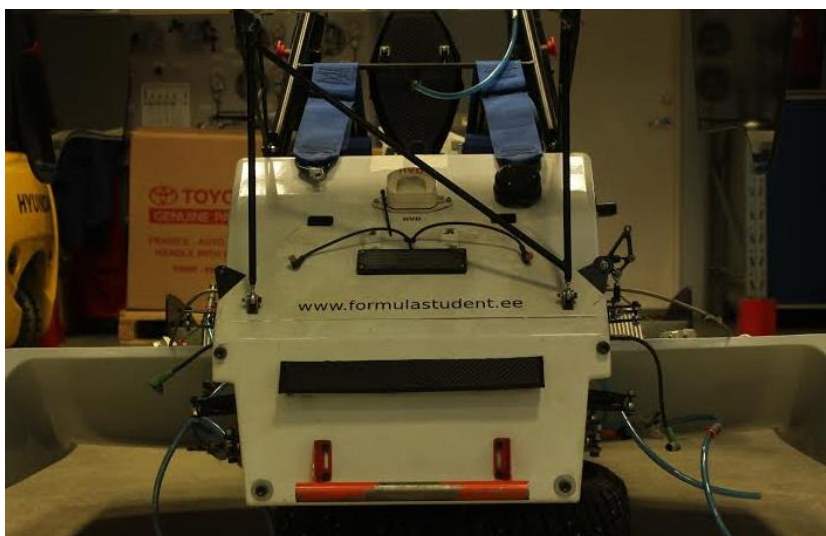
Tabel 2.2. Akukasti eemaldamise viisid

Kolme variandi kaalumisel valmis tabel, mille tulemusena otsustati, et akukasti eemaldamise viis ei tohi piiritleda ära akukasti suurust. Samuti ei tohi eemaldamise viisist tingituna muutuda kere laiemaks kuna see vähendab aerodünaamilist efektiivsust. Kuna akukasti põhja alt eemaldamine nõuab tugevat ja hästi projekteeritud flantsi, mis tõenäoliselt muudaks kere laiemaks, siis sellest variandist loobuti. Samuti ei olnud teada kui hästi suudetakse akukast kätte saada läbi vaheseina, kuna eelneva vormeli, FEST15 akukasti eemaldamine läbi vaheseina ei oleks olnud võimalik ja ka FEST16 akukast ei olnud väiksem. Nagu selgus hiljem, siis tänu elementide vahetusele, mis tagasid 7,5 kg võrra väiksema massi ja suurema laadimisvoolu, kuid seejuures hõlmasid suurema ruumala, tuli akukast suurem eelnevast.

	<b>Akukasti mõõtmed</b>
<b>FEST15</b>	835x383x189 mm
<b>FEST16</b>	846x431x200 mm

Tabel 2.3. Akukasti suurused

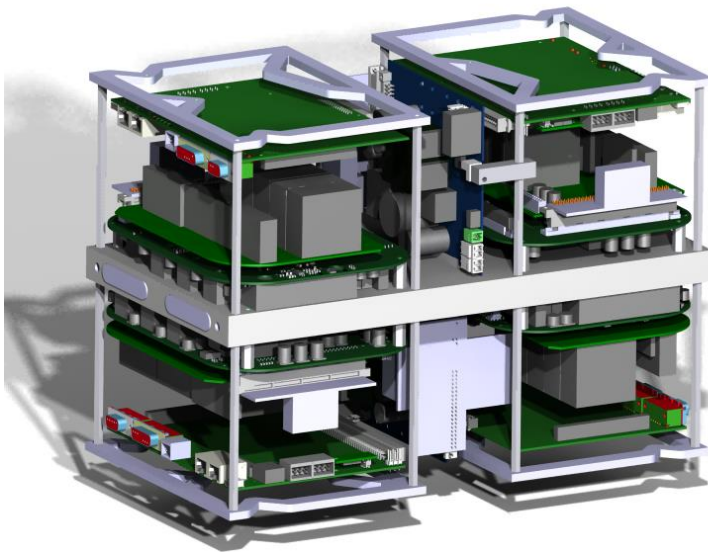
Lõplikud akukasti mõõdud suurenesid igas mõõtmes. Seega otsustati jääda akukasti eemaldamise juures sama lahenduse juurde nagu oli kasutusel FEST15 vormelil, ehk akukast eemaldatakse läbi kere taha otsa projekteeritud ava, mida katab komposiitmaterjalist plaat, mis on sama tugev kui kere. Miinusena tuleb küll välja tuua, et vedrustuse kinnitusi ei saa viia tagaseinale ning kere tuli projekteerida sellevõrra pikem kuna kinnitused ei saa asuda nurkade ja äärte läheduses. Samas ei olnud nii rangelt ära piiritletud akukasti mõõtmed, eriti pikkus. Vajadusel sai lihtsalt viia sisse muudatusi kere mõõtmetes, eeldusel, et vormide tootmine polnud alanud.



Sele 2.5. Akukasti avaust katev kereplaat FEST15 küljes

## 2.3 Mootorikontrolleri paigutus

Antud töös käsitletava vormeli kere sisse tuli ära mahutada ka elektrimootorite kontrollid. Vormelil FEST16 on veoskeemina kasutusel nelikvedu, tänu mootoritele saksa tootjalt AMK [6]. Antud mootorid paigutatakse iga vormeli ratta juurde saavutamaks võimalikult väikest ülekande massi. Mootorite komplektis on ka kontrollid, mis tuli ära mahutada kere sisse. Sisuliselt on tegemist iga mootori eraldi kontrolliga, mis on kokku pandud ühe raami külge.



Sele 2.6. AMK mootorite kontrollid

Kontrollid on mõõtmetega 336 x 183 x 237 mm. [7] Ülemise ja alumise inverteri paari vahel on jahutusplaat, millest jookseb läbi jahutusvedelik. Pildilt on näha, et kontrollidel puudub kaitsev korpus, samuti ei ole see kuigi kompaktsed. Kontrollid on võimalik kompaksemaks saada eraldades selle mitmeks osaks. Tootja seda ei soovita kuna on olemas oht rikkuda elektroonikakomponente. FEST16 puhul otsustati mitte eraldada kontrollid osadeks, vaid vähendada selle massi muutes jahutusplaadi kaheosaliseks, jättes ära ebavajaliku osa kahe inverteripüstaku vahel, mis otseselt ei jahuta midagi.

Kontrollide kaheks jagades oleks see võimalik ära mahutada vormeli kerest väljapoole, kuid kuna elektroonikameeskond ei tahtnud riskida kontrollide lõhkumisega, tuli sellele leida koht kere sees. Samuti tähendaks kontrollide osadeks jaotamine ka pikemate juhtmete vajadust, mis kõrgepinge juhtmete puhul tähendaks massilist kuni 2 kg. Ainuke paik kuhu kontrollid ära mahtus oli juhi selja taga akukasti kohal. See tõstab küll raskuskeset, kuid ei muuda kere

laiemaks. Samas ei saa kere joon sõitja selja tagant kohe langema hakata vaid peab olema piisav, et mahutada ära kontrollid.



Sele 2.7. Kontrolleri paigutus

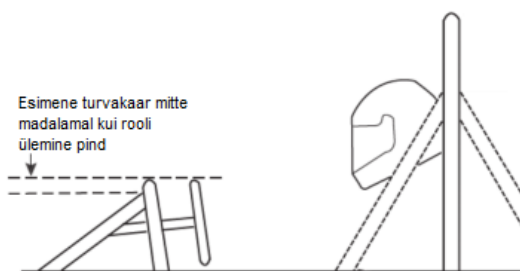
## 2.4 Turvakaared

Tudengivormeli kerel peab olema kaks turvakaart. Esimene turvakaart ehk „Front Hoop“ peab paiknema kere eesosas ja peamine turvakaart ehk „Main Hoop“ juhi pea juures. Turvakaarte asendi nõuded juhi pea suhtes on toodud peatükis 3.1. Lisaks sellele on seatud piirangud turvakaarte materjalile, valmistamise viisile ning kinnitusele.

### 2.4.1 Nõuded esimesele turvakaarele

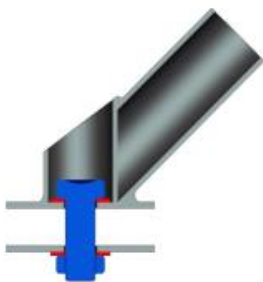
Järgnevalt on toodud väljavõtted tudengivormeli 2016 aasta reeglitest, mis kirjeldavad nõudeid monokokk kerele kinnitatavale turvakaarele [8].

- T3.12.4 Esimese turvakaare kõige ülemine pind ei tohi olla allpool kui rooli kõige ülemine pind ükskõik millise rooli asendis (sele 2.8)



Sele 2.8. Esimese turvakaare asend rooli suhtes [8]

- T3.12.5 Eesmine turvakaar ei tohi olla roolist eespool rohkem kui 250 mm.
- T3.35.1 Komposiitmaterjalidest turvakaare kasutamine on keelatud
- T3.35.2 Esimese turvakaare kinnitus monokokile peab vastama reeglile T3.39
- T3.39 Monokoki ja mõne teise primaarstruktuuri kinnitus peab igas suunas kannatama 30 kN suurust koormust
- T3.39.3 Iga kinnituspunkt vajab minimaalselt kahte 8 mm tugevusklassiga 8.8 polti
- T3.39.4 Iga kinnituspunkt vajab terasest tugiplaati minimaalse paksusega 2mm
- T3.39.5 Eesmise turvakaare tugede ja peamise turvakaare tugede kinnitustes tohib alternatiivina reeglile T3.39.3 kasutusel olla ka üks 10 mm polt tugevusklassiga 8.8, kui polt on toru tsentris nagu on näidatud seel 2.9



Sele 2.9. Turvakaare toe kinnitus [8]

## 2.4.2 Nõuded peamisele turvakaarele

Järgnevalt on toodud välja nõuded tudengivormeli 2016 aasta reeglistikust, millele peab vastama peamine turvakaar [8].

- T3.34.1 Peamine turvakaar peab olema valmistatud ühes tükis, ilma lõigete ja kahjustusteta terastorst reegli T3.4.1 järgi ning peab ulatuma monokoki põhjani.
  - T3.4.1 Peamine turvakaar peab olema valmistatud terastorst mõõtudega 25,4 x 2,4 mm või 25 x 2,5 mm. Teras peab sisaldama minimaalselt 0,1% süsinikku
- T3.34.2 Peamine turvakaar peab olema mehaaniliselt kinnitatud monokoki ülemisest ja alumisest osast ja vajadusel ka vahepealt
- T3.34.3 Turvakaarele keevitatud kinnitusplaadid peavad olema vähemalt 2mm paksusest terasest.
- T3.34.4 Peamise turvakaare kinnitus peab vastama reeglile T3.39. (vt. peatükk 3.4.1)

## 2.4.3 Esimese turvakaare materjali ja profiili valik

Erinevalt peamise turvakaare materjalist ja profiilist, mis on üheselt ära määratud, ei ole esimese turvakaare materjalile ja profiilile nii kindlaid piiranguid. Samuti ei pea esimene turvakaar ilmtingimata olema ilma lõigeteta. See tähendab, et see võib olla mitmest jupist kokku keevitatud.

	<b>Tavareeglitega nõutud materjal</b>	<b>Alternatiiv 1 Terastoru</b>	<b>Alternatiiv 2 Alumiiniumtoru</b>	<b>Alternatiiv 3</b>
<b>Esimene turvakaar</b>	25x2,5 mm terastoru	Terastoru miinimum seinapaksusega 2 mm. Nõuab suuremat välisdiameetrit, vaja valmistada tõmbekatse	Lubatud on alumiiniumtoru minimaalse seinapaksusega 3 mm. Võtab tänu vajalikule suuremale diameetrile rohkem ruumi kui tavareeglite toru	Lubatud ka muu kuju peale ümartoru, vaja tõestada, et on vähemalt sama tugev kui reeglitega nõutud terastoru

Tabel 2.4. Esimese turvakaare materjali ja profiili valik

Esimese turvakaare ristlõike kuju on reeglite põhjal vabalt valitav. Terasel asemel on võimalik kasutada alumiiniumi, mis nõuab küll minimaalset seinapaksust 3 mm. Iga variandi puhul, mis ei liigitu tavareeglite alla on vaja tõestada, et valitud profiil ja materjal on vähemalt sama tugev kui toru, mis on ette määratud tavareeglite järgi.

Alternatiivi 1 puhul, kus on lubatud väiksem seinapaksus, kui tavareeglitel, tuleb tähelepanu pöörata sellele, et saavutamaks väiksema seinapaksusega samast materjalist toruga sama tugevust on vaja suurendada toru diameetrit. See omakorda tähendab, et kere seespool jääb ruumi vähemaks jalaosa šablooni jaoks. Esimese turvakaare piirkonnast liigub läbi kogu kere esiosa juhtmestik ning antud piirkonnas paikneb ka vormeli roolisüsteem. Suurema diameetriga toru tõttu tekkiva võimaliku ruumi probleemi tõttu otsustati antud variandist loobuda.

Samadel põhjustel nagu alternatiiv 1 puhul ei võetud kasutusele ka alternatiivi 2, kuna suurema diameetriga toru seab ohtu šablooni mahtuvuse ning omakorda tehnilise kontrolli läbimise võistlustel.

Alternatiiv 3 ehk mõni muu ristlõike kuju peale toru tähendab, et kasutada võib ka mõnda muud profiili, kui tõestatakse ära ekvivalentne tugevus tavareeglite torule. Samas ei tohi kasutada väiksemat seinapaksust, kui 2 mm terasel või 3 mm alumiiniumil. Muud materjalid lubatud ei ole. Eelneval autol, FEST15 kasutati esimese turvakaarena 25x25x2,5 mm nelikanttoru, millele löigati torulaseriga painutusasukohadesse „säljud“ ning mis peale seda painutati ning painete kohast üle keevitati. Antud profiili valik õigustas end kuna turvakaar lamineeriti kere sisse, kahe süsiniku kihi vahele. Antud viisil paindeid tehes järgis turvakaar kere pinda nii, et turvakaare profiili ja välise süsiniku kihi vahele jäi minimaalne vahe. Samuti, kuna profiil oli sama paks, kui vahekihis kasutatud vaht, ei tekkinud sellest kühmu ning kasutatava nelikantprofiili tõttu ei jäänud profiili äärde vaigutaskuid.



Sele 2.10. FEST15 esimene turvakaar

Antud töös käsitletava vormeli, FEST16, kere plaaniti valmistada kahes tükis, mis tähendab, et kere pooled liidetakse omavahel peale tootmist. Antud tootmismeetod välistab turvakaare kere sisse lamineerimise kuna seda ei ole võimalik juba valmis tootesse teha. Seega jääb üle paigutada turvakaar kerest väljapoole või kerest omakorda sissepoole.



Sele 2.11. Väljas asuv (vasakul) ning sees asuv (paremal) turvakaar

Turvakaare kerest välja paigutamine annaks juurde vajalikku ruumi kere sissepoole, kuid mõjub halvasti aerodünaamikale ja juhi nähtavusele.

Kere sisse paigutamine lubab saavutada paremat aerodünaamilist efektiivsust. Samuti, kuna turvakaare asukohas on üleminek jalaosalt kokpiti avausele, on kere selles piirkonnas laieneva



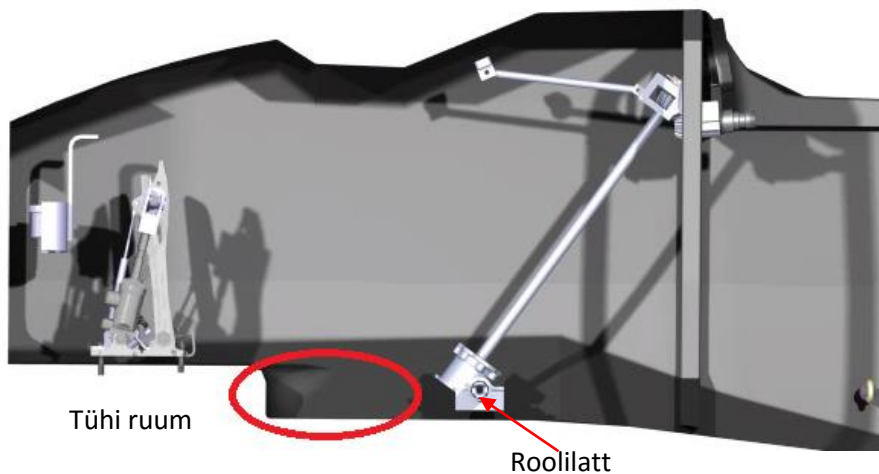
kujuga. Seega saaks minimaalselt väikeste mõõtudega turvakaare mahutada ära ka kere sissepoole.

Kuna monokokk-kere tootmisel läheb toode seda ebatäpsemaks, mida vormist sissepoole kihid liiguvad, muutuvad ka teravamad omavahel lähestikku olevad raadiused seespool üheks ühtlaseks kaareks. Seega pole võimalik saavutada nii teravaid nurki nagu saavutati FEST15 kere juures, kui sinna paigutati esimest turvakaart. Võib järeldada, et piisavalt täpse turvakaare sobivuse saavutamiseks kerega pole vaja teha kuigi väikese raadiusega paindeid. Kuna nelikantprofiil on raskem kui toru, mille diameeter on sama mõõduga, mis profiili küljepikkus, pole seda otstarbekas kasutada. Samuti on toruprofiili lihtsam painutada.

Valikusse jäi tavareeglitele vastav terastoru, kuna see on võimalikest väikseimate mõõtmetega ning seda on võimalik lihtsalt painutada. Puudub vajadus torulaserlõikuse järele. Eelnevalt mõõtu painutatud turvakaare toru paindeid on vajadusel võimalik mehaaniliselt ise muuta saavutamaks täpset sobivust kerele.

## **2.5 Roolisüsteem**

Roolisüsteemi geomeetria pandi paika 2016 tudengivormeli hooaja vedrustuse geomeetria autori Jonar Ilvese ja antud töö autori poolt. Kõigil eelnevatel FS Team Tallinna poolt ehitatud vormelitel oli roolilatt paigutatud kerest sissepoole kuna siis on komponent kaitstud. Nii tehti ka eelneva, meeskonna esimese monokokk-kere puhul. Toruraami puhul oli antud valik põhjendatud ka sellega, et ei kaasnenud olulist materjali lisakulu ja jalaosa templi kontrollimisel oli võimalik sobiva kere katmiku kuju puhul templit ülespoole liigutada. Monokokk-kere puhul seda võimalust ei ole ehk kogu jalaosa ulatuses tuleb arvestada ruumi piirangutega igas suunas. Eelneva aasta kere, mille geomeetria autoriks oli ka antud töö autor, tuli eraldi arvestada ka roolilati jaoks vajamineva ruumiga. Mistõttu tuli kere põhi viia antud kohast roolilati alla ning samuti kontrollida, et ruumi jaguks piisavalt roolilatist üleval pool. See tähendas, et latist ettepoole tekkis tühi ala, mis ei olnud piisavalt suur ühegi komponendi paigutamiseks. Kuid antud ruumi tekitamiseks oli vaja siiski materjali ehk lisamassi.

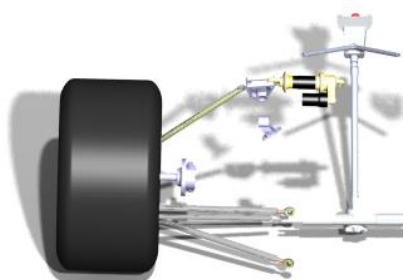
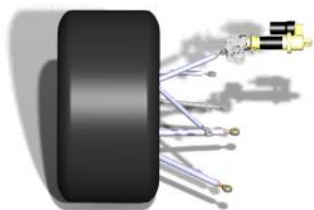


Sele 2.12. FEST15 kere esiosa

FEST16 kere puhul otsustati, et roolilatt paigutatakse põhja alla. Komponenti kõrgus maapinnast selle sammuga liigub allapoole, kuid kere sisemine osa on kompaktsem ning kere on võimalik projekteerida kergem. Samuti lihtsustub põhja kuju, mis tähendab täpsemat tootmist ning väiksemat massi. Roolilati kaitsmiseks löökide eest oli vaja sellele teha kate. Kate aitab parandada ka aerodünaamilist efektiivsust, mida põhja alune roolilatt vähendab.

### 3.6 Vedrustus

Kuigi vedrustuses põhimõttelisi muudatusi plaanis polnud, tähendas roolilati põhja alla liikumine, et kere esiosa tõuseb kõrgemale võrreldes eelmise kerega. Seetõttu võttis vedrustuse meeskond kinemaatika projekteerimise alfaasis sisendiks, et esivedrustuse alumiste õõtshoobade kinnitused liiguvad põhja alla. Kinemaatika seisukohast oli antud muudatus positiivne kuna ratta külgakalle muutub vähem.



Sele 2.13. Vedrutuse koost (all esivedrustus)

### 3. Kere materjalide valik

Komposiitmaterjalist kere koosneb kolmest komponendist.

- Armatuur, ehk kangas
- Maatriks ehk vaik
- Laminaadi kihtide vahel kasutatav vahematerjal

Armatuurina on monokokk-keredes kasutusel süsinik-kiud kangas. See hakkas laialt motosportis levima 1980 aastal kui võeti kasutusele esimene süsinik monokokk kere McLaren'i f1 meeskonna poolt. Monokokke oli varasemalt valmistatud ka alumiiniumist kombineerituna alumiiniumist kärkmaterjaliga, kuid süsinik omab alumiiniumist kuni 13 korda suuremat teoreetilist eritugevust [9]. Suurem eritugevus tähendab kaalusäästu. Eritugevus on teoreetiline, sest antud väärtus väljendab ideaalse materjali tugevust. Süsiniku kiu pinnal aga esineb alati mikrokoopilisi vigu, mis vähendavad reaalselt materjali tugevust. Sellest olenemata on saavutatakse tänapäeval vormel 1 klassis komponentidel 30% - 50% kaalusäästu võrreldes samaväärsete metallisulamitest valmistatud komponentidega [9].

Materjal	Tihedus, $p$ (g/cm <sup>3</sup> )	Tõmbetugevus, $\sigma$ (MPa)	Elastsusmoodul, $E$ (GPa)	Eritugevus, ( $\sigma/p$ )	Erielastsus moodul, ( $E/p$ )
<b>Teras</b>	7,8	1300	200	167	26
<b>Alumiinium</b>	2,81	350	73	124	26
<b>Titaan</b>	4	900	108	204	25
<b>Magneesium</b>	1,8	270	45	150	25
<b>E klaaskiud</b>	2,1	1100	75	524	21,5
<b>Aramiid</b>	1,32	1400	45	1060	57
<b>Standard moodul süsinik (T300) [10]</b>	1,76	3530	230	2005	130

Tabel 3.1. Metall- ja komposiitmaterjalide mehaaniliste omaduste võrdlus [9]

E klaaskiud- kõige laialdasemalt levinud kasutatav klaaskiudmaterjal

Standardmoodul süsinik T300- kõige laiemalt kasutatav ja odavaim süsinikkiudmaterjal

Nagu tabelist näha on süsinikul nii suurem eritugevus kui ka erielastsusmoodul kui teistel võimalikel materjalidel. Lisaks parematele mehaanilistele omadustele on kiududest koosnevat kangast kasutades võimalik muuta materjali omadusi erinevates kere osades, mis tähendab, et näiteks vedrustuse kinnituspunktidest saab laduda rohkem materjali kihte ning andmaks kerele paremat väändejäikust saab kanga kiu suuna orienteerida nurga alla. Seega on massi võimalik kokku hoida ka selle arvelt, et kogu kere ulatuses ei ole laminaadi paksus sama ega ka kiudude suunad.

Süsinikkiudu on saadaval erinevate lõimetega kangana, millel on erinevad omadused.

Maatrikmaterjalidena on komposiitmaterjalides kasutusel termoreaktiivvaigud. Need võib jagada kolme suuremasse gruppi.

- Polüestrid
- Vinüülestrid
- Epoksiidid

Kõige paremate mehaaniliste omadustega aga ka kõige kallim on epoksiidvaik.

Epoksiidi eelised võrreldes vinüülestrite ja polüestritega on paremad mehaanilised omadused, hea niiskuskindlus, pikad võimalikud lamineerimisajad, kõrge temperatuuritaluvus (kuni 220 °C) ning väike termokahanemine.

Epoksiidvaikude peamine miinus on hind (3,8-20 eur/kg) mis on kuni 15 korda suurem kui polüestritel (1,2- 2,4 eur/ kg) ning kuni 4 korda suurem kui vinüülestritel (2,5- 5,2 eur/kg). Hinnad olenevad alati ka ostetavast kogusest. [11]

Komposiitmaterjalile jäikuse lisamiseks kasutatakse kahe laminaadi kihi vahel täitematerjali. Need erinevad vastavalt toomismeetoditele.

Kui tootmisel kasutatakse vaiguga eelimpregneeritud ehk „prepreg“ kangast on võimalik laminaadi kihtide vahel kasutada kärpmaterjali. Kärje materjalidest on kasutusel alumiinium ja „Nomex“. Nomex on lühikesetest aramiidkiududest ja vaigust koosnev materjal millest valmistatakse kärpmaterjal. Kärpmaterjali ei ole infusioonimeetodit kasutades võimalik kasutada kuna see täitub vaiguga.

Teine materjal, mida kasutatakse laminaadi kihtide vahel on vahtmaterjal. Vahtu on võimalik kasutada tavalist tüüpi kangaste puhul. Neid materjale saab kasutada nii infusioonimise meetodit kasutades, kui ka märglamineerimisel. Vahud on erikaaluga 60-210 kg/m<sup>3</sup>.

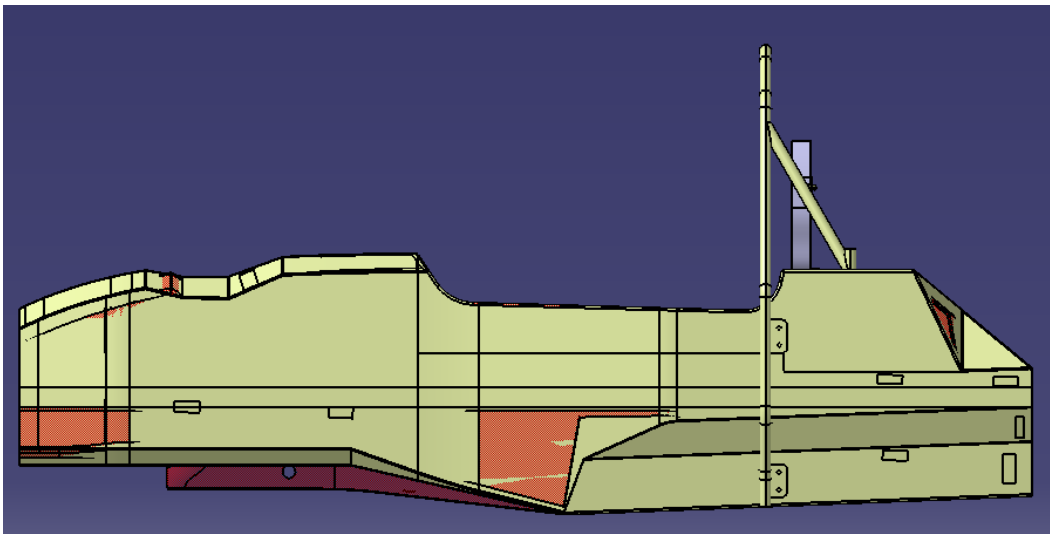
Kuna FS Team Tallinnal puuduvad võimalused kasutada tootmismeetodit mis võimaldaks eelimpregneeritud kangaste kasutust ei saanud antud töös kasutada kärkmaterjale.

Eelneval kerel kasutati terves ulatuses 25 mm paksusega vahtmaterjali laminaadi sisemise ja välimise kihi vahel. Vaid põhja laminaadis kasutati väiksema paksusega 10 mm vahtu. Põhjuseks oli kogu valdkonna uudsus ja kogemuste puudumine. Esimene kere taheti toota piisava tugevusvaruga mitte viimase piirini optimeerituna. Vahuna kasutati AIREX C70 struktuurset PVC vahtu tihedusega  $80 \text{ kg/m}^3$  [15]. Tegemist on küllaltki suure tihedusega materjaliga, mistõttu antud töös konstrueeritava kere juures taheti leida kergem lahendus. Üks võimalus on vähendada materjali paksust. Samuti on võimalik vähendada kasutatava materjali tihedust.

Kuna eelneval aastal tehti paindekatsed torudega, mis olid tugevamad, kui reeglitega ette nähtud, otsustati vähendada vahtmaterjali massi mõlemal võimalikul meetodil. Antud töös konstrueeritavale kerele valiti välja vahtmaterjal AIREX T90 tihedusega  $60 \text{ kg/m}^3$ . Paksuseks valiti 20 mm kuna sellega vähendatakse massi 20% võrra. T90 vaht on tulekindel ja vastav standardile FAR25.853 [22], omab head väsimustugevust ning niiskuskindlust. Samuti on vaht termovormitav, mis võib tootmisprotsessi käigus kujuneda vajalikuks omaduseks. Antud vahtu kasutades otsustati konstrueerida esimesed külgekõrkupõrke ala laminaadi katsekehad. Vahtmaterjali mehaanilised omadused tugevusanalüüsiks saadi toote spetsifikatsiooni dokumendist [16].

## 4. Kere modelleerimine

Kui kõik suuremad sisendid olid olemas ja ära kirjeldatud sai hakata looma kere kuju. Aluseks võeti eelneva aasta kere, eesmärgiga viia kujus sisse minimaalseid muudatusi. Projekteerimisel järgiti põhimõtet, et kõige paremaid tugevusomadusi omavad sirged pinnad. Seega prooviti terve kere struktuursetes osades vältida kumeraid pindasid. Samuti tuli arvestada asjaoluga, et kere projekteeritakse arvutis pindadena, ehk nullpaksusega. See tähendas, et iga komponendi paigutusel tuli arvestada kere paksusega, mis antud kohas oli planeeritud.

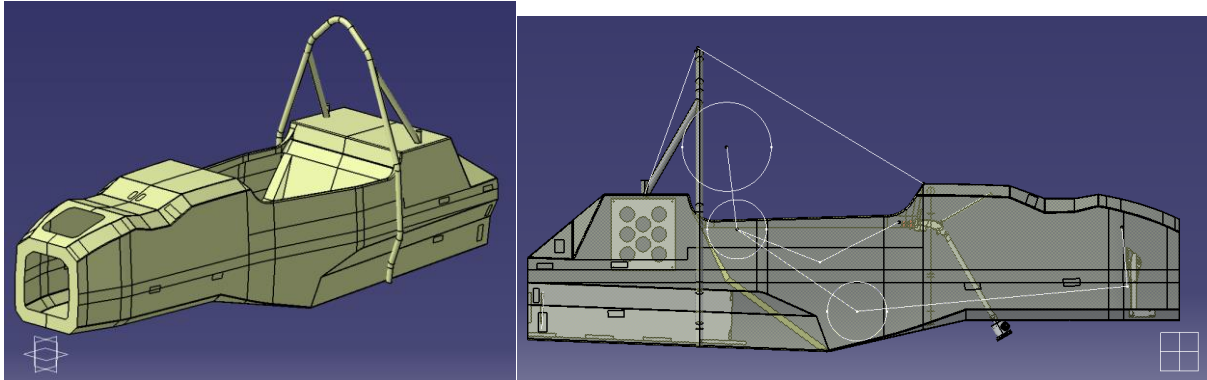


Sele 4.1 Lõpliku kere võrdlus eelmise kerega

Suurim muutus kere lõplikus kujus võrreldes FEST15 kerega toimus esiosas. Muudeti ära põhja kuju, mis tulenes asjaolust, et roolilatt liigutati põhja alla. See võimaldas kogu põhja projekteerida kolmest pinnast. Eelnevalt koosnes põhi kuuest pinnast millest üks oli väike ja kumerusega, mis põhjustas tootmise faasis probleeme, kuna seda katvat vahutükki oli keeruline ja ajamahukas täpsesse mõõtu töödelda. Samuti liigutati esiosa üles, mis tulenes jalaosa templi mahutamisest. Eelneval kerel mahtus antud tempel väga napilt tänu sellele, et kere seest liigub ka juhtmestik. Kuna sama riski võtta ei tahetud, et mõne võistluse tehnilises kontrollis probleeme tekiks, siis projekteeriti esiosa suurema varuga.

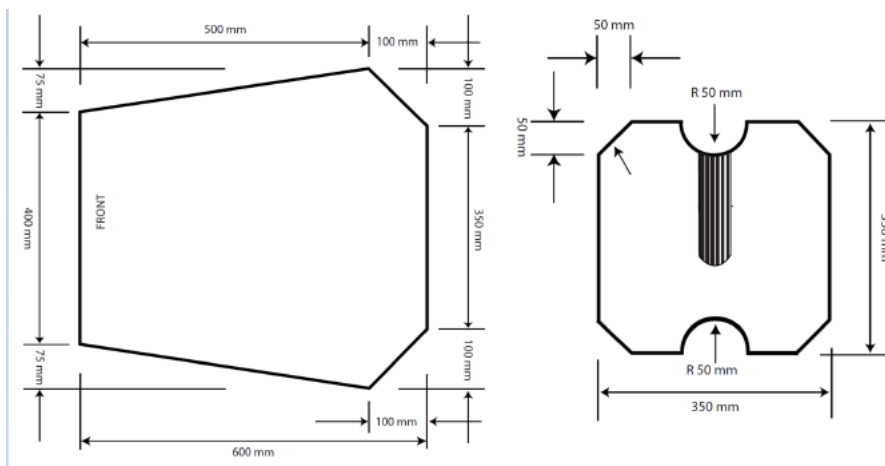
Kere tagaosas olid muudatused minimaalsed ja tingitud vaid komponentide kuju muutusest võrreldes eelneva kerega. Eelkõige muutus kere laiemaks, mis oli tingitud akukasti mõõtmete suurenemisest. Samuti liigutati peamine turvakaar kerest väljapoole, et akukast mahuks sisse ja jääks rohkem ruumi nii juhtmestikule kui controllerile. Eelneval kerel oli antud komponentide paigutus üksteisele väga lähedistiku mis tekitas probleeme kere sees juhtmestiku vedamisega.

Eriti mootoritesse suunduvate kõrgepinge juhtmetega, mis on 13 mm diameetriga ja ei ole kuigi painduvad. Samuti jäi rohkem ruumi jahutusvoolikutele ning jahutussüsteemi pumbale ja paisupaagile, mis kinnitub kontrolleri külge kere tagaosas.



Sele 4.2. Lõplik kere (vasakul) ja kere peamiste komponentidega (paremal)

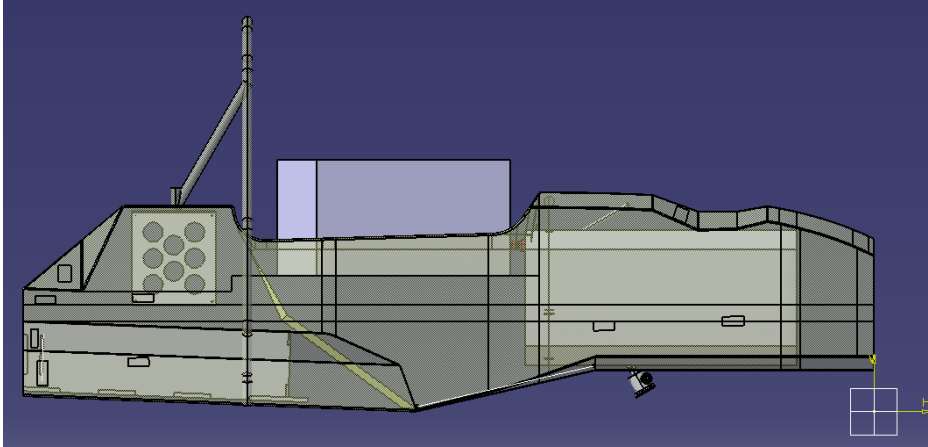
Selelt 4.2. on näha väljaspoole paigutatud turvakaar, mis andis juurde ruumi kere sisemusse, eelkõige akukasti paigutamiseks ning võimaldas suurendada kere laiust tagaosas minimaalselt.



Sele 4.3. Kõpiti avause ja jalaosa templid [8]

Selelt 4.3 on näha nii kõpiti avause tempel kui jalaosa tempel. Kõpiti templiga kontrollitakse kõpiti ava piisavat suurust. Templit liigutatakse ülevalt alla kuni saavutatakse maapinnast kõrgus 350 mm. Jalaosa tempel peab ilma takistusteta mahtuma läbi kere osast, kus paiknevad jalad, kuni 100 mm kaugusele kõige eesmisest pedaalist. Ainsaks takistuseks võib olla roolisüsteem, mille jaoks on templile tehtud sisse spetsiaalne soon. [8]





Sele 4.4. Kere kokpitiavause ja jalaosa templiga

## 5. Tugevusanalüüs

Monokokk-kere projekteerimisel on tugevusanalüüs keerukam kui toruraami puhul, komposiitmaterjal ei käitu koormusolukorras nagu homogeenne materjal. Selle omadused ei ole igas suunas samad. Komposiitmaterjali puhul on võimalik kombineerida mitmete erinevate lõimetega kangaid ning lamineerida neid erineva nurga all. Ansys Composite PrePost programmi on võimalik lisada materjale, mille omadused tuleb ise määrata. Saavutamaks võimalikult väikest erinevust tugevusanalüüsi ja reaalsuse vahel oli vaja analüüsi sisendandmeid. Sisendandmete saamiseks tuli teostada erinevatest kangatüüpidest valmistatud katsekehadeگا tõmbe-, surve- ja nihkekatsed. Tõmbekatsed tuli teostada mitme erineva kanga nurgaga kuna erinevate nurkade all materjali omadused muutuvad. Kõik vajalikud tugevusanalüüsi sisendandmete katsed teostas 2015 aasta hooajal meeskonna endine liige Marek Lentsius [4].

Materjali twill nihketugevus	XY	78,4 MPa
	YZ	7,9 MPa
	XZ	7,9 MPa
Materjali UD (uniaktsiaalne) nihketugevus	XY	45,9 MPa
	YZ	6,2 MPa
	XZ	45,9 MPa
Materjali biaxial nihketugevus	XY	65,4 MPa
	YZ	7,6 MPa
	XZ	7,6 MPa

Tabel 5.2. Kasutatavate materjalide nihkeomadused [4]

Materjali twill survetugevus	X	307,6 MPa
	Y	307,6 MPa
	Z	97,6 MPa
Materjali UD (uniaktsiaalne) survetugevus	X	290,6 MPa
	Y	72 MPa
	Z	72 MPa
Materjali biaxial survetugevus	X	344,5 MPa
	Y	344,5 MPa
	Z	92 MPa

Tabel 5.1. Kasutatavate materjalide surveomadused [4]

Materjali twill tõmbetugevus	X	766 MPa
	Y	766 MPa
	Z	19 MPa
Materjali UD (uniaksiaalne) tõmbetugevus	X	1305,7 MPa
	Y	20,9 MPa
	Z	9 MPa
Materjali biaxial tõmbetugevus	X	758 MPa
	Y	758 MPa
	Z	11,3 MPa

Tabel 5.3. Kasutatavate materjalide tõmbeomadused [4]

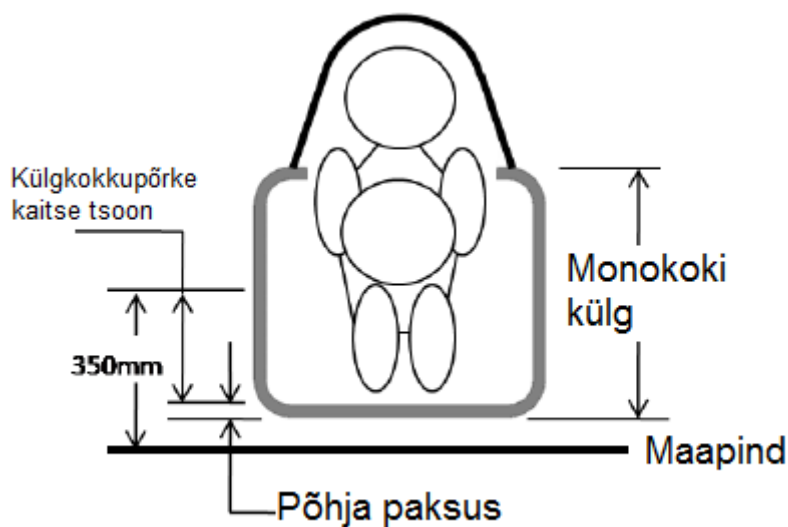
## 5.1 Reeglid

Tudengivormeli sarja reeglid näevad ette, et kui meeskond otsustab ehitada monokokk-kere, siis lisaks tugevusanalüüsile tuleb tõestada kere piisavat tugevust ka reaalse katsetega. Lisaks on reeglitega nõutud kõigi kasutatud materjalide ostudokumentide koopia esitamine. Esitada tuleb ka info kõikide kerel kasutatud laminaatide kohta ning arvutused, mis tõestavad reaalse katse põhjal kere tugevust. Kõik nimetatud andmed koondatakse ühtsesse, struktuurse samaväärsuse dokumenti (i.k. Structural Equivalency Spreadsheet, SES), mis on reeglite koostajate poolt välja antav programmis „MS Excel“ koostatud dokument (Lisa 1). Antud dokumendis on koostatud lehed kõigi vajalike katsete jaoks. Sisestatud on juba kõik vajalikud valemid, et kõikidel meeskondadel oleksid võrdsed arvutuste lähtetingimused. Peamine võrreldav väärtus on materjalide EI (kus E- elastsusmoodul, I- ristlõike inertsmoment). Reeglitega reguleeritud kere osade vajalik tugevus on määratud baasmaterjalist konstrueeritud toruraamiga. Täidetavate lahtrite juures on kiri, mis katsetulemuste sisestamisel näitab, kas antud katse tulemused on reeglite piires või mitte.

Monokokk-kere ehitamisel on vaja tõestada järgnevad kere laminaadid:

- Külgkokkupõrke laminaat
- Kokpiti põhja laminaat
- Kere eesmine otsasein
- Eesmine otsasein
- Turvavöö õlakinnituse laminaat
- Kõrgepinge komponentide kaitse laminaat

Külgkokkupõrke laminaadi kõrgus peab olema maapinnast vähemalt 350 mm (Sele 5.1). Külgkokkupõrke laminaadi katsekeha peab olema vähemalt samaväärsete tugevusomadustega kui kaks metallist toru, mis on antud baasmaterjalide all [8, reegel T3.4.1]. Külgkokkupõrke tsooni jääv kere horisontaalne osa peab olema samade omadustega kui üks baasmaterjalidega määratud metalltoru [8, reegel T3.33.2]. Külgkokkupõrke tsoon asub kere eesmise ja peamise turvakaare vahel. Külgkokkupõrke tsooni laminaadi energia neelduvus peab olema võrdne või parem kui kaks metalltoru, mis on määratud baasmaterjalide all [8, reegel T3.33.3].



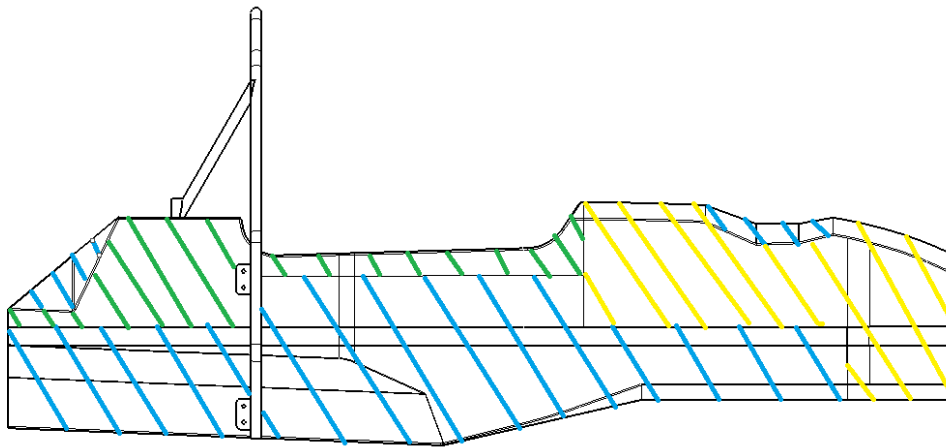
Sele 5.1. Külgkokkupõrke tsoon

Kere eesmise otsaseina toetuse EI peab olema võrdne vähemalt kuue baasmaterjali toruga [8, reegel T3.32.1].

Kere eesmise otsaseina nihketugevus peab olema võrdne või parem kui 1,5 mm paksusega terasplaadil [8, reegel T3.31].

Õla turvavöö kinnituslaminaat peab pidama vastu 13kN suurusele koormusele enne purunemist [8, reegel T3.40.1].

Kõrgepinge komponentide kaitse laminaat peab olema tugevuselt võrdne ühe terastoruga, mis on määratud baasmaterjalide all [8, reegel EV3.4.4].



Sele 5.2. Laminaatide jaotus kerel: Sinine- küljkokkupõrke laminaat; Kollane- eesmise otsaseina tugilaminaat; Roheline- Kõrgepinge komponentide kaitselaminaat

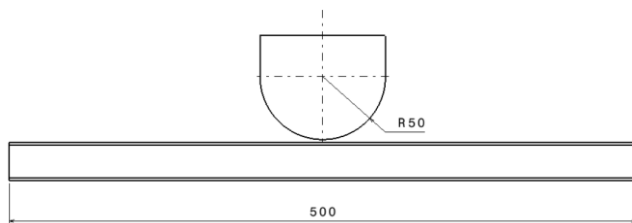
Igale kerel reeglitega reguleeritud piirkonnas kasutatavale laminaadile on vajalik teostada kaks katset:

- Kolme punkti paindekatse
- Nihkekatse

Mõlema katse jaoks on määratud standardsed katsekeha suurused. Katsekehad tuleb valmistada samu tootmismeetodeid kasutades nagu kerel.

### 5.1.1 Kolme punkti painde katse

Kolme punkti painde katsekeha peab olema mõõdudes 275x500 mm. Katsekeha peab olema valmistatud kasutades samu meetodeid nagu kere tootmisel. Koormuse rakendamiseks katsekehale toetatakse otsad tugelele ning paneeli keskelt surutakse koormusega, mille raadius on 50 mm [8, reegel T3.30.4].



Sele 5.3. kolme punkti painde katse skeem [8]

### 5.1.2 Nihkekatse

Nihkekatse sooritatakse katsekehal mis on minimaalselt mõõtudega 100 x 100 mm. Koormuseks tuleb kasutada 25 mm diameetriga ning lapiku otsaga templit. Templil on lubatud ääre raadiuseks 1 mm. Katsekeha toetatakse rakisele, mille keskel on 32 mm diameetriga ava.[8, reegel T3.30.5].

## 5.2 Külgkokkupõrke laminaat

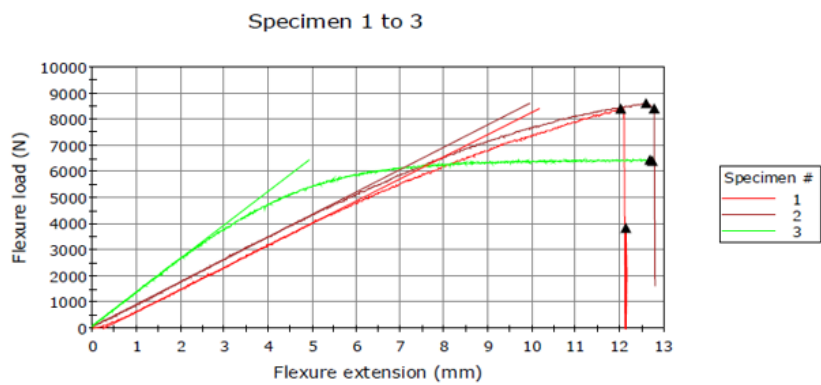
Monokokk kere külgkokkupõrke ala laminaat peab olema samade või paremate mehaaniliste omadustega kui reeglitega nõutud terastorudest valmistatud külgkokkupõrke piirkond. Valideerimiseks tuleb korraldada kolme punkti paine nii torude kui ka komposiitlaminaadiga. Lisaks ka nihkekatse. Eelneva, FEST15, kere projekteerimisel kasutati katsetustes torusid, mis olid valmistatud materjalist 25CrMo4, mille tõmbetugevus on 800-950 MPa [12]. Tudengivormeli reeglitega on aga nõutud materjal mis vastab margile AISI1010, mille tõmbetugevus on 365 MPa [13]. Tugevuse vahe on 2,6 kordne, mis annab alust arvata, et eelneva kere külgkokkupõrke laminaat võis olla üle dimensioneeritud. FEST16 kere jaoks vastava katsetuse tegemiseks hangiti torumaterjal, mis vastab margile 1.0330 [14]. Antud terase tõmbetugevus on 410 MPa, mis on lähedasem reeglitega nõutule.

Esmalt korraldati kolme punkti paine torudest katsekehaga, et saada aimu, mis jõudusid tuleb komposiitlaminaadi tugevusarvutustes kasutada. Toru katsekeha tuleb suruda, kuni saavutatakse deformatsioon 12,7 mm. Antud väärtuse juures tuleb mõõta jõudu ning ka energia neelduvust. Just energia neelduvus on näitaja mille parema väärtuse saavutamine komposiidist katsekehaga valmistas probleeme eelneva kere projekteerimisel. Katse teostati kahe kõrvuti asetseva toruga. Mõõtmised torudel olid määratud tudengivormeli sarja reeglitega baasmaterjal

külgkokkupõrke tsooni jaoks. Välisdiameeter  $D1=25\text{mm}$  ja sisediameeter  $D2=20\text{mm}$ .  
Katseserak on esitatud seel 5.4.



Sele 5.4. Torudest külgkokkupõrke ala katsekeha



	Specimen label	Flexure load at max (kN)	Flexure extension at Break (mm)	Modulus (Automatic) (GPa)	Thickness (mm)	Width (mm)
1	Laminaat 1	8,42	12,12	9,11	21,0	275,0
2	Laminaat 2	8,63	12,76	9,23	21,0	275,0
3	Kaks toru kõrvuti	6,47	12,72	38,44	16,6	200,0

	Specimen note 1	Energy at Break (Standard) (J)	Energy at Tensile Strength (J)
1		55,29	54,60
2		64,59	62,00
3		63,49	63,14

Sele 5.5. Torudest külgkokkupõrke katsekeha graafik

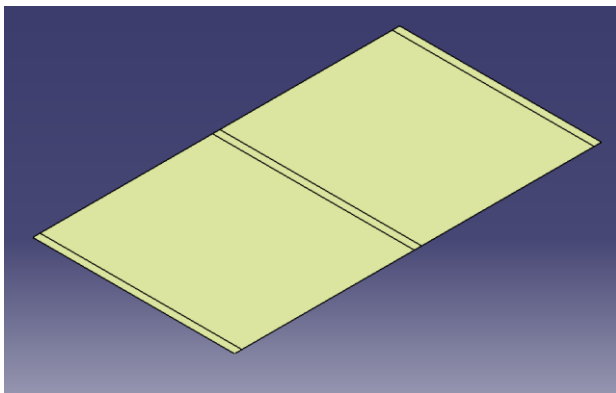
Läbipaine, mm	Jõud, N	Neeldunud energia, J
12,72	6470	63,49

Tabel 5.4. Katse tulemused

Peale torude kolme punkti painde katset sai hakata arvutis projekteerima laminaati. Tugevusanalüüsi sisenditeks võeti samad andmed, mis ka eelneva kere projekteerimisel, kuna süsinikkangaste tüüpe otsustati mitte vahetama hakata.

### 5.2.2 Mudeli loomine

Tugevusanalüüsi jaoks alustati CAD mudeli loomist CATIA V5 keskkonnas. Kõige otstarbekam on tasapinnalist detaili analüüsida pindmudelina. Selleks loodi pindmudel, mis jaotati osadeks, määramaks rajatingimusi.



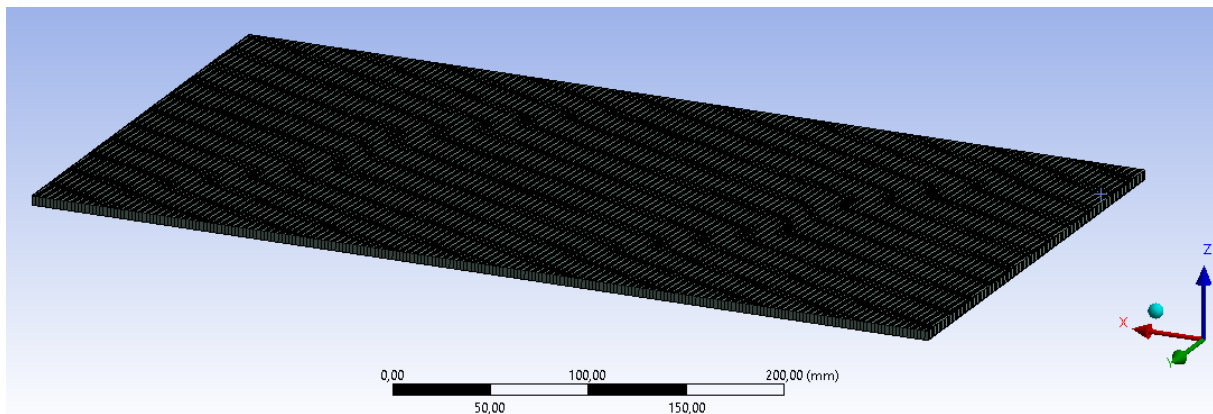
Sele 5.6. 3 punkti paindekatse mudel CATIA V5 keskkonnas

Mudeli pind jaotati osadeks nii, et keskmisele osale saab rakendada jõu ning otsmised pinnad saab vastavalt vajadusele kinnitada.

Peale CAD mudeli valmimist alustati LEM mudeli ülesehitust.

Laminaadi kangakihtides otsustati kasutada kangatüüpi UD ja twill vastavalt nende tõmbe- ja surveomaduste tõttu.

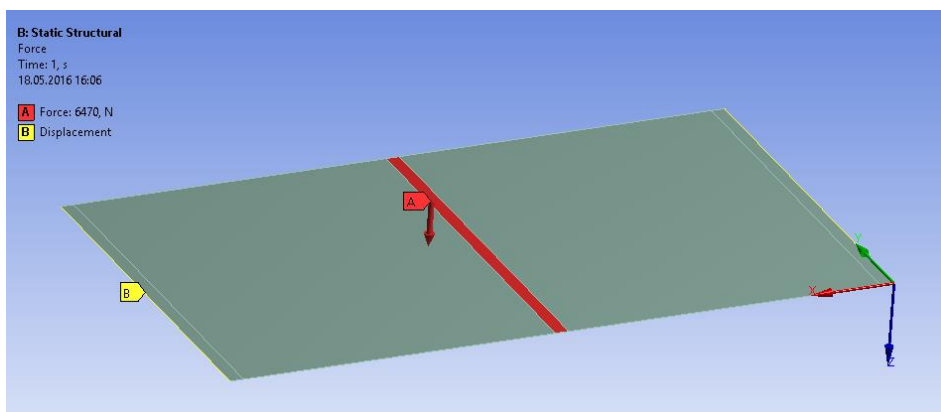




Sele 5.7. Elementide võrgustiku mudel

LEM analüüsi mudelil kasutati nelinurkse koorikelementidega võrgustikku. Elemendi serva pikkuseks valiti 2mm, mis andis elementide arvuks 34638.

Kuna kolme punkti painde katsel on suruvaks elemendiks silindriline keha mille kontaktpind surumise käigus suureneb, rakendati jõud detaili keskele 10 mm laiale osale. Suruva jõuna kasutati torude kolme punkti painde katse maksimaalset jõudu 6470 N. Katsekeha otstele rakendati kinnitus „displacement“ piirates ära liikumise Y ja Z suunas, jättes vabaks liikumise X telje suunas.



Sele 5.8. Kolme punkti painde katse rajatingimused

### 5.2.3 Esimese paigutuse analüüs

Kolme punkti painde katsekeha laminaadi loomisel tuleb arvestada tugevust paindele ning samal ajal peab säilima ka nihketugevus vähemalt 7,5 kN [8, reegel T3.33.4]. Paindetugevust on lihtne saavutada kasutades laminaadi kihtides ainult kangast UD, millel on kõik kiud ühes suunas. Antud kanga tüüp omab kasutatavatest kanga tüüpidest suurimat tõmbetugevust, 1305,7 MPa. Kuid sellist tüüpi kanga nihketugevus 45,9 MPa on madalam kui teistel kasutatavatel materjalidel, vastavalt twill tüüpi kangal 78,4 MPa ja biaxial tüüpi kangal 65,4 MPa. Seega ainuüksi UD tüüpi kanga kasutamine ei ole otstarbekas. Samuti, kuna kasutatavate kangaste twill ja biaxial pinnatihedused on samad- 300 gsm, ei ole viimast otstarbekas külgekõkkupõrke laminaadis kasutada.

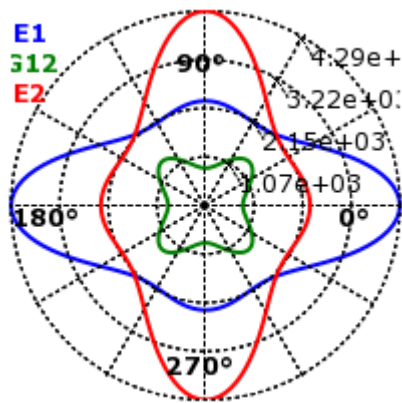
Sisendandmetest lähtuvalt ja erinevaid kangakombinatsioone läbi analüüsides valmis esimene laminaadi kihtide paigutus, millest otsustati ka katsekeha valmis teha. Kuna eelnevast kogemusest oli teada, et komposiitmaterjalide analüüsi tulemus antud katsel võib reaalsusest tugevasti erineda otsustati esimese katsekeha puhul kasutada nelja kihti kangast mõlemal pool. Laminaadi kihte kombineerides lähtuti põhimõttest, et oleks tagatud paindetugevus, säilitades samal ajal ka nihketugevuse.

<b>Kihi number</b>	<b>Kanga tüüp</b>	<b>Nurk, deg</b>
1	Twill	0
2	UD	0
3	UD	0
4	Twill	45
5	Vaht	
6	Twill	45
7	Twill	0
8	Twill	0
9	Twill	0

Sele 5.9. Esimese katsekeha kihtide paigutus

Antud katsekeha massiks kujunes 440 g arvestamata katsekeha tegemiseks kuluvat vaiku.

Ansysis Composite PrePost programm võimaldab analüüsis kasutatud kihte vaadelda eraldi. Selleks kasutati Tsai Wu tugevuskriteeriumit mis näitab nii survet kui ka pinget. Programm näitab analüüsi tulemusi pöördvarutegurina, mis tähendab, et kui tulemuse väärtus läheb väärtuselt üle ühe, toimub laminaadis purunemine.



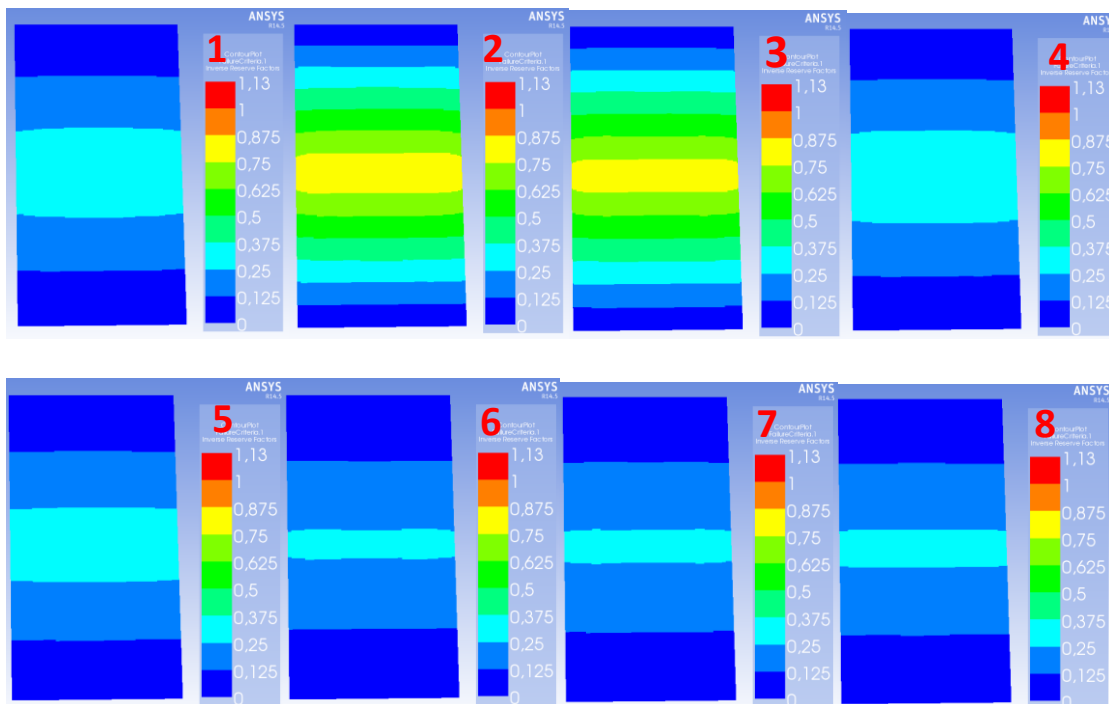
Sele 5.10. Laminaadi omaduste polaargraafik

<b>Laminaadi paindejäikus</b>	11948,30
<b>E1</b>	MPa
<b>Laminaadi paindejäikus</b>	6420,88 MPa
<b>E2</b>	
<b>Laminaadi nihketugevus</b>	824,55 MPa
<b>Laminaadi tõmbetugevus</b>	4290,89 MPa
<b>E1</b>	
<b>Laminaadi tõmbetugevus</b>	2307,56 MPa
<b>E2</b>	

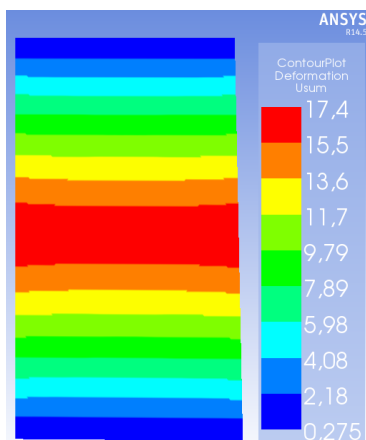
Tabel 5.5. Laminaadi tugevusomadused

Laminaadi polaargraafikult ja ka tugevusomaduste tabelist võib välja lugeda, et nii paindejäikuse kui ka tõmbetugevuse juhul on tugevaimad suunad 0°, 90°, 180° ja 270°. Antud suunas on laminaadis enim kiude. Nihketugevuse suurendamiseks on laminaati lisatud üks kiht 45° nurga all twill kangast. Paindejäikus ja tõmbetugevus suunal 180° ja 0° on suurem kuna selles suunas on orienteeritud ka ühesuunaliste kiudude paigutusega UD kangas.

Järgnevalt vaadeldi kihtide analüüsi tulemusi eraldi.



Sele 5.11. Laminaadi tugevusanalüüsi tulemused kihtide kaupa



Sele 5.12. Laminaadi deformatsioon

Nagu on näha Tsai Wu tugevuskriteeriumi järgi koormatud kihtide analüüsist on kõige rohkem koormatud UD kanga kihid (pildid 2 ja 3). See tuleneb antud kanga suurimast tõmbetugevusest, mis tähendab ka suurimat paindetugevust. Siiski ei näita tulemused purunemist ja üldiselt on kõik kihid ühtlaselt koormatud. Deformatsioon antud jõu juures on 17,4 mm, mis on 5 mm võrra suurem kui oli torudest koostatud katsekehal.

Enter values for minimum and maximum load/deflection in linear-elastic region.

Gradient must be  $\geq$  that of two baseline steel tubes

$x_1$ (mm)	1	$y_1$ (N)	1000	Gradient (N/mm)	823
$x_2$ (mm)	17,4	$y_2$ (N)	6470		

Enter value for force at panel failure or maximum tested force.

$y_{max}$  (N) **6470** ( $\geq$  bending strength of two baseline side impact tubes)

Enter value of absorbed energy, must be  $\geq$  that of two baseline tubes

Energy (J)

Enter details of test setup, panel core and skin thicknesses below

$l$ (mm)	500	Panel Support Span
$h$ (mm)	275	Panel Height (should be 275mm, alternative sizes must be agreed in advance)
$b$ (mm)	20	Core Thickness
$t_1$ (mm)	0,8	Inner Skin Thickness
$t_2$ (mm)	0,8	Outer Skin Thickness
$I$ (mm <sup>4</sup> )	47614	Second moment of area
$E$ (GPa)	45,0	Skin modulus of elasticity
$\sigma_{UTS}$ (MPa)	183	UTS of skins

### Sele 5.13. Analüüsi tulemused sisestatuna SES keskkonda

Tugevusanalüüsi tulemused sisestati seejärel SES keskkonda vastavatesse lahtritesse, et kontrollida vastavust tudengivormeli sarjas nõutud tugevusega. Kuna Ansys Composite PrePost keskkond ei suuda simuleerida laminaadi energia neelduvust, jäeti antud lahter tühjaks. Tulemustest selgus, et läbi analüüsitud laminaat vastab ette seatud tugevustingimustele ning laminaat otsustati valmistada.

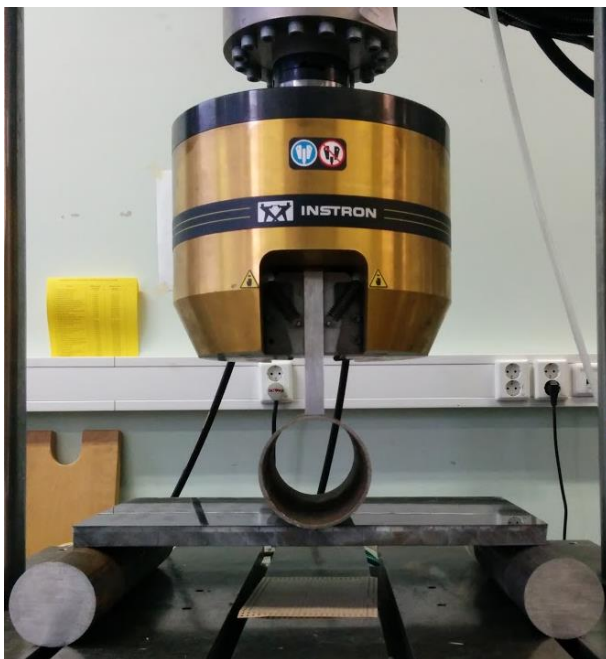
## 5.2.4 Esimese laminaadi katsetus

Laminaadi katsekeha valmistati kasutades infusioonimise tehnoloogiat. Tegu on sama meetodiga, millega plaaniti valmistada ka lõplik kere. Infusioonimise juures kasutati VAP membraankangast, mis aitab saavutada ühtlasema vaigu sisalduse kogu laminaadis, aitab vähendada õhu kogust laminaadis ning tagab ühtlase vaigu voolamise. Tegemist on spetsiaalse kangaga, mis laseb läbi gaase, kuid ei lase läbi vedelikke [17]. Katsekeha lõplikuks massiks peale valmistamist kujunes 1,13 kg.



Sele 5.14. VAP membraankangaga kaetud katsekehade infusioonimine

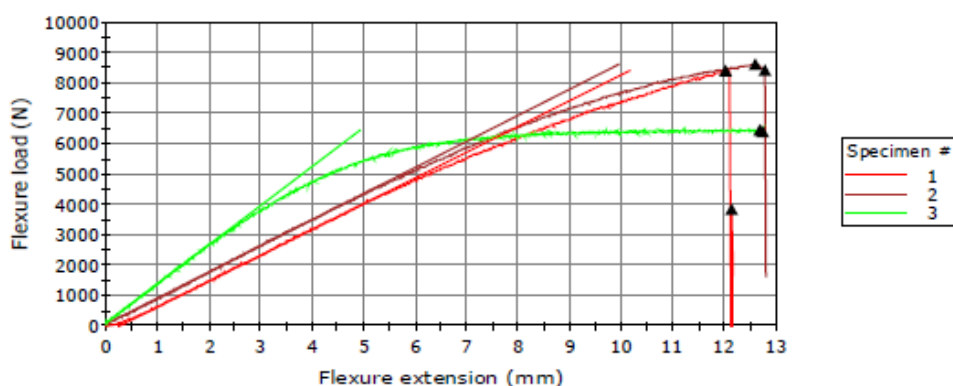
Katse viidi läbi Tallinna Tehnikaülikooli Materjalitehnika instituudi katselaboris Instron 8802 katsepingis. Katse tegemiseks eemaldati katseadmelt alumine kinnituspadrun, mille asemele paigutati laminaadi otste alla silindrilised kehad. Keha suruti keskelt ülevalt poolt 100 mm diameetriga silindrilise kehaga kuni purunemiseni.



Sele 5.15. Üles seatud kolme punkti painde katse

Katseseade väljastab katsetulemused graafikuna ja tulemuste tabelina. Mõõdeti deformatsiooni, jõudu ja neeldunud energiat.

Specimen 1 to 3



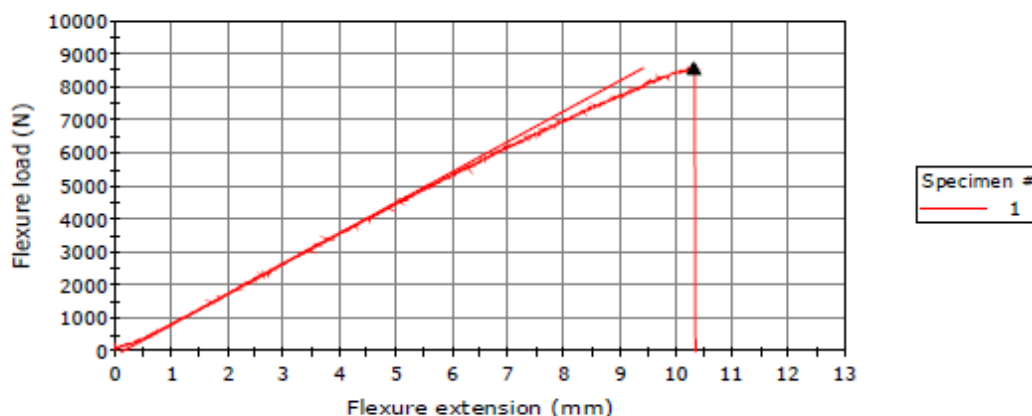
	Specimen label	Flexure load at max (kN)	Flexure extension at Break (mm)	Modulus (Automatic) (GPa)	Thickness (mm)	Width (mm)
1	Laminaat 1	8,42	12,12	9,11	21,0	275,0
2	Laminaat 2	8,63	12,76	9,23	21,0	275,0
3	Kaks toru kõrvuti	6,47	12,72	38,44	16,6	200,0

	Specimen note 1	Energy at Tensile Strength (J)
1		54,60
2		62,99
3		63,14

Sele 5.16. Katse tulemused

Katse tulemustest oli näha, et tingimused on rahuldatud maksimaalse jõu osas, milleks kujunes laminaadi purunemishetkel 8,63 kN. Purunemine toimus läbipainde juures 12,76 mm. Samas ei rahuldanud katse tulemused energia neelduvuse tingimust. Kui torudest katsekeha energianeelduvus 12,72 mm läbipainde juures oli 63,14 J siis laminaadi keha vastav näitaja oli 62,99 J, mis tähendab 0,15 J puudujääki. Korraldati ka üks korduskatse analoogse katsekehaga, et kontrollida tulemust. Sel korral osutusid tulemused halvemaks (sele 5.17).

### Specimen 1 to 1



Sample file name: Formula student 3P-paine sandwich\_30nov2015.is\_flex

Specimen label	Flexure load at max (kN)	Flexure extension at Break (mm)	Modulus (Automatic) (GPa)	Thickness (mm)	Width (mm)
1	8,59	10,31	27,59	16,6	200,0

Specimen note 1	Energy at Tensile Strength (J)
1	46,28

#### Sele 5.17. Laminaat 1 korduskatse

Katse tulemused erinesid kõigis kolmes näitajas, vastavalt läbipaine 10,31 mm, maksimaalne jõud 8,59 kN ja energia neelduvus 46,28 J. Tulemuste erinevus on tõenäoliselt põhjustatud tootmisel tekkivatest määramatustest. Kuna valitud tootmismeetod on suures osas käsitöö ei ole võimalik kahe erineva valmistamisega tagada 100% sarnaseid tingimusi. Peale korduskatset otsustati koostada analüüsis veel kolm võimalikku laminaati, eelkõige nähes, kui suuresti võivad tugevusomadused hajuda. Järgnevatel katsetatavatel laminaatidel otsustati paindejäikuse lisamiseks kasutada kangast UD mõlemal pool kahe laminaadi vahel olevat vahukihti.

### 5.2.5 Laminaadi uuendamine

Järgnevatel katsetusteks otsustati korrigeerida koostada kolm erinevat laminaati, et vähendada tootmisele ja katsetustele kuluvat aega. Iga katsekeha puhul kasutati järjest vähem kangaid. Rõhku pandi katsekeha survele toimivale poolele, kuid iga laminaadi paigutuse juures paigutati



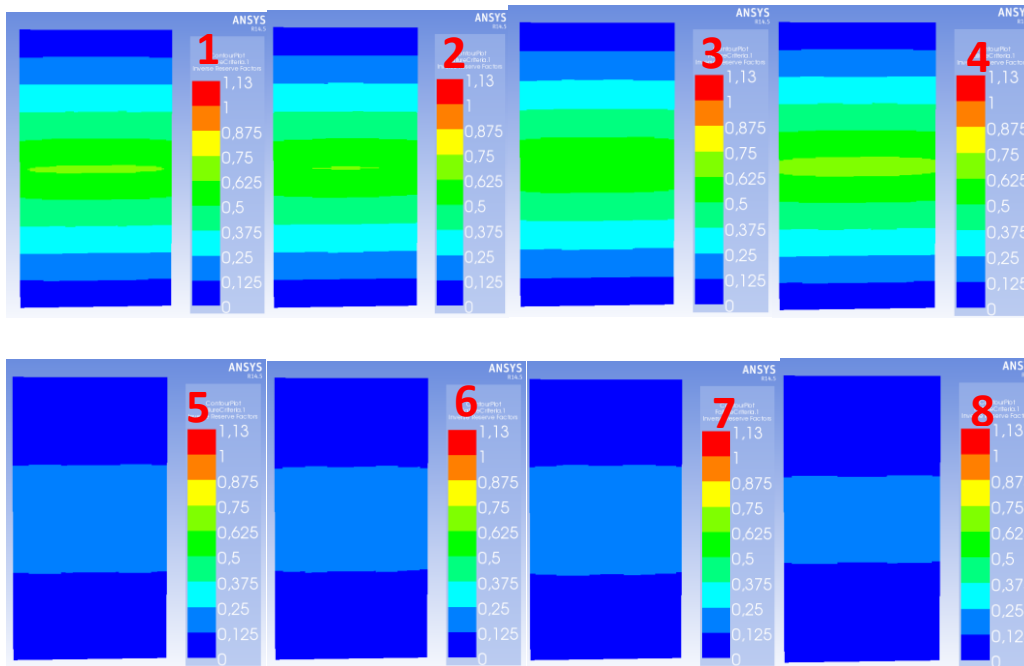
vähemalt üks kiht UD kangast ka tõmbele toimivale katsekeha poolele. Valminud kolm laminaadi paigutust olid järgnevad:

Kihi number	Paigutus 2		Paigutus 3		Paigutus 4	
	Kangas	Nurk, deg	Kangas	Nurk, deg	Kangas	Nurk, deg
1	Twill	0	Twill	0	Twill	0
2	Twill	0	Twill	0	Twill	0
3	Twill	0	UD	0	UD	0
4	Twill	45	Twill	45	Twill	45
5	Vaht		Vaht		Vaht	
6	Twill	45	Twill	45	UD	0
7	Ud	0	UD	0	Twill	0
8	Ud	0	Twill	0		
9	Twill	0				

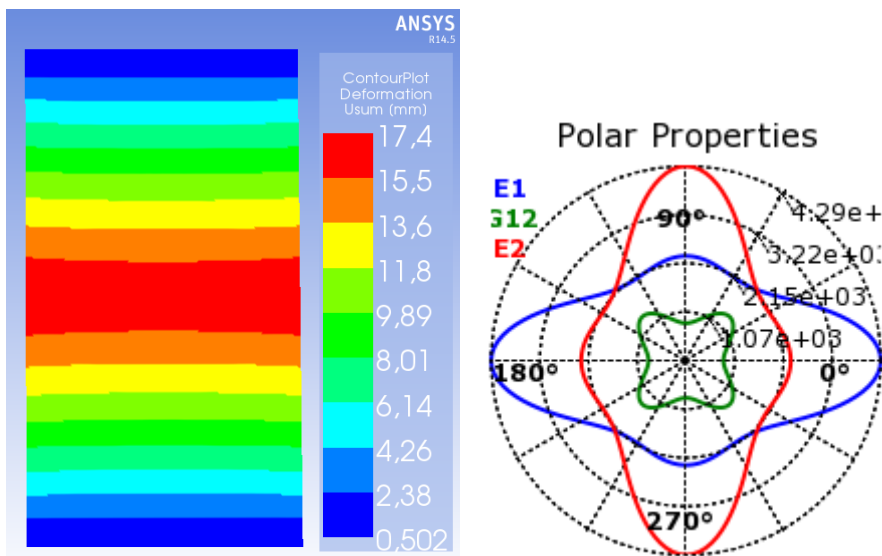
Tabel 5.6. Järgnevate katsekehade kihtide paigutused

Paigutus 2 on esimese katsekeha kihtide ringi pööratud variant. Laminaat tulenes vajadusest lisada survepoolele turvetugevust ning tõmbepoolele tõmbetugevust. Kuna twill tüüpi kanga survetugevus on suurem UD tüüpi kangast ning UD tüüpi kanga tõmbetugevus on suurem twill tüüpi kangast. Paigutuses 3 ja 4 lähtuti asjaolust, et tudengivormeli kere puhul on tegemist detailiga, mille üheks suurimaks näitajaks on mass. Seega otsustati koostada ka vähendatud kangaste arvuga laminaadid. Kuna esimese katsekeha purunemine toimus surve poolel, otsustati kihte vähendada katsekeha tõmbele toimivate kihtide poolelt. Laminaadi asetus võib olla asümmeetriline, kuna löök kerele tuleb alati väljast, ehk laminaadi surve poolelt.

Paigutuste tugevusanalüüsi tulemuse Tsai Wu tugevuskriteeriumi järgi ning ka deformatsioonid on esitatud järgnevalt:

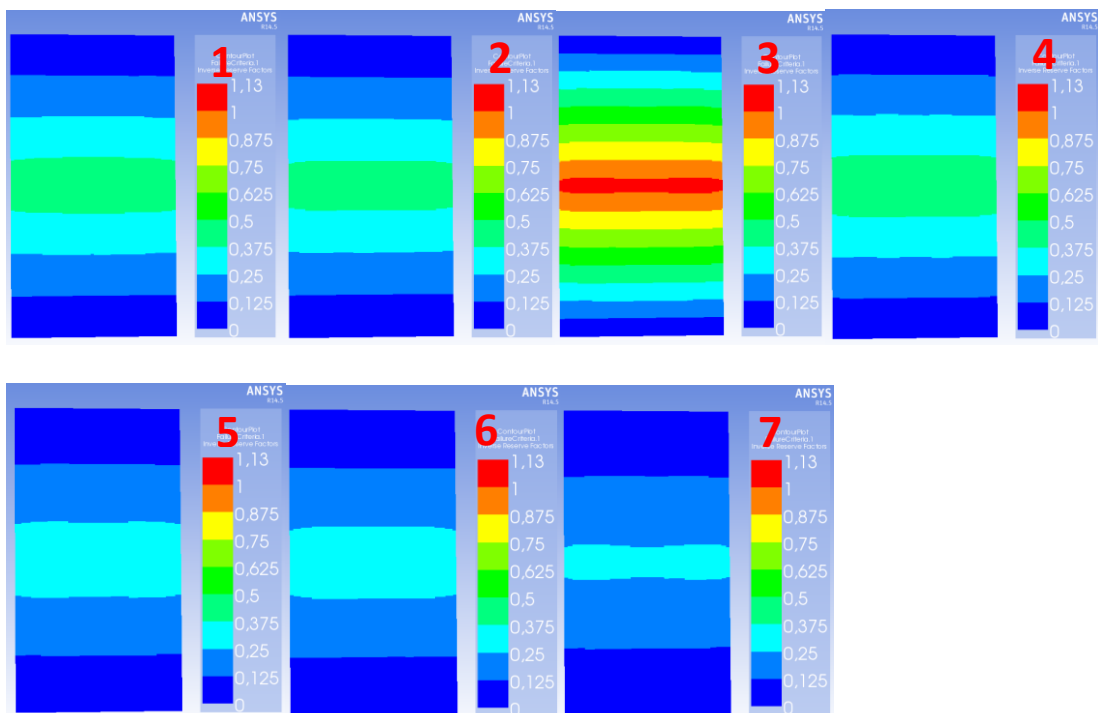


Sele 5.18. Paigutuse 2 analüüsi tulemused kihtide kaupa

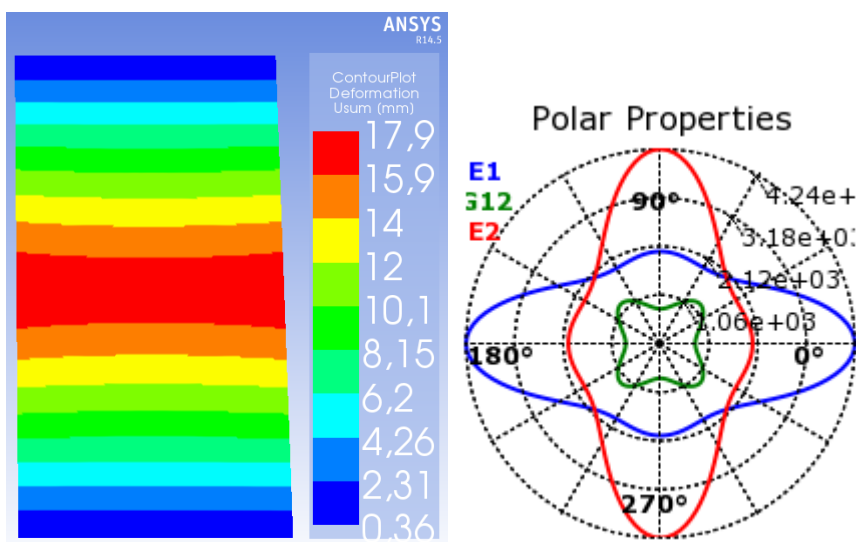


Sele 5.19. Paigutuse 2 laminaadi deformatsioon ja polaargraafik

Esimese katsekehaga võrreldes pööratud laminaadi kihtide analüüsi tulemusi vaadates on näha, et laminaadi ülemised ehk surve kihid saavad rohkem koormust kui tõmbele töötavad. Kuna aga surve poolel on kasutatud vaid twill tüüpi kangast, siis on näha, et kõik kihid on koormatud ühtlaselt. Alumise poole kangad on koormatud vähem, kuid samuti on näha ühtlast koormuspilti. Huvitaval kombel on laminaadi deformatsioon 17,4 mm identne esimese katsekehaga.



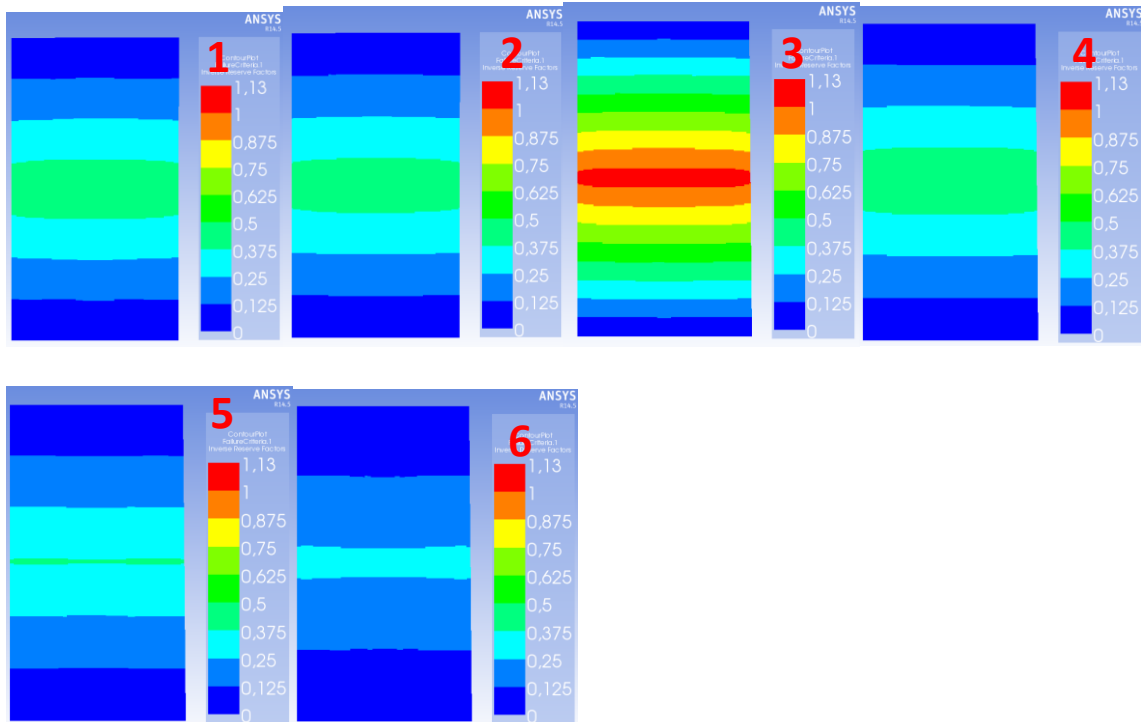
Sele 5.20. Paigutuse 3 analüüsi tulemused kihtide kaupa



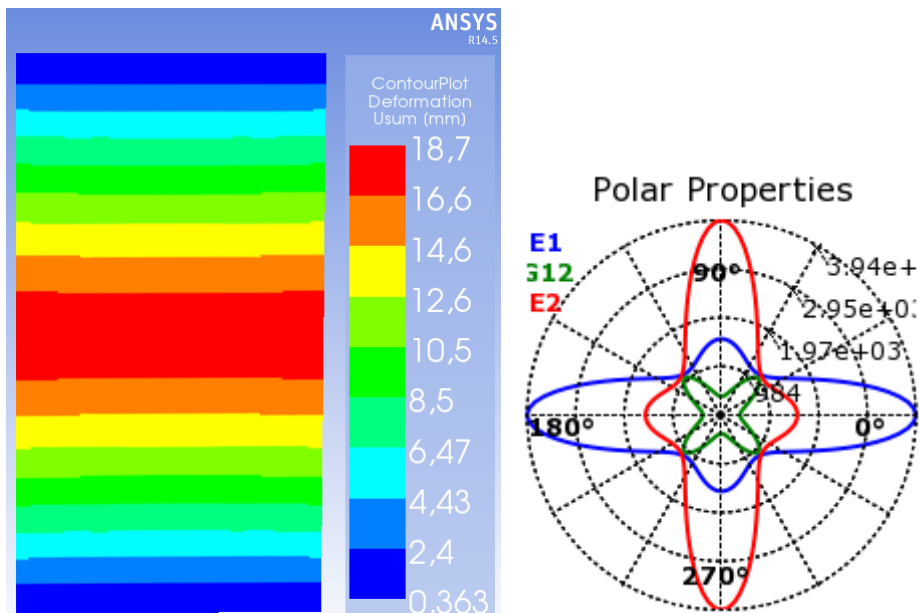
Sele 5.21. Paigutuse 3 laminaadi deformatsioon ja polaargraafik

Kolmanda laminaadi koormuspilti vaadeldes on näha, et surve poolel on enim koormatud UD kangas, mis tuleneb selle väiksemast survetugevusest. Ülejäänud survekihid on ühtlaselt koormatud. Tõmbepoolel on näha samuti ühtlast koormatust, olenemata sellest, et 6. kiht on kangast UD ja kihid 5 ning 7 on twill tüüpi kangast. Näha on, et tõmbe kihid on rohkem

koormatud, kui eelnevate laminaatide puhul. Deformatsioon on võrreldes eelneva kahe analüüsiga suurenenud 0,5 mm.



Sele 5.22. Paigutuse 4 analüüsi tulemused kihtide kaupa



Sele 5.23. Paigutuse 4 laminaadi deformatsioon ja polaargraafik

Neljanda paigutuse analüüsis on samuti surve poolel koormatud enim UD kangas. Tõmbe poolel on näha suuremat koormatust UD kanga puhul, kui paigutuse 3 puhul, kuid purunemist ei esine. Deformatsioon on suurenenud 1 mm võrra.

Kuna deformatsioon ei näita võrreldes esialgse katsekehaga suurenemist üle 1 mm kõigi kolme katsekeha puhul, otsustati valmistada kõik kolm keha ja viia läbi reaalne kolme punkti paine katse.

<b>Paigutus</b>	<b>Deformatsioon, mm</b>	<b>Mass, g</b>	<b>Kihtide arv</b>
<b>2</b>	17,4	440,0	8
<b>3</b>	17,9	389,6	7
<b>4</b>	18,7	357,6	6

Tabel 5.7. Paigutuste 2, 3 ja 4 deformatsioon ja mass

### 5.2.6 Paigutuse 2, 3 ja 4 katsetamine

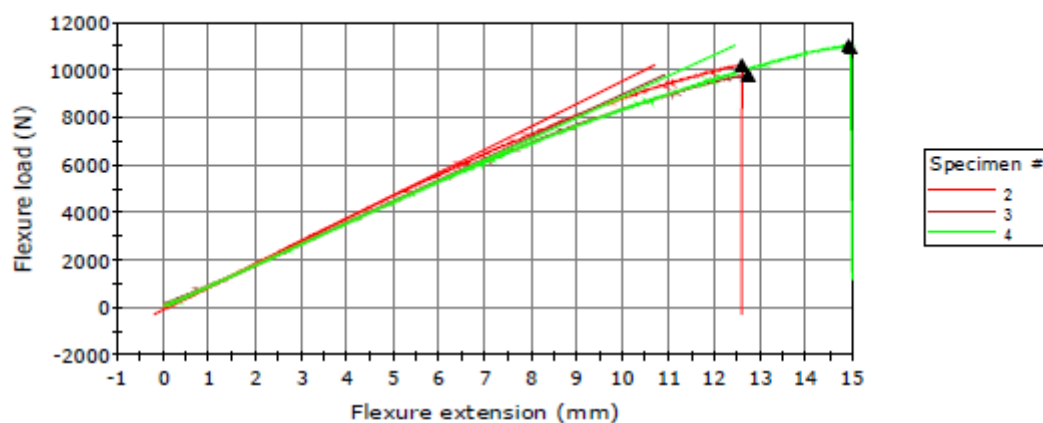
Peale valmistamist kujunesid katsekehade massid järgnevalt:

<b>Paigutus</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
<b>Mass,g</b>	1135	1127,3	1112,4

Tabel 5.8. Katsekehade 2, 3 ja 4 massid

Tabelist on näha, et vähendatud kangaste arvuga laminaadid on vastavalt 4,7 ja 14,9 grammi kergemad. Teoreetiline massi arvutus lubas massi vähenemist vastavalt 41,3 ja 82,6 grammi. Tegelik väiksem massivõit tuleneb sellest, et FS Team Tallinna komposiitmaterjalide tootmismeetod on terves ulatuses käsitöö. Katsematerjalide ja kulumaterjalide lõikamine ning ka vaigu vormi laskmine sooritatakse käsitsi. Sellest tulenevalt on ka massi varieeruvus erinev teoreetilisest. Katsekehad valmistati sama tehnoloogiat kasutades nagu katsekeha paigutusega 1.

Specimen 1 to 3



	Specimen label	Flexure load at max (kN)	Flexure extension at Break (mm)	Modulus (Automatic) (GPa)	Thickness (mm)	Width (mm)
1	2	10,23	12,58	28,73	16,6	200,0
2	3	9,81	12,73	26,85	16,6	200,0
3	4	11,06	14,94	26,43	16,6	200,0

	Specimen note 1	Energy at Tensile Strength (J)
1		70,76
2		68,77
3		91,84

Sele 5.24. Katsetulemused

Laminaat	Deformatsioon katsel, mm	Deformatsioon analüüsis, mm	Erinevus
2	12,58	17,4	21%
3	12,73	17,9	29%
4	14,94	18,4	28%
<b>Keskmine</b>			26%

Tabel 5.9. Analüüsi ja katse deformatsiooni erinevus

## 5.2.7 Nihkekatse

Tudengivormeli reeglid nõuavad lisaks kolme punkti painde katsele ka nihkekatse sooritamist reaalsel laminaadil. Selleks tuleb valmistada katsekeha minimaalse küljepikkusega 100 x 100 mm, millest surutakse läbi 25 mm diameetriga tempel. Katsekeha on samal toetatud rakisele, mille keskel on 32 mm diameetriga ava.

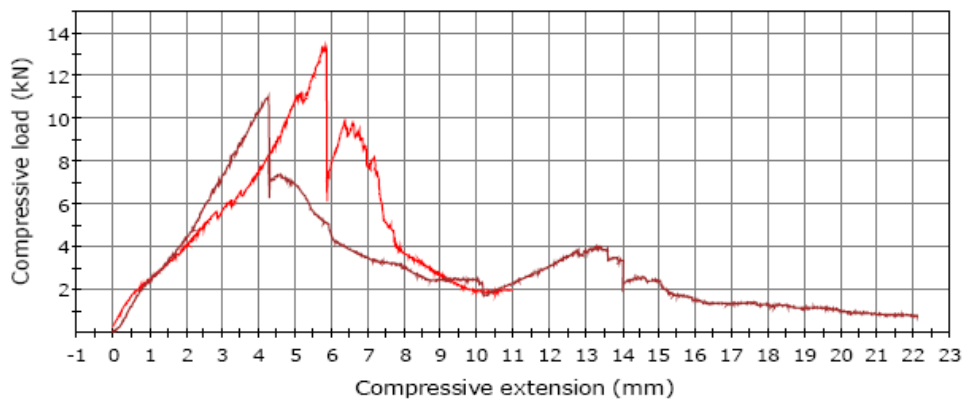
Nihkekatse sooritati, nagu ka kolme punkti painde katse Tallinna Tehnikaülikooli Materjalitehnika instituudi laboris.

Tulenevalt kolme punkti painde katse tulemustest otsustati nihkekatses sooritada laminaadile 4. Katskeha peab vastu pidama vähemalt 7,5 kN suurust koormust.



Sele 5.25. Üles seatud nihkekatskeha

Graph 1



	Specimen label	Comment	Maximum Compressive load (kN)
1	Alukast		13,46
2	Side impact nihe		11,05

	Compressive extension at Maximum Compressive load (mm)
1	5,9
2	4,3

Sele 5.26. Külgkokkupõrke laminaadi nihkekatses

Laminaat pidas vastu 11,05 kN suurust jõudu, mis on piisav tugevus. Maksimaalne jõud saavutati 4,3 mm suuruse läbipainde juures ehk välimise laminaadi kihi läbistamisel.

## 5.2.8 Külgkokkupõrke laminaadi valik

Paigutus	Max jõud, kN	Deformatsioon, mm	Neeldunud energia, J	Energianeelduvus võrdlus toruga
toru	6,47	12,72	63,49	
1	8,63	12,76	62,99	-0,5
2	10,23	12,58	70,76	+7,27
3	9,81	12,73	68,77	+5,28
4	11,06	14,94	91,84	+28,35

Tabel 5.10. kolme punkti paine katsetulemused

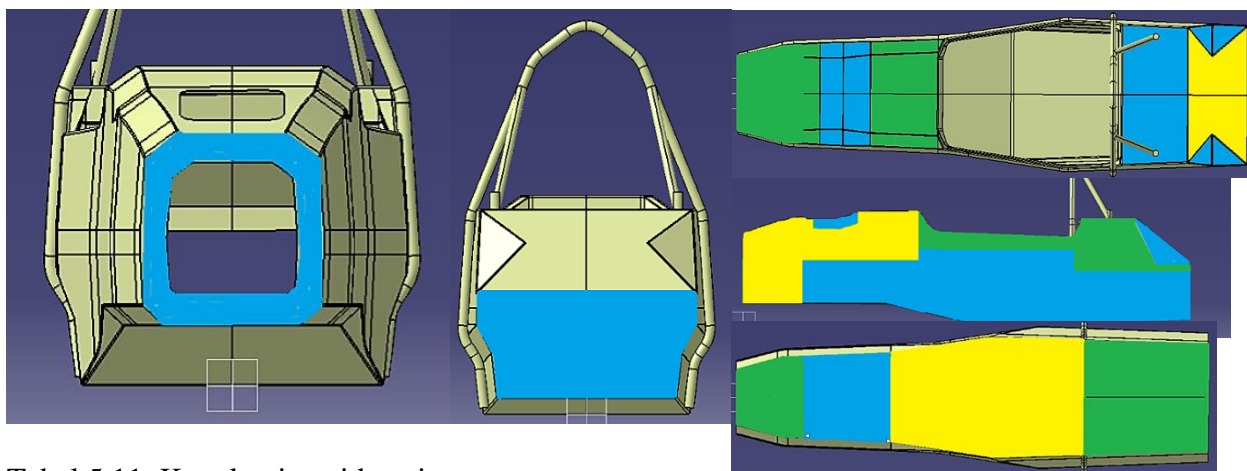
Tabelist on näha, et kõige tugevamaks osutus laminaat kihtide paigutusega 4. Kuna tõmbepoolel on laminaadil vähem kihte siis see pole nii jäik ja lubab suuremat läbipainet. Samal ajal annab UD kangas juurde paindetugevust. Purunemine toimus endiselt laminaadi survele töötavate kihtide poolel. Kuna laminaat 4 omas suurema läbipainde juures ka suuremat maksimaalset jõudu, siis on ka neeldunud energia kogus suurem, kui teistel katsekehadel ja toru katsekehal. Lõplik energianeelduvus on 28,35 J suurem kui torudest koostatud katsekehal. Lõplikuks külgkokkupõrke laminaadiks valiti katsekega kihtide paigutusega 4.

## 5.3 Teised kerel kasutatavad laminaadid

Kuna tudengivormeli valmistamisel on kriitiline tegur kogu projekteerimisele ja ehitusele kuluv aeg, otsustati kasutada mujal kere piirkondades laminaatide konfiguratsioone, mis on pärit meeskonna eelmise vormeli FEST15 kere projekteerimise ajast. Vajalik oli antud laminaatide seast õigesse piirkonda välja valida sobiv paigutus. FEST15 kerel kasutatud laminaatide katsetused olid sooritatud eelneval hooajal. Kokpiti põhjapiirkonnas otsustati kasutada FEST15 sama piirkonna laminaati, kus oli kasutusel 10 mm paksune AIREX® C70 vaht tihedusega 80 kg/m<sup>3</sup>. Mujal, kere eesosas vedrustusest eespool kasutati FEST15 põhjalaminaati, mis ei asunud kokpiti piirkonnas. Laminaatide sobivust kontrolliti SES dokumendis.



## 5.4 Kere laminaatide paigutus



Tabel 5.11. Kere laminaatide paigutus

Kere laminaatide paigutusel lähtuti põhimõttest, et kere kohustuslikud piirkonnad oleksid kaetud õige tugevusega laminaadiga. Samuti kuna vedrustuse kinnituspunktide katsed, mille viis läbi meeskonna liige Hendrik Kergand, teostati kasutades külgkokkupõrke laminaati, kasutati seda vedrustuse kinnituste juures. Sellega tagati olukord, kus vormeli esimene ja tagumine telg on kerel omavahel seotud jäigima kasutatava laminaadiga, tagades parima võimaliku kere väändejäikuse.

Laminaadi kihtide paigutused on järgnevad:

Kihi number	1	2	3	4	5	6	7	8
<b>Sinine</b>	Twill 0/90	Twill 0/90	UD 0	Twill 45/45	Vaht 20 mm	UD 0	Twill 0/90	
<b>Kollane</b>	Twill 0/90	UD 0	UD 0	Twill 45/45	Vaht 10 mm	Twill 45/45	UD 0	Twill 0/90
<b>Roheline</b>	Twill 0/90	UD 0	Twill 45/45	Vaht 10 mm	Twill 45/45	UD 0	Twill 0/90	

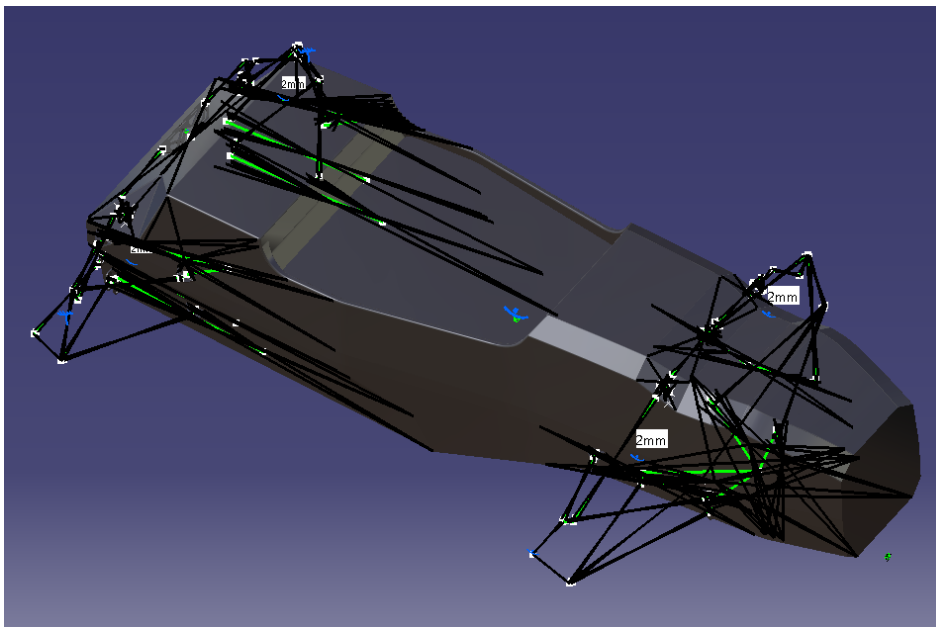
Tabel 5.12. Keres kasutatavate laminaatide kihtide paigutus

### 5.4.1 Kere tugevusanalüüs

Tugevusanalüüsis keskenduti kere puhul väändejäikuse analüüsimisele. Kuna antud töö valmimise ajaks ei olnud vormel veel piisavalt komplektne, et saaks mõõta ka reaalselt väärtust rakises, piirduiti arvutusliku väärtusega, mis saadi Ansys Composite PrePost keskkonnast.

Analüüsis koormati kere 180 kg raskusega. Suurusjärgus sama massiga on teostatud ka meeskonna toruraamide väändejäikuse mõõtmised. FEST15 kere reaalsel väändejäikuse mõõtmisel kasutati 266,5 kg suurust massi, kuna 180 kg juures ei olnud tekkinud mõõdetavat deformatsiooni.

Väändejäikuse analüüsiks koostati kõigepealt tugevusanalüüsi mudel programmis CATIA V5. Antud mudeli vajadus seisnes selles, kuna Ansys keskkonnas ei ole võimalik luua jäiksid virtuaalseid kehasid erinevate detailide vahel. Analüüsi jaoks asendati vedrusutse mudeli liigendid 2d pindadega, milledele anti paksus ja materjaliks määrati teras. Nii on võimalik luua lihtsustatud liigendid mille külge loodi virtuaalsete jäikade ühendustena vedrustuse hoovad. CATIA mudelis kasutatud kere mudel oli monoliitne ja materjaliks määrati teras. Mudelis jäeti alles vedrustuse kerepoolsed kinnituskõrvad. Kinnituskõrvade ja kere vahele määrati jõusensorid, mis väljastasid kõrva ja kere vahel tekkiva reaktsioonijõu kolme komponendina.



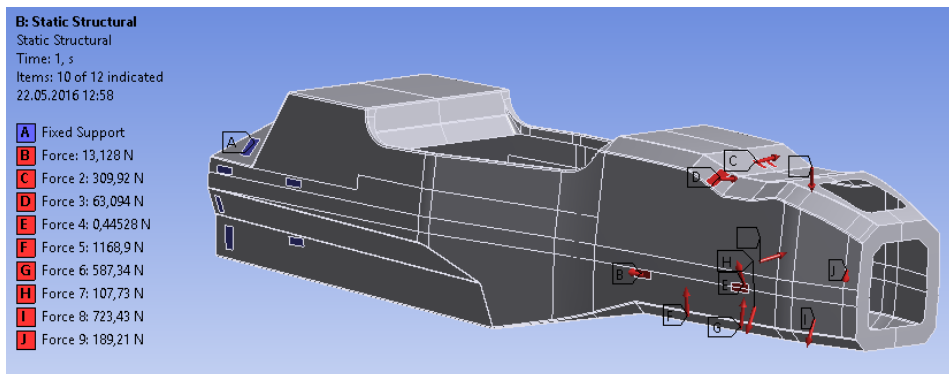
Sele 5.27. CATIA V5 programmis loodud reaktsioonijõudude saamise mudel

Analüüsi teostamiseks kinnitati mudel tagatelje käänmiku punktides jäigalt. Esimese telje puhul kasutati samas kohas, kus asub reaalsel väändejäikusrakisel kuullaagri kuul, „pivot“

käsku, mis lubab teljel pöörelda ümber x-telje. Mudeli parempoolse esimese käänmiku juurde modelleeriti lisapind, mis asub samal kohal, kus väändejäikusrakise pind koormuse jaoks. Antud pinnale rakendati 1765,8 N suurune jõud suunaga alla.

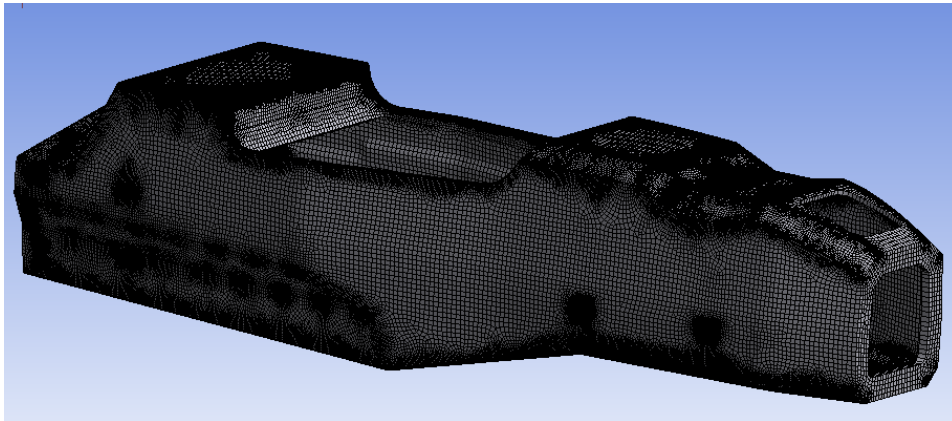
Analüüsi tulemusena saadi reaktsioonijõud, mis tekivad esivedrustuse kõrvade ja kere kinnituspinnal.

Seejärel loodi analüüsi mudel Ansys Composite PrePost keskkonnas. Kerest loodud pindmudelit lõigati nii, et vedrustuse kinnituskõrvade alust pinda saaks eraldi valida. See oli vajalik, et rakendada jõudu täpselt õigesse kohta, samuti mudeli kinnitamiseks. Mudel kinnitati tagumise telje vedrustuse kõrvade kinnituspindadest käsuga „fixed support“. Esimesele teljele kanti vedrustuse kinnituspindadele üle CATIA analüüsist tekkinud reaktsioonijõud. Ansys keskkond lubab jõudu sisestada kolme komponendina nagu CATIA neid väljastab (sele 5.28).



Sele 5.28. Kere tugevusanalüüsi rajatingimused

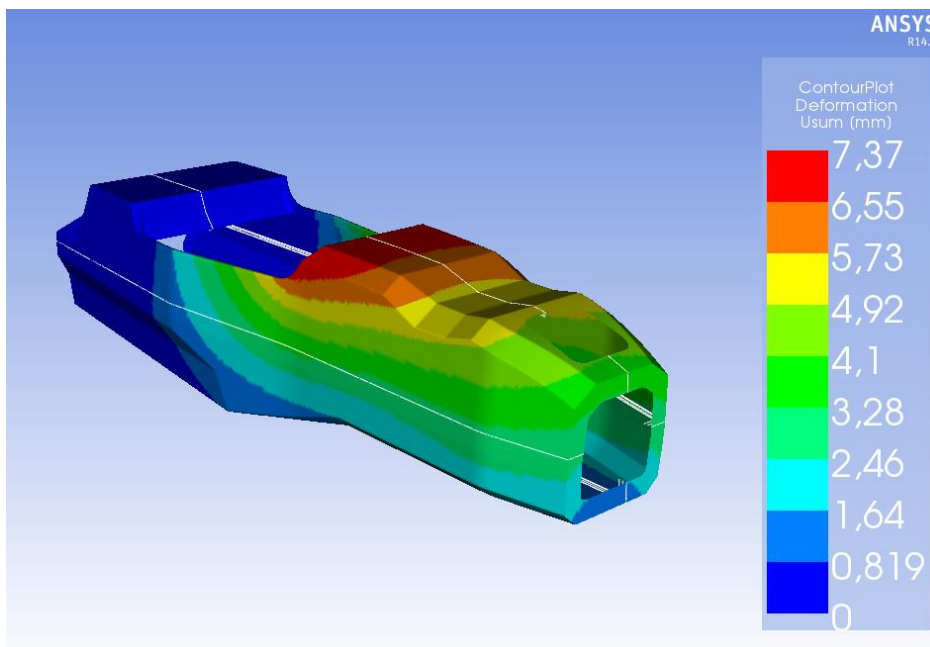
Analüüsi mudeli võrgustikus kasutati erineva suurusega koorikelemente. Lähtuti põhimõttest, et võrgustik oleks tihedam vedrustuse kinnituspindade juures ning mudeli servades. Tasapindadel lubati genereerida suuremaid elemente. Servades ja olulistest piirkondades kasutati elementi serva pikkusega 2 mm ning mujal lubati elemente serva suurusega 11 mm.. Mudel koosnes 141548 elemendist (sele 5.29).



Sele 5.29. Kere tugevusanalüüsi mudeli elementide võrgustik

Järgmise etapina teostati Ansys Composite Pre keskkonnas kere mudelile süsinik kangaste kihtide ja vahust vahekihi ladumine. Selleks tuli ära märkida kõik kere pinnad ja moodustada neist eraldi piirkonnad vastavalt kasutatavatele laminaatidele. Seejärel laoti igale pinnale vastav laminaat mudelile. Mudeli korrektsust kontrolliti läbilõikejoontega.

Kui kanga kihid olid kerele laotud, võrgustik genereeritud ja rajatingimused paigas, pandi programm analüüsi tulemusi arvutama. Tulemustest kuvati mudeli deformatsioon ja ka Tsai Wu tugevuskriteeriumi tulemused.



Sele 5.30. Deformatsioon

Tulemustest selgus, et suurim deformatsioon kerel tekib kokpiti ees kere ülemisel pinnal. Deformatsiooni suurus oli 7,37 mm. Eelnevate katsete deformatsiooni võrdlus reaalsuse ja analüüsi vahel näitas, et keskmiselt näitab programm reaalsusest 26 % suuremat deformatsiooni. Seega reaalne deformatsioon antud piirkonnas on 5,45 mm. Sele 5.31 on näha, et vedrustuse piirkonnas on deformatsioon 4,9 ja 3,2 mm vahemikus ning alumiste õõtshoova kinnituste piirkonnas alla 2 mm. Kerelt mõõdetud deformatsiooni põhjal on võimalik välja arvutada kere väändejäikus kere nurga muutuse kaudu. Arvutuseks kasutati deformatsiooni esivedrustuse ülemise esimese õõtshoova kinnitusest. Kere kaldenurgaks osutus 0,49°. Väändejäikuse arvutamiseks kasutati valemit:

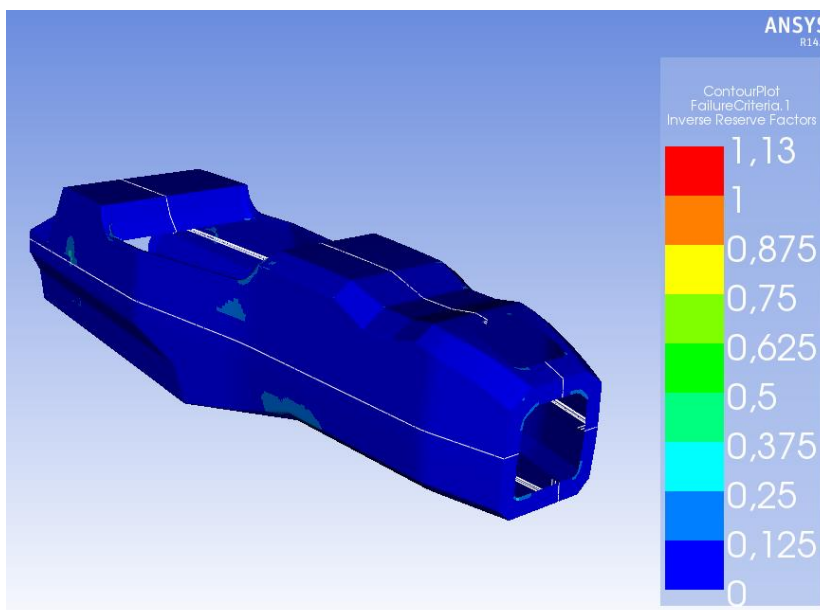
$$M_{vj} = \frac{\alpha}{M}$$

$M_{vj}$ - väändejäikus

A- kere nurgamuutus

M- kerela rakendatud moment

Väändejäikuse tulemuseks saadi arvutuslikult **3274,75 Nm/deg**. Saadud arvutuslik väärtus on väiksem kui Marek Lentsiuse poolt leitud arvutuslik FEST15 kere väändejäikus 10151 Nm/deg, kuid suurem kui viimane meeskonnas ehitatud toruraami väärtus 2560 Nm/deg. Seega võib järeldada, et konstrueeritud raam, ei ole nii jäik kui FEST15, kuid on siiski jäigem kui viimane toruraam.

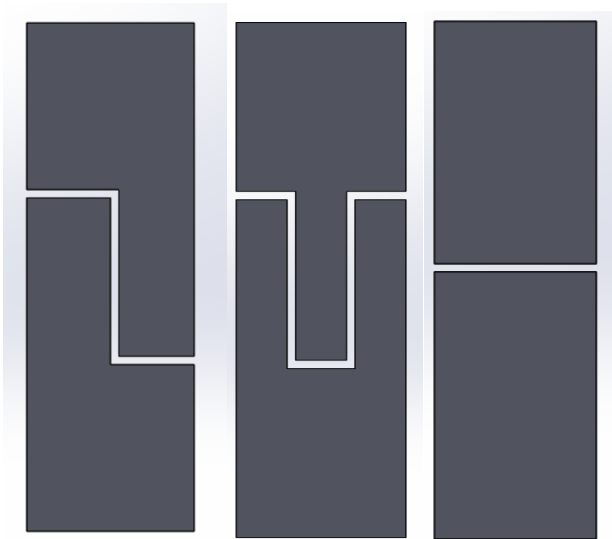


Sele 5.31. Tsai Wu tugevuskriteeriumi järgi arvutatud varutegur

Tsai Wu tugevuskriteeriumi järgi kuvatud tulemustest on näha, et kerel ei esine kriitilisi piirkondi. Väiksemate pingete teket võib näha kokpiti nurkades ning põhja all olevates nurkades. Võib järeldada, et kere saaks kangaste paigutuselt optimeerida, kuid tudengivormeli reeglitega on laminaatide tugevused paika pandud ning edasine optimeerimine tähendaks, et tõenäoliselt ei vastaks enam katsekehad seatud tugevustingimustele. Edasine optimeerimine oleks võimalik võttes kasutusele prepreg kanga ning vahu asemel vahekihis alumiiniumkärge materjali, mis lubab erinevalt vahtmaterjalist, progresseeruvat deformatsiooni mistõttu on lihtsam saavutada vajalikku energia neelduvust.

## 6. Liimliide

Kuna FEST16 kere valmistati kahes tükis- ülemine ja alumine pool, tuli mõelda ka kere poolte omavahelisele liitmisele. Selleks viidi läbi uurimus erinevate võimalike liite liikide kohta. Võimalikud liite variandid olid ühe ja kahe astmeline ning põkkliide. Peale liitmist tuleb liide üle lamineerida ülekattega nii kere seestpoolt kui väljastpoolt tagamaks piisavat nihketugevust.



Sele 6.1. Ühe ja kahe astmeline liide ning põkkliide

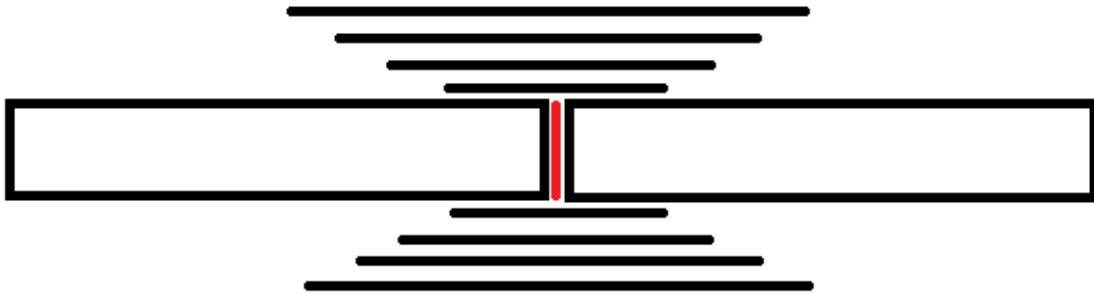
Kuna kaheastmeline liide oleks nõudnud peale valmimist kere poolte paigutamist 5 teljelisse freespinkki soone freesimiseks ja selline võimalus meeskonnal puudus siis antud liite projekteerimisest loobuti. Seejärel tuli valida ühe astmelise liite ja põkkliite vahel. Ühe astmelise liite eelis põkkliite ees on suurem nihkepind ja seega ka nihketugevus. Põkkliite puhul töötaksid nihkele vaid ülekatteks lamineeritud süsinikkanga kihid. Ühe astmega liite valmistamine tähendab, et kere vormi positiivile tuleb sisse freesida astme soon. Alguses valitigi antud liite meetod suurema nihketugevuse pärast, kuid ka sellest variandist oldi sunnitud loobuma. Põhjuseks tudengivormeli valmimise ajakriitilisus. Nimelt astmelise liitega kere vormi positiivide freesimine oleks ajaliselt olnud kaks korda pikem protsess kui põkkliitega vormide korral. Seetõttu projekteeriti kere liitmine põkkliite meetodil.

Liite tugevust kahe kere poole vahel oli keeruline analüüsida ja ennustada kuna liite tugevus on suuresti sõltuv kasutatavast liimist, liimimise võtetest ning liimipinna ettevalmistusest. Seetõttu otsustati valmistada kaks erinevat katsekeha kus esimesel juhul kasutati liimina sama epoksiidvaiku, mida oli kavas kasutada ka kere tootmisel [18]. Tegemist on West System seeria

epoksiidvaiguga, mis on mõeldud kasutamiseks infusioonimeetodil. Liimimiseks lisati vaigule paksendavat klaaskiudpulber komponenti.

Teise katsekeha puhul kasutati liimi Loctite EA 9466. Tegemist on kahe komponentse epoksiidliimiga, mis on mõeldud kõrgtugevate liidete saamiseks. Antud liim sobib nii metallide, keraamiliste materjalide kui ka plastide ja komposiitmaterjalide liitmiseks [19].

Liite laminaadina kasutati külgkokkupõrke laminaadi kihtide paigutust. Esmalt valmistati liite jaoks kaks katsekeha poolt, mis hiljem omavahel kokku liimiti. Kui liite pooled olid valmis, karestati liitepinnad liivapaberiga ning seejärel puhastati atsetooniga, et tagada parim nakkuvus. Seejärel liimiti pooled kokku asetades liimi punasele alale (sele 6.2). Kui liim oli kuivanud lihviti katsekeha uuesti ning puhastati atsetooniga. Liide lamineeriti mõlemalt poolt üle nelja järjest suureneva tugevduslapiga, et vältida pinge kontsentraatori tekkimist ülekatte äärde.



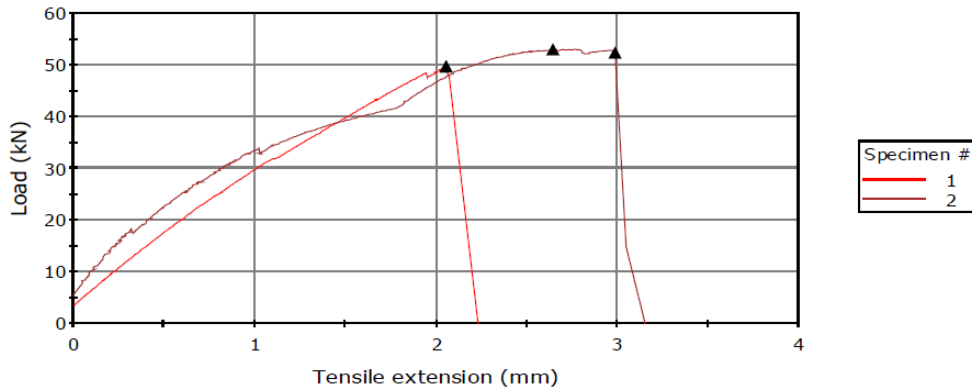
Sele 6.2. Liimliite põhimõtteskeem

Katsekeha laius oli 50 mm. Ülekatte lappide suurused oli kasvavas järjekorras 50 mm, 70 mm, 90 mm ja 110 mm. Katsekeha otstes, mis tõmbekatse ajaks suruti tõmbepingi padruni haaratsi vahele, kasutati vahu asemel alumiiniumit.



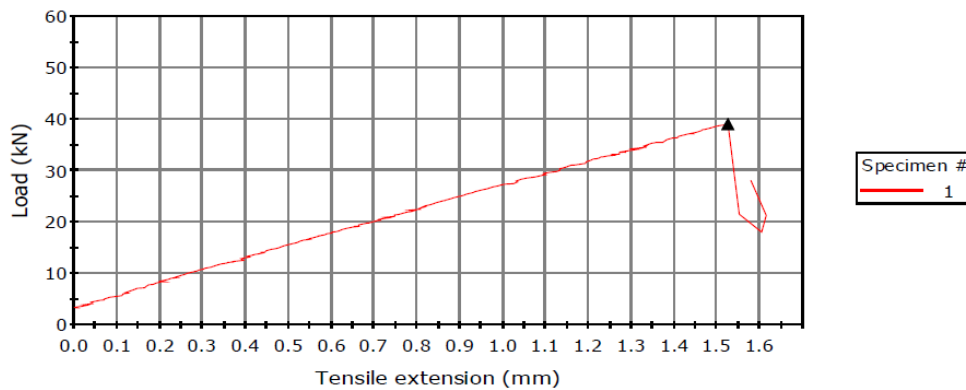
Sele 6.3 .Liimliite katsekeha valmistamine ja katsekeha tõmbepingis





Specimen label	Maximum Load (kN)	Load at Break (Standard) (kN)	Tensile extension at Maximum Load (mm)	Extension at Break (Standard) (mm)	Comment	Rate 1 (mm/min)
1	49,6	49,6	2,1	2,2	Liimliide	5,0
2	51,0	51,0	2,3	2,2		5,0
Mean	51,3	51,0	2,3	2,6		5,0

#### Sele 6.4. Epovaik liimiga katsekeha



Specimen label	Maximum Load (kN)	Load at Break (Standard) (kN)	Tensile extension at Maximum Load (mm)	Extension at Break (Standard) (mm)	Comment	Rate 1 (mm/min)
1	39,0	39,0	1,5	1,6		5,0
Mean	39,0	39,0	1,5	1,6		5,0

#### Sele 6.5. Epoksiidliimiga 9466 katsekeha

Kahes katsetatud liimist tugevamaks osutus katsekeha, mis oli kokku liimitud sama epovaiguga, mida kasutati ka kere valmistamisel. Katsekehad kannatasid vastavalt 49,6 kN ja 39 kN tõmbekoormust. Arvestades, et kogu kere liitepinna pindala on katsekeha liitepinnast ligikaudu 42 korda suurem võib arvestada, et liite tugevus ei saa kere tugevusel määravaks faktoriks. Lõplikuks liitmismeetodiks valiti põkkliide, mis on kokku liimitud kerel kasutatava vaiguga ning üle lamineeritud nelja ülekatte lapiga.

## 7. Elektri juhtivus

Tugenvormeli sarja reeglid ütlevad, et kõik vormeli komponendid, mis on elektrit juhtivad ja asuvad veojõu skeemile lähemal kui 100 mm, peavad omama takistust alla 5  $\Omega$  [8, reegel EV4.3.2]. Veojõu skeemi alla kuuluvad mootorid, mootorite kõrgepinge juhtmed, mootorite kontrollid ja akukast. Kuna kere valmistatakse süsinikkiust, mis juhib elektrit, siis tuli mõelda kogu kere takistuse viimisele alla 5  $\Omega$ . Probleem seisneb asjaolus, et komposiitmaterjalis kasutatav epoksiidvaik ei juhi elektrit. Seega takistust mõõtes näiteks kahe vedrusutse kinnituskõrva vahel ei vastaks see reeglitele. Kui elektrit juhtiv komponent on kaetud värvi või mõne muu kattega siis juhtivuse mõõtmiseks võib kattematerjali eemaldada [8, reegel EV4.4.3].

Eelneval kerel oli nimetatud reeglitesse mahtumisega probleeme. Detailide vahelised takistused ei mahtunud üldiselt reeglite piiresse ja vedada tuli lisajuhthmeid. Ühe põhjusena võib välja tuua, et FEST15 kerel kasutati kinnituspunktides klaasiudlappe pidurdamaks kere siseste kinnitusankrutena kasutatava alumiiniumi ja süsinikkiu vahelist galvaanilist korrosiooni. Galvaanilise korrosiooni tekkimiseks kahe materjali vahel on lisaks kontaktile vaja ka niiskust ning õhku, kuid arvestades, et kere sisse lamineeritud detailid on küllalt kaitstud ligipääseva õhu eest ning vormel puhastatakse alati peale märjaks saamist kiiresti, siis ei oma antud nähtus kere tugevusele ohtu [20].

FEST 16 kere vajaliku juhtivuse saavutamiseks korraldati katse kus testiti kas kerosse sisse lamineeritavate alumiiniumkinnitusankruta ja süsinikkiu vahelist kontakti on võimalik parandada kasutades vaskvõrku. Valmistati neli katsekeha. Katsekeha kihtide paigutused olid järgnevad:

Katsekeha number/ kihi number	1	2	3	4
1	Süsinikkiud	Süsinikkiud	Süsinikkiud	Süsinikkiud
2	Klaaskiud	Alumiinium	Vaskvõrk	Klaaskiud
3	Alumiinium		Alumiinium	Vaskvõrk
4				Alumiinium

Tabel 7.1. Juhtivus katsekehade kihtide paigutus



Sele 7.1. Juhtivus katsakehad

Kui katsakehad olid valmistatud, lihviti alumiiniumpind puhtaks ja teostati mõõtmised.

Katsakeha	S	S+K	S+K+V	S+V
1	1 k $\Omega$	2 k $\Omega$	25 $\Omega$	4 $\Omega$
2	2,6 k $\Omega$	2,5 k $\Omega$	32 $\Omega$	0,2 $\Omega$
3	0,8 k $\Omega$	4 k $\Omega$	22 $\Omega$	0,8 $\Omega$
4	170 $\Omega$	1,3 k $\Omega$	24 $\Omega$	2 $\Omega$

Tabel 7.2. Takistuse mõõtmistulemused

S- katsakeha kus ei kasutatud ei klaaskiudu ega vaskvõrku

S+K – süsinikkiu ja alumiiniumi vahel on üks kiht klaaskiudu

S+K+V – süsinikkiu ja alumiiniumi vahel on üks kiht klaaskiudu ja tükk vaskvõrku

S+V – süsinikkiu ja alumiiniumi vahel on ainult vaskvõrk

Takistuse mõõtmistulemustest selgus, et kõige paremaid elektrijuhtivuse omadusi omab kombinatsioon kus kinnitusankru ja süsinikkiu vahel ei ole klaaskiudu ja on ainult vaskvõrk. Võrk parandab alumiiniumi ja süsiniku kontakti tasemele, et iga teostatud mõõtmine oli alla 5  $\Omega$ . Seega võeti vastu otsus, et keres kasutatavate kinnitusankrute ja laminaadi vahele paigutatakse vaskvõrgu tükid prandamaks kontakti ja vähendamaks takistus erinevate vormeli komponentide vahel.

## 8. Tootmine

Kuna FEST 16 tootmise protsessis ei toimunud muutusi võrreldes eelneva kere tootmisega siis teeb autor toomisprotsessist lühikokkuvõtte.

Kere tootmise võib jagada kolme etappi:

- Positiiv vormi valmistamine
- Negatiiv vormi valmistamine
- Kere lamineerimine

Kere vormi positiiv kujutab endast reaalse kere kujuga vormi, mille peale lamineeritakse hiljem vormi negatiiv, ehk vorm kuhu sisse lamineeritakse lõplik toode. Vormi positiiv valmistatakse võimalikult homogeenisest materjalist, mida on lihtne töödelda ja mille pinnakvaliteet jääks peale töötlemist võimalikult hea. Vormi valmistamiseks on olemas spetsiaalseid materjale, mis tagavad õige freesimisprotsessi valikul koheselt väga hea pinnakvaliteedi ega vaja järeltöötlust. Antud materjalid tagavad vormi valmistamisel väiksema ajakulu, kuid nende suureks miinuseks on kõrge hind. Omades kogemust eelnevast aastast otsustati vormi positiiv valmistada kokku liimitud MDF plaatidest. MDF on ühtlase struktuuriga peenest saepurust kokku pressitud plaat, mis on odavam alternatiiv spetsiaalsetele vormi valmistamise materjalidele. Plaadid tükeldati ja liimiti kokku polüestervaiguga. Seejärel freesiti saadud plokkidest 5- teljelises freespingis kere ülemise ja alumise vormi positiivid. 5- teljelise freespingi eeliseks on võimalus puurida positiiv vormide sisse avad kinnituspunktide positsioneerimiseks. Positiivid töödeldi seejärel pritspahtliga ning lihviti ja poleeriti kuni oli saavutatud vajalik pinnakvaliteet negatiivi lamineerimiseks.



Sele 8.1. Kere positiiv vorm enne ja peale pinnatöötlust

Kere negatiiv vormid lamineeriti positiiv vormide peale. Vormi valmistati klaasplastist. Negatiiv vormide sisse valmistati hiljem lõplik kere. Vormi positiivide sees olevate

kinnituspunktide ava järgi positsioneeriti negatiiv vormidesse kere lõplikud kinnituspunktid. Selleks kasutati polte ja 2015 hooaja meeskonna liikme Kristen Milleri projekteeritud spetsiaalseid pukse, mis lamineeriti negatiiv vormi sisse.



Sele 8.2. Positiiv vorm positsioneerimispuksidega ning valminud negatiiv vormid

Kui vormid olid valminud hakati negatiiv vormide sisse lamineerima FEST16 kere. Kere lamineerimine toimus kahes osas. Kõigepealt laoti vormi kangad välimise laminaadi kihi jaoks, misjärel kiht infusiooni meetodil vaiguga täideti. Esimese kihi juurde kuulusid ka iga kinnituspunkti tugevduseks mõeldud süsinikkanga lapid. Seejärel laoti kere vahust vahekiht ning paigaldati kõik kinnitusankrud. Kinnitusankrute mõlemale poole paigaldati vaskvõrgu tükid nii, et need kataksid ära ka kinnituspunkti ava, mis tagas hilisemal ava läbipuurimisel ja sinna kinnituspoldi paigaldamisel kontakti poldi ja vaskvõrgu vahel. Vahust vahekihi tükid lõigati välja laserlõikuse meetodil ja tükid töödeldi parajaks servade lihvimise teel. Lihvimise ebatäpsusest tekkinud vahed täideti Coremat materjaliga, mis on komposiitmaterjalist toodetes kasutatav südamikmaterjal [21]. Coremat on polüestrist ka klaaskiudpulbrist koosnev pehme materjal ja mida oli hea kasutada tekkinud vahede täitmiseks. Nii oli võimalik hoida kokku tootmisele kuluva vaigu kogust ning vähendada kere lõplikku massi. Vahust vahekihi peale laoti seejärel kinnitusankrute sisemise kihi tugevduslapid ning lõpuks sisemise laminaadi kihi kangad. Lõpptulemusena valmisid FEST16 kere ülemine ja alumine pool, mis tuli veel omavahel kokku liimida. Tootmise detailsemad pildid kronoloogilises järjekorras on toodud lisa 2.



Sele 8.3. Valmis kere ülemine pool

## 8.1 Kere kokku liimimine

Peale kere poolte valmistamist tuli need omavahel kokku liimida. Selleks kasutati liidet, mis on kirjeldatud peatükis 7. Poolte omavaheliseks täpseks positsioneerimiseks valmistati eesmise ja tagumise otsaseina kinnituste külge kinnituvad 21 mm paksusest vineerist rakise plaadid. Plaadid lõigati välja 3- teljelise CNC pingiga, et tagada maksimaalne positsioneerimis täpsus. Kere poolte liitmisel lihviti esmalt liivapaberiga üle liimipind ning seejärel puhastati atsetooniga. Seejärel kanti peale paksendatud epoksiidvaik ning pooled paigutati liitmise rakisesse. Peale liite kuivamist võeti kere rakisest välja ning kogu liiteping lihviti ja puhastati nii seest kui ka väljastpoolt. Peale puhastamist lamineeriti kogu liite ulatuses neli ülekatte lappi. Lappide peale paigutati seejärel vaakumkile, et tagada maksimaalne kontakt kere ja lappide vahel.



Sele 8.4. Liimimisrakises kere pooled ning liite ülekatte lamineerimine

## 8.2 Termotöötlus

Peale kere valmimist viidi maksimaalse tugevuse kiiremaks saavutamiseks läbi kere termotöötlus. Pro Set Inf 114 vaiku on lubatud maksimaalse tugevuse saavutamiseks termotöödelda 82°C juures. Hoides toodet antud temperatuuril 8 tundi saavutatakse vaigu tõmbetugevus 70 MPa. Ilma termotöötlemata vaik saavutab maksimaalse tõmbetugevuse 54 MPa seistes toatemperatuuril 22°C neli nädalat. Seega on termotöötusega võimalik tõsta vaigu tugevus omadusi 33 % võrra [18]. Termotöötlus viidi piisavalt suure ja täpse ahju puudumisel läbi saunaruumis. Kere temperatuuri kontrolliti 8 tunni jooksul iga 10 minuti tagant. Temperatuur püsis kogu protsessi vältel 77 °c ja 81 °c vahemikus.



Sele 8.5. Kere termotöötlus

## 8.3 Lõpptulemus

FEST16 valminud kere massiks mõõdeti 25,4 kg ilma peamise turvakaareta. See tähendab massi alandamist 11,6 kg võrra võrreldes FEST15 kerega. Turvakaared lisavad massile 5 kg, kuid ka FEST15 mass mõõdeti ilma turvakaarteta.

Kerele kinnitatud detailide vahelise takistuse mõõtmine andis tulemusi alla  $1\Omega$ , mis on märk sellest, et valitud elektrijuhtivuse parandamise meetod toimib.

Peale vormeli komplekteerimist ja detailide valideerimist värvitakse kere üle valge värviga, et kaitsta pinda uv-kiirguse ning süsinikku tumeda värvi tõttu tekkiva kõrge temperatuuri eest.



Sele 8.3.1. Lõplik kere



## Kokkuvõte

Käesoleva lõputöö eesmärk oli projekteerida ning valmistada tudengivormeli FEST16 kere. Enne projekteerimise algust tuli analüüsida meeskonna eelmise vormeli, FEST15 kere omadusi ning tootmist. Kuna FEST15 kere reaalne väändejäikus oli töö alguses teadmata, sooritati „Hub to hub“ katse mille tulemusena arvutati väärtus välja. Väändejäikuseks osutus 4300 Nm/deg, mis oli 2,4 korda väiksem kui analüüsitud tulemus, kuid siiski kõrgem kui meeskonna viimase toruraami väärtus. Otsustati, et FEST16 kere juures tuleb väändejäikust vähendada, et alandada massi. Töös analüüsiti ka FEST15 kere arvutusliku ja tegeliku massi erinevust, mis oli 14,5 kg. Mudelis arvatud mass oli 22,5 kg ning tegelik väärtus 37 kg. Töös jõuti järeldusele, et tegeliku ja arvutusliku massi erinevus võib olla põhjustatud liigsest tootmiskeerukusest. Nimelt valmistati FEST15 kere ühes tükis, mis tähendas, et lamineerimine toimus ülimalt kitsastes oludes. Esines piirkondi, kuhu ei olnud võimalik näha. Asjaolusid arvesse võttes otsustati FEST16 kere toota kahes tükis. Kere jaotati ülemiseks ja alumiseks pooleks.

Peale FEST15 tootmise ja mehaaniliste omaduste analüüsi ning otsust muuta antud töös käsitletava kere valmistamismeetodit, tuli modelleerida uue kere kuju. Modelleerimise alguses pandi paika kõikide suuremate koostude ja detailide asukohad. Alustati sõitja asendist, millest valmistati reeglitele vastavuse valideerimiseks rakis. Peale sõitja asendi paika panemist analüüsiti erinevaid akukasti paigutamise ja kerest eemaldamise võimalusi. Uuenenud akukast kasvas võrreldes eelmisega igas mõõtmes, mistõttu otsustati jääda sama lahenduse juurde mis oli kasutusel eelneval vormelil. Akukast paigutatakse vormelisse läbi kere tagaosas oleva avause. Kast kinnitub kere põhja ning tagumist ava katma hakkava komposiit plaadi külge. Järgmine suurem detail, mille pidi mahutama ära kere sisse, oli mootorite kontrolleri. Kontrolleri kuju ei olnud võrreldes eelneva aastaga muutnud ning seetõttu otsustati, et asukoht juhi selja taga akukasti kohal on ainuvõimalik.

Seoses suurenenud akukastiga ja kaheosalise kerega tuli ümber mõelda ka turvakaarte paigutus. Peamine ehk tagumine turvakaar, mis asus eelmisel mudelil kerest seespool, liigutati ruumipuuduse tõttu väljapoole. Esimene turvakaar, mis oli eelnevalt kere sisse lamineeritud, liigutati sissepoole kuna kahes osas toodetud kere puhul ei ole võimalik turvakaart sisse lamineerida.

Peale turvakaarte paigutust pandi paika roolisüsteem. Otsustati, et lihtsama põhja kuju saavutamiseks paigutatakse roolilatt vormeli kere põhja alla. Nii hoiti kokku materjali ning muudeti komponentide paigutust kompaktsemaks.

Lõplikul kere mudelil viidi suuremad muudatused sisse esiosas. Kõrgemale liikus nii põhi kui ka juhiesine piirkond. Selle tulemusena saavutati jalaosa šabloonile suurem varu. Lihtsamaks muutus põhja kuju. Kere tagumine osa muutus laiemaks tingituna akukasti mõõtmete suurenemisest.

Kere materjalide valikul võrreldi süsinikkiu mehaanilisi omadusi nii metallide, kui ka teiste komposiitmaterjalidega. Otsustati, et suurima eritugevuse ning erielastsusmooduli tõttu jäädakse materjali valikul süsinikplasti juurde. Süsinikplast on ka kõige levinum materjal antud tüüpi monokokk-kerede valmistamisel. Laminaadikihtide vahelise südamikmaterjali valikul otsustati kärg- ja vahtmaterjali vahel. Valik langes vahtmaterjali kasuks tingituna kasutatavast tootmismeetodist ning tootmisvõimalustest.

Peale materjali valikut alustati tugevusanalüüsiga. Tudengivormeli sarja reeglitega on ära määratud, milliste mehaaniliste omadustega peavad monokokk-kere erinevate piirkondade laminaadid olema. Kuna süsiniku kihtide vahelist vahtmaterjali otsustati muuta, tuli uuesti projekteerida vähemalt külgnokkupõrkelaminaat. Külgnokkupõrkelaminaadi tugevuse valideerimiseks korraldati võrdlev kolme punkti katse kahe terastoruga mille tugevusest ja energianeelduvusest tuli edasistes katsetes lähtuda. Lõpliku lahenduseni jõudmiseks kulus 10 analüüsi. Tugevusanalüüs teostati Ansys Composite PrePost keskkonnas. Protsessi käigus valmistati viis kolme punkti katsekeha ja üks nihketugevuse katsekeha. Viiest kolme punkti katse laminaadist valiti nihkekatseks välja tugevaim, mis osutus ühtlasi ka kõige kergemaks. Kolme punkti painde ja ka nihkekatse vastasid reeglitega nõutud maksimaalse jõu ja energianeelduvuse tingimustele. Ülejäänud kere piirkondades kasutatavad laminaadid võeti üle FEST15 kere tootmise käigus tehtud analoogsetest katsetest.

Kere tugevusanalüüsi teostamiseks tuli kasutada kahte programmi. Esmalt loodi CATIA V5 keskkonnas kere analüüsi mudel koos vedrustusega. CATIA keskkonnas simuleeriti „Hub to hub“ väändejäikuse katset millest tekkinud reaktsioonijõud kanti üle Ansys Composite PrePost keskkonda kere mudelile. Kere analüüsi mudelis kuvati deformatsiooni ja tulemusi Tsai Wu tugevuskriteeriumi järgi. Analüüs näitas, et kerel ei teki suure pingega piirkondi, kuid kuna deformatsioon ei saanud väändejäikuse seisukohast enam suurenda ei hakatud kere edasi optimeerima. Edasisel optimeerimisel oleks tekkinud vajadus valmistada uued laminaadi katsekehad, mida ei tahtud projekti ajakriitilisuse tõttu teha.

Peale tugevusanalüüsi teostamist projekteeriti kere poolte liitmiseks liimiliide. Valiti kolme erineva liitesüsteemi vahel, otsustati pötkliite kasuks. Pötkliide valiti kuna teiste valikus olnud

liidete valmistamiseks puudus võimekus või oleks nende valmistamine hakanud ajaliselt lükkama edasi kere valmimise tähtaega. Liimliite valideerimiseks valmistati kaks katsekeha. Võrreldi kerel kasutatava epoksiidvaigu ning kahe komponentse liimi EA9466 tugevust. Katsest selgus, et tugevam on kere liitmisel kasutada sama epoksiidvaiku, mida kasutati ka mujal kere laminaatides.

Peale liimliite valikut räägiti töös vormeli kere elektrijuhtivuse parandamise vajadusest. Nimelt FEST15 kere ei vastanud alla  $5 \Omega$  elektrilise takistuse reeglile ja tekkis vajadus lisajuhtmete järele. FEST16 kere tarbeks valmistati neli katsekeha kus võrreldi kinnitusankru ja süsiniklaminaadi vahelist kontakti läbi klaasriide ja kasutades ka vaskvõrku. Parimaid tulemusi andis ilma klaasriideta ja koos vaskvõrguga katsekeha. Antud lahendust kasutati ka kere hilisemal tootmisel.

Eelviimases peatükis kirjeldatakse kere tootmise protsessi. Kere tootmiseks valmistati esmalt 5-teljelises freespingis kokkuliimitud MDF plaatidest kere positiiv-vormid, mille pinnad töödeldi seejärel pritspahtliga. Peale pritspahtliga kaetud pinna lihvimist piisava pinnakvaliteedini lamineeriti positiivi peale klaasplastist negatiiv vormid ning nende sisse omakorda lõplikud kere pooled. Peale ülemise ja alumise kere poole valmimist liimiti need spetsiaalses rakises kokku ning terve liide lamineeriti üle nelja tugevduslapi kihiga.

Töö tulemusena projekteeriti ja valmistati tudengivormeli FEST16 süsinikust monokokk-kere, mis kaalus 25,4 kg. See on 11,6 kg kergem kui eelneva vormeli kere. Kere juures võeti kasutusele uus külgekokkupõrke laminaat ning teostati tugevusanalüüs. Säilitati piisav kere väändejäikus, mida antud töö käigus vormeli ebapiisava kompleksuse tõttu ei olnud võimalik valideerida. Kere detailide vahel saavutati tänu vaskvõrgu kasutusele võtmisele elektrijuhtivus alla  $1 \Omega$  mõõdetuna kõikide kerel kinnituvate juhtivate detailide pealt.

## Summary

The purpose of this thesis was to design and produce the chassis for the Formula Stuednt racecar FEST16. Before starting the design of the new chassis, the properties and production of the last chassis had to be analyzed. As the real torsional stiffness value of the FEST15 chassis was unknown, a „Hub to Hub“ test was conducted. The value was 4300 Nm/deg, which was 2,4 times smaller than the analysis had showed. Still, the value was higher than the value for the teams last tubular chassis. It was decided that the torsional stiffness of the FEST16 chassis had to be lowered in order to reduce mass. The 14,5 kg difference of the real and calculated mass of the FEST15 chassis was also analyzed. The calculated mass was 22,5 kg and the real mass was 37 kg. The conclusion was that the difference in mass was caused by difficulties during production. The FEST15 chassis was produced as a one piece chassis which meant that production was carried out in extremely tight spaces. There were areas where it could not be seen. Taking into account all the circumstances, it was decided to produce the FEST16 chassis in two pieces, the upper and the lower part.

After analyzing the FEST15 chassis, modeling of the new chassis could begin. In the beginning all the major components of the car had to be positioned. The first component was the driver and the driver position. A special jig was made with which the compliance to the rules was validated. After the driver had been positioned, different methods in positioning and the removal of the accumulator container were analyzed. Since the new accumulator container had grown in every dimension, it was decided to stay with the same solution which had been used the last year. The accumulator container would be installed into the chassis through an opening in the rear and attached to the floor and a composite plate which would be covering the rear opening. The next big component that had to be positioned was the motor controller. Since the size of the controller had not changed, the only possible position for it was behind the driver above the accumulator container.

Due to the larger accumulator container and the two part chassis, the positioning of the rollhoops also had to be reconsidered. The main rollhoop which had been situated inside of the chassis had to be moved outside due to lack of space inside the chassis. The front hoop that was previously laminated into the chassis, was positioned inside of it since it is impossible to laminate it into the two part chassis.

After the positioning of the rollhoops, the steering system was positioned. It was decided that in order to simplify the shape of the floor, the steering rack was positioned under the car. Therefore a more compact layout and material savings were achieved.

The biggest changes in the shape of the new chassis were in the front area. The whole front region was raised. A bigger margin for the floor region template was achieved. The shape of the floor was simplified. The rear of the car was made wider due to the bigger accumulator container.

When choosing the material for the chassis, the properties of carbon fiber reinforced plastic were compared with metals and other composite materials. It was decided that due to a higher strength to weight and modulus of elasticity to weight ratio, the choice of material would be carbon fiber reinforced plastic (CFRP). CFRP is also the most common material for the manufacture of this type of chassis. The core material selection was made between honeycomb and structural foam. The choice fell in favor of the foam due to the production process and production facilities.

After the material had been chosen, the strength analysis could begin. The rules of Formula Student state how strong different regions of the chassis must be. Since the core material for the laminate was changed a new side impact laminate analysis was necessary. A three point bend test with steel tubes was conducted for the comparison of the composite laminate. The force and absorbed energy was measured. It took 10 analysis to reach the final laminate configuration. Strength calculations were conducted in Ansys Composite PrePost. During the analysis process, five test three point test specimens and one shear strength specimen was made and tested. The test results were in compliance with the rules. The other laminates to be used in the chassis would be taken from the tests made during the production of the FEST15 chassis.

Two programs had to be used to make the final strength calculations for the chassis. At first, a chassis model with the suspension geometry was made in CATIA V5. The „Hub to Hub“ torsional rigidity test was conducted in CATIA from which the reaction forces to the chassis were carried over to Ansys Composite PrePost where a model with only the chassis was made. For the results deformation and safety factors calculated by the Tsai Wu strength criteria were displayed. The results showed there were no regions with high stress, but since the deformation could not get bigger due to torsional rigidity the chassis was not optimized further. In order to make further optimizations new side impact laminate test would have had to be conducted. That would have started to influence the timescale of the project.

After the strength calculations an adhesive joint had to be designed for the chassis. A choice between three joints was made. A regular butt joint was chosen. It was chosen because the team did not have the capability to produce the other joints or the production would have started to influence the timescale of the project. Two test specimens were made to compare different adhesives. One was glued with the same epoxy resin to be used on the chassis and the other with two component epoxy glue EA9466. The test showed that the test specimen with the regular epoxy resin was stronger, so it would be used in joining the chassis.

After the choice for the adhesive joint was made, the problem with improving the electrical conductivity of the chassis was dealt. The electrical resistance of the FEST15 chassis was not below 5  $\Omega$  so extra wiring had to be used. For the FEST16 four test specimens testing different material configurations for improving the conductivity were made. The specimen showing the best results was the one using copper mesh between the carbon fiber laminate and the insert laminated into the chassis. Copper mesh was later used in production of the chassis.

The production process is then described. The positive mould of the chassis was milled out in a 5 axis milling machine. The positive mould was made from MDF plates glued together. Then the surface of the positives was treated for lamination of the negative moulds. The negative moulds were made from glass fiber reinforced plastics. The final chassis was laminated into the negative moulds. After the upper and lower chassis pieces were made, the parts were joined in a special jig and the joint was covered with four layers of CFRP.

As the result of this thesis the FEST16 Formula Student racecar monocoque chassis was designed and produced. The chassis weighed 25,4 kg which is 11,6 kg lighter than the previous chassis. A new sideimpact laminate was tested and implied in the chassis and other thinner laminates were taken over from the FEST15. Sufficient torsional rigidity was maintained which could not be validated with a real test due to the fact that the whole car was not completed to a level to conduct the test by the time this thesis was finished. The electrical resistance of the chassis was below 1  $\Omega$  thanks to the new copper mesh solution tested and used in the insert installation process.

## Kasutatud kirjandus

- 1- Vormel 1 mõistete kodulehekülg [WWW] <http://www.formula1-dictionary.net/monocoque.html> (07.04.2016)
- 2- Vormel 1 tehnilisi lahendusi seletav kodulehekülg [WWW] <http://www.f1technical.net/f1db/cars/476/mclaren-mp4-1> (07.04.2016)
- 3- Lend, R. FEST10 Formula Student klassi võistlusauto raami projekteerimine: magistritöö. Tallinna Tehnikaülikool, Tallinn, 2010
- 4- Lentsius, M. Formula Student klassi vormelauto monokokk-kere projekteerimine: magistritöö. Tallinna Tehnikaülikool, Tallinn 2015
- 5- Parts, S. FEST14 raami analüüsi mudel: kere meeskonna töödokument. FS Team Tallinn, Tallinn, 2014.
- 6- Elektrimootorite tootja AMK kodulehekülg [WWW] [http://amk-group.com/en/product/amk\\_servomotors](http://amk-group.com/en/product/amk_servomotors) (10.04.2016)
- 7- AMK elektrimootrite kontrolleri CAD mudel: jõuülekanne meeskonna töödokument FS Team Tallinn, Tallinn, 2015.
- 8- SAE International. 2016 Formula SAE Rules [WWW] [http://www.fsaeonline.com/content/2016\\_FSAE\\_Rules.pdf](http://www.fsaeonline.com/content/2016_FSAE_Rules.pdf) (21.10.2015)
- 9- Savage, G. Composite Materials Technology in Formula 1 Motor Racing, Honda Racing F1, Inglismaa, 2008.
- 10- Süsinikkanga Toray T300 tugevusomaduste dokument [WWW] <http://www.toraycfa.com/pdfs/T300DataSheet.pdf> (15.04.2016)
- 11- Komposiitmaterjalides kasutatavate maatrikmaterjalide võrdlus [WWW] <http://www.netcomposites.com/guide-tools/guide/resin-systems/resin-comparison/>
- 12- Ulrich, F.,Gomeringer, R., Heinzler, M., Kilgus, R., Näher, F., Oesterle, S., Paetzold, H., Stephan, A. Mechanical and Metal Trades Handbook. Eestikeelne trükk Herranen, H., Karjust, K., Kers, J., Krustok, J., Kulu, P., Käerdi, H., Laansoo, A., Lend, H., Otto, T., Põdra, P., Riives, J., Saarna, M., Sergejev, F., Tiidemann, T., Veinthal, R. Mehaanikainseneri käsiraamat. Tallinn: Tallinna Tehnikaülikool, 2012.
- 13- Teras AISI1010 mehaanilised omadused [WWW] [http://www.efunda.com/materials/alloys/carbon\\_steels/show\\_carbon.cfm?ID=AISI\\_1010&prop=all&Page\\_Title=AISI%201010](http://www.efunda.com/materials/alloys/carbon_steels/show_carbon.cfm?ID=AISI_1010&prop=all&Page_Title=AISI%201010) (15.04.1016).

- 14- Katsetatud toru materjali mehaanilised omadused [WWW]  
[http://www.steelnumber.com/en/steel\\_composition\\_eu.php?name\\_id=199](http://www.steelnumber.com/en/steel_composition_eu.php?name_id=199)  
(10.04.2016).
- 15- FEST15 keres kasutatud vahtmaterjali omadused [WWW]  
<http://www.airexbaltekbanova.com/airex-c70-pvc-foam.html> (10.04.2016).
- 16- FEST16 kasutatud vahtmaterjali omadused [WWW]  
<http://www.airexbaltekbanova.com/airex-t90-fire-resistant-foam.html> Airex t90  
datasheet (10.04.2016).
- 17- VAP membraankanga eelised [WWW] <http://www.vap-info.com/en/vap-advantages.html> (10.04.2016)
- 18- PRO SET INF 114 materjali tehniline info [WWW]  
[http://prosetepoxy.com/PDF/INF-114\\_INF-211.pdf](http://prosetepoxy.com/PDF/INF-114_INF-211.pdf) (10.11.2015).
- 19- Liimi EA9466 tehniline informatsioon [WWW]  
<http://tds.henkel.com/tds5/docs/EA%209466-EN.PDF> (10.01.2016).
- 20- Bosze, E., Nutt, S, Potential for Galvanic Corrosion between Carbon Fifiers and Al Wires in ACCC/TW Conductor.- Gill Foundation Composites . 1-2. [online] ctcglobal (01.02.2016).
- 21- Coremat südamikmaterjali tehnilised omadused [WWW]  
[http://www.lantor.com/wp-content/uploads/2015/01/02\\_LANT\\_DATASHEET\\_COREMAT\\_XM\\_-web.pdf](http://www.lantor.com/wp-content/uploads/2015/01/02_LANT_DATASHEET_COREMAT_XM_-web.pdf)  
(01.03.2016).
- 22- FAR25.853 testi kirjeldus [WWW] [http://sekisui-spi.com/assets/images/products/KYDEX%C2%AE\\_Sheet\\_Technical\\_Brief\\_111-B\\_-\\_FAR\\_25.853a\\_\\_FAR\\_25.pdf](http://sekisui-spi.com/assets/images/products/KYDEX%C2%AE_Sheet_Technical_Brief_111-B_-_FAR_25.853a__FAR_25.pdf) (01.02.2016).



# Lisad

## Lisa 1

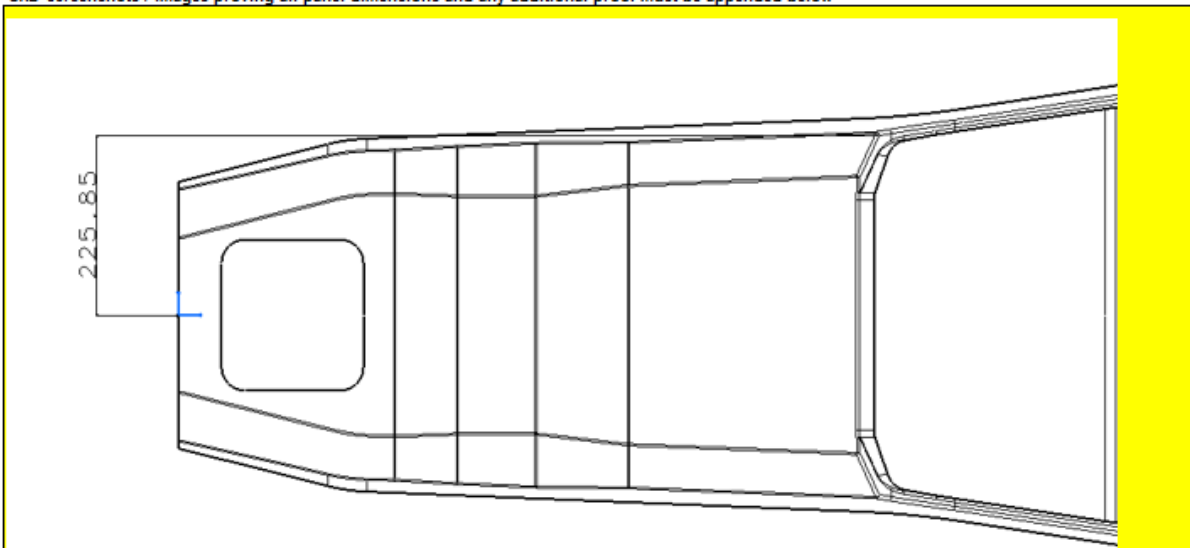
### Front Hoop Bracing

Enter construction type **Composite only**

Material Property	Baseline	Your Tube	Your Composite	Your Total
Material type	Steel	Steel	Other 1	
Tubing Type	Round	Round	NA	
Material name /grade	Steel	Steel	Composite 2	
Youngs Modulus, E	2,00E+11	2,00E+11	1,38E+11	
Yield strength, Pa	3,05E+08	3,05E+08	3,24E+08	
UTS, Pa	3,65E+08	3,65E+08	3,24E+08	
Yield strength, welded, Pa	1,80E+08	1,80E+08	N/A	
UTS welded, Pa	3,00E+08	3,00E+08	N/A	
Number of tubes	1	1		
Tube OD, mm	25,4	25,4		
Wall, mm	1,60	1,6		
Thickness of panel, mm			12	
Thickness of core, mm			10	
Thickness of inner skin, mm			1	
Thickness of outer skin, mm			1	
Panel height, mm (half width across top of chassis)			225,85	
OD, m	0,0254	No tubes		
Wall, m	0,0016			
I, m <sup>4</sup>	8,51E-09		1,37E-08	1,37E-08
EI	1,70E+03		1,88E+03	1,88E+03
Area, mm <sup>2</sup>	119,6		451,7	451,7
Yield tensile strength, N	3,65E+04		1,46E+05	1,46E+05
UTS, N	4,37E+04		1,46E+05	1,46E+05
Yield tensile strength, N as welded	2,15E+04		1,46E+05	1,46E+05
UTS, N as welded	3,59E+04		1,46E+05	1,46E+05
Max load at mid span to give UTS for 1m long tube, m	9,78E+02		2,98E+03	2,98E+03
Max deflection at baseline load for 1m long tube, m	1,20E-02		1,10E-02	1,10E-02
Energy absorbed up to UTS, J	5,88E+00		4,91E+01	4,91E+01

	Outer	Inner
b (m)	0,22585	0,22585
h (m)	0,001	0,001
A <sub>1</sub> (m <sup>2</sup> )	2,28E-04	I <sub>1</sub> (m <sup>4</sup> ) 1,88E-11
A <sub>2</sub> (m <sup>2</sup> )	2,28E-04	I <sub>2</sub> (m <sup>4</sup> ) 1,88E-11
z <sub>1</sub> (m)	0,0005	I <sub>c1</sub> (m <sup>4</sup> ) 6,85E-09
z <sub>2</sub> (m)	0,0115	I <sub>c2</sub> (m <sup>4</sup> ) 6,85E-09
Centroid (m)	0,0060	I <sub>c2</sub> (m <sup>4</sup> ) <b>1,37E-08</b>

CAD Screenshots / Images proving all panel dimensions and any additional proof must be appended below



Sele 9.1. Näidis struktuurse samaväärsuse dokumentist (esimese turvakaare toetuse tõestamine)

## Lisa 2



Sele 9.2. Kere positiiv mudel peale freesimist ja peale pahtlipinna lihvimist



Sele 9.3. Kere positiiv ette valmistatud negatiiv vormi lamineerimiseks ja valmis negatiiv vormid



Sele 9.4. Välimise laminaadi kihi lamineerimine



Sele 9.5. Välimise laminaadikihi infusioonimine (vasakul) ja vahust vahekihi paigaldamine (paremal)



Sele 9.6. Sisemise laminaadikihi lamineerimine



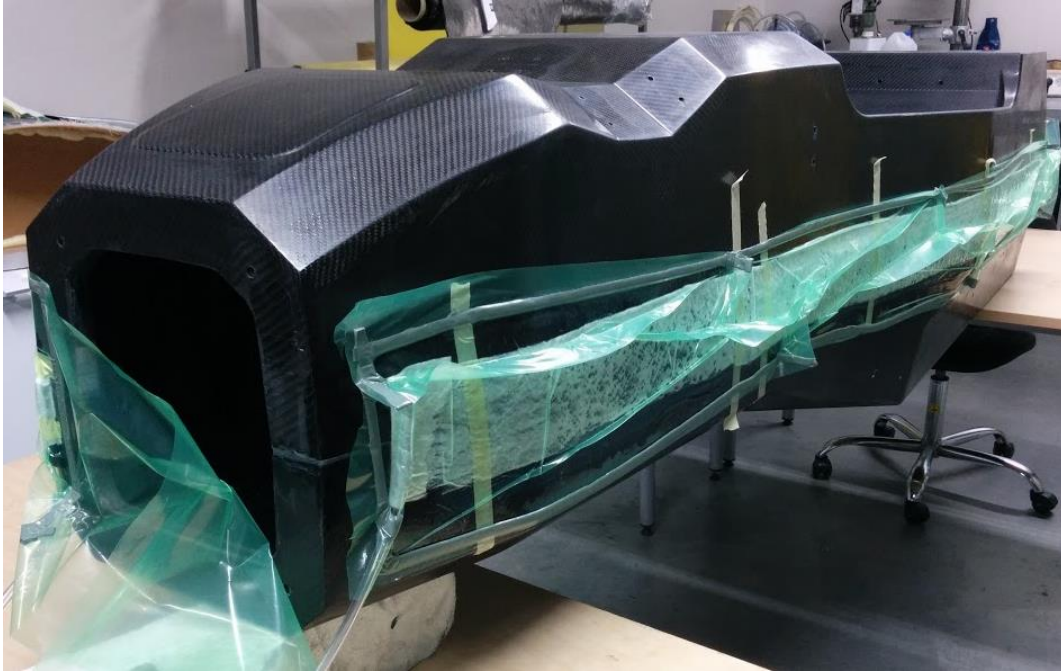
Sele 9.7. Sisemise laminaadikihi infusioonimne (vasakul) ja valmis kere alumine pool (paremal)



Sele 9.8. Valmis kere ülemine pool



Sele 9.9. Kokku liimitud kere pooled liimimisrakises



Sele 9.10. Liimliite ülekatete lamineerimine



Sele 9.11. Valmis kere

## Graafiline osa