



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL  
INSENERITEADUSKOND  
Mehaanika ja tööstustehnika instituut

## **KERE PROJEKTEERIMINE TUDENGIVORMELILE FEST20**

### **CHASSIS DESIGN FOR A FORMULA STUDENT CLASS CAR FEST20**

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Kaarel Haavajõe

Üliõpilaskood 192211 MATM

Juhendaja: Martin Eerme, Professor

# AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

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

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

"....." ..... 20.....

Autor: .....

/ allkiri /

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele

"....." ..... 20.....

Juhendaja: .....

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

"....." .....20... .

Kaitsmiskomisjoni esimees .....

/ nimi ja allkiri /

**Mehaanika ja tööstustehnika instituut**  
**LÕPUTÖÖ ÜLESANNE**

**Üliõpilane:** Kaarel Haavajõe, 192211 MATM  
Õppekava, peeriala: MATM02/18 - Tootearendus ja tootmistehnika  
**Juhendaja(d):** Martin Eerme, Professor  
**Konsultant:**

**Lõputöö teema:**  
(eesti keeles) Kere Projekteerimine tudengivormelile Fest20  
(inglise keeles) Chassis design for a formula student class car fest20

**Lõputöö põhieesmärgid:**

1. Materjalide valik
2. Katsetulemuste valideerimine arvutusmoodulitega
3. Tootmise muutmine efektiivsemaks

**Lõputöö etapid ja ajakava:**

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Kere projekteerimist mõjutavate tegurite määramine	01.10.2019
2.	Kanga ning vahematerjali määramine	01.12.2019
3.	Laminaatide määramine ning valideerimine	01.01.2020
4.	Toodetud süsinikmonokokk-kere	01.03.2020

**Töö keel:** ..... **Lõputöö esitamise tähtaeg:** "....." .....20.....a

**Üliõpilane:** ..... "....." .....20.....a  
/allkiri/

**Juhendaja:** ..... "....." .....20.....a  
/allkiri/

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

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

# SISUKORD

<b>EESSÕNA</b> .....	7
<b>SISSEJUHATUS</b> .....	8
<b>1 LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU</b> .....	10
<b>2 VÕISTLUSSARJA REEGLID [4]</b> .....	11
<b>2.1 Üldised reeglid</b> .....	11
<b>2.2 Reeglid kerele</b> .....	11
<b>3 NÕUDED KERE REGIOONIDELE</b> .....	12
<b>3.1 SIS</b> .....	12
<b>3.2 SHB</b> .....	13
<b>3.3 TSPS</b> .....	13
<b>3.4 MHBS</b> .....	13
<b>3.5 FBH</b> .....	13
<b>3.6 FBHS</b> .....	14
<b>3.7 FHB</b> .....	14
<b>4 KERE GEOMEETRIAT MÕJUTAVAD TEGURID</b> .....	15
<b>4.1 Keres paiknevad komponendid</b> .....	15
<b>4.2 Vedrustuspunktid</b> .....	15
<b>4.3 Tootmistehnoloogia mõju</b> .....	16
<b>5 MATERJALI VALIK</b> .....	17
<b>5.1 Kanga valik</b> .....	17
<b>5.2 Vahematerjali valik</b> .....	18
<b>6 KERE LAMINAADID</b> .....	21
<b>6.1 Kere laminaadi arvutus</b> .....	21
<b>6.2 Paralleelsete fiibrite arvutamine</b> .....	23
<b>6.3 Laminaadi perimeetri nihketugevus</b> .....	24
<b>6.4 Kere massi arvutus</b> .....	25
<b>7 KERE INSERTID</b> .....	27
<b>7.1 Arvutusmoodul</b> .....	27
<b>7.2 Materjali valik insertidele</b> .....	30
<b>8 KERE LOKAALNE JÄIKUS</b> .....	32
<b>8.1 Väsimus katsekeha</b> .....	32
<b>8.2 Lokaalne läbipaine</b> .....	33
<b>9 TURVAKAARED</b> .....	35

<b>10 TOOTMINE</b> .....	36
<b>10.1 Kere positiivvormid</b> .....	36
<b>10.2 Kere negatiivvormid</b> .....	37
<b>10.3 Kere tootmine</b> .....	38
10.3.1 Negatiivvormide parandamine .....	38
10.3.2 Kärgede sobitamine .....	39
10.3.3 Lamineerimine .....	40
<b>10.4 Tootmistulemus</b> .....	42
<b>KOKKUVÕTE</b> .....	44
<b>SUMMARY</b> .....	46
<b>KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU</b> .....	47
<b>LISAD</b> .....	48
<b>GRAAFILINE OSA</b> .....	52

Sele 3.1 Fest 20 kere regioonid .....	12
Sele 4.1 Tasku kinnituskõrvadele .....	16
Sele 5.1 Põimitud kangas [7] .....	18
Sele 6.1 Võistlussarja Excel .....	21
Sele 6.2 Reaalne katsetulemus .....	22
Sele 6.3 Arvutusmoodulit kasutades saadud tulemus .....	22
Sele 6.4 Kere regioonid .....	26
Sele 7.1 Kere kinnitusankur .....	28
Sele 8.1 Kinnituskõrv .....	32
Sele 8.2 Väsimusgraafik .....	33
Sele 9.1 Eesmise turvakaare šabloon .....	35
Sele 9.2 Keevitatud peamine turvakaar .....	35
Sele 10.1 Freesi töörada .....	36
Sele 10.2 Freesimata serv .....	36
Sele 10.3 Vormide lihvimine .....	37
Sele 10.4 Poleeritud vormid .....	37
Sele 10.5 Gelcoat ning inserdid .....	38
Sele 10.6 Vorm enne infusioonimist .....	38
Sele 10.7 Katkine negatiiv vorm .....	39
Sele 10.8 Parandatud negatiiv vorm .....	39
Sele 10.9 Kärje lõikamine .....	40
Sele 10.10 Sobitatud kärjed .....	40
Sele 10.11 Esimene turvakaar .....	41
Sele 10.12 Lamineeritu turvakaar .....	41
Sele 10.13 Kärge insertiega .....	41
Sele 10.14 Insertide lisamine .....	41
Sele 10.15 Vaskvõrk .....	42
Sele 10.16 Tudengivormel FEST20 .....	43
Tabel 1 Süsinikkuskt kanga valik .....	18

Tabel 2 Kärgede võrdlus.....	19
Tabel 3 Laminaadi arvutusmoodul.....	22
Tabel 4 Laminaatide massid.....	23
Tabel 5 Kanga fiibrite protsent.....	24
Tabel 6 Perimeetri nihketugevus ühe kihiga.....	25
Tabel 7 Perimeetri nihketugevus kahe kihiga.....	25
Tabel 8 Kere massi arvutus tabel.....	26
Tabel 9 Kinnitusankrute arvutusmoodul.....	27
Tabel 10 Inserdi materjalid.....	30
Tabel 11 Ajakava.....	43

## **EESSÕNA**

Käesolev lõputöö on teostatud Tallinna Tehnikaülikoolis ning töö tulmusena valmis koostöös Tallinna Tehnikakõrgkooli tudnegitega tudengivormel FEST20. Töö autor soovib tänada Formula Student Team Tallinna meeskonna liikmeid võimaluse eest panustada meeskonna arengusse ning tiimitöösse. Autor soovib tänada Tallinna Tehnikaülikooli ning töötajaid, kes on aidanud laborikatsetega. Magistrikraadi taotleja täna ettevõtteid: Composite Plus OÜ, Paintlines OÜ, Composite Eesti OÜ, kes aitasid kaasa lõputöö teemaks olnud FEST20 vormelauto valmimist. Autor tänab lõputöö juhendamise eest Martin Eermed.

## SISSEJUHATUS

Formula Student on tootearendusvõistlus, millest võtavad osa ülikoolid üle maailma. Võistlussari sai alguse Ameerika Ühendriikidest 1980. aastatel. Sari on viimaste aastakümnetega kogunud populaarsust ning tuntud kogu maailmas. Euroopas toimus esimene võistlus 1998. aastal. Tootearendusvõistluse eesmärk anda üliõpilastele auto projekteerimise ja ehitamise kogemus, hiljem ka eelduseid ja motivatsiooni töötada autotööstuses. Sinna, kuhu liigub ja areneb autotööstus, liigub ka Formula Student võistlussari. Nii ongi sarjale lisandunud lisaks bensiini- ning elektrimootorite kategooriale ka isejuhtivate vormelite kategooria. Formula Student projekt koosneb dünaamilistest aladest ehk vormeliga võistlusrajal sõitmisest, aga ka staatilistest aladest, kus üliõpilased saavad lisaks projekteerimiskogemusele end proovile panna ka autotööstuse majandusliku poole ehk eelarve loomise ja arvestamisega. [1]

Formula Student Team Tallinna meeskond on tegutsenud aastast 2006. Meeskonda kuuluvad entusiastlikud üliõpilased Tallinna Tehnikaülikoolist ning Tallinna Tehnikakõrgkoolist. Meeskond on nende aastate jooksul ehitanud kokku 13 vormelit, millest 6 on olnud bensiinimootoriga. FEST20 hooajal valmis 13. vormelauto, mis oli ühtlasi meeskonna jaoks 7. elektrivormel. [1] Meeskond on valmistanud varasemate võistlusautode kered toruraamist, kuid alates hooajast 2014/2015 hakati valmistama süsinikmonokokk-keresid. [2] Hooajal 2017/2018 võeti kasutusele eelimmutatud süsinikkiust kangas ning aasta hiljem hakkas meeskond kasutama monokokk-kere laminaatides vahematerjalina alumiiniumkärgeid. [3]

Antud lõputöö raames valmib tudengivormeli FEST20 süsinikmonokokk-kere. Töö käigus pannakse rõhku arvutusmoodulite väljatöötamisele, lihtsustades sellega järgnevatel aastatel kere arendust. Lõputöö raames laiendatakse materjalivalikut, millest monokokk-kere koosneb, vähendades sellega kere massi, kuid tagades kere igale regioonile nõutud jäikuse ning turvalisuse nõuded. Töö autor paneb rõhku teemadele, mis aitaksid järgnevatel aastatel projekteeritud lahendusi lihtsamalt valideerida. Üheks selliseks teemaks on kere kinnitusankrud, mille jaoks leitakse arvutuskäik, millega on võimalik edaspidi säästa aega ja vältida liigseid katsetamisi. Lisaks sellele pannakse rõhku tootmisprotsessi arendamisele ja võetakse vormide valmistamisel kasutusele tehnoloogia, mis kiirendab monokoki valmimist.

Lõputöö esimestes peatükkides räägitakse võistlussarja reeglitest, mis pannevad paika, millistele tingimustele Formula Student sarja vormel vastama peab ning milliste oluliste parameetritega tuleb kere projekteerimisel arvestada. Järgnevalt vaadeldakse

lähemalt erinevaid materjale, mida on võimalik kasutada tudengivormeli süsinikmonokokk-kere tootmiseks. Pärast seda uuritakse lähemalt kere laminaatide arvutuskäiku, mille käigus luuakse erinevaid arvutusmoduleid, leidmaks kõige optimaalsem süsinikkiust laminaat FEST20 kerele. Järgmisena käsitletakse peatükis kere insertide arvutusmooduli leidmist, millega oleks võimalik lihtsustada kinnitusankrute valideerimist. Viimastes peatükkides vaadeldakse kere lokaalset jäikust kere külge kinnituvate detailide juures. Sellega seoses valmistatakse kinnitusankrule väsimuskatsekeha ning vaadeldakse, kui palju mõjutab kere lokaalne läbipaine vormelauto sõidudünaamikat. Eelviimases peatükis vaadeldakse vormelauto eesmist ning peamist turvakaart. Viimase teemana käsitleb töö autor tootmist ja kirjeldab kõiki FEST20 kere tootmisprotsessi osasid. Antud töö autor kasutas töövahenditena arvutusprogrammi Excel, kus sooritati arvutused, ning projekteerimiseks CATIA V5. Lisades on näha erinevate arvutusmoodulite tulemused ning graafikud.

# 1 LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU

FEST19 – Formula Student Team Tallinna 2018/2019 hooaja võistlusauto

FEST20 – Formula Student Team Tallinna 2019/2020 hooaja võistlusauto

Formula Student Team Tallinn – Tallinna Tehnikaülikooli ning Tallinna Tehnikakõrgkooli meeskond

SIS – Küljkokkupõrke struktuur (*ing k* Side impact structures)

SHB – Õlaturvavöö struktuur (*ing k* Shoulder harness bar)

TSPS – Akupakki kaitsev struktuur (*ing k* Tractive system protection structures)

MHBS – Tagumise turvakaare tugistruktuur (*ing k* Main hoop bracing support)

FBH – Eesmine kokkupõrke struktuur (*ing k* Front bulkhead)

FBHS – Eesmise kokkupõrke struktuuri tugistruktuur (*ing k* Front bulkhead support)

FHB – Eesmise turvakaare tugistruktuur (*ing k* Front hoop bracing)

3k – Fiibrite kogus

## 2 VÕISTLUSSARJA REEGLID [4]

Rahvusvahelise Formula Student võistlussarjas on sätestatud mitmed reeglid, mida tuleb järgida vormeli projekteerimisel. Reeglid on koostatud Formula Student Germany sarja poolt. Tegemist on tudengisarjaga, seega reeglite eesmärk on eelkõige tagada üliõpilaste turvalisus võistlustel.

### 2.1 Üldised reeglid

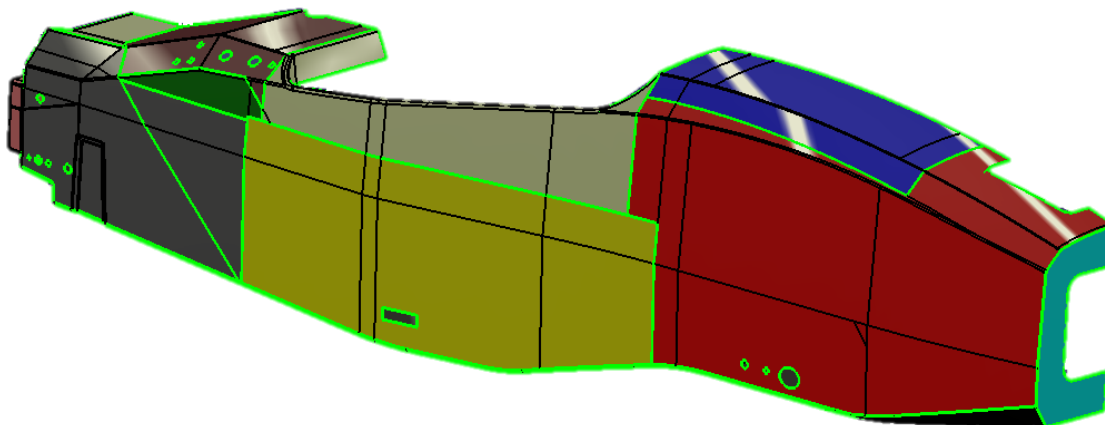
- T2.3.2: Vormeli statsionaarne põhjakõrgus, mis tahes kohast mõõdetuna välja arvatud rehvidest, peab olema minimaalselt 30 mm maapinnast.
- T3.5.1: 3-punkti katsekeha mõõtmed peavad olema 275 mm x 500 mm ning vahematerjal peab olema nähtav.
- EV3.1.1: Elektri juhtivate vormeli komponentide takistus peab olema väiksem kui 300 mΩ, mis on mõõdetud 1 ampriga vormli madalpinge ahelast.
- T3.3.1: Peamine turvakaar peab olema terasest, eesmine turvakaar peab olema metallist ning võib olla alumiiniumist keevitatud.

### 2.2 Reeglid kerele

- T3.15.1: Küljkokkupõrke struktuur võib olla kere kõige madalamast sisepinnast 320 mm kõrguseni.
- T3.2.4: Tõestuseks tuleb kasutada mittekeevitatud torusid, mille elastsusmoodul on 200 GPa, voolepiir 305 MPa ning tõmbetugevus 365 MPa.
- T3.4.3: Regioonide laminaatides ei tohi paralleelseid fiibreid olla ühes suuna üle 50%. +/-10° fiibrid loetakse samasuunaliseks.
- EV4.4.2: Kõrgepinge seadmed, mis on madalamal kui 350 mm maapinnast, tuleb kaitsta kokkupõrke eest vastava struktuuriga, mis vastab antud regiooni nõuetele.
- T3.5.9: Laminaadi perimeetri nihketugevuse katsekeha mõõtmed on 100 mm x 100 mm. Aplikaatori läbimõõduks on 25 mm.

### 3 NÕUDED KERE REGIOONIDELE

Kere projekteerides tuleb arvestada paljude reeglitega, millele kere peab vastama, et saavutada igale regioonile sobilik struktuur. Reeglitega on ära määratud kindlad materjalid, millega peab süsinikkomposiidist kere olema võrdväärne, küll aga ei ole piiratud materjalid, millest kere võib olla tehtud. Allpool on näha Formula Student Team Tallinna tudengivormel FEST20. (Sele 3.1)



*Sele 3.1 Fest 20 kere regioonid*

#### 3.1 SIS

Külgkokkupõrke regiooni ülesanne on kaitsta vormelipilooti olukorras, kus kokkupõrge kerega toimuks küljelt. See ala on tähistatud kollase värviga. (Sele 3.1) Antud regioon jagatakse veel kaheks, SIS horisontaalne ning SIS vertikaalne, kus vertikaalne osa on kere külg ning horisontaalne kere põrand. SIS regioon peab vastama järgmistele nõuetele:

- SIS peab asuma kahe turvakaare vahel.
- SIS vertikaalne regioon peab olema sama jäik, kui on 2 terastoru, mille inertsmoment on  $8509 \text{ mm}^4$  ning mille energianeelduvus oleks 2 toruga sama.
- SIS horisontaalne regioon peab olema sama jäik, kui on 1 terastoru, mille inertsmoment on  $8509 \text{ mm}^4$ .
- Perimeetri nihketugevus peab olema vähemalt  $7.5 \text{ kN}$ .

### 3.2 SHB

Õlaturvavöö regioon asub sõitja selja taga, õlgade kõrgusel. Antud regioon kinnitatakse õlaturvavöö kinnituskõrvad. Tähistatud pruuni värviga. (Sele 3.1) SHB regioon peab vastam järgmistele nõuetele:

- SHB regioon peab olema sama jäik, kui on 2 terastoru, mille inertsmoment on 8509 mm<sup>4</sup>. (T3.2.4)
- SHB regioon peab olema piisavalt lai, et sinna mahuks kaks kinnituskõrva vahemikus 180 mm kuni 230 mm, mõõdetud kinnituskõrvade keskpunktidest.

### 3.3 TSPS

Akupakki kaitsev regioon asub kere küljel tagumises osas. Antud regiooni ülesanne on kaitsta kõrgepingete komponente nagu näiteks akupakk ning kontrollid. TSPS on tähistatud halli värviga. (Sele 3.1) Regioon peab vastama järgmistele nõuetele:

- TSPS regioon peab olema sama jäik, kui on 2 terastoru, mille inertsmoment on 8509 mm<sup>4</sup>. (T3.2.4)
- TSPS peab olema piisavalt kõrgel, et kaitsta komponente, mis on madalamad kui 350 mm maapinnast. (EV4.4.2)

### 3.4 MHBS

Tagumise turvakaare tugistruktuur asub turvakaarest taga pool, kere küljel. Antud regiooni ülesanne on tagada triangulatsioon tagumise turvakaare kinnituskõrvade ning turvakaart toetava toru kinnituse vahel. MHBS on tähistatud rohelise värviga. (Sele 3.1) Regioon peab vastama järgmistele nõuetele:

- MHBS regioon peab olema sama jäik, kui on 1 terastoru, mille inertsmoment on 6695 mm<sup>4</sup>. (T3.2.4)
- Tagatud peab olema turvakaare kinnituste vahel triangulatsioon.

### 3.5 FBH

Eesmine kokkupõrke struktuur on kere kõige eesmine regioon, kuhu kinnitub kokkupõrkeleevendi. Antud regioon peab olema piisavalt jäik, et vastu võtta lauskkokkupõrkel piisavalt jõudu. Regioon kaitseb sõitja jalgu. Tähistatud helesinise värviga. (Sele 3.1) Regioon peab vastama järgmistele nõuetele:

- FBH regioon peab olema sama jäik, kui on 1 terastoru, mille inertsmoment on 8509 mm<sup>4</sup>. (T3.2.4)

- Perimeetri nihketugevus peab olema sama või suurem kui on 1.5 mm terasplaadil. (T3.2.4)

### **3.6 FBHS**

Eesmise kokkupõrke struktuuri tugistruktuur asub ees kere küljel. Antud regiooni ülesanne on tagada piisavalt jäik struktuur toetamaks FBH-d ning FHB-d. FBHS on tähistatud punase värviga. (Sele 3.1) Regioon peab vastama järgmistele nõuetele:

- FBH regioon peab olema sama jäik, kui on 6 terastoru, mille inertsmoment on 6695 mm<sup>4</sup>. (T3.2.4)
- Perimeetri nihkejõud peab olema vähemalt 4 kN.

### **3.7 FHB**

Eesmise turvakaare tugistruktuur asub ees kere peal. Antud regiooni ülesanne on ära siduda eesmine kokkupõrke struktuur eesmise turvakaarega. Regioon on tähistatud sinise värviga. (Sele 3.1) FHB peab vastama järgmistele nõuetele:

- FBH regioon peab olema sama jäik, kui on 2 terastoru, mille inertsmoment on 8509 mm<sup>4</sup>. (T3.2.4)
- Võib olla kuni 50 mm all pool turvakaare kõige kõrgemast punktist.

## **4 KERE GEOMEETRIAT MÕJUTAVAD TEGURID**

### **4.1 Keres paiknevad komponendid**

Kere disainimisel ei tasu ära unustada monokokk-keres paiknevaid komponente. Käesolevas magistritöös vaadeldava FEST20 vormeli kerel liikus roolisüsteem kere sisse. Sellest tulenevalt tuleb laminaati arvestades arvestada ka roolisüsteemi kõrgusega. Kuna süsteem on liikunud kere sisse, tuleb arvestada, et hiljem tuleb teha eesmise kokkupõrke struktuuri tugistruktuurile vastav ava, et sealt oleks võimalik ühendada omavahel roolivarras roolisambaga.

Vormelis on paigutatud komponendid kompaktselt ning kõikidele detailidele ei pruugi kergelt ligi pääseda. Üheks selliseks süsteemiks, millele on keeruline ligi pääseda, on pidurisüsteemi pedaalid. Pedaalidele tuleb piloodi vahetuse ajal juurde pääseda, et oleks võimalik muuta pedaalide kaugus erinevatele sõitjale sobivaks. Selleks on eesmise turvakaare tugistruktuurile tehtud ava, et vajadusel oleks võimalik sinna kergelt juurde pääseda. Antud struktuurile laminaati mõeldes tuleb arvestada ava suurusega.

Esmakordselt on FEST20 puhul muudetud vormelit juhtiva kontrolleri komponentide paigutust mittestandardseks. Komponendid viidi kere põrandale lähemale, tänu sellele langes kontrolleri massikese madalamale. Selle muutuse tõtu on kere tagumine osa läinud laiemaks ning madalamaks. Sellest tulenevalt tuleb arvesse võtta, et ilmselt tuleb tagumises osas teha struktuurid jäigemad.

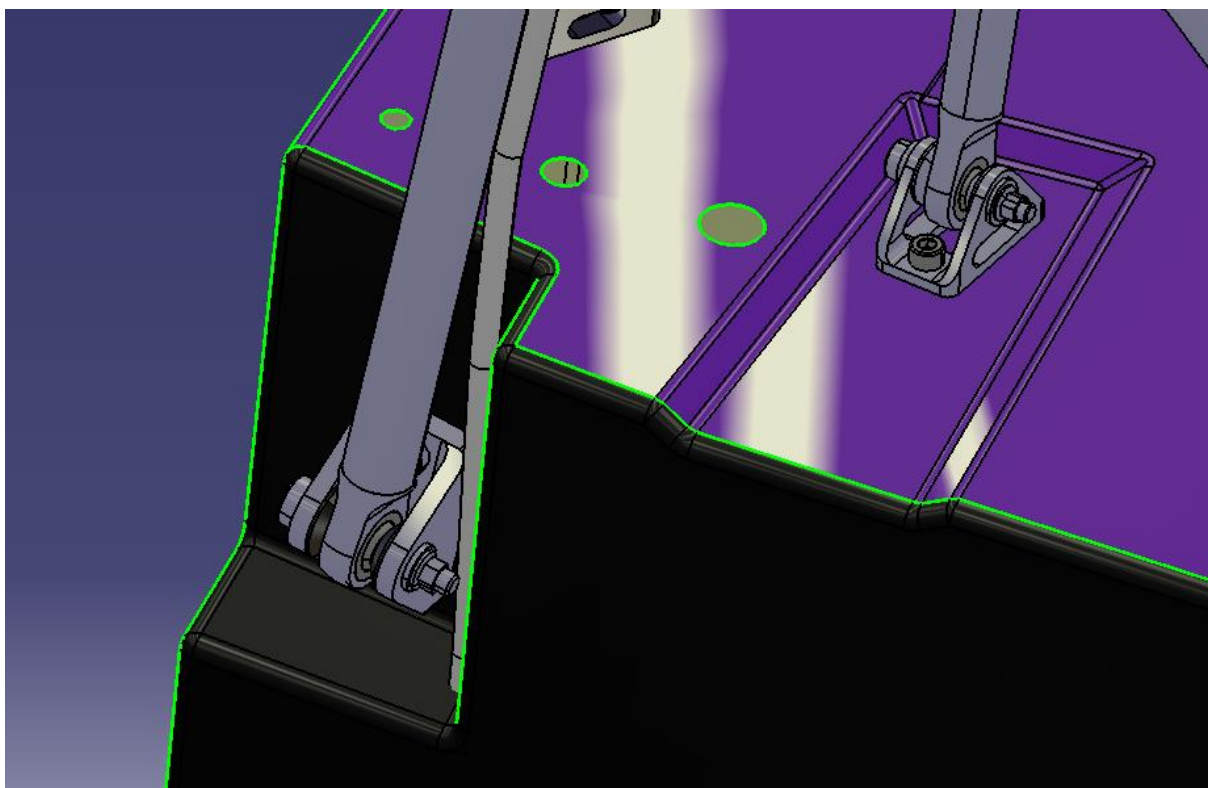
Formula Student Team Tallinna vormeli tagumine struktuur on läbi aastate seotud kolme väga olulise detailiga. Tagumises seinas paikneb stabilisaatori varras, akukasti jahutusavad ning tagasein. Kuna vormeli kere on tagant madalam, jääb vähem ruumi ka tagaseinale, sellest tulenevalt võib arvestada, et sein tuleb teha veelgi jäigem, kui ta on olnud varasematel aastatel.

### **4.2 Vedrustuspunktid**

Kere projekteerimisel on üheks suuremaks sisendiks vedrustuspunktid. Kinemaatilisi arvutusi tehes saadakse punktid, kuhu kinnituvad veermiku detailid, olgu selleks käänmik või hoopis kõrvad. Teades kõrvade asukohta saab disainida kere võimalikult kinnituspunktide lähedalt, et võita kõrvade massist. Kuid tulenevalt keres paiknevatest komponentidest ning struktuuride laminaadi paksusest, ei saa alati kere pindasid

kõrvadele sobivale kohale. Kuna kinemaatika on esmane prioriteet, tuleb leida kompromiss keres. Üheks selliseks kohaks on tagumise nurga roolivarras. Antud juhul on tehtud kere sisse vastav süvis, et saaks kõrvale sobiva pinna. Sellest tulenevalt tuleb antud regioon jäigem teha.

Teiseks selliseks kohaks on tagumise alumise õõtsa tagumine kõrva kinnitus. Antud kinnitusel on tehtud nurka tasku, et oleks võimalik saada sobilik kinnituskoht. Tasku tuli teha, sest kõrva ei olnud võimalik difuusori tõttu alla poole viia ning kere küljele ei oleks olnud võimalik kõrva kinnitada. (Sele 4.1) Antud regioonis tuleb arvestada, et kinnituskõrvale saaks piisavalt jäik laminaat.



*Sele 4.1 Tasku kinnituskõrvadele*

### **4.3 Tootmistehnoloogia mõju**

Disainides üritatakse kere paneele hoida võimalikult lihtsatena, väheste geomeetriliste muudatustega ühes regioonis. Tulenevalt sellest, et süsinikkiust plaatide vahel paiknevat vahematerjali ei anna väga painutada. Küll aga on kerel mõningad regioonid, mis on suurema kumerusega. Üheks selliseks kohaks on eesmise turvakaare tugistruktuur. Antud regioonis tuleb vahematerjali valides silmas pidada, et oleks võimalik materjali vastavalt geomeetriaile paigutada.

## 5 MATERJALI VALIK

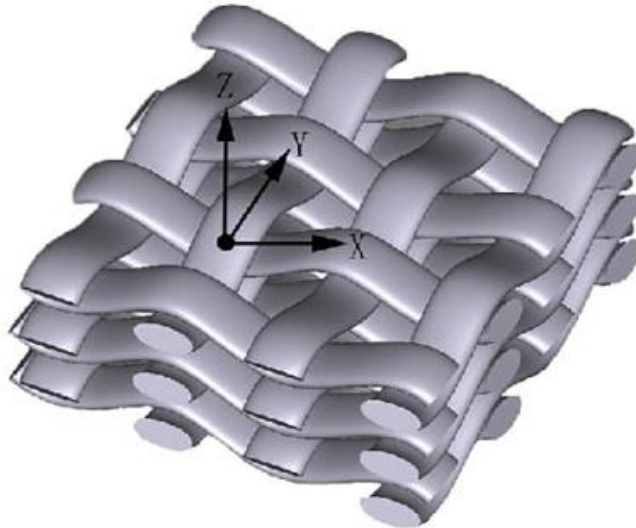
Viimastel aastatel on laienenud nende materjali valik, millest Formula Student Team Tallinna vormeli kere koosneb. Kui varasemalt kasutati monokokkkeses süsinikkiust kangast ja vahtu, siis nüüd on hakatud kasutama ka kärgesid, olgu selleks alumiinium- või Nomex kärg. Lisaks sellele veel erinevad vaigukangad ning pastad, et veelgi paremini siduda laminaadis olevaid materjale.

### 5.1 Kanga valik

Alates aastast 2018 on Formula Student Team Tallinna tudengivormeli kere toodetud eelimmutatud süsinikkiust kangast *pregreg*. [3] Kanga on saanud sponsorkorras ettevõttest Gurit. Antud ettevõtte kahjuks enam Tallinna meeskonda toetada ei saanud, seega tuli hakata otsima eelimmutatud kangast mujalt.

Kanga valikul uuriti esmalt vana kanga andmelehte ning tehti selgeks, mis omadustele varem kasutatud eelimmutatud kangas vastab. Selgus, et varasemalt on kasutatud 2x2 põiminguga kangast. Antud kanga põiming on laialt levinud, seega võib eeldada, et sellise põiminguga kangast on lihtsam hankida. Lisaks sellele on 2x2 põiminguga kangast lihtne vormida keeruka geomeetriaga vormidele. [5] Erinevate kangaste andmelehti võrreldes selgus, et kangaste paindemooduli ning tõmbemooduli vahe on ligikaudu kahekordne. Silma jäi DeltaPregi kõrge elastsusmooduliga ühesuunaline kangas M46J, mille tõmbemoodul on 420 GPa. [6] Seega võis järeldada, et antud kanga elastsusmoodul on 210 GPa.

Kangaste andmeid uurides selgus, et kui põimitud kangas on tehtud samast kiust, mis ühesuunaline kangas, siis põimitud kanga elastsusmoodul väheneb poole võrra. Seega võib öelda, et samast kiust tehtud põimitud kanga elastsusmoodul on 105 GPa. Põimitud kanga elastsusmoodul väheneb sellepärast, et ristlõike ulatuses on pooled kiud ühes suunas ning pooled kiud risti teistega. (Sele 5.1)



Sele 5.1 Põimitud kangas [7]

Erinevatest põimingutega kangastest jäi silma DeltaPregi GG200T kangas. Kui varem on Formula Student Team Tallinn kasutanud 3k fiibriga kangast, siis antud kangal on ühes pundis 6k fiibrit. Suurema fiibri kogusega kangastel on üldjuhul paremad mehaanilised omadused. 6k fiibreid kasutatakse rohkem lennunduses ning rallivõistlussarjades. [8] Antud kangaga tehti võrdlus varem kasutatud põiminguga kangastega. (Tabel 1) Võrreldes teiste kangastega omab valitud kangas suuremat elastsusmoodulit ning antud kanga mass on kergem. Ainukeseks miinuseks võib pidada kanga kõrget ruutmeetri hinda.

Tabel 1 Süsinikkiuskt kanga valik

	Gurit SC 110(T2) [9]	Sigrapreg W245 [10]	DeltaPreg GG200T [6]
Mass, g/m <sup>2</sup>	408 (3)	445 (2)	345 (5)
Elastsusmoodul, GPa	60 (2)	55 (1)	105 (5)
Hind, €/m <sup>2</sup>	60 (3)	29,5 (4)	96 (1)
Kanga paksus, mm	0,25 (4)	0,3 (3)	0,15 (5)
Kokku	12	10	16

## 5.2 Vahematerjali valik

Formula Student sarja Tallinna meeskonna vormelil FEST19 oli esimene süsinikmonokokk-kere, kus kasutati esmakordselt vahematerjaliks alumiiniumkärjesid. Alumiiniumkärjed valis välja kunagine komposiitmeeskonna

kapten Kalev Karp, kes oma lõputöös toob ka välja parameetrid, mida ta kärje valikul võrdles. [3] Kuna FEST19 kere tootmisest jäi alumiiniumkärjesid järgi, otsustati majanduslikul kaalutlusel suurem osa kärjesid samaks jätta ning need ära kasutada.

Vahematerjalina uuriti Nomex kärjesid. Nomex kärj on toodetud aramiidpaberist, mis on omavahel kokku liimitud kuumakindla vaiguga. Antud kärjed on mittemetalsed ning väikese massiga. [11] Vähene mass on ka põhjus, miks Nomex võeti vaatluse alla. Valiti välja Nomex, mille kärje suurus oleks ligilähedane 3 mm. Väikese suurusega kärj valiti vastavalt eelnevale tootmiskogemusele, mida mainib Kalev Karp oma lõputöös. Silma jäid ka Toray kärjed. [12] Vahematerjali võrdlusel vaadeldi nihketugevuse ning massi suhet. Tabelis tähistatud rohelised lahtrid näitavad massi ning nihketugevuse jagatist. Mida madalam on väärtus seda parem on kärj. (Tabel 2 Kärgede võrdlus Tabel 2) Seega kõige sobilikum oleks kasutada ANA-3.2-64 Nomex kärje.

Tabel 2 Kärgede võrdlus

Name	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Plate Shear strength (MPa)	Weight to shear ratio	Material thickness (mm)	Test panel with (mm)	Area (mm <sup>2</sup> )	Max force (N)	kN
ANA-3.2-29	29	0,5	58	10	275	2750	2750	2,75
				15		4125	4125	4,125
				20		5500	5500	5,5
				25		6875	6875	6,875
				30		8250	8250	8,25
ANA-3.2-48	48	1,25	38,4	10	275	2750	6875	6,875
				15		4125	10312,5	10,3125
				20		5500	13750	13,75
				25		6875	17187,5	17,1875
				30		8250	20625	20,625
ANA-3.2-64	64	2	32	10	275	2750	11000	11
				15		4125	16500	16,5
				20		5500	22000	22
				25		6875	27500	27,5
				30		8250	33000	33

Valem teoreetilise maksimaalse jõu arvutamiseks:

$$F = 2 * a * b * \sigma_s \quad (1)$$

Kus:

F - Maksimaalne jõud, N

$\sigma_s$  - Nihkepinge vahematerjalis, MPa

a - Vahematerjali paksus, mm

b - Vahematerjali laius, mm

Võrreldes Nomex kärjesid eelneval aastal kasutatud alumiiniumkärgedega, jäis silma, et nomexil on nihketugevus märgatavalt madalam. Selleks arvutati erinevate kärjepaksuste korral välja katsekeha teoreetiline maksimaalne jõud, millal

vahematerjal puruneb. Eelnimetatud tabelis tähistatud kollaselt. Silma jäi, et väljavalitud kärje maksimaalne jõud 30 mm korral oleks 33 kN.

Võrdluseks võib välja tuua, et kui 10 mm paksune alumiiniumkärj suudab 3-punkti painde jooksul maksimaalselt vastu pidada 21 kN, siis ligilähedase tulemuse annab alles 20 mm paksune Nomex kärj. Küll aga katsekeha mõõtmetega on 20 mm Nomex kärj 40% kergem kui 10 mm alumiiniumkärj. (T3.5.1) Kuna laialt on kasutatud keres 20 mm alumiiniumkärje, siis otsustati ANA-3.2-64, 30 mm Nomex kärje kasuks.

## 6 KERE LAMINAADID

Formula Student Team Tallinn kattis eelimmutatud kanga kulud sellel aastal iseseisvalt. Kuna eelimmutatud kangas ning vahematerjal on väga kallid, tuleb tellida täpne kogus. Antud kangast valmisid tudengivormeli kere, veljed, aerodünaamilised detailid ning palju muud. Et mitte kangast raisata, arvutati sobivad laminaadid igale regioonile, vältides sellega liigset katsekehade tegemist.

### 6.1 Kere laminaadi arvutus

Veendumaks, et kere vastab reeglitele ning nõuetele, tuleb teostada monokoki erinevatele regioonidele katsekehi. Kaks põhilist katset, mida teostatakse, on 3-punkti katse ning perimeetri nihkejõu katse. Antud katsete katseandmed sisestatakse võistlussarja poolt teostatud Exceli tabelisse. Antud excel võrdleb katsekehi torukatseandmetega ning näitab, kas antud katsekeha sobib soovitud regiooni või mitte.

Esmalt uuriti, mis sisendid on võistlussarja poolt loodud Excelil. 3-punkti paindel arvutab excel esimese asjana laminaadi jäikuse, selleks tuleb sisendiks määrata jõud, mis laminaadile mõjub ning läbipaine selle jõu juures. [13] Sisestada tuleb ka maksimaalne jõud, mille korral katsekeha purunes. Lisaks sellele tuleb ära määrata tugede kaugus ning katsekeha parameetrid, sinna alla kuuluvad süsinikkiust plaatide paksused, vahematerjali paksus ning laminaadi mõõtmed. Sisendid on tähistatud kollase värviga ning väljundi on tähistatud halli värviga. (Sele 6.1) Väljunditeks saadakse laminaadi jäikus, inertsmoment, elastsusmoodul ning paindepinge.

Figure 2: Load Deflection Curve [Your Structure]

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

$x_1$ (mm)	1,5	$y_1$ (N)	4095	Gradient (N/mm)	2525
$x_2$ (mm)	4	$y_2$ (N)	10334		

Enter value for force at panel failure (max 12.7 mm deflection) or maximum tested force.

$Y_{max}$  (N) 14470

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

$l$ (mm)	484	Panel Support Span
$h$ (mm)	275	Panel Height
$b$ (mm)	25	Core Thickness
$t_1$ (mm)	0,45	Inner Skin Thickness
$t_2$ (mm)	0,6	Outer Skin Thickness
$I$ (mm <sup>4</sup> )	47039	Second moment of area
$E$ (GPa)	126,8	Skin modulus of elasticity
$\sigma_{UTS}$ (MPa)	485	UTS of skins

Sele 6.1 Võistlussarja Excel

Laminaatide välja arvutamiseks läheneti võistlussarja Excelile pöördvõrdeliselt. Kuna teada oli juba valitud kanga elastsusmoodul erinevate süsinikkiud plaatide korral, arvutati välja teised parameetrid. Antud viis võimaldas säästa aega laminaadi määramisel ning hoida kokku materjali arvelt.

Arvutusmoodulit koostades lihtsustati arvutuskäiku. Esmalt määrati ära laminaadi paindepingeks konstantne suurus, kuna lõpptulemusena mõjutab see lineaarselt maksimaalset jõudu, millele katsekeha vastu suudab pidada. Suhe kahe muutuja vahel on sama. Arvutuskäiku määrati ka elastsusmoodul ning laminaadi parameetrid. Tulemuseks saadi maksimaalne jõud, millele katsekeha paindel vastu peab, ning katsekeha jäikus. Lisaks sellele arvutati välja ka laminaadi energianeelduvus. (Tabel 3) Ainukeseks arvutusmooduli miinuseks võib pidada seda, et läbipaine tuleb määrata katse-eksitus meetodil. Kuid sellest hoolimata saab laminaadi ligilähedased tulemuse.

Tabel 3 Laminaadi arvutusmoodul

	UTS (MPa)	E (GPa)	x (mm)	t1 (mm)	t2 (mm)	b (mm)	h (mm)	L (mm)	Ymax (N)	I (mm <sup>4</sup> )	Y (N)	Gradient (N/mm)	Energy (J)	Break (mm)	Laminate shear (MPa)
TW ja TW	500	105,4	10,4	0,15	0,15	20	275	484	3409,343	8374,36875	3886,254	373,67827	15,55298	9,123738483	0,309940256
	500	105,4	10,4	0,15	0,15	25	275	484	4261,566	13045,93125	6054,164	582,131163	15,59867	7,320628111	0,309932055
	500	105,4	10,4	0,15	0,15	30	275	484	5113,805	18748,74375	8700,642	836,6001472	15,62933	6,11260367	0,309927584
	500	105,4	10,4	0,15	0,15	35	275	484	5966,054	25482,80625	11825,69	1137,085223	15,65133	5,246795785	0,309924881
	500	105,4	10,4	0,15	0,15	40	275	484	6818,309	33248,11875	15429,3	1483,586389	15,66789	4,595828566	0,309923123
	500	105,4	10,4	0,15	0,15	45	275	484	7670,567	42044,68125	19511,48	1876,103647	15,6808	4,08856272	0,309921916
	500	105,4	10,4	0,15	0,15	50	275	484	8522,829	51872,49375	24072,22	2314,636996	15,69115	3,682144954	0,309921052

Arvutusmoodulit võrreldi varem teostatud reaalsete katsetulemustega. Reaalsed tulemused ning arvutuslikud tulemused on nähtavad all pool. (Sele 6.2), (Sele 6.3) võrdlusest on näha, et arvutuslikud tulemused ei erine suuresti katselisest tulemusest, seega võib moodulit piisavalt usaldada, et määrata teised laminaadid kere regionidele. Terve arvutusmoodul on nähtav Lisas 1.

Enter values for minimum and maximum load/deflection in linear-elastic region.  
Gradient must be >= that of two baseline steel tubes

x<sub>1</sub> (mm) 1 y<sub>1</sub> (N) 2303 Gradient (N/mm) 1706  
x<sub>2</sub> (mm) 6 y<sub>2</sub> (N) 10768

Enter value for force at panel failure or maximum tested force.  
Y<sub>max</sub> (N) 17210 (>= bending strength of two baseline side impact tubes)

Enter value of absorbed energy, must be >= that of two baseline tubes  
Energy (J) 85

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

l (mm) 484 Panel Support Span  
h (mm) 275 Panel Height (should be 275mm, alternative sizes must be agreed in adv)  
b (mm) 20 Core Thickness  
t<sub>1</sub> (mm) 0.75 Inner Skin Thickness  
t<sub>2</sub> (mm) 0.75 Outer Skin Thickness  
I (mm<sup>4</sup>) 44421 Second moment of area  
E (GPa) 90.7 Skin modulus of elasticity  
σ<sub>UTS</sub> (MPa) 504 UTS of skins

Sele 6.2 Reaalne katsetulemus

Enter values for minimum and maximum load/deflection in linear-elastic region.  
Gradient must be >= that of two baseline steel tubes

x<sub>1</sub> (mm) 0 y<sub>1</sub> (N) 0 Gradient (N/mm) 1706  
x<sub>2</sub> (mm) 5 y<sub>2</sub> (N) 8462.7

Enter value for force at panel failure or maximum tested force.  
Y<sub>max</sub> (N) 17075.2 (>= bending strength of two baseline side impact tubes)

Enter value of absorbed energy, must be >= that of two baseline tubes  
Energy (J) 86.13

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

l (mm) 484 Panel Support Span  
h (mm) 275 Panel Height (should be 275mm, alternative sizes must be agreed in adv)  
b (mm) 20 Core Thickness  
t<sub>1</sub> (mm) 0.75 Inner Skin Thickness  
t<sub>2</sub> (mm) 0.75 Outer Skin Thickness  
I (mm<sup>4</sup>) 44421 Second moment of area  
E (GPa) 90.7 Skin modulus of elasticity  
σ<sub>UTS</sub> (MPa) 500 UTS of skins

Sele 6.3 Arvutusmoodulit kasutades saadud tulemus

Katsekehade valmimisel kaaluti need ära, et neid võrrelda erinevate laminaatide korral, mis oleks massi mõistes kõige optimaalsem. Võrdluseks toodi laminaatide massid, mille süsinikkiust plaadid olid samad, aga vahematerjali paksust oli

muudetud. (Tabel 4) Tulemustest on näha, et Nomex kärjega laminaat on isegi kergem 20 mm paksusest alumiiniumkärjega laminaadist. Antud laminaatidest omab kõige suuremat jäikust 25 mm vahematerjaliga laminaat, kuid 20 mm alumiiniumkärjega ning 30 mm Nomex kärjega laminaadid omavad ligilähedast jäikust. Seega oleks optimaalne 20 mm alumiiniumkärje asemel kasutada 30 mm nomex kärgesid.

*Tabel 4 Laminaatide massid*

Skin1	Core	Skin2	Mass (g)
TW/UD/TW	20 Alu	TW/UD/TW	613
TW/UD/TW	25 Alu	TW/UD/TW	696
TW/UD/TW	30 Nomex	TW/UD/TW	582

## 6.2 Paralleelsete fiibrite arvutamine

Tudengivormeli sarjas muutuvad reeglid igal aastal. Reeglid lähevad küll karmimaks, aga sellest tulevanalt tagatakse võistlussarja turvalisus. Viimaste aastate üheks suuremaks muudatuseks on see, et tuleb vaadata, et laminaadis ei oleks ühes suunas üle 50% fiibreid. Reegli eesmärk on tagada, et laminaadid ei ehitataks üles ühesuunalise kanga UD peale. Kasutades ainult ühesuunalist kangast, puudub laminaadil teises suunas piisav jäikus. Sellest tulenevalt sai teha Exceli tabel, mis arvutab igas kanga orientatsioonis välja, kui suur fiibrite hulk selles suunas on. (Tabel 5)

Tabelit koostades võeti arvesse kangaste massid. Kirja pandi iga regiooni süsinikkiust kangaste kogus vastavalt antud regiooni laminaadile. Kanga kogust kirja pannes võeti arvesse kanga orientatsiooni. Massi arvutamisel arvestati ühe ruutmeetriga, kuna pindala suurus ei mõjuta fiibrite kogust üheski suunas. Välja arvutatud massist leiti massi ning nurga suhe, pärast mida oli võimalik leida protsendiline kogus igas suunas. Kogu kere laminaatides on kasutusel ainult neli suunda, mille suunas fiiber jookseb. Tabelist on näha, et mitte üheski suunas ei ole üle 50% süsinikkiust fiibrite. Teiste laminaatide tulemused on nähtavad Lisas 2.



Tabel 6 Perimeetri nihketugevus ühe kihiga

TW/CORE/TW	Aluminium		Nomex	
Thickness	Force (kN)	Shear (MPa)	Force (kN)	Shear (MPa)
10	3,67	155,76	2,36	100,16
15	4,11	174,43	2,01	85,31
20	4,26	180,80	2,17	92,10
25	4,30	182,50	2,35	99,74

Parema selguse saamiseks teostati sama põhimõttega uued katsekehad, kuid nüüd lamineeriti mõlemale poole vahematerjali kaks kihti süsinikkiust kangast. Tulemustest on näha, et paksuse muutudes erineb nihketugevus võrreldes alumiiniumkärjega ainult mõne Mpa võrra. Nomex kärjega on sama olukord, küll aga ei tohiks arvestada esimest tulemust, kuna antud katsekehal suruti aplikaator läbi mõlema süsinikplaadi. Erinevaid materjalide katsetulemusi võrreldes selgub, et alumiiniumkärjega on perimeetri nihketugevus poolteist korda parem, kui Nomex kärje perimeetri nihketugevus. (Tabel 7)

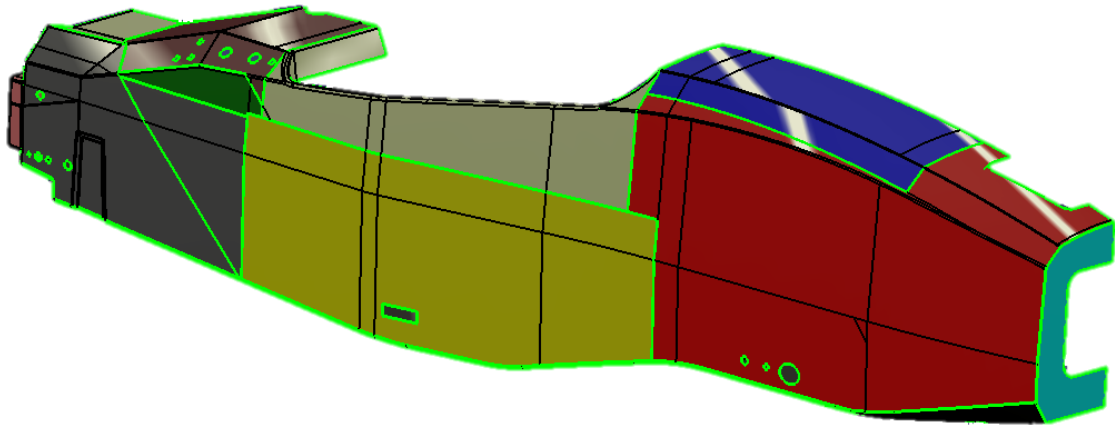
Tabel 7 Perimeetri nihketugevus kahe kihiga

TW/TW/CORE/TW/TW	Aluminium		Nomex	
Thickness	Force (kN)	Shear (MPa)	Force (kN)	Shear (MPa)
10	4,46	94,64	4,07	86,37
15	4,96	105,25	3,27	69,39
20	4,92	104,41	3,49	74,06
25	4,90	103,98	3,12	66,21

Katsekehade tulemustest võib järeldada, et vahematerjali paksus mõjutab perimeetri nihketugevust vähe, küll aga mõjutab seda vahematerjali materjal. Antud teemat peaks järgnevatel aastatel lähemalt uurima.

## 6.4 Kere massi arvutus

Kere massi arvutamiseks jagati esmalt kogu kere ära regioonideks. CAD-mudelil lõigati kere tükkideks, et saada kätte iga regiooni pindala. Arvesse läksid ka struktuurselt mitteolulised pinnad. (Sele 6.4)



Sele 6.4 Kere regioonid

Massi arvutades koostati Exceli programmis tabel, kuhu pandi kirja eelnevalt tükeldatud regioonide pindalad. Iga regiooni taha läks kirja kangaste kogus, vahematerjali paksus ning materjal. Pärast seda arvutati iga laminaadi süsinikkiust kanga, vahematerjali ning lisavaigu mass. Tabelist on näha, et kere massist pool moodustab süsinikkiust kanga ning lisavaigu mass. (Tabel 8) Massile lisati juurde eeldatav insertide, pasta ning esimese turvakaare mass. Tulemuseks saadi, et tudengivormeli FEST20 kere mass võib-olla ligikaudu 20 kg.

Tabel 8 Kere massi arvutus tabel

Colour	Region	Area mm2	Area m2	TW qty	UD qty	Core t	Core material	Core mass	TW mass	UD mass	Klebe mass	
	sis horizontal	222632,7	0,2226327	5	2	15	alu	652,6032335	768,082815	207,4937	222,6327	
	sis vertical	272427,7	0,2724277	5	2	20	alu	1064,756423	939,875565	253,9026	272,4277	
	Floor	321467,3	0,3214673	4	2	15	alu	942,3170965	887,249748	299,6075	321,4673	
	FBH	36165,2	0,0361652	16	1	10	alu	70,67403384	399,263808	16,85298	36,1652	
	FHB	213874,5	0,2138745	4	2	30	nomex	821,27808	590,29362	199,331	213,8745	
	Rear amort surface	41294,2	0,0412942	4	1	20	alu	161,3942513	113,971992	19,2431	41,2942	
	FBHS	341700,9	0,3417009	5	2	30	nomex	1312,131456	1178,868105	318,4652	341,7009	
	MHBS_Side	94956,5	0,0949565	4	2	25	alu	463,9099808	262,07994	88,49946	94,9565	
	TSPS	147109,3	0,1471093	5	2	25	alu	718,7024852	507,527085	137,1059	147,1093	
	DASH	31232,5	0,0312325	3	0	5	vaht	34,35575	64,651275	0	31,2325	
	SHB_MHBS	48004,3	0,0480043	5	2	25	foam	234,5250077	165,614835	44,74001	48,0043	
	seljatagune	11221,4	0,0112214	3	0	10	foam	24,68708	23,228298	0	11,2214	
	sis upper	91071,1	0,0910711	4	0	15	foam	300,53463	251,356236	0	91,0711	
	RearWall	45012,1	0,0450121	4	2	10	alu	87,96264582	124,233396	41,95128	45,0121	
	Misc.	31114,5	0,0311145	2	0	0		0	42,93801	0	0	
	M hole	46878,9	0,0468789	1	2	0			32,346441	43,69113		
	Carbon for Front hoop	65190	0,06519	2	0	0			89,9622	0		
								<b>Total material mass</b>	<b>6889,832153</b>	<b>6441,543369</b>	<b>1670,884</b>	<b>1918,1697</b>
								Front hoop	1000	g		
								inserts	1200	g		
								Pasta	1400	g		
								<b>Chassis mass</b>	<b>20520,42914</b>	<b>g</b>		

## 7 KERE INSERTID

Inserte kasutatakse süsinikmonokokk-keres, et tagada kinnituskoht kerele kinnituvatele detailidel. Inserti eesmärk on tagada koos laminaadiga kinnituspunkti jäikus. Inserti võib ette kujutada kui lihtsat puksi sisemiste ning välimiste süsinikkiust kangaste vahel, mis takistab inserti ümber oleva kärje kokkusurumist. FS Team Tallinn on aastaid kasutanud insertide materjalina alumiiniumit. [14] Kuna kinnitusankrute projekteerimine ning analüüsimine on keeruline ning aeganõudev, uuriti inserte lähemalt.

### 7.1 Arvutusmoodul

Kinnitusankrute projekteerimise ning analüüsimisega tegeles tudengivormeli meeskonnas FEST19 ajal Hannes Moor. Lõputöös tõi Moor välja, et analüüsid laminaati koos insertiga, on keeruline määrata õiget purunemisviisi. [15] Seega oli keeruline analüüsist adekvaatset infot välja lugeda. Sellest tulenevalt on insertide sobivust varasemalt määratud katseliselt.

Kuna kanga kogus on limiteeritud, tuli käesoleva töö autoril selgitada, kuidas lihtsustada kinnitusankrute projekteerimist nii, et saaks arvutuslikult ligilähedase tulemuse. Esmalt uuriti võistlussarja Excelit, kust jäi silma, et kinnitusankrutele arvutatakse perimeetri nihkejõudu. Arvutuskäiku muudeti vastaval nii, et tulemuseks saadakse hoopis kinnitusankru ning seibi läbimõõt. (Tabel 9)

*Tabel 9 Kinnitusankrute arvutusmoodul*

Perimeter shear strength, kN	30
Skin shear strength, MPa	162
Skin thickness inner, mm	0,45
Skin thickness outer, mm	0,6
Strengthening patches, mm	0,3
Insert, Backing plate perimeter, mm	137,2
Insert, Backing plate diameter, mm	43,7
Round to nearest 5 or 10 D, mm	45
Spokes per insert, qty	8
Spoke width, mm	2
Fillet radius between spokes, mm	2,5
Material tensile strenght, Mpa	290
Force per spoke, kN	3,75
Angle between spokes	45
Distance from surface center to max stress, mm	6,2
Mb, N/m	11,6
Section modulus, m3	0,0000000399
Insert thickness, mm	10,9

Kinnitusankru perimeetri määramisel on sisendiks inserdi regioonile vastava laminaadi parameetrid ning jõud, millele kinnitusankur vastu peab pidama. Jõud tuleneb vastavalt reeglitest või vedrustusjõudude Excelist, mis teostatud meeskonna liikme poolt. Inserdi perimeetrist arvatati välja läbimõõt. Perimeeter arvatati järgneva valemiga:

$$C = \frac{F}{St_i St_o St_s} * \sigma_s \quad (3)$$

Kus:

C – Inserdi perimeeter, mm

F – Inserdile mõjuv jõud, kN

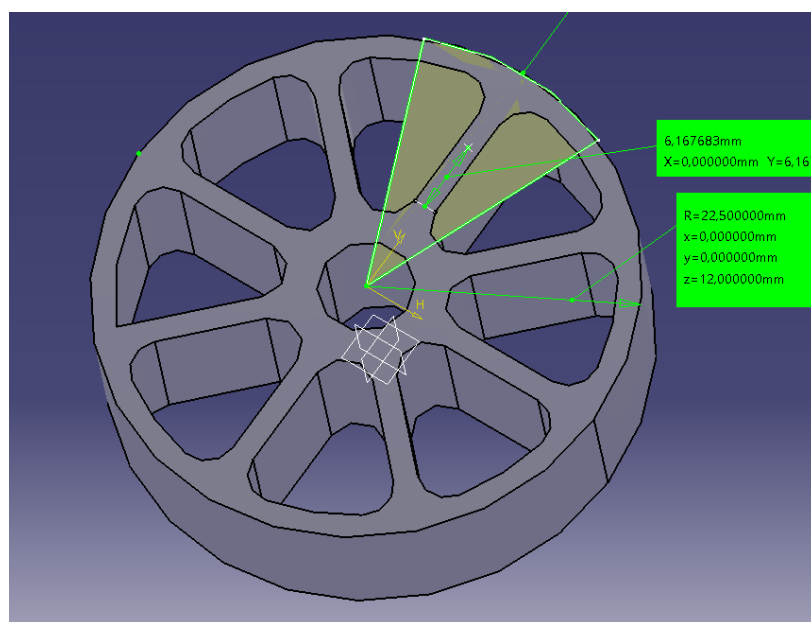
$St_i$  – Sisemise süsinikkangaste paksus (Inner skin thickness), mm

$St_o$  – Välimise süsinikkangaste paksus (Outer skin thickness), mm

$St_s$  – Tugevduslappide paksus (Strengthening patches skin thickness), mm

$\sigma_s$  – Laminaadi perimeetri nihkejõud, MPa

Inserdi paksuse arvutamiseks määrati mõningad lihtsustused. Näites määrati sisenditeks kodarate kogus, kodarate paksus, kodarate vaheline raadius ning materjali tõmbetugevus. Kinnitusankrule peale vaadates võis teha järelduse, et kõige suuremad pinged tekivad kodara alguses raadiuse juures, kus ristlõige on kõige väiksem. Kuna insert on keeruka geomeetriaga võeti ühe kodara kohast sektor, millele arvatati pinna keskme punkt. Punktist arvatati pinnakeskme kaugus maksimaalsest pingete kohast. Arvutuskäigu tulemust saab võrrelda all olevalt pildilt. (Sele 7.1)



Sele 7.1 Kere kinnitusankur

Inserdi kodarat käsitletakse lihtsa talana, mis on ühest otsast kinni ning millele rakendub pinnakeskme punktist ühele kodarale mõjuv jõud. Esmalt arvutati välja kodarale mõjuv paindemoment järgneva valemiga:

$$M_b = F * l \quad (4)$$

Kus:

$M_b$  – Paindemoment, N\*m

F – Kodarale mõjuv jõud, kN

l – Jõuõlg, m

Teades jõuõlga, kasutati inserdi paksuse määramiseks paindepinge valemit. Kuna paindepinge on võrdne paindemomendi ning ristlõike telgvastupanumomendi jagatisega, siis avaldati valemist ristlõike telgvastupanumoment. Vastavaks pingeks võeti materjali tõmbetugevus. Valem arvutuseks on järgmine:

$$W = \frac{M_b}{\sigma_b} \quad (5)$$

Kus:

W – Ristlõike telgvastupanumoment,  $m^3$

$M_b$  – Paindemoment, N\*m

$\sigma_b$  – Tõmbetugevus, MPa

Vastavalt ristküliku ristlõike telgvastupanumomendist avaldati ristküliku kõrgus, ehk siis inserdi paksus. Paksus arvutati välja järgneva valemiga:

$$h = \sqrt{\frac{6 * W}{l_k}} \quad (6)$$

Kus:

h – inserdi paksus, mm

W – Ristlõike telgvastupanumoment,  $m^3$

$l_k$  – Kodara laius, mm

Antud arvutuskäik lihtsustab kinnitusankrute projekteerimist. Lisaks sellele hoiab materjali ning aega kokku. Kuna arvutuskäik on tehtud alles pärast monokokk-kere valmimist, saab võrrelda arvutuskäiku tehtud katsetega. Varasemalt sooritatud

katsega erines tulemus umbes 2 kN võrra, seega arvutusmooduli täpsus on 94%, millega võib rahule jääda. Graafik on nähtav Lisas 3. Antud arvutuskäiku saab kasutada järgnevatel aastatel.

## 7.2 Materjali valik insertidele

Keres kasutatavate kinnitusankrute paksus on üldiselt väiksem kui vahematerjali paksus. Insertid on projekteeritud madalamad, et võita kere massis ka insertide massi arvelt. Sellest tulenevalt on tehtud inserti ümber kaunid, et tootmisel oleks võimalik süsinikkiustkangast paremini lamineerida. (Vaata peatükki **Lamineerimine**) Kuna insertide juures on laminaat õhem, võib järeldada, et seal on ka inertsmoment väiksem. Tagamaks, et inserti ümbruses oleks ristlõige sama suur, kui seda on laminaadil, tuleks välja vahetada kinnitusankrute materjal. Materjali vahetusel tuleb silmas pidada, et insertil säiliks soovitud jäikus ning mass ei ületaks varasemalt kasutatud inserti massi.

Materjali vahetamiseks võrreldi erinevaid materjale ning koostati Excelis tabel. (Tabel 10) Materjale võrreldi eritugevuse järgi, selleks vaadeldi tõmbetugevuse ning tiheduse suhet. Materjalide hulgast jäi silma PlastiComp LCF30-PA66. [16] Antud materjal on süsinikkiust fiibriga tugevdatud polüamiid. Et oma valikus veenduda, arvutati, kui paks peaks antud materjal olema, et insert oleks sama jäik, kui varasemalt kasutatud alumiiniumist kinnitusankur. Lisaks sellele arvutati maksimaalne inserti kõrgus, mille puhul inserti mass ei ületa esialgse inserti massi. Tulenevalt ristlõike telgvastupanumomendi valemist muudab paksuse suurendamine ristlõike jäikust rohkem kui laiuse muutmine. Seega arvutuskäigul muudeti ainult inserti paksust, jättes pindala samaks.

Tabel 10 Inserti materjalid

Insert area, mm <sup>2</sup>	618				
Insert thickness, mm	10				
Insert Volume, mm <sup>3</sup>	6180				
Material	Tensile strength, MPa	Density, g/cm <sup>3</sup>	Strength/density	Needed thickness by strength	Max thickness by weight
6082 T6 (Aluminium)	290	2,7	107,41	10	10
Acetal Copolymer, Carbon fiber filled	101	1,6	63,13	28,71287129	16,875
Nylon 6, Carbon fiber filled	173	1,26	137,30	16,76300578	21,42857143
PlastiComp LCF30-PA66	276	1,27	217,32	10,50724638	21,25984252
TECAMID 66 CF20	104	1,23	84,55	27,88461538	21,95121951

Saadud tulemustest võib järeldada, et kasutades valituks osutunud materjali laminaadis, kus on kasutusel 20 mm vahematerjal, ei pea inserdi ümber kaussi tegema. Nende tegemata jätmise kiirendab oluliselt monokoki valmimist.

## 8 KERE LOKAALNE JÄIKUS

### 8.1 Väsimus katsekeha

FEST20 monokok-keres on kasutusel vahematerjalina Nomex kärge, mille kohta laialdased teadmised puudusid. Seega otsustati vaadelda, kuidas antud kärge väsimusel käitub. Katsekeha lamineeriti antud regioonile vastava laminaadi järgi. Lamineerides jälgiti eelmise aasta kogemuse pealt, et inserdi ümber saaks piisavalt palju pastat, suurendades sellega inserdi ümber olevad perimeetrit.

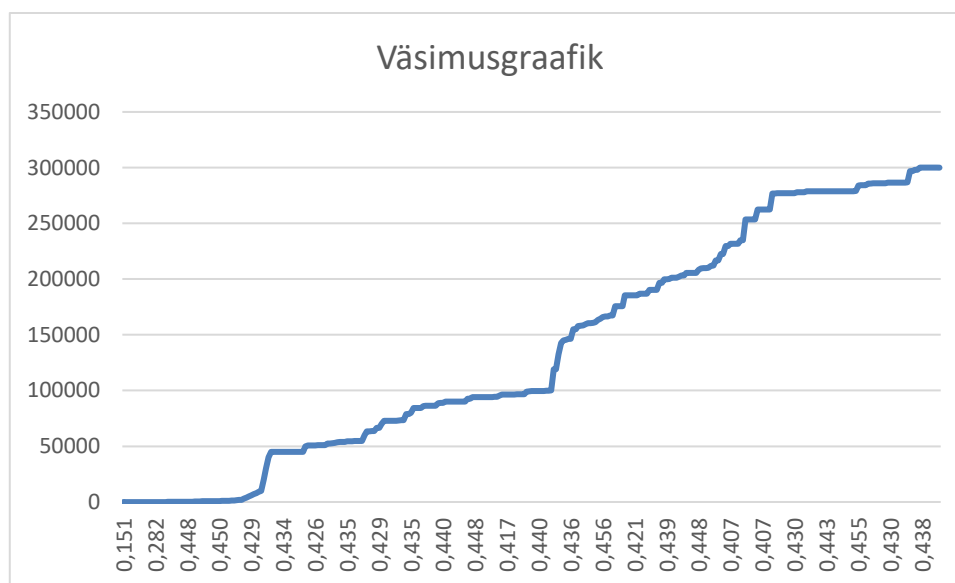
Esmalt uuriti, millised kõrvad kinnituvad regioonis, kus on kasutatud Nomex kärge. Selgus, et antud alas on kolm kinnituskõrva: amordi kinnituskõrv ning kaks ülemiste eesmise õõtsade kõrva. Vedrustuspunktide Excelit oli näha, et maksimaalne jõud mõjub tagumisele õõtsa kõrvale, milleks on 1.9 kN. Katse sooritati 2 kN, et näha, mis juhtub katsekehaga suurematel jõududel. FEST20 kere puhul on see küll laminaadi katsetamine ebarealistlikes tingimustes - sellist jõudu ei eksisteeri seal kunagi. Katse sooritati kõrva ning tagumise seibiga, mis kinnitub ka realselt kere külge. (Sele 8.1) Antud viis annab võimalikult reaalsed katsetingimused reaalsusele.



*Sele 8.1 Kinnituskõrv*

Katse jaoks tehti 300 000 tsüklit 5 Hz sagedusega. Antud tsüklite arv peaks vastama FEST20 kere kaheaastast kilometraažile. Varasematel aastatel on ära märgitud, et vedrustuspunktide jäikus hooaja lõpuks peaks olema vähemalt 10000 N/mm. [3] Katse lõppedes selgus, et Nomex kärjega väsimuskatsekeha jäikus on 9100 N/mm. Antud tulemusega võib rahule jääda, sest katse oli sooritatud suurema jõuga, kui

sellele reaalsetes tingimustes mõjub, seega võib eeldada, et realselt on antud regioonis jäikus suurem. (Sele 8.2)



Sele 8.2 Väsimusgraafik

Teistele laminaatidele, kuhu kinnituvad kõrvad, väsimuskatsekeha ei teostatud. Antud laminaate võrreldi eelmiste aastate samade regioonidega ning leiti, et FEST20 kerelaminaadid on jäigemad, lisaks sellele mõjub kerele väiksem jõud. Seega otsustati teistele kinnituskohtadele väsimuskatsekeha mitte teostada ning eeldati, et antud regioonis on nõutud jäikus tagatud.

## 8.2 Lokaalne läbipaine

Kinnituskohtade läbipaine arvutamiseks kasutati varasemalt meeskonna liikmete poolt koostatud Exceleid. Üheks Exceliks, mida kasutati, oli vedrustuspunktide Excel, kust saadi nii kere- kui ka käänmikpoolsed kinnituspunktide koordinaadid ning jõud erinevates olukordades. Saadud andmed kanti teise arvutusmoodulisse, kust saadi kätte lokaalne läbipaine ning selle mõju kinemaatikale kraadides.

Oluline on tagada vormeli ideaalne sõidudünaamika. Kuna kerepunktide läbipaine mõjutab rehvi külgakaldenurka ning meeskond saab seda seadistada ainult 0.5° võrra, siis on oluline tagada, et läbipaindest tekkinud nurgamuut oleks vähem kui 0.25°. Jõud mille juures arvutatakse läbipainet saadakse erinevate pikki- ning külgiirenduste korral. Arvutuskäigul arvestati eelnevalt kokku lepitud teiste detailide jäikuse ning parameetritega, mida iga meeskonna liige peab tagama. Antud parameetrid ning tingimused on läbi aastate samad olnud. [3] Arvutuskäigu tulemuseks saadi, et

kõikides olukordades on nurgamuut väiksem kui  $0.25^\circ$ . Eesmise nurga nurgamuut oli maksimaalselt  $0.198^\circ$  ning tagumise nurga nurgamuut maksimaalselt  $0.248^\circ$ . Teistes olukordades on tulemused näha lisa 4.

## 9 TURVAKAARED

Formula Student Team Tallinna meeskonna monokok-kere koosneb kahest turvakaarest: eesmisest turvakaarest, mis on valmistatud alumiiniumist, ning peamisest turvakaarest, mis on valmistatud terasest. (T3.3.1) Turvakaarte eesmärk on kaitsta sõitja jalgu ning kehe juhul, kui vormeliga peaks toimuma kokkupõrge või vormel peaks ümber minema.

Eesmine turvakaar valmistati samade parameetrite järgi nagu eelneval aastal. [3] Turvakaar on välja freesitud 35 mm paksusest toorikust. Kui eelneval aastal freesiti turvakaar välja eelnevalt vesilõikusest välja lõigatud laiemast toorikust, siis FEST20 tarbeks freesiti turvakaar välja suurest toorikuplaadist, et turvakaart oleks võimalik paremini rakistada, sest eelneval aastal ei olnud turvakaare seinapaksus ühtlane. Turvakaare peale keevitati 2 mm paksune alumiiniumplaat. Turvakaare keevitamiseks ning termotöötamiseks kasutati samu parameetreid, mis varasemalt. Hiljem lõigati šabloon järgi turvakaar õigesse mõõtu. (Sele 9.1)



*Sele 9.1 Eesmise turvakaare šabloon*



*Sele 9.2 Keevitatud peamine turvakaar*

Peamine turvakaar on valmistatud 25CrMo4 terasest. Turvakaar kinnitub FEST20 kere külge nelja kõrva abil, kus iga kõrva kinnitamiseks on kasutatud M8 polte. Turvakaare tugitorud on kinnitatud M10 poldiga. Turvakaare kuju tuleneb kere geomeetriast ning sõitja asendist. Peamine turvakaar on kokku keevitatud. Enne keevitamist on torusid lokaalselt kuumutatud ning pärast keevitamist on teostatud turvakaarele termotöötlus. (Sele 9.2)

## 10 TOOTMINE

Igal aastal toodetakse Formula Student Team Tallinna meeskonnas töö tulemusena uus vormelikere. Et kere tootmist lihtsustada, peab tiim juba projekteerimise käigus arvestama tootmistehnoloogiaga, kuna kõik asjad ei pruugi olla teostatavad. Samas tehakse igal aastal ka toomisprotsessis muudatusi, mis võimaldab toota aina keerukama geomeetriaga kere.

### 10.1 Kere positiivvormid

FS Team Tallinna meeskonna esimestest tegutsemisaastatest alate on paika pandud, et 1. detsembriks peab kere CAD-mudel olema valmis. Antud kuupäeval saadetakse mudel freesimisse. Selleks ajaks peavad olema teada ka esialgsed kere laminaadid ning lõplikud kerekinnituskohad, sest hiljem on neid keeruline lisada.

Kui freesitud positiivvormid kätte saadi, hinnati tehtud töö kvaliteeti ning tehti ettevalmistusi negatiivi tootmiseks. Esmalt vaadeldi, kas kõik kinnitusavad on olemas. Selgus, et kahe tagumise stabilisaatorvarda kinnituskõrva aval oli vormis vale läbimõõt, seega tuli need ise üle puurima. Puuritud avad täpsust ei mõjutanud, kuna hiljem kinnitus stabilisaatorvarras kere külge probleemideta.

FEST20 vormide kvaliteet ei olnud nii hea, et oleks saanud kohe vormidele pritspahtlit lisada, sellest tulenevalt lihviti suuremad freesi tööjäljed vormidelt ära. Vormidel oli näha, et freesimisega oldi kiirustatud ning teatud kohtadest isegi liiga sügavalt freesitud. (Sele 10.1) Sellest tulenevalt pidi vorme ka ise pahteldama. Suuremate tööjälgede eemaldamine annab parema kvaliteedi pritspahtli panekul. (Sele 10.2)



Sele 10.1 Freesi töörada



Sele 10.2 Freesimata serv

Olles vormide kvaliteediga rahul, viidi vormid ettevõttesse Auve Tech OÜ, kes aitasid tudengivormeli vorme katta sobiva materjaliga. Ettevõttel paluti peale kanda pritspahtlit, kuid olude sunnil kanti sinna peale tavalist autovärvi. Protsessi korrati kaks korda ning kahe kandmise vahel käis meeskond vorme lihvimas. (Sele 10.3) Antud värvi oli keerulisem pärast töödelda, kuid oma eesmärgi täitis see suurepäraselt. Vormid toodi Tallinna Tehnikaülikooli tudengivormeli ruumidesse, kus tegeleti nendega edasi. Kohale toodud vorme lihviti ning lõpus poleeriti vormipinnad peegelpinnaks. (Sele 10.4) Vorme poleerisid meeskonna liikmed, kuid poleerimisvahenditega aitas tudengivormeli meeskonda ettevõtte Paintlines OÜ.



*Sele 10.3 Vormide lihvimine*



*Sele 10.4 Poleeritud vormid*

Pärast positiivvormide poleerimist tehti ettevalmistusi negatiivvormide valmistamiseks. Selleks puhastati vormid mustusest, nii tolmust kui ka rasvadest, mis vorme puudutads sinna jääda võis. Puhastele vormidele lisati vormidele ette nähtud aineid. Esmalt lisati, vedelal kujul, kriime sulgev tihendaja. Pärast seda lisati vormidele kaheka kihti eraldusainet, mis võimaldas hiljem vormidelt detaili kätte saada.

## **10.2 Kere negatiivvormid**

Negatiivide tootmist alustati *gelcoati* kandmisega positiivvormidele. Antud materjal on kahekomponentne plastmass. [17] Materjali kanti vormidele pintsiliga ja lasti vormidel

vähemalt 16 tundi seista. Kuna varasemal aastatel on olnud keeruline vormi insertide ümber *gelcoati* lisamine, siis lihtsustati inserdi geometriat. Inserdilt eemaldati astmed ning tehti koonuse kujuliseks. Sellega tagati kahekomponentse plastiku olemasolu vajalikel pindadel. (Sele 10.5)

Süsiniku kandmisel *gelcoatile* muudeti võrreldes varasema aastaga tootmistehnoloogiat. Kui varasemalt kanti eelnevalt rulliga märjatud kangas vormile, siis FEST20 vormide valmistamiseks kasutati infusioonimist. Selleks lõigati kuiv süsinikkiudkangas sobivateks tükkideks ning *spray*-liimi kasutades lisati tükkaaval vormidele. Olles pannud kõik vajalikud tükid vormile, tõmmati vorm vaakumisse ning lasti vaigul sisse imenduda. (Sele 10.6) Antud tootmistehnoloogia muudatus aitab vormide valmistamisprotsessi märgatavalt kiirendada. Kuiv süsinikkiudkangas on saadud ettevõttest Composite Eesti OÜ.



Sele 10.5 Gelcoat ning inserdid



Sele 10.6 Vorm enne infusioonimist

Vormide infusioonimiseks valiti välja vaik, mis seda võimaldaks. Kuna eelnev vaik oli liiga viskoosne, siis seda kasutada ei saanud. Lisaks sellele peab vaik kannatama temperatuuri kuni 120 kraadi. Sobivaks vaiguks osutus Guriti toode T-Prime 130-1. [17] Antud vaiku kasutades tehti ka katsekeha, et teada saada, kui hästi vaik kanga vahel imendub. Selleks asetati kangas klaasile astmeliselt: 4 kihti, 8 kihti ning 12 kihti. Antud katsekeha õnnustus, kuna vaik imendus kanga vahel ühest otsast teise ühtlase kiirusega.

## 10.3 Kere tootmine

### 10.3.1 Negatiivvormide parandamine

Igal aastal on negatiivvormidel teatud kohad, mida tuleb parandada, sama olukord oli ka sellel tootmishooajal. Kui vormid eemaldatakse positiivvormidest, lähevad nad kõrgel temperatuuril, teatud ajaks ahju. Kui ahjust vormid eemaldatakse, on näha, et tekkinud on praod. Üldiselt tekivad need insertide läheduses. Arvatav põhjus peitub selles, et *gelgoati* peale pannes ning infusioonides jääb liiga palju õhku vormi sisse, mis ahjus paisudes tekitab praod. Kuna *gelcoat* puruneb hõlpsamini kui süsinikkiust laminaat, siis sellepärast praod ka *gelcoat* pinnal esile tulevad. Teine põhjus, mis tekitab sama reaktsiooni, on süsinikkanga halvasti paigutamine vormil. Kui juba kanga asetamisel jääb juba kanga ning vormi vahele ruumi, ei suru vaakum kangast vastu vormi. (Sele 10.7)



*Sele 10.7 Katkine negatiiv vorm*

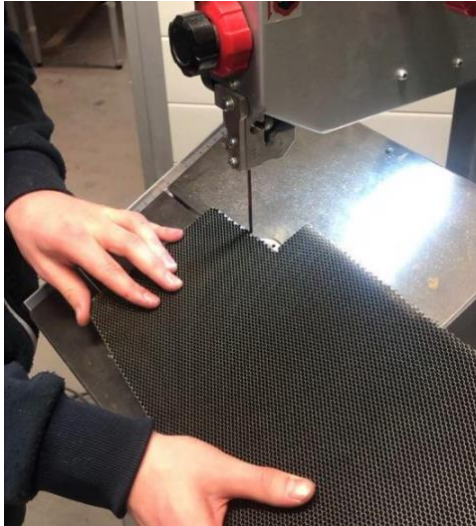


*Sele 10.8 Parandatud negatiiv vorm*

Tekkinud praod ning avad täidetakse uuesti kahekomponentse plastmassiga, millele järgneb uus tsükkel ahjus. Protsessi korratakse, kuni saadakse soovitud kvaliteet. (Sele 10.8) Korras negatiivvormidele kantakse sarnaselt positiivvormidega peale vaha.

### **10.3.2 Kärgede sobitamine**

Kärgede sobitamiseks lõigati esmalt välja igale regioonile vastav sabloon. Antud šabloonile järgi lõigati välja sobivas suuruses ning paksuses kärg. Kui FEST19 puhul lõigati kärgede omavahelised ühendused välja tavalise noaga, siis FEST20 puhul sai ühenduskohad välja lõigata sobiva nurga alla lintsaega. (Sele 10.9) See kiirendas kärgede sobitamist. Tükid said saega lõigates täpsed ning sellest tulenevalt vähenes ka kärgede vahele mineva pasta kulu.



*Sele 10.9 Kärje lõikamine*



*Sele 10.10 Sobitatud kärjed*

Kärgede sobitamisel ei pandud vorme veel kokku, et lihtsustada tööd. Küll aga oli vormi ära pandud esimese süsinikkihi kangas. Sellega välditi olukorda, kus alumiiniumkärj võiks kriimustada eelnevalt poleeritud vorme. (Sele 10.10) Kui suurem osa kärgedest oli sobitatud, võeti kärjed vormist välja ning polditi vormid omavahel kokku.

### **10.3.3 Lamineerimine**

Lamineerimise jaoks oli vaja nelja ahjutsükli. Ühe tsükli kestvuse määrab ära kanga andmeleht, kus on välja toodud temperatuuri kasvamise kiirus ning kui kaua tuleb detaili ahjus hoida enne valmimist. [6] Vorme jahutatakse aeglaselt, et vältida kere geomeetrilisi hälbeid. Aeglaselt temperatuuri tõstmine, temperatuuril hoidmine ning jahutamine võtab aega päeva.

Enne esimest ahjutsükli toimub välimiste eelimmutatud süsinikkiust kangaste lamineerimine. Kangad lõigatakse välja samade šabloonide järgi, mille järgi lõigati alumiiniumkärjed. Süsinikkangast lamineeritakse vormi vastavalt järjekorrale, mis sai igale regioonile arvatud. Lisaks sellele lisatakse tugevduslappe kere kinnituskohadesse, kus on vaja tagada lokaalselt suurem jäikus. Tugevduslappe on näha ka (Sele 10.12).

Pärast esimest ahjus käimist tuleb lamineerida esimene turvakaar. Selleks lõigati turvakaare alumised otsad sobivaks kere geomeetriaga, tagades sellega ideaalse sobivuse eelnevalt lamineeritud kangaga. (Sele 10.11) Turvakaarel ning süsiniku vahel kasutatakse ühekomponentset pastat, mille varasemal aastal valis välja eelnev

komposiitmeeskonna kapten. [3] Turvakaar on kere sisse lamineeritud eraldi kahe süsinikkiust lapiga ning hiljem ka sisemiste süsinikkihtidega. (Sele 10.12)



*Sele 10.11 Esimene turvakaar*



*Sele 10.12 Lamineeritu turvakaar*

Pärast turvakaare lamineerimist paigutatakse sisse eelneval paika sobitatud kärjed. Kärgedele tehakse insertide jaoks avad ning insertide ning kärje vahele pannakse pastat. (Sele 10.14) Pastat pannakse ka kärgede vahele, kui neid asetatakse monokokki. Pasta eesmärk on kanda jõudusid ühelt detaililt teisele üle. Kui kärjed koos insertidega on vormis, siis nende asukoht fikseeritakse poltidega. Antud lahendus tagab kärje ning insertide täpse asukoha. Inserdi ümber tehakse kausjad ääred. Ääred on vajalikud, sest üldiselt on inserdid väiksema paksusega kui vahematerjal. Inserdid on tehtud madalamad, et massi optimeerida. Ääred aitavad lihtsustada ka lamineerimist. (Sele 10.13) Kärgede ning eelmise süsinikkiudkanga vahele pannakse Klebe. Antud materjal on jällegi Guriti toodang, mis on lihtsamalt öeldes lisavaik kärje ning süsiniku vahel. [9]



*Sele 10.13 Kärj insertiega*



*Sele 10.14 Insertide lisamine*

Enne viimast ahjutsükli lamineeritakse ära sisemise kihi kõik süsinikkiudkangad. Protsess on sarnane välimise kihi lamineerimisega, kus tükid on välja lõigatud šablooni järgi. Sisemist kihti lamineerides tuleb arvestada eelmises protsessis tehtud kaussidega. Tuleb jälgida, et kangas oleks surutud vastu kärgesid, et tagada kinnituspunktide maksimaalne töö. Kanga ning kärje vahele pannakse jällegi Klebe. Viimase asjana, enne monokoki ahju panekut, lisatakse kere kinnituskohたdesse vaskvõrku. (Sele 10.15) Vaskvõrgu eesmärk on tagada kere võimalikult väike elektriline takistus, mis on reeglitega nõutud. (EV3.1.1)



*Sele 10.15 Vaskvõrk*

## **10.4 Tootmistulemus**

Tootmise vältel dokumenteeriti erinevatele protsessidele kulunud aeg. Antud ajakava annab hiljem võimaluse analüüsida tootmisprotsesse: kas on vaja midagi muuta või millelegi rohkem rõhku panna. (Tabel 11) Tabelist tuleb välja, et tootmisprotsessiga alustati varem ning FEST20 kere sai kaks päeva kiiremin valmis kui FEST19 kere. Mida kiiremini saadakse kere valmis, seda kiiremini saadakse vormel ratastele ning testima. Suurema arvu testsõitudega on võimalik parandada kõik vead enne võistlusi, et saavutada veelgi paremad tulemused.

Tabel 11 Ajakava

Kuupäev eelmine aasta	Kuupäev sellel aasta	Mis
03.01.2019	20.12.2019	Positiivid kohal
18.01.2019	09.01.2020	Positiivide lihvimine
26.01.2019	18.02.2020	Positiivide poll/avad
30.01.2019	22.01.2020	Alumine negatiiv
02.02.2019	27.02.2020	Ülemine negatiiv
03.02.2019	29.02.2020	Negatiivide parandamine /poll
17.02.2019	12.02.2020	Esimene kangas sisse
18.02.2019	13.02.2020	Kärje sobitamine- esimene
21.02.2019	14.02.2020	Vormid kokku
22.02.2019	15.02.2020	Esimene skin ahju
26.02.2019	17.02.2020	Front hoop termotöötlus
01.03.2019	18.02.2020	Hoop vormi sisse
02.03.2019	19.02.2020	Kärgede sobitamine
04.03.2019	21.02.2020	Kärjed ahju
06.03.2019	23.02.2020	Teine skin ahju
07.03.2019	24.02.2020	Kook vormist välja
48	46	PÄEVI KOKKU

Kere massiarvutustest tuli välja, et ennustatav kere mass on ligikaudu 20.5 kg, kuid FEST20 kere massiks kujunes 19.8 kg. Algsest arvutusest erines kaal 700 grammi: kaaluvõit tuli pasta ning insertide arvel, sest eelnevalt hinnati antud komponentide massi suuremaks. Formula Student Team Tallinna meeskonna poolt valminud vormelit on võimalik näha alljärgneval pildil. (Sele 10.16)



Sele 10.16 Tudengivormel FEST20

# KOKKUVÕTE

Antud magistritöö eesmärk oli projekteerida ning toota kerge, jäik ning turvaline süsinikmonokokk-kere Formula Student Team Tallinna 2019/2020 hooaja võistlusautole FEST20.

Töö jagati mitmeteks peatükkideks ning alampeatükkideks, kus käsitleti esmalt kerele nõutud tingimusi ning projekteerimist piiravaid tegureid. Töö vältel käsitletakse erinevates peatükkides materjalivalikut ning valideerimist. Peatükkides käsitletakse arvutusmoodulite loomist, kiirendades sellega kere valmimist. Töös pannakse rõhku kere lokaalsele jäikusele ning turvalisusele. Suuremas osas tööst käsitletakse võistlusauto FEST20 süsinikmonokokk-kere tootmist

Eelimmutatut kanga valikult tehti kindlaks, millistele parameetritele vastasid varem kasutatud kangad. Parameetreid võrreldes suudeti leida veelgi kergem ning suurema elastsusmooduliga süsinikkiust kangas. Kärgede valikusse toodi Nomex kärg, mille kasutamisega suudeti veelgi rohkem optimeerida kere massi, samas tagades nõutud jäikuse igas regioonis. Uute materjalidega arvutati orienteeruv esialgne mass, mis veelgi kinnitas materjalide õiget valikut.

Kere kinnitusankrute valideerimiseks loodi arvutusmoodul, kus inserti lihtsustades suudeti arvutada ligilähedane tulemus katsetulemustega, kiirendades sellega kinnitusankrute projekteerimist ning valideerimist. Lisaks sellele analüüsiti insertidele materjali valikut ja võrreldi erinevate materjalide eritugevust. Sobiva materjali valikuga suudeti lihtsustada tootmisprotsessi, sest kinnitusankrute ümber ei pea selle valiku korral tegema kausse.

Uue vahematerjali kasutusele võtmisel teostati kere kinnitusankrute väsimuskatsekeha, mille abil selgus, et antud regioon, kus insert asus, peab probleemideta vastu võistlussarja hooaja. Lisaks sellele vaadeldi kerekinnituspunktide lokaalset läbipainet, kust selgus, et kõikidest kerepunktidest tulenev kraadimuut läbipaindest ei ole suurem kui  $0.25^\circ$ , mis tagab FEST20 nõutud sõidudünaamika.

Tootmisel pandi suurt rõhku vormide kvaliteedile. Vorme lihviti ning poleeriti kuniks saavutati vormidel peegelpind. Tootmisprotsessidel vahetati välja varasem meetod ehk märjalt lamineerimine ja asendati see infusioonimisega. Selle muudatuse abil oli võimalik vormid varem valmis saada. Toomisprotsessi käigus pidas töö autor ajagraafikut, kust selgus, et FEST20 kere toodeti võrreldes varasematega kaks päeva

kiiremini. Lisaks sellele selgus, et reaalne süsinikmonokokk-kere kaalus 19,8 kg, mis on 700g kergem kui eeldatav kere mass.

## SUMMARY

The aim of this master's thesis is to design and produce a light, stiff and secure carbon fibre monocoque chassis for the Formula Student Team Tallinn 2019/2020 season FEST20 racing car.

The work process was divided into many chapters and subchapters – firstly regarding chassis regulations and other design limitations. Material selection and validation is addressed in different chapters along with calculation module creation, which is used to speed up the chassis production. Most of the work describes the production of the carbon fibre monocoque, with local rigidity and safety being emphasized.

When choosing the pre-impregnated carbon fabric, older solutions were analysed so that the parameters between different fabrics could be compared. Thanks to this, an even lighter fabric with a higher modulus of elasticity was found. Nomex honeycomb was added to the selection of cores. When used, the mass of the chassis was further optimised while also keeping the required rigidity in different zones. When the estimated total mass was calculated, it confirmed that the choice of new materials was correct.

A calculation module was created in order to design the mounting anchor points. The calculation results of said module were similar to the physical tests, which helped speed up the design and validation of the anchor points. Different materials were also analysed and their specific strengths were compared. This simplified the production, as the concave surface technique around the anchor points was not needed anymore.

When choosing a new core material, an anchor point prototype was made for testing purposes. Thanks to this, it was confirmed that the insert regions could withstand the entire season without any problems. The local deformation around the anchor points was also measured and the results for all the regions did not exceed  $0.25^\circ$ , which guarantees the required FEST20 driving dynamics.

During production, quality was of utmost importance. Mold surfaces were sanded and polished until a mirror finish was achieved. During production, the previous wet lamination technique was replaced with infusion. This sped up the mold creation process. The author kept a schedule and concluded that the FEST20 chassis was produced two days faster than older models. The monocoque chassis turned out to weigh 19,8 kg, which was 700g lighter than the estimated mass.

## KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] „FS Team Tallinn,“ [Võrgumaterjal]. Available: [www.formulastudent.ee](http://www.formulastudent.ee).
- [2] M.Lentsius, „Formula Student klassi vormelauto monokokk-kere projekteerimine,“ 2015.
- [3] K.Karp, Kere projekteerimine tudengivormelile Fest19, 2019.
- [4] „Reeglid,“ [Võrgumaterjal]. Available: [https://www.formulastudent.de/fileadmin/user\\_upload/all/2020/rules/FS-Rules\\_2020\\_V1.0.pdf](https://www.formulastudent.de/fileadmin/user_upload/all/2020/rules/FS-Rules_2020_V1.0.pdf).
- [5] „Süsinikkiust kanga põimingud,“ [Võrgumaterjal]. Available: [www.elevatedmaterials.com/carbon-fiber-weaves-what-they-are-and-why-to-use-hem/#:~:text=2%C3%972%20Twill%20is,tows%20then%20under%20two%20tows..](http://www.elevatedmaterials.com/carbon-fiber-weaves-what-they-are-and-why-to-use-hem/#:~:text=2%C3%972%20Twill%20is,tows%20then%20under%20two%20tows..)
- [6] „DeltaPreg andmeleht,“ [Võrgumaterjal]. Available: [www.delta-tech.it/impregnated-fabrics/](http://www.delta-tech.it/impregnated-fabrics/).
- [7] „Põiminguga kangas,“ [Võrgumaterjal]. Available: [www.researchgate.net/publication/316371890\\_Nanoindentation\\_derived\\_elastic\\_constants\\_of\\_carbon\\_fibres\\_and\\_their\\_nanostructural\\_based\\_predictions/figures](http://www.researchgate.net/publication/316371890_Nanoindentation_derived_elastic_constants_of_carbon_fibres_and_their_nanostructural_based_predictions/figures).
- [8] „Süsinikkanga fiibrid,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.estcarbon.com/blog/carbon-fiber-what-is-k/>.
- [9] „Gurit andmeleht,“ [Võrgumaterjal]. Available: [www.gurit.com/en/our-business/composite-materials/prepregs/high-performance](http://www.gurit.com/en/our-business/composite-materials/prepregs/high-performance).
- [10] „Sigrapreg andmeleht,“ [Võrgumaterjal]. Available: [www.sglcarbon.com/en/markets-solutions/material/sigrabond-carbon-fiber-reinforced-carbon/](http://www.sglcarbon.com/en/markets-solutions/material/sigrabond-carbon-fiber-reinforced-carbon/).
- [11] „Nomex kärg,“ [Võrgumaterjal]. Available: [www.honeycombpanels.eu/en/products/honeycomb/nomex-honeycomb-commercial-grade?gclid=CjwKCAjw7diEBhB-EiwAskVi1-WEoplOUBhCla6CGHD-nYlrkC-cDhA00oAHbAtNXPj21Hzca\\_FJHRoCicAQAvD\\_BwE](http://www.honeycombpanels.eu/en/products/honeycomb/nomex-honeycomb-commercial-grade?gclid=CjwKCAjw7diEBhB-EiwAskVi1-WEoplOUBhCla6CGHD-nYlrkC-cDhA00oAHbAtNXPj21Hzca_FJHRoCicAQAvD_BwE).
- [12] „Toray kärjed,“ [Võrgumaterjal]. Available: [www.toraytac.com/media/5527e573-2e72-4aa4-bda7-5a49a20fef06/guunTA/TAC/Documents/Data\\_sheets/Adhesives\\_and\\_Core/Honeycomb\\_core/Nomex-Honeycomb-Core-Aerospace-Grade\\_PDS.pdf](http://www.toraytac.com/media/5527e573-2e72-4aa4-bda7-5a49a20fef06/guunTA/TAC/Documents/Data_sheets/Adhesives_and_Core/Honeycomb_core/Nomex-Honeycomb-Core-Aerospace-Grade_PDS.pdf).
- [13] „FSG dokumendid,“ [Võrgumaterjal]. Available: [www.formulastudent.de/fsg/rules/](http://www.formulastudent.de/fsg/rules/).
- [14] T.Pärtin, „Formula Student klassi vormelauto FEST15 monokokk-kere kinnitusankrute projekteerimine,“ 2015.
- [15] H.Moor, Kinnituslahenduse projekteerimine Formula Student klassi võistlusauto FEST19 monokokk-kerele, 2020.
- [16] „PlastiComp PA66,“ [Võrgumaterjal]. Available: [www.plasticomp.com/complet-lcf30-pa66-mt/](http://www.plasticomp.com/complet-lcf30-pa66-mt/).
- [17] „Guriti gelcoat ning vaik,“ [Võrgumaterjal]. Available: [www.gurit.com/en/our-business/composite-materials/liquids/tooling](http://www.gurit.com/en/our-business/composite-materials/liquids/tooling).

# LISAD

## LISA 1

	UTS (MPa)	E (GPa)	x (mm)	t1 (mm)	t2 (mm)	b (mm)	h (mm)	l (mm)	Ymax (N)	Y (N)	Gradient (N/mm)	Energy (J)	Break (mm)	Laminate shear (MPa)	
TW ja TW	500	105,4	10,4	0,15	0,15	20	275	484	3409,343	8374,36875	3886,254	373,67827	15,55298	9,123738483	0,309940256
	500	105,4	10,4	0,15	0,15	25	275	484	4261,566	13045,93125	6054,164	582,131163	15,59867	7,320628111	0,309932055
	500	105,4	10,4	0,15	0,15	30	275	484	5113,805	18748,74375	8700,642	836,6001472	15,62933	6,11260367	0,309927584
	500	105,4	10,4	0,15	0,15	35	275	484	5966,054	25482,80625	11825,69	1137,085223	15,65133	5,246795785	0,309924881
	500	105,4	10,4	0,15	0,15	40	275	484	6818,309	33248,11875	15429,3	1483,586389	15,66789	4,595828566	0,309923123
	500	105,4	10,4	0,15	0,15	45	275	484	7670,567	42044,68125	19511,48	1876,103647	15,6808	4,08856272	0,309921916
500	105,4	10,4	0,15	0,15	50	275	484	8522,829	51872,49375	24072,22	2314,636996	15,69115	3,682144954	0,309921052	
TW/TW ja TW/TW	500	105,2	5,1	0,3	0,3	20	275	484	6820,168	16999,95	3861,346	757,1266555	30,7179	9,007961411	0,620015245
	500	105,2	5,1	0,3	0,3	25	275	484	8524,325	26404,95	5997,585	1175,997075	30,89469	7,248593948	0,61995093
	500	105,2	5,1	0,3	0,3	30	275	484	10228,61	37872,45	8602,298	1686,725044	31,01408	6,064183172	0,619915735
	500	105,2	5,1	0,3	0,3	35	275	484	11932,97	51402,45	11675,48	2289,31056	31,10013	5,212472053	0,619894406
	500	105,2	5,1	0,3	0,3	40	275	484	13637,37	66994,95	15217,14	2983,753625	31,16509	4,570541997	0,619880511
	500	105,2	5,1	0,3	0,3	45	275	484	15341,81	84649,95	19227,28	3770,054237	31,21587	4,069386076	0,619870958
500	105,2	5,1	0,3	0,3	50	275	484	17046,26	104367,45	23705,88	4648,212399	31,25665	3,667272827	0,619864411	
TW/UD/TW ja TW/TW	500	121,5	16,5	0,3	0,45	20	275	484	8526,578	21408,10547	18169,53	1101,183426	33,01109	7,743104104	0,775143446
	500	121,5	16,5	0,3	0,45	25	275	484	10656,51	33203,02734	28180,13	1707,886924	33,24613	6,239588744	0,775019056
	500	121,5	16,5	0,3	0,45	30	275	484	12786,69	47576,07422	40378,85	2447,203208	33,40536	5,225021468	0,774950867
	500	121,5	16,5	0,3	0,45	35	275	484	14917,01	64527,24609	54765,68	3319,13228	33,52038	4,494249235	0,774909491
	500	121,5	16,5	0,3	0,45	40	275	484	17047,42	84056,54297	71340,62	4323,674137	33,60734	3,942807611	0,774882513
	500	121,5	16,5	0,3	0,45	45	275	484	19177,88	106163,9648	90103,67	5460,828781	33,6754	3,511899675	0,774863952
500	121,5	16,5	0,3	0,45	50	275	484	21308,39	130849,5117	111054,8	6730,596212	33,73012	3,165899707	0,774850639	
TW/UD/TW ja TW/UD/TW	500	143,2	3,6	0,45	0,45	20	275	484	10233,88	25880,45625	5648,363	1568,989722	33,37571	6,522591395	0,930352624
	500	143,2	3,6	0,45	0,45	25	275	484	12789,42	40080,76875	8747,556	2429,876569	33,65795	5,263403867	0,930139762
	500	143,2	3,6	0,45	0,45	30	275	484	15345,38	57374,83125	12521,95	3478,320462	33,84976	4,411720393	0,930022868
	500	143,2	3,6	0,45	0,45	35	275	484	17901,57	77762,64375	16971,56	4714,321403	33,9886	3,7927274656	0,929951854
	500	143,2	3,6	0,45	0,45	40	275	484	20457,92	101244,2063	22096,37	6137,879391	34,09374	3,33306015	0,929905509
	500	143,2	3,6	0,45	0,45	45	275	484	23014,37	127819,5188	27896,38	7748,994426	34,17613	2,969981703	0,929873602
500	143,2	3,6	0,45	0,45	50	275	484	25570,89	157488,5813	34371,6	9547,666508	34,24243	2,678234973	0,929850704	
Vana Katsetulemus	500	90	5	0,75	0,75	20	275	484	17075,18	44421,09375	8462,66	1692,532082	86,13188	10,08854436	1,552289544
GRADIENT	1400														
ENERGY	33														

## LISA 2

ud 233 g/m<sup>2</sup>  
tw 345 g/m<sup>2</sup>



FHB	1	2	skit	Total	Weig	Angle	Weigl	Weigl %
TW 0	1	1	2	890	0	811	37	0° (37 %)
Tw45	2	1	3	1035	90	345	15,7	90° (16 %)
ud 0	1	1	2	468	45	518	23,8	45° (24 %)
total wt				2191	-45	518	23,8	-45° (24 %)

FBH	1	2	skit	Total	Weig	Angle	Weigl	Weigl %
TW 0	8	2	10	3450	0	1958	27,4	0° (27 %)
Tw45	8	2	10	3450	90	1725	24,2	90° (24 %)
ud 0	0	1	1	233	45	1725	24,2	45° (24 %)
total wt				7133	-45	1725	24,2	-45° (24 %)

FBH	1	2	skit	Total	Weig	Angle	Weigl	Weigl %
TW 0	1	2	3	1035	0	1217	35,2	0° (35 %)
Tw45	3	2	5	1725	90	818	15	90° (15 %)
ud 0	2	1	3	699	45	883	24,9	45° (25 %)
total wt				3459	-45	883	24,9	-45° (25 %)

SIS	1	2	skit	Total	Weig	Angle	Weigl	Weigl %
TW 0	1	1	2	890	0	811	37	0° (37 %)
Tw45	2	1	3	1035	90	345	15,7	90° (16 %)
ud 0	1	1	2	468	45	518	23,8	45° (24 %)
total wt				2191	-45	518	23,8	-45° (24 %)

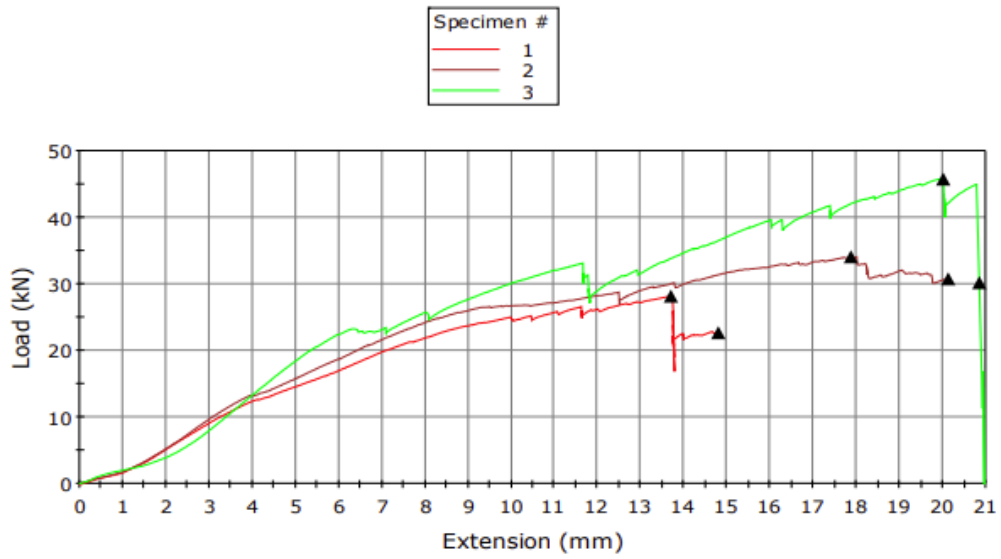
MHB	1	2	skit	Total	Weig	Angle	Weigl	Weigl %
TW 0	2	1	3	1035	0	518	23,8	0° (24 %)
Tw45	1	1	2	690	90	518	23,8	90° (24 %)
ud 45	1	1	2	468	45	811	37	45° (37 %)
total wt				2191	-45	345	15,7	-45° (16 %)

SHB	1	2	skit	Total	Weig	Angle	Weigl	Weigl %
TSPS								
TW 0	1	1	2	890	0	811	37	0° (37 %)
Tw45	2	1	3	1035	90	345	15,7	90° (16 %)
ud 0	1	1	2	468	45	518	23,8	45° (24 %)
total wt				2191	-45	518	23,8	-45° (24 %)

ACP	1	2	skit	Total	Weig	Angle	Weigl	Weigl %
TW 0	2	2	4	1380	0	2088	43,1	0° (43 %)
Tw45	3	3	6	2070	90	690	14,2	90° (14 %)
ud 0	3	3	6	1398	45	1035	21,3	45° (21 %)
total wt				4848	-45	1035	21,3	-45° (21 %)

# LISA 3

## Specimen 1 to 3



	Specimen label	Maximum Load (kN)	Tensile stress at Maximum Load (MPa)	Tensile extension at Maximum Load (mm)	Load at Break (Standard) (kN)
	1	28,21	370,2	13,69	22,78
	2	34,10	447,5	17,86	30,79
	3	45,77	600,7	19,99	30,23
	Mean	36,03	472,8	17,18	27,93

	Extension at Break (Standard) (mm)	Rate 1 (mm/min)	Comment
	1	14,79	
	2	20,11	
	3	20,83	
	Mean	18,58	

## LISA 4

	FRONT UPRIGHT ANGLE	REAR UPRIGHT ANGLE
	0,068155686	0,083624021
	0,098114208	0,040197611
	0,117785024	0,001554657
	0,12647519	0,029623179
	0,124465962	0,051357935
	0,113095469	0,062764147
	0,094565288	0,064103937
	0,071651395	0,056705615
	0,047354398	0,04275731
	0,024531212	0,025002458
	0,005552659	0,006375749
	0,007971543	0,010375092
	0,015367117	0,023035307
	0,016948027	0,030195054
	0,013942061	0,031414914
	0,008299372	0,027265603
	0,002408722	0,01923767
	0,001242512	0,0095325
	0,000404994	0,000726476
	0,000404994	0,000726476
	0,006620583	0,004441384
	0,020584369	0,003621311
	0,041340067	0,00483294
	0,067717636	0,021686678
	0,097639897	0,046643788
	0,128338229	0,078330245
	0,156659913	0,114411418
	0,179431316	0,151830026
	0,193833853	0,187136656
	0,197747342	0,216873536
	0,190018715	0,237966048
	0,170622649	0,248075873
	0,14069365	0,245874469
	0,102424785	0,231205054
	0,058844577	0,205114147
	0,01349838	0,169748576
	0,02992809	0,128129183
MAX	0,197747342	0,248075873

# **GRAAFILINE OSA**