



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL

INSENERITEADUSKOND

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

TUDENGIVORMELI SÜSINIKKERE JA -DETAILIDE TAKISTUS JA MAANDUS

CARBON FIBRE CHASSI AND CARBON DETAILS ELECTRICAL RESISTANCE AND GROUNDING FOR FORMULA STUDENT CAR

BAKALAUREUSETÖÖ

Üliõpilane: Sven Rosenberg

Üliõpilaskood: 193714 EAAB

Juhendaja: Martin Parker, Insener

Tallinn, 2022

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.

“18” Mai 2022.

Autor: Sven Rosenberg.

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

“18” Mai 2022.

Juhendaja: Martin Parker.

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

“.....”20..... .

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina Sven Rosenberg (*autori nimi*)

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose
TUDENGIVORMELI SÜSINIKKERE JA -DETAILIDE TAKISTUS JA MAANDUS,
(*lõputöö pealkiri*)

mille juhendaja on Martin Parker.

(*juhendaja nimi*)

1.1 reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil, sh Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

1.2 üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.

2. Olen teadlik, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

18.05.2022 (kuupäev)

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

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE

Autor: Sven Rosenberg

Lõputöö liik: Bakalaureusetöö

Töö pealkiri: Tudengivormeli süsinikkere ja -detailide takistus ja maandus

Kuupäev:

43 lk (*lõputöö lehekülgede arv koos lisadega*)

18.05.2022

Ülikool: Tallinna Tehnikaülikool

Teaduskond: Inseneriteaduskond

Instituut: Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

Töö juhendaja(d): Martin Parker

Töö konsultant (konsultandid): Kaarel Haavajõe

Sisu kirjeldus:

Lõputöö teema tuleneb FEST21 keretakistuse halbadest tulemustest. Eesmärgiks seati FEST22 parema maandustakistuse projekteerimine.

Lõputöö käigus uuriti reeglitest ja tootmisest tulenevaid nõudeid ja piiranguid.

Enne monokokk-kere tootmist toodeti võrreldavad katsekehad. Katsekehad mõõdeti millioommeetriga. Mõõtmiste tulemustest vähima takistuse andnud maandusmeetod võeti kasutusel kerel.

Kere tootmise käigus dokumenteeriti valitud lahenduse tootmisprobleemid. Mõõdeti üle eelnevate aastate vormelite maandustakistus, arutati maanduslahendusi ja võrreldi tulemusi uue vormeli kerega.

Töö tulemusena antakse soovitusi järgneva vormeli süsinikkere maandustakistuse projekteerimisel.

Märksõnad: Monokokk-kere, süsinikkiiber, prepreg, komposiitootmine, vaskkangas, millioommeeter, takistus, elektriline juhtivus, komposiit

ABSTRACT

Author: Sven Rosenberg

Type of the work: Bachelor

Title: Carbon fibre chassi and carbon details electrical resistance and grounding for formula student car

Date: 18.05.2022

43 pages (the number of thesis pages including appendices)

University: Tallinn University of Technology

School: School of Engineering

Department: Department of Electrical Power Engineering and Mechatronics

Supervisor(s) of the thesis: Martin Parker

Consultant(s): Kaarel Haavajõe

Abstract:

Theses subject comes from bad electrical resistance measurement results of FEST21 chassi. The aim of theses is betterment of grounding for FEST22 monocoque chassi.

Requirements and restrictions of the rules and production were researched and noted.

Before making of the monocoque chassis the test specimens were produced. The test specimens were measured with milliohm meter. The production method of the least resistive specimen was implemented to chassi.

During the production of monocoque the occurred problems were documented. The measurements of electrical resistance were taken from previous seasons formula cars and the results were compared to the new chassis.

At the end of the theses suggestions of grounding design were made for next year's chassis

Keywords: Monocoque chassis, carbon fibre, prepreg, composite manufacturing, copper wire mesh, milliohm meter, resistance, conductivity, composites

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Lõputöö teema:

**TUDENGIVORMELI SÜSINIKKERE JA -
DETAILIDE TAKISTUS JA MAANDUS**

Lõputöö teema inglise keeles:

**CARBON FIBRE CHASSI AND CARBON DETAILS
ELECTRICAL RESISTANCE AND GROUNDING
FOR FORMULA STUDENT CAR**

Üliõpilane:

Sven Rosenberg , 193714 EAAB

Eriala:

Elektroenergeetika ja mehhatroonika

Lõputöö liik:

Bakalaureusetöö

Lõputöö juhendaja:

Martin Parker

Lõputöö kaasjuhendaja:

(ettevõtte, amet ja kontakt)

Lõputöö ülesande kehtivusaeg: **18.07.2022**

(kehtivusaja annab juhendaja)

Lõputöö esitamise tähtaeg: **18.05.2022**

Üliõpilane (allkiri)

Juhendaja (allkiri)

Õppekava juht (allkiri)

Kaasjuhendaja (allkiri)

1. Teema põhjendus

Juba esimesest monokokk-kerest on valmistanud probleemi kere elektriline takistus. Alati on saadud keretakistus reeglitele vastavaks, kuid lahendused on dokumenteeritud põgusalt. Suurt probleemi valmistas FEST21 kere, mille takistus tulemused olid kohati väga piiripeal.

2. Töö eesmärk

Töö eesmärgiks on projekteerida maandustakistuse lahendus FEST22 kerele ja süsinikdetailidele, mis vastavad tudengivormeli reeglitele.

3. Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:

1. Kas, kuhu ja kuidas panna vaskvõrku keretakistuse vähendamiseks.
2. Akukasti maanduse võimalus läbi kere
3. Kuidas mõjutab maanduslahendus süsinikdetailide tootmist.

4. Lähteandmed

Lähteandmed saab kirjandusest, mõõtmistulemustest varasemalt valmistatud vormelilt, projekteerimise käigus olevalt vormelilt ja valmistatud katsekehadelt.

5. Uurimismeetodid

Töö tulemuseni jõudmiseks otsin materjali, katsetan ning teen katsetulemuste analüüsi. Vahenditeks on digitaalmultimeeter millioomeeter funktsiooniga. Vajalikud katsekehad valmistan tudengivormeli komposiidi tootmislaboris. Andmeid töödeldakse Excelis. Raalprojekteerimiseks kasutan Catia V5 tarkvara.

6. Graafiline osa

Graafiline osa koosneb tulemustabelitest, selgitavatest mudelitest ja piltidest.

7. Töö struktuur

Töö algab uuriva osaga, mille käigus tehakse selgeks projekteerimise eesmärgid ja piiravad tegurid.

Kasutatavad materjalid. Detailide nõuded, piiravad reeglid. Tootmismeetodid. Katsekehade tootmine ja mõõtmine. Kere tootmine ja tootmise analüüs. Vanemate vormelite mõõtmine ja analüüs. Järgmise aasta keretakistuse projekteerimise soovitusel. Kokkuvõte

8. Kasutatud kirjanduse allikad

1. Rait Läänemetsa lõputöö
2. Fsg reeglid
3. Mõõtevahendite andmelehed
4. Teadusartikkel alumiiniumkärjest

9. Lõputöö konsultandid

Kaarel Haavajõe – materjali valik vormlauto kere jaoks.

10. Töö etapid ja ajakava

1. Mõõteseadme valik ja mõõtmismeetoodika, juhendajaga kohtumine 22.11.2021
2. Katsekehade mõõtmete ja katsete läbimõtlemine 10.12.2021
3. Katsekehade katsetamine 11.03.2022
4. Tulemuste analüüsimine 12.03.2022
5. Juhendajaga kohtumine, Sisu 1.etappi esitamine 14.03.2022
6. Lõputöö arendus 15.03.2022 - 04.04.2022
7. Sisu 2. etappi esitamine 04.04.2022
8. Sisu arendus, mõõtmised 04.04.2022 – 09.05.2022
9. Kaitsmistaotluse esitamine 09.05
10. Eelkaitsmine 12.05.2022
11. Lõputöö valmis 18.05.2022
12. Lõputöö esitamine 18.05.2022 kell 15

SISUKORD

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE	4
ABSTRACT	5
Eessõna	11
Lühendite ja tähiste loetelu	12
1 Sissejuhatus.....	13
2 Komposiit materjalide elektriline juhtivus	14
2.1 Süsinikfiiber.....	14
2.2 Vaskkangas	14
2.3 Kärgstruktuur	15
3 Vormeli auto detailide nõuded	16
3.1 Maandusnõuded	16
3.2 Muud nõuded	16
4 Süsinikdetailide tootmine	18
4.1 Tootmise kirjeldamine.....	18
4.2 Infusioonimine, eelnevalt kasutatud tootmismeetod.....	18
4.3 Hetkel kasutatav tootmismetoodika	19
4.3.1 Märjalt lamineerimine	19
4.3.2 Prepreg kanga lamieerimine	20
5 Katsekehad ja mõõtmine	21
5.1 Mõõtemetoodika ja mõõteseade	21
5.2 Prepreg katsekehad	22
5.2.1 Katsekehade tootmine	22
5.2.2 Katsekehade mõõtmine.....	25
5.3 Märjalt lamineeritud katsekehad.....	26
5.3.1 Katsekehade tootmine	26
5.3.2 Katsekehade mõõtmine.....	28
6 Detailide tulemused.....	30
7 Autode keretakistus võrdlus	33

8	Järgmise aasta vormeli maanduse projekteerimise soovitused	37
9	Kokkuvõte.....	40
10	Kasutatud kirjandus.....	42

EESSÕNA

Lõputöö teema sai valitud tudengivormeli 2021 hooaja kokkuvõtte põhjal. FEST21 auto probleemiks oli halb elektriline juhtivus ja maandus, mida kontrollitakse võistluse eel tehnilises kontrollis.

Tudengivormeli võistlussari on mõeldud ennekõike inseneritudengitele, ning erilist tähelepanu pannakse auto ohutusele. Ohutusreeglid on eriti karmid elektriautodel, kuna maksimaalne akupaki pinge on 600 V. Varasemalt on saadud vormeli maandustakistus piiripeale lisades maanduskaableid ja vaskteipi. FEST22 autol on pandud erilist tähelepanu maandusele.

LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU

MP* – madalpinge

KP* – kõrge pinge

Prepreg – eelimmutatud kangas (ing k preimpregnated fabric)

VS – veosüsteem

FEST15 – FS Team Tallinna 2014/2015 hooaja vormelauto

FEST16 - FS Team Tallinna 2015/2016 hooaja vormelauto

FEST17 - FS Team Tallinna 2016/2017 hooaja vormelauto

FEST18 - FS Team Tallinna 2017/2018 hooaja vormelauto

FEST21 - FS Team Tallinna 2019/2021 hooaja vormelauto

FEST22 - FS Team Tallinna 2021/2022 hooaja vormelauto

*vormeli reeglitest tulenev vormeli pinge süsteem $MP < 60 \text{ V} \leq KP$

1 SISSEJUHATUS

Juba aastast 2015 kui valmis esimene monokokk-kere oli probleemiks kerekinnituste takistus. FEST18 ajal uuriti korraks süsiniklaminaadi maandust Rait Läänemetsa lõputöö raames [1]. Aastatega on arenenud FS Team Tallinna kere tootmis-tehnoloogia ning sellega on muutunud ka materjalide kasutus süsinikdetailide tegemisel.

Kere mehaanilisele tugevusele ja elektrilisele takistusele on seatud reeglid. Käesolev töö käsitleb täpsemalt kere ja muude süsinikdetailide elektrilist takistust. Peamine põhjus, miks reeglid nõuavad head juhtivust on see, et lühise olukorras ei saaks juht elektrilööki ja turvalülitused toimuksid elektrilise isolatsiooni vea korral.

Tahtes võimalikult kergelt vormelit on materjalide valik peamiselt piiratud komposiit tehnoloogiatele. Komposiidis peab võtma arvesse lisaks materjalide valikul ka sobivad tootmismeetodid. Igal meetodil on omad head ja vead.

Lõputöö raames saab põhjalikult selgeks erinevatest tootmismeetoditest tingitud piirangud, reeglitest tulenevad piirangud ja materjalide valikust tulenevad piirangud. Kõiki piiranguid arvesse võttes sai läbi mängida erinevad stsenaariumid katsekehade näol projekteerimise faasis, et võtta arvesse pärast detailide tootmisel.

Katsekehade projekteerimisel üks põhilisi eesmärke oli, et hiljem saaks võrrelda erinevaid tegureid tootmise näol ning mõõtmisviisi poolest. Lisaks pandi paika kindlad katsekeha mõõdud, järgmisteks tudengivormeli elektrijuhtivuse katsete teostamiseks.

Peale katsekehade analüüsi ja tulemusi, sai valitud parimaid tulemusi kajastavaid parameetrid ning toodetud vastavad kere detailid. Selgus et päris kere tootmist ei saa lihtsa katsekeha tootmisega vastavusse viia. See järel dokumenteeriti protsessi halvendavad tegurid, mis on ka kajastatud käesolevas lõputöös.

Peale detaili tootmist tuli teha projekteerimist kokkuvõtavad katsed monokokk keretakistuse mõõtmisel. Vormelitel on monokokk-kere mõõtmised on tehtud vastavalt võistluste ohutuskontrollile, mille käigus leiti veel varem arvestamata tegureid.

Kuna kõik meetodid, mis on kajastatud lõputöös põhinevad varasemalt tehtud vormelitel siis mõõdeti üle kõik kättesaadavad vormelid üle (FEST17, FEST18, FEST21 ja FEST22). See annab lõpliku võrdluse vormelite näol, sest kõigi vormelite kohta ei tehtud põhjaliku uuringu.

2 KOMPOSIIT MATERJALIDE ELEKTRILINE JUHTIVUS

Komposiit tähendab kahe või enam materjali kasutamist struktuuris uute materjali omaduste saamiseks. Motospordis kasutatakse kerguse, jäikuse ja muude soovitud omaduste saamiseks. Tihti kasutatakse põimitud, tehnilist kangast nagu süsinikfiiber, klaasfiiber või aramiidfiiber (kevlar).

Kangast ainuüksi ei piisa, on vajalik veel sideainet, mis hoiab kangast ja kangakihte koos ning tagab soovitud kujupinna. Seda täitematerjali nimetame maatriksiks. Kõige sagedamini kasutatavad maatriksid on termoreageerivad vaigud nagu vinüülester, polüester ja epoksüvaik. Monokokk keres on kasutusel epoksüvaik, kuna see on paremate mehaaniliste omadustega kui vinüülester või polüester [2]. Vormelis kasutatavatel vaikudel on kahjuks madal elektrijuhtivus.

2.1 Süsinikfiiber

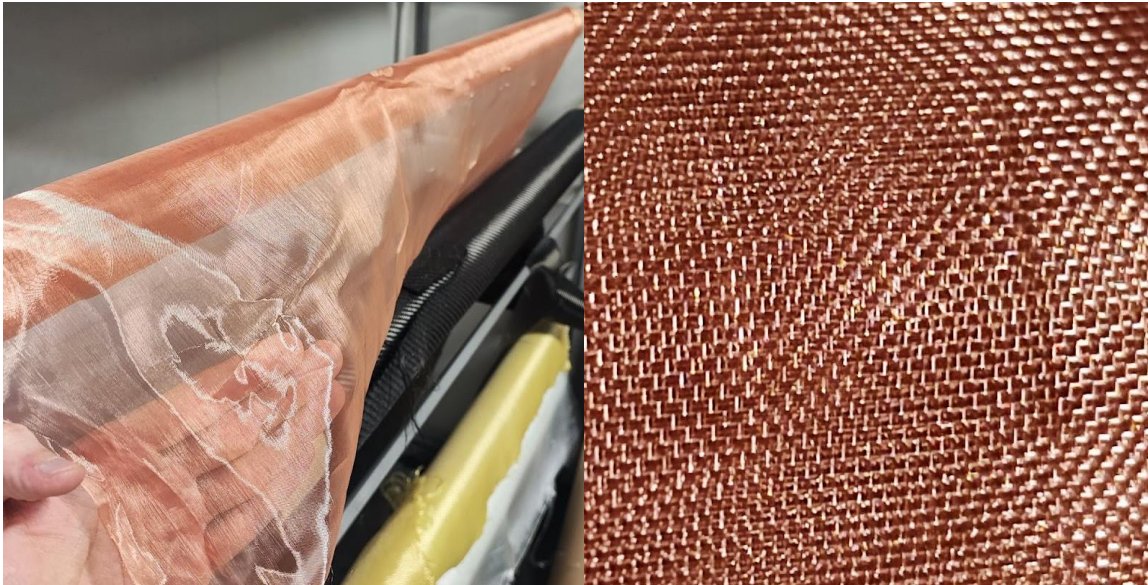
Süsinikkangas on kõrgel temperatuuril karboniseeritud plastniit, mis hiljem põimitakse kangaks. Kuna pealmisel kihil on suur süsiniku sisaldus, siis on niidil elektrit juhtivad omadused. Kahjuks ei ole süsinik hea elektrijuht ning lisaks vajab kangas vaigutamist oma kuju ja suurepärase mehaaniliste omaduste tagamiseks.

Süsinikfiibri omadusena võib välja tuua, et ideaalolukorras võib fiibri elektriline juhtivus olla 106 S/m [3]. Võrreldes vasega, mille elektriline juhtivus on $5,96 \cdot 10^7$ S/m [4], on süsinik halb elektrijuht. Maandusel peaks valima suure juhtivusega materjali.

2.2 Vaskkangas

Vaskkangas on vormelis peamiselt kasutusel süsinikdetailide maandamiseks. Vaskkangas nagu palju teisigi tekstiile on igas massis, suuruses ja põimingus. Üheks heaks lisaomaduseks tootja väitel on ka elektromagneetilise ühilduvuse kaitse [5].

Lähtudes peamiselt keretakistuse vähendamise eesmärkidest siis sobib pea iga vaskkangas kasutamiseks. Olulised mehaanilised parameetrid peaks vaskkanga valikul olema paksus ja raskus. Vaskkangas peaks olema võimalikult õhuke, et see laminaadi paksust väga ei mõjuta ning võimalikult kerge, et see kere massile võimalikult vähe juurde annaks. Arvestades neid tingimusi otsustati võtta 0,05 mm paksust *Plain põiminguga vaskkangast* (vaata joonist 2.1). Kanga massi määrab selle põimingu tihedus.



Joonis 2.1 Õhuke vaskkangas rullis, suurendatud pilt kanga põimingust

2.3 Kärgstruktuur

Kärgstruktuur on väga levinud vahematerjal tüüpilises komposiit „sandwich“ kasutuses. Tiimi kereinsenerid on leidnud, et kasutades kärgstruktuuri saab parema massi ja jäikuse suhte kerel.

Peamiselt on tiimis kasutusel nomex kärge ja alumiiniumkärge. Nomex kärge baseerub papilaadsest aramiid lehest, mis on ära vaigutatud [6]. Nomex kärge on kasutatud FEST21 ühes osas kere ning algselt oli plaanis kasutada ka seda FEST22 kere, kuid projekteerimise käigus avastati, et planeeritud regioonis on massi poolest parem kasutada alumiiniumkärge, kuna laminaat oli lõpptulemusena kergem.

Alumiiniumkärge heaks omaduseks on selle elektrijuhtivus, mida nomex kärjel ei ole. Olenevalt kere regioonist, kasutatakse (10, 15, 20 ja 25) mm paksust alumiiniumkärge. Lisaks on akukastis ja vaheseinas kasutusel 3 mm ja 5 mm paksust nomex kärge.

Kuna on kasutusel erinevad paksused, eri kere regioonides, siis ei ole võimalik teostada kogu maandust läbi alumiiniumkärge. Lisaks paksustele tuleb arvesse võtta ka laminaadi tootmismeetodit ja pukside paigutust, mis on kirjeldatud peatükis 4.

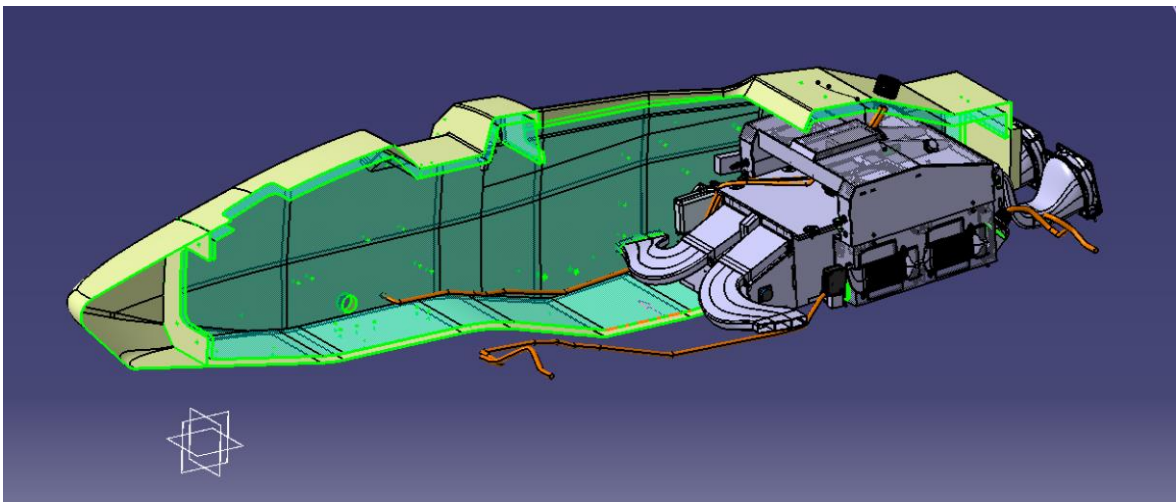
3 VORMELI AUTO DETAILIDE NÕUDED

Ehitades elektriautot, mille aku pingeline on ligilähedale 600 V, on reeglites kõrged elektriohutusnõuded. Maailmas toodetakse järjest enam elektriautosid ning tudengivormeli reeglid rajavad hea arusaama elektrisõiduki elektriohutusest inseneri vaatepildist.

3.1 Maandusnõuded

Maandusreeglid on kajastatud reegli raamatus peatükis EV 3.1 [7]. Reegel väidab, et metallist osadel, 100 mm ulatuses VS osadest, peab olema takistus väiksem kui 300 m Ω (mõõtevool 1 A) MP-süsteemi maandusele. Auto osad, mis võivad elektrit juhtida, näiteks värvitud/kaetud metallidetailid ja süsinikdetailid, 100 mm ulatuses VS osadest peab takistus olema vähem kui 5 Ω .

KP osadena peab arvestama kõiki komponente, mis juhivad VS. Joonisel 3.1 on välja toodud VS osad, mille piires kehtib varem mainitud maanduse reegel. Auto taga osas asub mootorite kontrollid ja akupakk ning mööda kere sisemist põhjakülgi jooksevad mootorite kaablid (joonisel 3.1 oranžid kaablid).



Joonis 3.1. VS osad keres

3.2 Muud nõuded

Füüsiline auto maandus on tegelikult viimane päästenõu elektrilise vea puhul. Vastavalt ohutusnõuetele peab olema vormelil reegel EV 6.3 [7] järgi elektrilise isolatsiooni mõõtur, mis mõõdab maandust peaturvakaarel, mis on samuti ühendatud auto MP-süsteemi ja akukasti maandusesse. Vea korral peab elektrilise isolatsiooni mõõtur seade

avama välja lülitamise ahela [7]. Kui sõiduajal tuleb isolatsiooni veateade, siis on soovitatav juhtidel viivitamatult autost väljuda.

Lisaks elektrilöögile on elekter ka suur tulekahjude põhjustaja. Selle pärast on nõutud, et juhti eraldaks akukastist tulesein vastavalt T 4.8 reeglitele [7]. Lisaks peab tulesein olema elektrit mitte juhtivast materjalist, kuid akukasti poolne osa peab olema alumiinium plekist, mis on maandatud MP-süsteemi. Lisaks tuleseinale peab olema tulekindel ka akukast. Akukasti peab vastama EV 5.5 reeglitele [7].

4 SÜSINIKDETAAILIDE TOOTMINE

4.1 Tootmise kirjeldamine

Komposiidis on tootmismeetodeid mitmeid, Tudengivormeli komposiidi alam-meeskond kasutab nendest 3 põhilist ja ühte hübriid lahendust. Kaalu ja jäikuse optimeerimisel kasutatakse põhilistel detailidel rohkelt „sandwich“ struktuuri, kus kahe laminaadi kihi vahel on madala tihedusega vahematerjal. Selline struktuur on laialt kasutusel komposiitide maailmas, omalt poolt lisab see raskust tootmisele ning olenevalt olukorrast raskendab see erinõudeid elektriohutuse tagamisel.

Kahte põhilist tootmismeetodit saab teha kolmes etapis: 1. esimene laminaadi kiht 2. vahematerjal 3. viimane laminaadi kiht. Iga etapi vahel toimub vaigu kõvendamine. Prepregide puhul ahjus, vedela vaiguga toatemperatuuril ning olenevalt vaigu koostisest siis hiljem ka ahjus.

4.2 Infusioonimine, eelnevalt kasutatud tootmismeetod

Infusioonimismeetodit kasutatakse põhiliselt kerevormide tegemisel. Infusioonimise meetod kujutab endast kuiva kanga lamineerimist vormi pinnale koos pihustava liimiga ning vaakumi abiga vaiguläbitõmbamist kangast. Seda meetodit on kasutatud ka FEST15 ja 16 monokokk kere ja tugevus katsekehade tegemisel [8]. J.Eametsa magistritöös on toodud ka takistuse katsekehad selle meetodi tootmise puhul.

Põhiliselt kasutatakse seda suurte detailide tegemisel, kuna epoksü kõvenemise aeg jääb liiga lühikeseks (~8h) [9]. Meetodi eelised on selle puhtus, töökindlus ja odavus. Suurteks miinusteks on keerukas ja ajakulukas ettevalmistus ja limiteeritud vahematerjalide valik. Vahematerjalina sellel meetodil ei saa kasutada alumiinium ja nomex kargstruktuure, mis oma omaduste poolest on kergemad ja jäigemad kui vaht.

Infusioonimise meetodil on kindlad reeglid, mida peab silmas pidama tootmisel. Kõige olulisemad on sööt ja ära tõmme. Üle pinna peab söötтору olema igalt poolt sama kaugel (vaata joonis 4.1 A osa) äratõmbest, muidu võib jääda vaik kanga sisse tõmbamata ehk kuivaks (vaata joonis 4.1 B osa).



Joonis 4.1 Kerevormide sööt ja äratõmbe torud A osa , kuivaks jäänud koht B osa

Peale vaigu, kuivkanga ja söödu-, äratõmbetoru on oluline roll ka eralduskangal (*Peelply*) ja infusioonimisvõrgul. Need aitavad vaigul ühtlaselt ja õigel kiirusel laminaati voolata.

4.3 Hetkel kasutatav tootmismetoodika

4.3.1 Märjalt lamineerimine

Märjalt lamineerist kasutakse vormelis peamiselt tulekindlate detailide tegemiseks. Reegel EV 5.3.4 ja T 4.8.7 ütleb [7], et akupakk ja tulesein peavad järgima tulekindluse reeglit T 1.2.1 [7]. Tulekindluses reeglis on määratud, et materjalil peab olema UL94 V-0 standardi kohane tulekindlus [7].

Tootmismeetod on peaaegu sama, mis infusioonimisel. Vahe on ainult selles, et kuiv kangas märjatakse siledal pinnal pintsliga või rullikuga. See järel laotatakse märg kangas vormi pinnale kiht kihi haaval. Märgamist võib teha ka vormi pinnal, kuid siis tuleb jälgida, et raskesti ligipääsetavad nurgad vaigust kuivaks ei jää.

Nagu ka infusioonimisel on märjalt lamineerimisel piirangud. Kõike kolme etappi ei saa korraga teha akukasti ning vahesina puhul, kuna ette määratud mehaaniliste omaduste tõttu kasutatakse vahematerjalina kärgstruktuure. Peatükis 5.3.1 räägin täpsemalt märjalt lamineeritud katsekehadest.

Samamoodi on vaja kasutada eralduskangast, kuid võrgu asemel kasutatakse hingamisriiet (*Breather/Bleeder*). Hingamisriide eesmärk on ühtlustada vaakumi ning lasta õhku laminaadist välja [10].

4.3.2 Prepreg kanga lamieerimine

Prepreg kanga üks eeliseid tootmisel on see, et lihtsamate detailide puhul saab kõike kolme etappi ühe korraga teha. Lisaks sellele on tootmine väga puhas. Miinuseks on ahju või autoklaavi nõue ja kallis materjal. Peatükkis 5.2.1 räägin täpsemalt prepreg kangaga toodetud katsekehadest.

Tulenevalt kere turvalisuse nõuetest ja tootmisvõimalustest, kasutab tiim monokokk ja muude kere osade tootmiseks eelimmutatud kangast, ehk prepregi. Prepregi maatriksi süsteemid on ka termoreageerivate vaikude baasil. Need vajavad kuumust ja survet oma kuju säilitamiseks. Tiimis on kasutusel mitme erineva tootja prepregi, kuid kõik on epoksü autoklaavi mitte vajavad vaigud.

Kuna prepregidele on doseeritud täpses koguses vaiku oma täpsete omaduste saavutamiseks, siis on vaja vähematerjali kasutamisel kasutada lisa vaiku. Vaigust kuivaks jäänud kangas ei taga enam mehaanilisi oodatavaid tulemusi laminaadile. Samas lisavaigu kihi lisamisel võib see järjekordselt halvendada kontakti kanga, kärje ja puksi vahel moodustades elektrit isoleeriva kihi.

Kui prepreg kangas on vormile lamineeritud, siis pannakse sellele tavaliselt perforeerimata eralduskile või siis kanga tootja soovitatud perforeeritud kile. Eralduskile peale pannakse järgmise kihina hingamisriie. Parima tulemuse saamiseks tuleks jälgida, et kõik tarvikud oleks korrektselt kasutusel ning midagi kahekordselt ei ole.

5 KATSEKEHAD JA MÕÕTMINE

5.1 Mõõtemetoodika ja mõõteseade

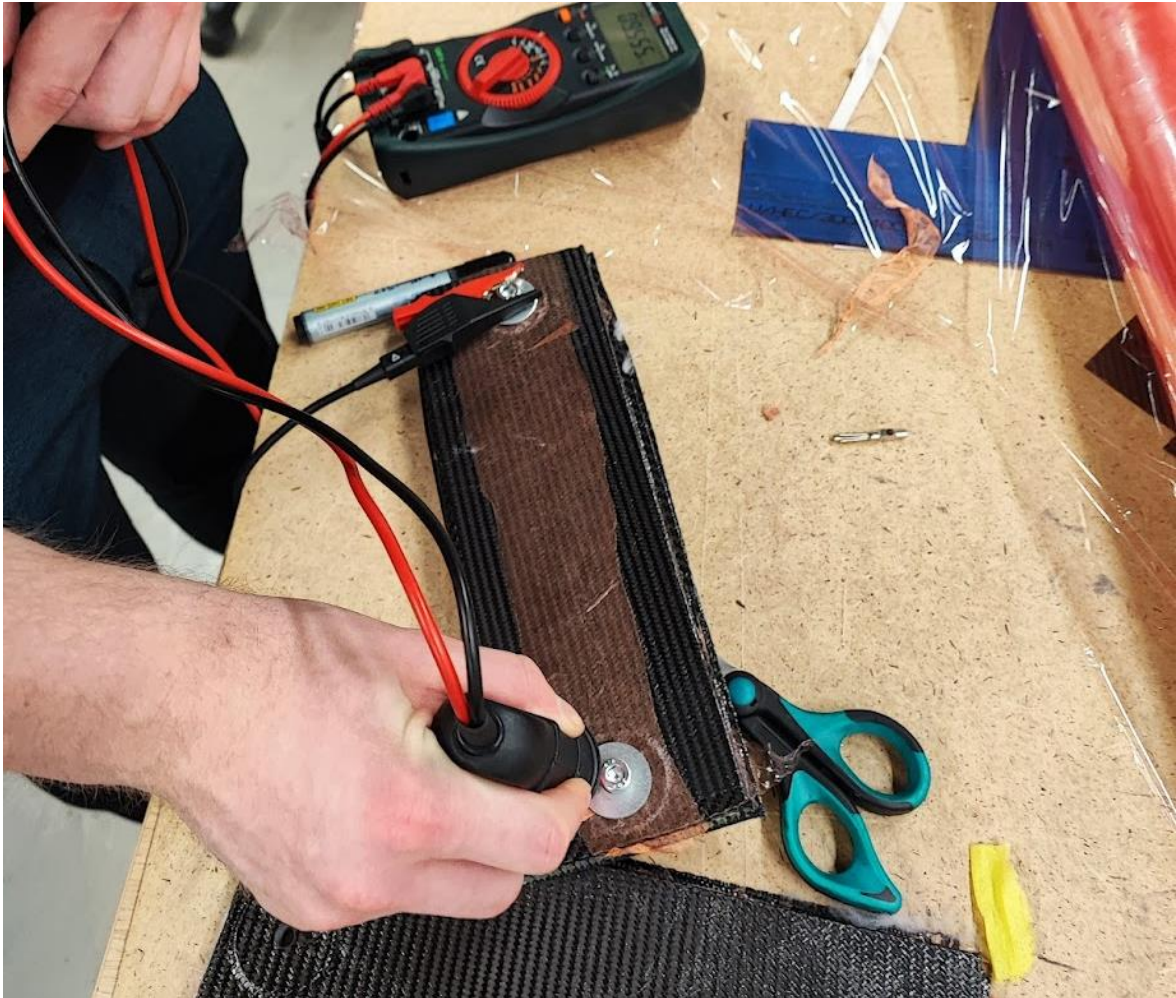
Reeglitest lähtuvalt on vaja mõõta väga väikeseid takistusi (alla 300m Ω) ning soovides täpseid tulemusi on vaja leida sobilik elektrilise takistuse mõõtmismeetod ja sellele vastavalt ka mõõtevahend.

Madalate takistuste juures tekitab probleem tavapärase kaheterminali mõõtmisega, see on ebatäpne ning annab umbkaudse kogutakistuse [11]. Üheks lihtsamaks madala takistuse mõõtmismeetodiks on nelja juhtme meetod, vahel tuntud ka kui Kelvini meetod. 4 juhtme meetodil mõõdetakse korraga voolu ja pinget. Lisaks välistab see meetod välja proovikute enda takistuse [12].

Peale mõõtepiirkonna määramist 0 m Ω - 300 m Ω on veel kriteeriume, millest lähtuda mõõtmiste teostamisel. Lähtuvalt võistluste tehnilise kontrolli kogemustest, peab mõõtmine toimuma kiirelt. Samuti peab andma mõõtevahend piisava täpsuse ja eraldus võime.

Vastavalt nendele kriteeriumitele sai valituks Gossen Metrawatti poolt Metrahit 27I, mis ise tagab ise kiiremõõtmise, kuna sellele on nelja juhtme mõõtmine sisseehitatud ning ei ole vajadust eraldi vooluallikale. Sellel digitaalmultimeetril on piisav täpsus ja eraldus võime [13], see vastab tudengivormeli reeglitele ning on üldiselt väga laia funktsionaalsusega, lisaks on see meeskonnal käepärast.

Katsekehadel mõõtmisel ühendati klamber ümber ühe poldipea ning nõel proovikuga suruti vastu teist poldipead või seibi (vaata pilti 5.1). Mõõtes üle poldi ja seibi vahelise takistuse ning saades tulemuseks 0,27 m Ω ühe ampri voolu juures, võib öelda, et see takistus on väga väike, ning seda tulemustes arvestama ei pea.



Joonis 5.1 Keretakistus katsekeha mõõtmine

Tehes päris autol mõõtmisi peab arvestama, et klamber ühendatakse auto maandus pistikupessa. Kuna klamber ise ei mahu pistikupessa siis kasutatakse metallist 4mm konnektori liidest, tihti tuntud ka banaani pistikuna. Vormelil mõõtmisel kasutatavat konnektori on näha ka joonisel 5.1 lauapeal katsekeha ees. Peatükkis 7 räägitakse täpsemalt mõõtmistest vormelitel.

5.2 Prepreg katsekehad

5.2.1 Katsekehade tootmine

Katsekehad otsustati teha ühesugused mõõtmetelt, 300 mm x 100 mm x 15 mm. Valitud sai see kere tootmisest ülejäänud kärje ja puksi paksustest. Katsekehad toodeti lähtuvalt peatükkis 4.2.2 juhistelev.

Laminaatide ülesehituse on välja toodud tabelis 5.1 ja tervet laminaat kirjeldan ristlõikena joonisel 5.2. Prepreg kangana kasutasin *twill* 2x2 põiminguga kangast [14].

Number kanga taga tähendab nurka, mille all on kangas lõigatud. Nurk on oluline rohkem mehhaaniliste tugevuste tagamiseks, kui elektrise takistuse mõõtmisel.

Katsekehade eesmärk on jäljendada võimalikult täpselt kere tootmist, ning saada teada enne kere tootmist, kuhu panna vaskvõrk, et saada kõige väiksem takistus.

Eelmise hooaja materjalidest jäi üle ohtralt vaskkangast, mille tõttu otsustati kasutada seda keretakistust vähendava tegurina. Parima tulemuse välja selgitamiseks otsustati teha kolm katsekeha.

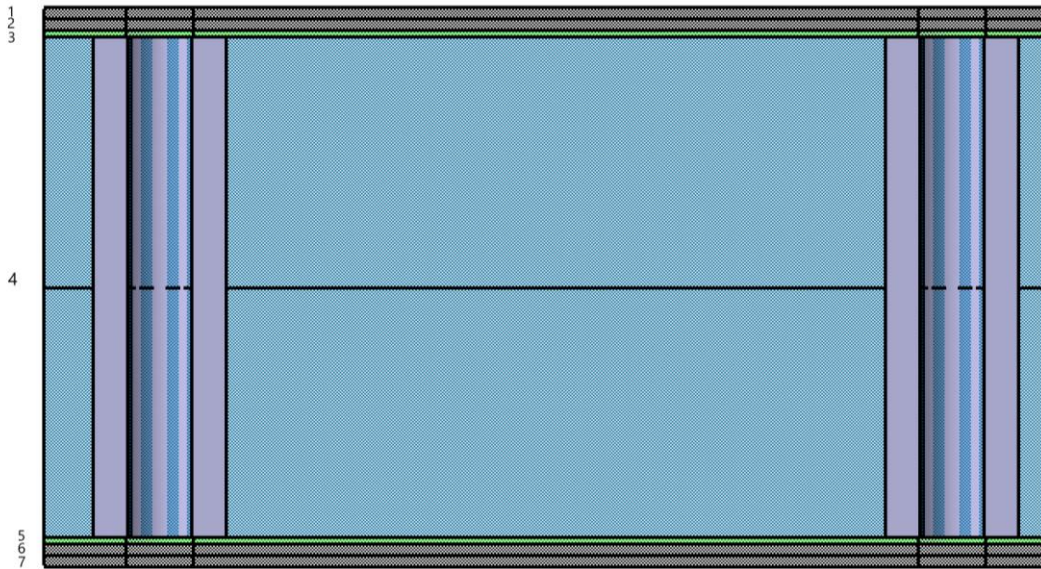
Esimesel katsekehal seoti vaskkangas ümber alumiinium puksi kodara ning täideti kodarad vahuga nii, et tekiks surve kanga ja kodara sisepinna vahele, parandades kontakti (vaata joonist 5.3 A ja B osa). Hüpoteesiks sellel katsekehal on: elektrit juhib polt läbi puksi ning sealt omakorda läbi teiste pukside, ühendades samaaegselt ka alumiiniumkärjed.

Teisel katsekehal laotati vaskkangas pärast laminaadi ära lamineerimist kõige pealmisele kihile. Hiljem eemaldades poltide kohalt üleliigse vaigu lihvpaberiga. Hüpoteesiks on: seibi ja pealmisekihi vaskkanga vahel tekib poldi pingestamise tõttu hea kontakt ning elektrit juhib pealne kangakiht.

Kolmandal katsekeha, eesmärk oli saada võrdlus olukord esimese ja teise katsekehaga ehk antud olukorras normaal laminaadi takistus.

Table 5.1 Laminaatide kihiline ülesehitus

Kihi Nr.	Vaskkangas pukside vahel	Vaskkangas laminaadi peal	Tavaline
1.	<i>Twill 0</i>	Vaskkangas	<i>Twill 0</i>
2.	<i>Twill 45</i>	<i>Twill 0</i>	<i>Twill 45</i>
3.	Lisa vaik	<i>Twill 45</i>	Lisa vaik
4.	Vaskkangas	Lisa vaik	Kärg ja puks
5.	Kärg ja puks	Kärg ja puks	Lisa vaik
6.	Lisa vaik	Lisa vaik	<i>Twill 45</i>
7.	<i>Twill 45</i>	<i>Twill 45</i>	<i>Twill 0</i>
8.	<i>Twill 0</i>	<i>Twill 0</i>	



Joonis 5.2 Tavalist „sandwich“ laminaati illustreeriv pilt ristlõikena. Mõõdud ei ole proportsionaalsed



Joonis 5.3 A osa: Vaskkangas pukside vahel B osa: pukside asetus laminaadis ja pasta kasutus

Et jäljendada kõiki keretootmise protsesse, siis on lisatud ka pukside vahele monokomponentset epoksü pastat. Pasta eesmärk on liita kargesi ja pukse kargede vahele. Kuna pasta on epoksü baasil, siis see halvendab veel omakorda elektrilist takistust kargede ja pukside vahel.

Tootmisraskuse poolest on kõige halvem variant vaskkangas pukside vahel, sest vaskkangas on kergesti purunev. Katsekeha, millel on vaskkangas puksidel pidi kaks korda siduma kuna esimesel korral lõi kangas vastu kärje teravat äärt katki . Lisaks

ei tohi jätta väga palju varu vaskkangal muidu tekkivad soovimatud ebatasasused kere sisepinnale.

5.2.2 Katsekehade mõõtmine

Kerekatsekehade mõõtmisel sai algul plaanitud mõõta poldi peadest, kuid mõõtmiste käigul tekkis lisa küsimusi. Kuidas kulgeb elektri vool katsekehas? Kas läbi pealmise kihi või läbi puksi ja vaskkanga? Nende küsimustele vastuse leidmiseks teostati kolm erinevat mõõtmismeetodi.

Ühendades vaskvõrguga puksid ning lisades poldi avadesse veel kangast (vaata joonis 5.4), sai parimaks tulemuseks 1,9 mΩ vaata tabelit 5.2.



Joonis 5.4. Poldi avadesse pandud lisavõrk parema poldi kontakti saamiseks puksiga

Üld küsimusele, kas vaskkangas aitab keretakistust vähendada vastavad kaks laminaati, milles on vaskkangast kasutatud. Kordades paremad tulemused on vaskkangast kasutatvatel katsekehadel.

Table 5.2 Prepreg katsekehade elektrilist takistust võrdlev tabel

Mõõtevool 1A, kõik tulemused mΩ	Laminaat 300 x 100 mm		
	Vaskkangas pukside vahel	Vaskkangas laminaadi peal	Tavaline
Poldist poldini	141,6	9,1	82,0
proovikuga vastu puksi	20,3	46,4	82,7
Poldist poldini + vaskkangas poldi ja puksi vahel	1,9	9,6	80,9

Esimesel katsekeha mõõtmistest (Tabel 5.2 teine veerg) võib järeldada, et puksid said omavahel hästi ühendatud, probleemiks on puksi ava tolerantsid, kuna poldist poldini takistus on ülemäära suur. Nimelt avad on liiga suured ning parema tulemuse saamiseks on hea otsus kasutada lisa vaskkangast poldi ja puksi vahel. Peab meeles pidama, et suure jõuga polti surudes võivad süsinik kihid kärje küljest lahti tulla ehk delamineeruda ning laminaat nõrgeneb mehaaniliste omaduste poolest.

Teisel katsekehal tuleb hea takistus seibi ja pealmise kihi heast kontaktis, kuigi ei ole takistustulemus nii hea kui kangas puksi vahel.

5.3 Märjalt lamineeritud katsekehad

5.3.1 Katsekehade tootmine

Soovides võrrelda ka tootmismeetodeid otsustati teha katsekehad mõõdult sarnased, mis peatükkis 5.2 prepreg katsekehad, ehk 300 mm x 100 mm x 10 mm. Katsekehad toodeti vastavalt peatükkis 4.3.1 juhisteile.

Kuna akukastil on väiksed mõõtmed, siis saab kasutada ühte tervet alumiiniumkärge ning viia maandus läbi elektrit juhtiva kärje, et säästa massilt. Seda meetodit arvesse võttes peab saavutama väga hea kontakti puksi ja kärje vahel. Selle jaoks uuriti esmalt pukside liitmis võimalusi.

Keres kasutatav puksi ja kargede liite pasta ei vasta tulekindlus nõuetele ei saa seda akukasti tootmisel kasutada. Selle asemel peab paksendama täite materjaliga tulekindlat vaiku nii palju, et vaik ei oleks enam voolav ja meenutab tahkemat voolitavat massi. Täite materjalina on kasutuses kõrge tihedusega West Sytem 404 filler [15].

Selle täite aine probleemiks on see, et selle peamised koostis osad on elektrit mitte juhtivad kaltsiumi ja silikaadi mineraalid.

Saadaval oli ka metalli pulber, printimiseks kasutatav alumiiniumpulber, mis ei ole otseselt mõeldud paksendamise eesmärgil. Lisaks metalli ja mineraal pulbrile on alternatiiviks süsinik puru [16]. Enne süsinikpuru katsetamist otsustati katsetada olemas olevat metalli pulbrit.

Esimeseks hüpoteesiks on: alumiinium pulber vaigupaksendajana vähendab vaigus ka elektritakistust. Metall pulbri segamisel vaigu sisse tekkis probleeme soovitud viskoossuse saavutamise ja pulbrit pidi panema pea kaks korda rohkem kui muidu spetsiaalselt paksendavat mineraal materjali. Vaigu segu muutus väga raskeks.

Alumiiniumpulbri liigse massi tõttu võeti võrdlusesse vaskkanga ühendamine puksidega. Teiseks hüpoteesiks on: vaskkangas tagab piisava ühenduse läbi pukside märjalt lamineerimise puhul.

Märjalt lamineerimisel erineb laminaat väikesel määral prepreg laminaadist, täpsemalt märjalt lamineerides ei ole vaja kasutada lisavaiku kuna saab doseerida laminaati ise soovitud koguses. Tahtes jäljendada täpselt akukasti tootmist siis toodeti laminaati kolmes etapis. Esmalt lamineeriti süsiniku kaks kihti klaasile asetades kärgruutu selle peale ning kõrvale lamineeriti pealmise poole süsiniku osad. Hiljem liimiti vaiguga pealmise poole süsinik kärjepeale ning jäeti vaakumsurve alla kõvenema.

Laminaadiks otsustati teha süsiniku kihtide arvult sama, mis prepreg katselaminaadid. Vaheks on lisavaigu puudumine (vaata tabeli 5.3) , kuna kasutatakse voolavat vaiku.

Table 5.3 Märjalt lamineeritud katsekehade laminaat

Kihi Nr.	Vaskkangas pukside vahel	Tavaline
1.	<i>Twill 0</i>	<i>Twill 0</i>
2.	<i>Twill 45</i>	<i>Twill 45</i>
3.	Vaskkangas	Kärg ja Puks
4.	Kärg ja Puks	<i>Twill 45</i>
5.	<i>Twill 45</i>	<i>Twill 0</i>
6.	<i>Twill 0</i>	

Esimeseks katsekehaks on tavaline laminaat, mida võrreldakse erinevate elektrilist takistus madaltavate teguritega. Teiseks katsekehaks on tavaline laminaat, kuid

vaskvõrk on ühendatud pukside külge laminaadi sees. Kolmandaks katsekehaks on tavaline laminaat, kuid täitematerjalina on mineraali pulbri asemel kasutatud metallist printimispulbrit. Neljandaks katsekehaks on kolmas katsekeha ning veel ekstra lisatud vaskkangas mööda pukse arvestades, et see peaks kõige parema tulemuse andma.

5.3.2 Katsekehade mõõtmine

Katsekehadel ühendati M8 poldid koos seibide ja mutritega läbi puksi ava ning teostati mõõtmisi sama moodi nagu prepreg katsekehade puhul. Ühel pool on klamber ning teiselt poolt vajutad proovikuga vastu poldipead.

Mõõtmistulemused olid üllatavalt halvad, tabelis 5.4 on näha, et paljudel katsekehadel ei saanud isegi soovitud meetodil mõõtmisi teostada. Tuli kasutada multimeetri teist mõõtefunktsiooni. Tuli kasutada multimeetri 20 mA või 200 mA mõõtevoolu olenevalt takistusest.

Table 5.4 Märjalt lamineeritud katsekehade elektriline takistus.

Laminaadi kirjeldus	Takistus mΩ, 1A voolu korral	Takistus mΩ, 20; 200 mA voolu korral
Tavaline	>300	440
vaskkangas laminaadi sees	>300	550
Tavaline + alumiinium pulber	230	240
vaskkangas laminaadi sees + alumiinium pulber	>300	780

Samuti ei pidanud kumbki varem seatud hüpotees paika. Ainsaks põhjenduseks võib tuua, et epoksüvaik voolas pukside ja kanga vahele ning halvendas tulemusi. Samuti ei aidanud metall pulber takistust vähendada.

Otsustasin teha standard laminaadi katsekeha välise mõõtmise, kus esimese süsinik kihi peale on lamineeritud vaskkanga. Eemaldades üleliigse kihi vaiku vaskkangalt sai kinnitust põhjendus, et vaik on voolanud ühenduste vahele eelnevate katsekehade puhul. Läbi esimese vaskkanga kihi sai elektriseks takistuseks 16,6 mΩ 1 A mõõtevoolu korral (vaata joonist 5.5).

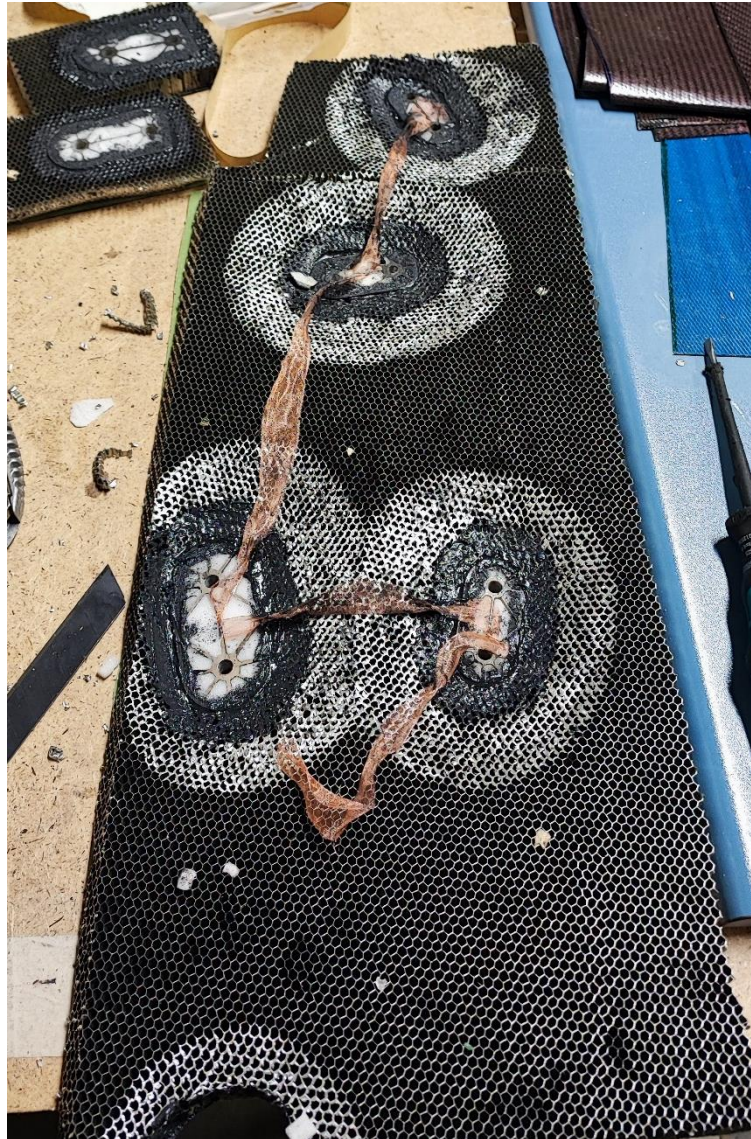


Joonis 5.5. Märjalt süsiniku peale lamineeritud esimese kihi mõõte tulemus

Soovides kinnitust ühemõtteliste tervete laminaatide näol, lamineeriti väike riba vaskkangast alumiinium pulbri katsekehale peale. Mõõtes uuesti standardsema katsekehalt poldi peadest saadi tulemuseks 17.4 mΩ.

6 DETAILIDE TULEMUSED

Kere tootmisel lähtuti kere katsekehade saadud vähimast takistusest. Kuid sellega osutus kerel palju tootmist raskendavaid probleeme. Kärgede sobitamisel kere vormi läks tihti vaskkangas katki ning väga palju kulus aega (päevi) pukside omavahel ühendamisele. Vaskkangaga ühendamine raskendas veel pasta lisamist insrtide ja kärgede vahele. Valmis kärjel jäeti üks vaskkanga ots lahti, et hiljem kere vormis sees see siduda teiste kärgedega (vaata joonist 6.1).



Joonis 6.1 valmis seotud alumiiniumkärge enne kerevormi sisestamist enne viimast süsiniku kihti

Kerevormi paigutades on takistas see normaalset eemalduskile panekut kärgedele, sest vaskkangas rippus mööda kere laiali (vaata joonist 6.2). Kui kile ei olnud hästi kärje peal siis võib jääda hingamiskangas pastakülge peale ahjus kivistumist. Suur oht oli ka kile puudumisel oli õrna vaskkanga takerdumine hingamiskangasse.

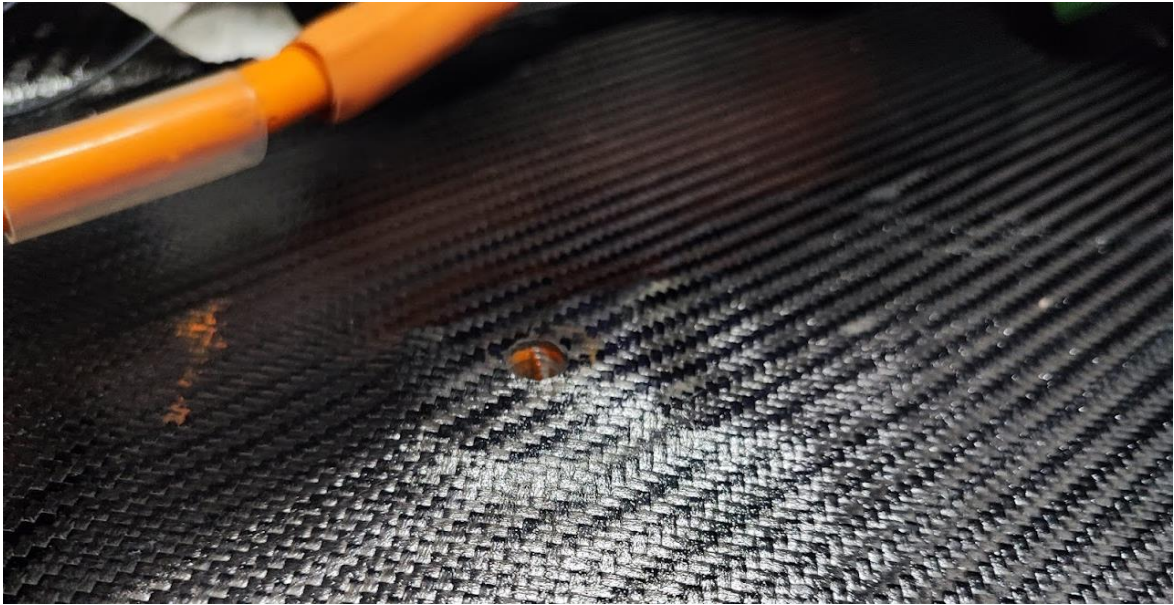


Joonis 6.2 Vaskkangas kerevormis ühendatud ja rippumas enne viimast süsiniku kihti

Pannes kõik kärjed vormi, saab teha esmase kontrolli. Kontrollida sai kõiki ühendusi enne sisemise süsinik kihi lamineerimist. Peale kontrolli läksid kärjed ahju, vormi poole pandud lisavaigu kihiga, et liimida see välimise süsinik kihi külge.

Peale ahjus käimist vaakumi all, eemaldati hingamisriie ja eralduskile ning hakati lamineerima sisemist kihti alustades lisavaigukihist. Tootmisel üritati vaskkangas jätta ilusti lamedalt kihtide alla, kuid paratamatult tekkis sõlmedesse kogumid, mis kajastuvad sisemisel pinnal.

Reljeefne pind pukside ümber ning olulistel pindadel nagu akukasti alune on väga ebasobilik. See ei toeta seibe täies ulatuses ning akukastil jättis suures osas õhku toetades väikse kumeruse peale, mis oli vaskkangast tekkinud (vaata joonist 6.3)



Joonis 6.3 Akukasti puksi juurde tekkinud vaskkangast tingitud reljeefne pind

Ebatasasused selliste tippude näol võivad tekitada suuri mehaanilisi pingeid seibi, akukasti laminaati või kere laminaati. Akukasti puhul, mis on vormeli kõige raskem komponent vormelis, peab seda igal juhul vältima. Lahenduseks on selle kühmu eemaldamine või lisa põhi akukastile.

Kühmu eemaldamisel tuleb tähele panna, et see kahjustab selles punktis laminaadi kihte, mis halvendab lokaalset tugevust ning võib tekitada probleeme võistluste tehnilises kontrollis.

Kuna kühmu eemaldamine on riskiallikas, siis otsustati lisada lisapõhi akukasti põhjale. Lisapõhja miinuseks on lisamass, kuid selle miinuse kaalub ülesse kaitse kere põhjalaminaadile korduvate aku sisse ja välja tõstmiste puhul.

Akukastil tootmisel pandi vaskkangas laminaadi pealmisele kihile ning selle tootmisega ei ilmunud probleeme.

7 AUTODE KERETAKISTUS VÕRDLUS

Lisaks takistuse vähendamisele ja maanduse projekteerimisele täidab lõputöö olulist rolli tudengivormeli meeskonnas dokumentatsioonina. Varasemalt pole võrreldud veteran masinaid ning tolle aja tootmisprotsesse keretakistuse vaatele.

Mõõtmisteks valitud autode kered on valmistatud peatükk 4 tootmismeetoditega. Kõikidel autodel on unikaalsed maanduslahendused, osad neist paremad ning osad halvemad, kuid võrrelda saab üldist maandusmeetodit ning on läbilõike kerede arengutest.

Mõõtmised on tehtud sarnaselt võistluste tehnilisekontrollile. Kui 1 A juures läks takistus üle 300 mΩ, siis vahetati multimeetrit mõõtefunktsiooni, et saada teada umbkaudne takistus.

Table 7.1 Kere maandustakistus FEST22, FEST21, FEST18, FEST17 autodel

koht	FEST22	FEST21	FEST18	FEST17
Parem auto pool	mõõteveool 1 A, mΩ	mõõteveool 1 A, mΩ	mõõteveool 1 A, mΩ	mõõteveool 1 A, mΩ
Peaturva kaar	101,3	237,5	41,2	150,2
akukasti kinnitus	112,4	292,2	-	-
alumine turvavöö	144,7	237,9	187,8	223,1
ülemine turvavöö	113,9	235,6	41,0	94,1
roolikinnitus esipaneelil	242,0	195,5	122,4	237,4
tagaseina	106,2	>300; 331	>300; 5,9 Ω	>300; 8,9 Ω
esimene ülemine tagumine õõts	130,1	237,3	74,6	209,7
esimene alumine tagumine	133,2	233,1	231,3	195,4
tagumine esimene ülemine	106,2	289,2	63,5	189,4
tagumine tagumine ülemine	105,1	252,4	66,4	221,0
Esiplaat	136,6	>300; 346	231,2	207,5
esimene stabilisaator	154,8	-	131,8	240,0
pedaalid	135,1	>300; 500	77,2	224,8
roolilati kinnitus	120,3	294,5	74,2	187,7

FEST17 kere on valmistatud märjalt lamineerimise meetodiga. Laminaadi vahematerjaliks on kasutatud vahtstruktuuri. Vaadates tabeli 7.1 siis FEST 17 on keskmiste tulemustega. Sellel ajal ei projekteeritud maanduslahendust kere sisse vaid kere kinnituspunktid on ühendatud omavahel kaablite ja kaabelkingadega (vaata joonist 7.1). Kaabelkingade lahendus on üldiselt lihtne, kuid massi poolest raske. Lisaks on kaablid väljaspool kere ning välistegurite poolt mõjutatavad. Suure vibratsiooni tõttu võivad ühendused ajapikku halvaks muutuda ning samas võivad inimesed ühendusi kogemata lõhkuda. See meetod ei ole eriti soovituslik kuna kestvussõidu ajal võib juhi vahetusel kaabel puruneda ning kui järelkontrollist läbi ei saa siis saab meeskond disklahvi. Kaabelkingade positiivne omadus on see, et need on kergesti vahetatavad, kui ühendus ei ole enam töökorras.



Joonis 7.1 FEST17 maandus kaabelkingadega roolilatikinnitus ja esimesed alumised õõtshoovad

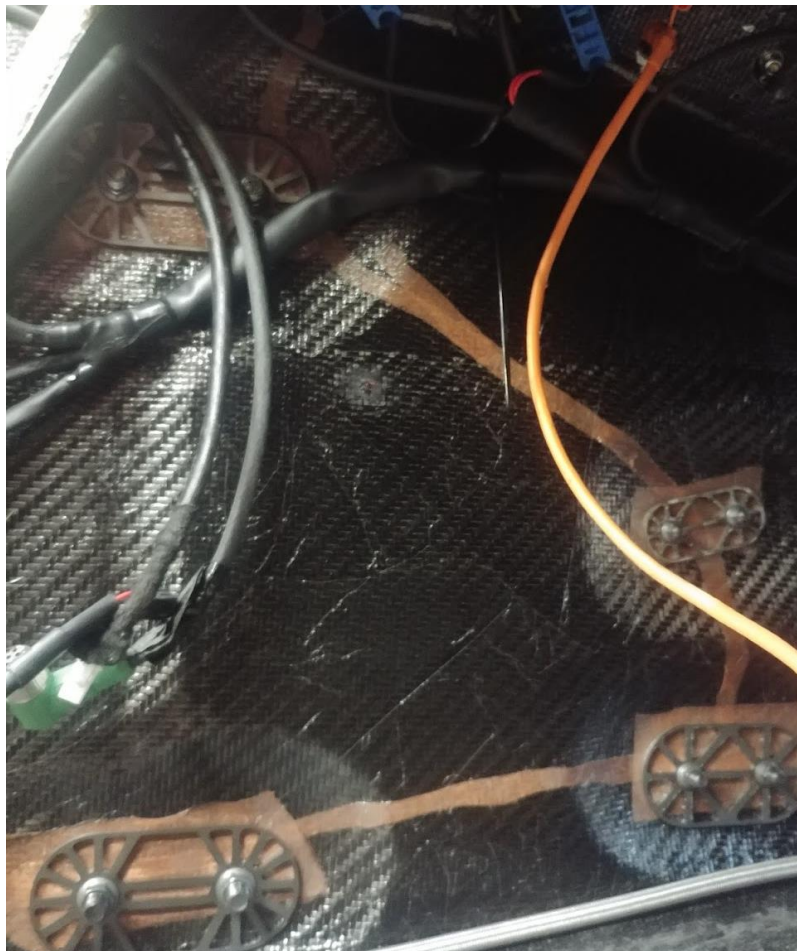
FEST18 on esimene kere, mis on toodetud prepreg-ist. Laminaadi vahematerjalina on kasutusel kuumakindel vaht. Keretakistus tulemuste poolest on see parim auto üldse. Maandus on viidud laminaadi sisse, kahjuks ei olnud piisavalt dokumenteeritud maanduslahendust, et tuua kindel järeldus, miks just FEST18 keretakistuse poolest nii hea on. Küsides tolle aja veteranide käest, võib kahjuks ainult spekuloida, et tootmise kvaliteet on parem, kui FEST22-el.

Pistiku ühenduse erinevuse saab eristada FEST18 ja FEST 22I mõõtes üle FEST22-I kaks täiesti erinevat kinnituspunkti . Mõõtes üle näiteks alumise turvavöö kinnituse ja ükskõik millise teise punkti sai tulemuseks ikka ligilähedale 100 mΩ.

FEST18 keretakistuse tulemused on väga head, kuid osad mõõtmistulemused on kordades suuremad kui muidu. Esikaitseplaat, alumine turvavöö, esimene alumine tagumine õõts on pea kolm korda suurema takistusega kui ülejäänud auto mõõtmispunktid. Hetke seisuga võib oletada, et halvad tulemused tulenevad tootmisest või ajalisest tegurist. FEST18 kere on pea viis aastat vana ja on kasutuses isesõitva vormelina.

FEST21 autol siiani kõige halvemad tulemused. Halbu takistus tulemusi võib lugeda tootmiskvaliteedi veaks, sest kere projekteerimisel unustati vaskkangast üldse panna. Materjalide poolest on FEST21-l lisaks alumiiniumkärjele ka elektrit mitte juhtiv nomex kärg. Kasutati ka teist prepreg kangast, mis oli paremate mehaaniliste omadustega kui varasemalt, sama kangast FEST22-le tarneraskuste tõttu ei kasutatud.

FEST21 maandust üritati parandada peale kere valmimist lamineerides vaskkanga kere sisepinnale lisavaigu tükkidega (vaata joonist 7.2). Kahjuks tekitas lisavaik liiga paksu epoksü kihi vaskkangale ning selle tõttu võisid tulemused halveneda. Tulemuste paremaks tegemises pidanuks lihvida kinnituspunktide alt vaskkangalt epoksükihti vähemaks või kohe lamineerima kerelaminaadi peale ilma lisavaiguta.



Joonis 7.2 FEST21 kere maandus lahendus

FEST 22 üldtulemused on üsna head. Tulemused on väga ühtlaselt 100 m Ω -150 m Ω piirkonnas, ainult roolikinnitus esipaneelil on kehv võrreldes ülejäänud kerega, 242 m Ω . Mõõtmis tulemus on reeglite piires . Nende tulemustega võib öelda, et projekteeritud lahendus töötab hästi. Kuna vaskkangas paikneb alumiiniumkärje peal siis sai tehtud ka kontroll mõõtmised avadest, kus on kärjed nähtaval ja mõõdetavad. Tulemused on ligilähedased kinnituspunktide tulemustele (vaata tabeli 7.2). Sellest võib järeldada, et

maandust on võimalik kerel viia ka läbi alumiiniumkärje, kui välja mõelda takistuse poolest parem kärgede vaheline ühendus ja kärje, puksi vaheline ühendus.

Tabel 7.2 Kärgede takistuse kontroll MP-maanduse pistikusse

lisa mõõtmise kärjest	mõõtevool 1 A, mΩ
nina hooldus ava	159
roolilati ava	134
külj jahutus ava	169

8 JÄRGMISE AASTA VORMELI MAANDUSE PROJEKTEERIMISE SOOVITUSED

Vormelis on tihti kiire ning paratamatult tehakse tootmisel ja projekteerimisel vigu, mis alles hiljem tulevad välja. Vigade vältimiseks on selles töös põhjalikult uuritud ja analüüsitud, keretakistust vähendavaid tegureid. Optimaalse keretakistuse ja keretootmise kvaliteedi tagamiseks, tuleb rohkem vaeva näha selle ellu viimisele.

FEST22 kere maandustakistus on hea, kuid väga palju tuli probleeme tootmisel ning tekkisid probleemid sisepinna kvaliteedis vaskkangast tingitult. Vältimaks sisepinna reljeefseid pindasi on mõttekas panna vaskkangas süsinik kihi peale. Tuleb tähele panna, et lisavaiku ei tohi lisada kanga panekul süsiniku külge, sest et see lisavaik voolab kanga kontaktide vahele. Vaskkangas tuleb küpsetada samas tsüklis kui viimast(sisemist) süsiniku kihti.

Vaskkangast pannes tuleb vältida monokokki avasi. Hea oleks tuua 4 erinevat vaskkanga riba mööda külgeinasi kere etteotsa. Kanga ühendamisel tuleks vältida sidumist pigem laotada kangas võimalikult siledalt üksteise peale põimides ühekihi teisest läbi(vaata joonist 8.1).



Joonis 8.1 Vaskkanga põimimine

Kui põimimine väga hästi ei tööta, siis peaks proovima jootmist. Jootmisel tuleks tähelepanu pöörata, et suur jootmise kuumus prepreg süsinikku ära ei rikuks.

Viies vaskkanga kõige peale (sisemisel kihile) saab laotada paremini lisavaigu kihti ning ka järgnevalt süsiniku kihte. See tõstab kere sisepinna kvaliteeti. Pärast kere tootmist on mõttekas mõõta üle kõik kinnitus punktid, kontrollimaks keretakistuse vastavust.

Keretakistus peaks autol olema piisavalt hea, et tehnilist kontrolli läbida, kui aga tahta natukene paremat tulemust siis on hea lisada vaskkangast. Pannes vaskkanga seibi alla (vaata joonist 8.2) parandab see kontakttakistust antud olukorras umbes 20 protsenti (vaata tabeli 8.1).

Table 8.1 Lisa vaskkanga võrdlus tabel

mõõtevool 1 A, Tulemused mΩ	Vaskkangas laminaadi peal	vakkangas laminaadi peal+ lisa kangas seibi all
preg	14,0	11,9
märjalt	25,9	18,0



Joonis 8.2 Vaskkangas seibi all

Selle meetodiga on hea nipp ka lamineerida pool vaskkangast laminaadi sisse ja jätta pool välja. Selleks tuleb üks kanga riba osa, mis jääb laminaadist välja, tuua eemalduskile peale. Väiksemate detailide puhul on seda lihtne teha, tuues laminaadi kõrvale, kuid kerel on võimalik ka seda kasutada tehes lõike eemalduskillesse ning põimida vaskkangast sellest välja (vaata joonist 8.3)



Joonis 8.3 Vaskkanga väljatoomist laminaadi keskel selgitav joonis

9 KOKKUVÕTE

Lõputöö eesmärgiks oli projekteerida tudengivormeli FEST22 kerele maanduslahendus vastavalt tudengivormeli reeglitele. Põhiprobleem sai alguse FEST21 autolt, kus võistluste eel pidi palju vaeva nägema, et auto tehnilisekontrolli läbiks. Probleemi vältimiseks uuel vormelil otsustati kohe projekteerida maandustakistust vähendavad meetmed kere sisse.

Projekteerimine algas FEST22 põhilistelt kasutatavate materjalide uurimisest. Sellest saab ülevaate elektrit juhtivatest materjalidest ja mitte juhtivatest materjalidest. Samuti otsustab materjali valik ka tootmisprotsessi. Materjalide valik on tehtud peamiselt mehaaniliste nõuete kohaselt.

Lisaks mehaaniliste nõuete täitmisele peab arvestama elektrilisi nõudeid, mille määravad tudengivormeli võistlussarja reeglid. Reeglitest tõin välja põhilised eesmärgid, millele peab antud projekteerimine vastama.

Peale võistluste reeglinõudeid ja materjalide valiku selgitatakse tootmisprotsessi mõjutavad tootmistegurid. Tootmismeetoditest lähtuvalt saab teada, kuidas mingi tootmistegur võib maandustulemust mõjutada ja lähtuvalt meetoditest saab ehitada sisse takistust vähendavad tegurid.

Jälgides peamiselt toodetavust otsustati teha katsekehad, mis võrdlevad tootmist ja erinevaid maandustakistust vähendavaid tegureid. Katsekehade tulemustest tuli välja, et parimaid (vähimaid) tulemusi andis katsekeha, kus on vaskkangas seotud ümber alumiinium puksi ning lisaks on pandud poldi ja puksi vahele tükike vaskkangast parema kontakti loomiseks.

Lähtudes parimatest tulemustest toodeti ka FEST22 kere, dokumenteerides kogu protsessi. Tootmise käigus toon välja varem arvestamata tegurid, mis mõjutasid otseselt kere tootmist. Üks neist oli sidumissõlmede tekitatud ebaühtlane sisepind kriitilistes kere osades.

Pärast kere valmimist võrreldi mõõtetulemusi eelnevalt ehitatud vormelitega. Kere üldtulemustest sai kinnitust seatud eesmärkide täitmine, kuid võrreldes vanemaid autosid, tuli välja, et FEST22 ei ole kõige parem auto kere takistuse poolest. Analüüsidest võrdlusi sai selgeks, et põhiliseks probleemiks tootmiskvaliteet, millega on vaja rohkem vaeva näha.

Peatükis 8 tuuakse välja häid järeldusi ja soovitusi, mida peaks jälgima järgmise aasta auto projekteerimisel. Pandi kirja tootmismugavusest tulenevad meetodid, mis tõstaksid üldist kere tootmiskvaliteeti ning meetodid, nipid, mida kasutada järgneval tootmisel.

10 KASUTATUD KIRJANDUS

- [1] R. Läänemets, „AKUKASTI PROJEKTEERIMINE FORMULA STUDENT KLASSI VORMELAUTOLE FEST19,“ 2019. [Võrgumaterjal].
- [2] C. R. Developments. [Võrgumaterjal]. Available: <https://compresdev.co.uk/CRD%20The%20Use%20and%20Application%20of%20Epoxy%20Resin%20vs%20Vinylester%20vs%20Polyester.pdf>. [Kasutatud 22 Aprill 2022].
- [3] Q. Zhao, „Review on the Electrical Resistance/Conductivity of Carbon Fiber Reinforced Polymer,“ *Nondestructive Testing and Imaging Based on Electromagnetic Fields and Waves*, 2019.
- [4] P. Anne Marie Helmenstine, „Table of Electrical Resistivity and Conductivity,“ ThoughtCo., 26 Juuni 2019. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.thoughtco.com/table-of-electrical-resistivity-conductivity-608499>. [Kasutatud 15 Mai 2022].
- [5] B. Indstech, „Fine Copper Mesh,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.copper-mesh.com/coppermesh/fine-copper-mesh.html>. [Kasutatud 3 Mai 2022].
- [6] C. World, „Core materials: The Basics,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.compositesworld.com/articles/honeycomb-cores-the-basics>. [Kasutatud 3 Mai 2022].
- [7] FSG, „Formula Student Rules 2022, Version 1.0,“ 1 Jaanuar 2022. [Võrgumaterjal]. Available: https://www.formulastudent.de/fileadmin/user_upload/all/2022/rules/FS-Rules_2022_v1.0.pdf.
- [8] J. Eamets, „Tudengivormeli FEST16 Monokokk Kere Projekteerimine Magistritöö,“ Tallinn, 2016.
- [9] „Gurit Datasheets,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.gurit.com/-/media/Gurit/Datasheets/tprime-1301.pdf>. [Kasutatud 02 Veebruar 2022].
- [10] W. System, „Vacuum Bagging Techniques,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.westsystem.com/wp-content/uploads/VacuumBag-7th-Ed.pdf>. [Kasutatud 24 Aprill 2022].
- [11] Electrical4U, „Measurement of Resistance,“ 27 Oktoober 2020. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.electrical4u.com/measurement-of-resistance/>. [Kasutatud 3 Mai 2022].

- [12] „All About Circuits,” [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.allaboutcircuits.com/textbook/direct-current/chpt-8/kelvin-resistance-measurement/>. [Kasutatud 24 Aprill 2022].
- [13] G. Instruments, „METRAHIT 27I,” GMC , [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.gmc-instruments.de/en/products/metrahit-27i>. [Kasutatud 23 Aprill 2022].
- [14] Dexmat, „Fabric Weave Patterns For Textiles And Composites,” [Võrgumaterjal]. Available: <https://blog.dexmat.com/cnt-fabric-weave-patterns>. [Kasutatud 24 Aprill 2022].
- [15] W. System, „404 High Density Filler,” [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.westsystem.com/404-high-density/>. [Kasutatud 25 Aprill 2022].
- [16] C. Eesti, „komposiit materjalid, C-puru,” [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.composite.ee/komposiitmaterjalid/>. [Kasutatud 25 Aprill 2022].