



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL

INSENERITEADUSKOND

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

AKUKASTI PROJEKTEERIMINE FORMULA STUDENT KLASSI VORMELAUTOLE FEST19

DEVELOPMENT OF ACCUMULATOR CONTAINER FOR FORMULA STUDENT
CLASS FORMULA CAR FEST19

BAKALAUREUSETÖÖ

Üliõpilane:
/Rait Läänemets/

Üliõpilaskood: 164139

Juhendaja:
/Leo Teder, assistent/

Tallinn, 2019

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud. Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

“.....” 201.....

Autor:

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

“.....” 201.....

Juhendaja:

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

“.....”201... .

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

Üliõpilane: Rait Läänemets

Õppekava, peeriala: MAHB02/13, Mehhatroonika

Juhendaja(d):(amet, nimi, telefon)

Lõputöö teema:

(eesti keeles) „Akukasti projekteerimine Formula Student klassi vormelautole FEST19“

(inglise keeles) „Development of accumulator container for Formula Student class formula car
FEST19“

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Aku moodulite piisava jahutuse tagamine
2. Kergeima konstruktsiooni leidmine olles endiselt kooskõlas tulekindlusstandarditega
3. FSG 2019 reeglitele vastavus

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Projekteerimine ja disain	01.12.2018
2.	Katsetused ja tootmine	01.03.2019
3.	Komplekteerimine	01.04.2019

Töö keel: eesti

Üliõpilane: “.....”2019a
/allkiri/

Juhendaja: “.....”2019a
/allkiri

Kinnise kaitsmise ja/või avalikustamise piirangu tingimused formuleeritakse pöördel

SISUKORD

EESSÕNA.....	6
SISSEJUHATUS	7
1. FEST19 akukasti disainiparameetrite seadmine.....	9
1.1 FEST18 akukasti analüüs	9
1.2 FEST19 akukasti disainiparameetrid	11
2. Projekteerimine.....	12
2.1 Akukasti geometria	12
2.2 Jahutusüsteemi projekteerimine	14
2.2.1 CFD analüüs jahutussüsteemile	15
3. Materjalide ja tootmistehnoloogia valik.....	16
3.1 Materjali valikut piiravate reeglite analüüs	16
3.2 Katsetused aramiidkangaga	17
3.3 Tootmistehnoloogia valik.....	18
3.4 UL94 V-0 katsetused	18
4. Tugevusanalüüsid ja arvutused	21
4.1 Akukasti analüüs ja katsekehad	21
4.2 Põhja kinnitusankrute projekteerimine	25
4.3 Tappide tugevusarvutused	27
4.4 Süsinikkiu laminaatide elektrijuhtivus	28
5. Tootmine	31
KOKKUVÕTE	36
SUMMARY	37
KASUTATUD KIRJANDUS.....	38
LISAD	40
Lisa 1 Brenntag BCA FR-001-LV	40

Lisa 2 Jost Chemicals B-25 Sealer.....	41
GRAAFILINE OSA.....	42

EESSÕNA

Käesolev lõputöö on valminud Tallinna Tehnikaülikooli ja Tallinna Tehnikakõrgkooli ühisprojekti Tudengivormel raames. Teema valiku tegi töö autor iseseisvalt, lähtudes teema olulisusest meeskonnale ning isiklikust huvist. Tehtud töö tugineb meeskonna aastatepikkusele kogemusele elektrivormelite ehituses ning sellega kaasnevatele andmetele. Meeskonnasiseselt peeti nõu akuhaldussüsteemi-, jahutus- ning komposiidiinseneridega.

Soovin avaldada tänu kõikidele FS Team Tallinna tegevliikmetele ja veteranidele, eriti Kristjan Kõutsule, Magnus Loosile, Kalev Karpile ja Kaarel Haavajõe. Nemad aitasid nii teadmiste, kui ka abikätega.

SISSEJUHATUS

Formula Student on bakalaureuse- ja magistritudengitele suunatud ülemaailmne tootearendusvõistlus, mille eesmärk on kasvatada noorinsenere, andes neile praktiline väljund koolis õpitule. Võistlusest võtab ülemaailmselt osa üle 700 tudengitiimi, kes võistlevad kas sisepõlemismootoriga, elektrimootoriga või isesõitva vormeliga [1]. Meeskondade loodud vormelautosid hinnatakse kolmel staatilisel alal ning neljal dünaamilisel alal. Staatiliste alade hulka kuuluvad disainikaitsmine, kuluaruanne ning äriplaani kaitsmine. Staatilistel aladel antakse kohtunikele, kes on valdavalt autotööstuse eksperdid, ülevaade meeskonna suutlikkusest teha otsuseid nii üldise kontseptsiooni osas kui ka tootmistehnoloogiate valikul. Hinnatakse põhjalikult ka arusaamist eelarve planeerimisest ja projekti elluviimisest. Dünaamilistel aladel pannakse auto proovile kiirenduses, kurvisuutlikkuses ning rajasõidus.

Formula Student Team Tallinn asutati 2006. aastal, mil alustati esimese sisepõlemismootoriga vormeli projekteerimist. Aastal 2008 võisteldi esimest korda komplektse vormeliga FEST08. Meeskond kannab endaga kaasas Eesti pikaajset vormeliehituspärandit, mille lõi Tallinna Autode Remondi Katsetehas vahemikus 1958-2000, mil ehitati ligikaudu 1300 vormelit Formula Estonia [2]. FS Team Tallinna poolt ehitatavad vormelid kannavad lühendatud kujul samuti nime Formula Estonia ehk FEST. Seniseni on erinevate aastakäikude ajal valminud viis sisepõlemismootoriga vormelit, kuus elektrivormelit ning käesoleval hooajal on valmimas seitsmes elektrivormel ning esimene isesõitev võistlusauto. FS Team Tallinn on olnud sarjas edukas nii sisepõlemismootoriga vormelite ehituses, mil tipneti maailma edetabeli teise kohaga, kui ka elektrivormelite ehituses, kus paiknetakse maailma esikümnes [3].

Antud lõputöö käsitleb akukasti projekteerimist ning tootmist elektrivormelile FEST19, mille projekteerimise ja ehitamisega tegeleb ligikaudu 60 tudengit Tallinna Tehnikaülikoolist ja Tallinna Tehnikakõrgkoolist. Lõputöö teema on meeskonnale oluline, kuna elektrivormelit ehitades on akukasti olemasolu vältimatu. Aastast aastasse muutuvad kogu vormeli disaini piiravad võimalused, tehnoloogiad kui ka reeglid, mistõttu toimub pidev parendamine igas valdkonnas. Meeskond lähtub vormeli ehitusel FSG (Formula Student Germany) reeglitest [4]. Kuna akukast on kõige raskem detail auto küljes ning seetõttu omab üht suurimat staatilist mõju auto sõidudünaamikale, tuleb leida igal aastal auto üldkontseptsioonile sobivaim lahendus. Käesoleva hooaja eesmärkideks oli langetada akukasti massi, parendada kasutusmugavust ja moodulite jahutust.

Lõputöö tugineb eelmiste aastate lahendustele, paralleelselt arenduses olevale akuelementide konfiguratsioonile ning meeskonna aastate pikkusele kogemusele komposiidivaldkonnas. Projekteerimiseks on kasutatud CATIA V5R21 ja tugevusanalüüsiks ANSYS 2019R1 tarkvara.

Materjalikatsetused toimusid Tallinna Tehnikaülikooli laborites. Katsekehade ja lõpp-produkti tootmine toimub Tallinna Tehnikaülikoolis Tudengivormeli ruumides.

1. FEST19 akukasti disainiparameetrite seadmine

Tervikliku akupaki projekteerimine on äärmiselt mahukas ning nõudlik protsess, mistõttu loodi neljaliikmeline tööühm, mille iga liige vastutab erinevate ülesannete eest. Ülesanded jagunesid järgmiselt:

- Akuelemendi valik ja akuhaldussüsteem
- Mooduli ja akukasti mehaanika
- Jahutusanalüüs
- Elektroonikasektsiooni paigutus

Iga valdkonna vastutav isik sooritas valdkonda puudutava analüüsi eelmistest lahendustest või uutest ideedest. Tööühma omavahelisel koostööl oli pärast esialgseid analüüse võimalik seada üldised disainiparameetrid tervikule.

1.1 FEST18 akukasti analüüs

Enne FEST19 akukasti projekteerimisega alguse tegemist analüüsiti põhjalikult FEST18 akukasti, kuna akuelementide konfiguratsioon on ka uuel autol sarnane (Sele 1).



Sele 1 FEST18 akukast

FEST18 akukast on toodetud süsinikkiust. Süsinikkiud on hea valik oma väga hea eritugevuse tõttu. Laminaadis kasutati täitematerjalina Rohacell S PMI (polümetakrülimiid) vahtu. Klaasile märglamineeritud paneelidest lõigati vesilõikuses välja akukasti seinad, mis omavahel istuvad kokku tappidega ning on kokku liimitud. Selline tootmismeetod on lihtne ning vähekulukas, kuna ei vaja vorme. Ainus vormiga toodetud detail selle lahenduse juures on kaas, mille vorm toodeti niiskuskindlast vineerist. FEST18 akukast on senistest lahendustest kergeim, kaaludes 4,2kg, ja mõõtmetelt väikseim.

Eelmisel hooajal oli kestvussõitudes suurimaks piiranguks akuelementide temperatuur, mis ei tohi reeglite kohaselt ületada 60 °C. Hooaja jooksul oli märgata, et temperatuuri lubatud piirides hoidmiseks peame auto võimsust piirama. Võimsust piirates langevad ka ringiajad. Seetõttu sai eesmärgiks elementide ühendusklemmide jahutuse parendamine. FEST18 akupaki elektroonikasektsioonis on kaks võrega kaetud ava, kust tuleb jahutuseks vajalik õhk sisse. Õhku elektroonikasektsioonis edasi moodulitesse ei juhita. Akukasti taga on kolm ventilaatorit, mis imevad õhu elektroonikasektsioonist läbi moodulite. Sellise lahendusega takistavad ka mooduleid ühendavad pistikud oluliselt õhu jõudmist jahutust vajavate klemmideni (Sele 2).



Sele 2 Õhuvoolu piiravad detailid akukastis

Akukasti kaas kinnitub külgseinte külge horisontaalselt kinnitatud poltidega. Kaane ja külgseina liitepinna vahelt võib akukasti sattuda auto jahutussüsteemi või kere lekke puhul vesi. Ka elektroonikasektsiooni veekindlus võiks olla paremini lahendatud.

Kuna FEST18 akukast käib autost sisse-välja läbi kokpiti, lisati küljeseintele tõstmissilmused juhuks, kui kasti pole võimalik käsitsi välja tõsta ja peab kasutama rihmasid. Hooaja jooksul kasutati rihmasid minimaalselt.

Tabel 1 FEST18 akukasti analüüsi järeldused

Kitsaskohad	Tugevused
Tõstmismugavus	Väikesed mõõtmed
Jahutuse lahendus	Lihne tootmismeetod
Veekindlus	Mass

1.2 FEST19 akukasti disainiparameetrid

FEST18 akulementide koguenergia on 6,5 kWh. Eelmise hooaja testi- ja võistlusperioodi jooksul ilmnas, et elemendid kaotavad rajakoormusel hooaja viimaseks võistluseks ligikaudu 350 Wh energiat. Seetõttu otsustati FEST19 aku koguenergiat suurendada elementide lisamisega, et oleks võimalik kõikidel võistlustel kasutada maksimaalset võimsust. Lisaenergiaga saab akut kasutada ka 2019/2020 hooajal, mil ehitatakse auto ümber isesõitvaks. Lähtudes akuhaldussüsteemi eest vastutava elektroonikameeskonna liikme Kristjan Kõutsu arvutustest, on sobilik akupaki koguenergia 7,2 kWh. Lisades 0,7 kWh, lisandus elementide kogumassile 2 kg. Seega seati eesmärk optimeerida veelgi akukasti massi, et tasa teha elementide poolt tekkinud lisamass.

Piisava jahutuse tagamiseks elementide klemmidele seati eesmärgiks disainida moodul ja akukast täielikus kooskõlas, et mõlema disainielemendid töötaksid koos minimaalse õhuvoolu takistuse nimel.

Elektroonikasektsiooni paigutuse eesmärgid kooskõlastati samuti, et ka seal jahutust vajavad detailid leiaksid endale õige koha, seejuures takistamata elementidele jõudvat õhuvoolu. Samuti seati eesmärgiks ruumikasutuse ning seeläbi ka hooldusmugavuse parendamine.

Seega määrati akukasti mehaanika eesmärkideks:

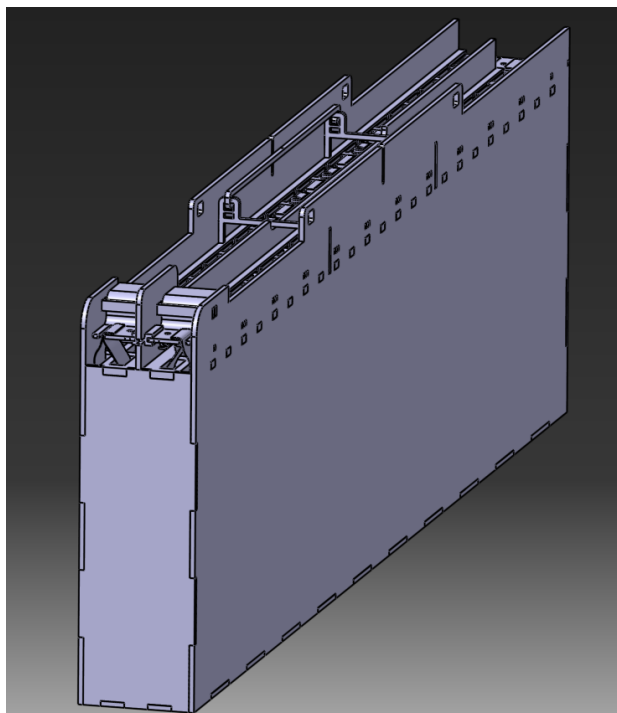
- Tasa teha elementide poolt lisanduv mass
- Jahutuse parendamine akuelementide klemmidel
- Kasutusmugavuse ja turvalisuse tagamine

2. Projekteerimine

2.1 Akukasti geomeetria

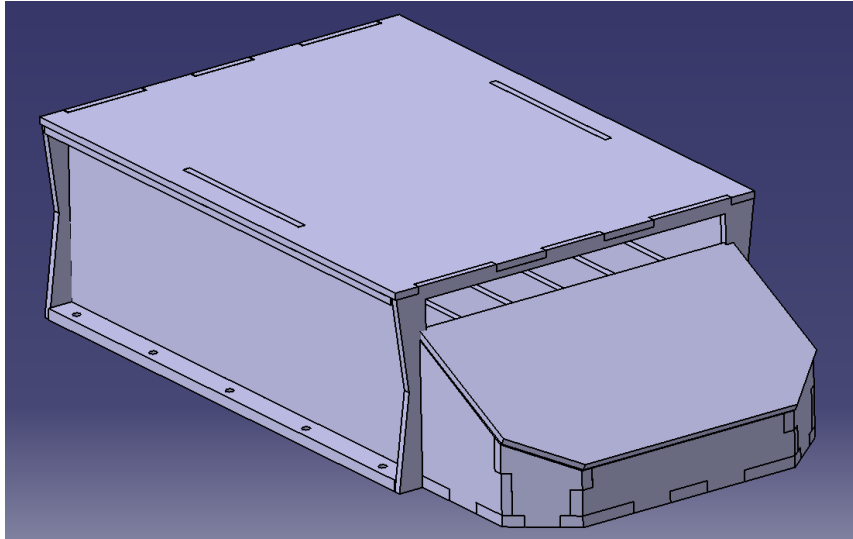
Akukasti geomeetria projekteerimise aluseks on akuelemente siduva mooduli mõõtmed. Meeles tuleb ka pidada elektroonika komponentide paigutamisele sobiva ruumi jätmisele elektroonikasektsioonis. Seetõttu osales töö autor nii mooduli, kui ka elektroonika komponentide paigutuse projekteerimises.

Mooduli seinad on valmistatud 2 mm paksusest PP (polüpropüleen) plastikust, mille tugevus valideeriti programmis ANSYS 19.2 teise meeskonnaliikme poolt. Elementide mõõtude järgi projekteerides kujunes ühe mooduli laiuseks 46 mm, pikkuseks 514 mm ning kõrguseks 163,5 mm (Sele 3).



Sele 3 FEST19 akumoodul

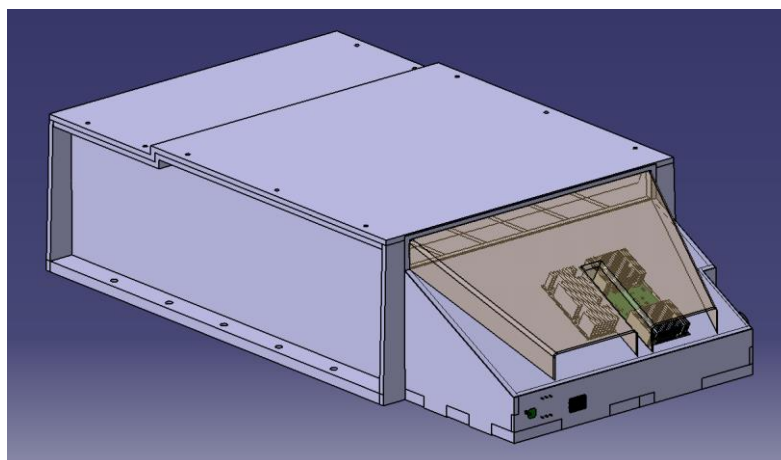
Kuna akukast käib autost sisse-välja läbi kokpiti, siis oli sarnaselt eelmise aasta lahendusele asetada akukasti juhtelektroonika akukasti ette. Selline paigutus võimaldab akukasti mugavalt hooldada ja katsetada eemaldades vaid vaheseina. Et lahendada veekindluse probleem, sai akukasti kaane ja vertikaalsete välisseinade ühendus viidud horisontaalseks. See muudab ühtlasi ka akukasti tõstmise oluliselt mugavamaks ja eemaldab tõstesilmuste vajaduse. Esialgsete elektroonikasektsioonis paiknevate trükkplaatide ning moodulite mõõtude abil oli võimalik luua esialgne akukasti geomeetria (Sele 4).



Sele 4 FEST19 akukasti esialgne geomeetria

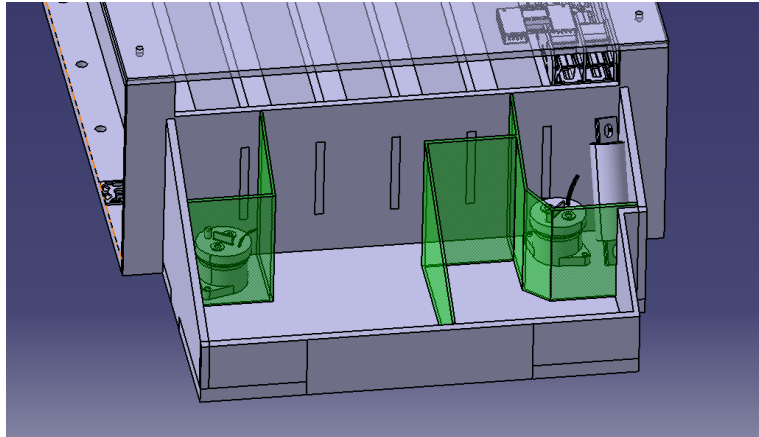
Geomeetria edasiarendamisel jäeti moodulitele varu 2 mm. See vähendab riski, et tootmistolerantsidest tulenevalt moodulid akukasti ära ei mahu. Paneele ühendavaid tappe muudeti, et tapid oleks võrdsel kaugusel nii laminaadi servast, kui ka järgmisest tapist. See muudatus viidi sisse, et muuta hilisemalt toimuvaid tugevusarvutusi lihtsamaks. Ka põhja kinnituspunktid viidi võrdsetele kaugustele laminaadi servadest. Et tagada õhuvool moodulitele, projekteeriti elektroonikasektsiooni kaane peale jahutuskanal, mida veel hiljem vastavalt CFD analüüsile muudeti (vt Sele 5).

Kuna kogu auto üldiseks eesmärgiks oli kõikide võimalike massikeskmete allapoole toomine, selgus projekteerimise hilisemas faasis, et akukasti kohal paikneva mootorite kontrolleri alla poole toomisele jääb akukasti tagumine ots ette. Seetõttu oli tarvis kaanele sisse teha aste. Kaane kinnitus külgeinte külge otsutati lahendada poltliidetega. Muudeti ka elektroonikasektsiooni piiravaid seinu, et sees paiknevad komponendid paremini ära mahuks (Sele 5).



Sele 5 FEST19 akukasti lõplik geomeetria

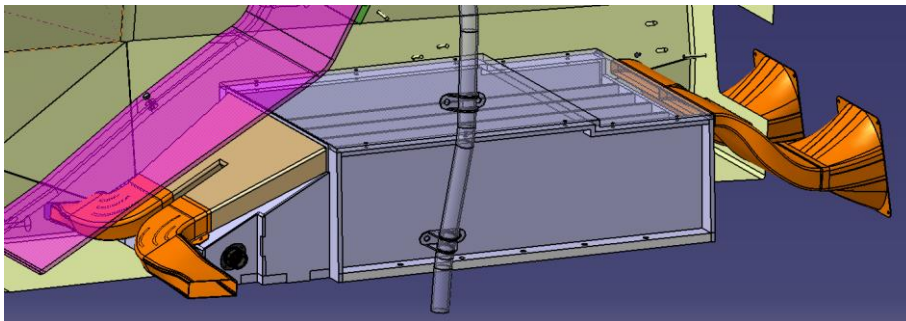
Uus geomeetria ei ole täielikult toodetav klaasile lamineeritud paneelidest. Mõlemad välimised külgseinad ja akukasti kaas vajavad vormi. Samuti vajavad vormi elektroonikasektsiooni vaheseinad ja kaane jahutuskanal (vt. Sele 5 ja Sele 6).



Sele 6 Elektroonikasektsiooni vaheseinad

2.2 Jahutusüsteemi projekteerimine

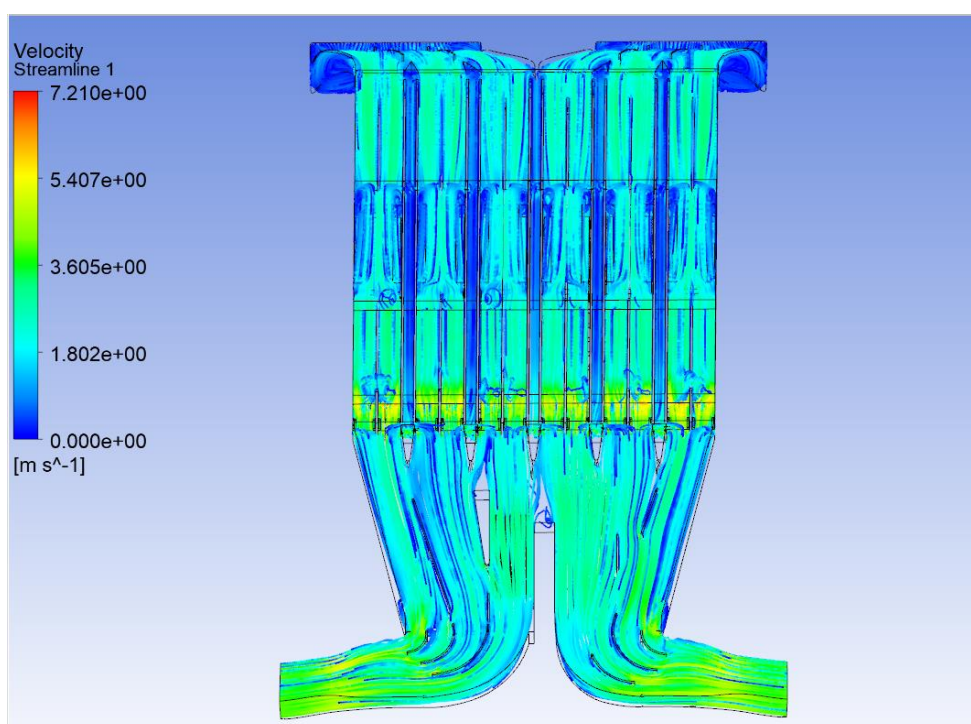
Selleks, et täita FEST19 akukasti üks prioriteetseid eesmärke, piisavat jahutust klemmidel, oli tarvilik projekteerida õhku juhtivad kanalid. Kuna FS Team Tallinnal on ligipääs TalTechis paiknevale laserpaagutusseadmele, otsustati kanalid teha prinditavad. See tähendas, et on võimalik luua mis tahes kujuga kanalid. Ainsaks piiranguks ostutus masina tööala, mis on 190 x 230 x 315 mm [5]. Idee oli luua akukasti taha kere sisse statsionaarsed kanalid. Akukasti autosse paigutades ühendatakse see kanaliga istuga. Eesmise osa kanalid on eemaldatavad, et võimaldada akukasti hooldust. Esimesed kanalid ühenduvad läbi kere väljastpoolt õhku tõmbavate kanalitega. Tagumiste kanalite külge kinnituvad ventilaatorid, mis imevad õhu läbi akukasti. Et elektroonikasektsioonis paiknev DC-DC muundur samuti piisavalt jahutusõhku saaks, paigutati see elektroonikasektsiooni kaane peal paiknevasse kanalisse.



Sele 7 Akukasti jahutuskanalid (oranž)

2.2.1 CFD analüüs jahutussüsteemile

Ühtlase õhuvoolu tagamiseks oli tarvilik teha akukasti jahutuskanalites liikuvale õhule CFD (*computational fluid dynamics*) analüüs. Analüüs sooritati Konrad Ilustrummi poolt programmis ANSYS 19.2, kasutades moodulit Fluent. Esialgne analüüs ilma õhusuunajateta näitas, et õhuvool ei ole piisavalt ühtlane ning vaja oleks lisada vaheseinu. Vaheseinadega mängides jõuti ka soovitud tulemuseni, ehk iga moodul saab võrdse koguse õhuvoolu (Sele 8). Õhusuunajad otsustati toota süsinikust. Kuna ajanappuse tõttu ei jõutud korralikku termoanalüüsi teha, otsustati keskenduda võimalikult suure ja ühtlase õhuvoolu tagamisele. Selleks modifitseeriti korduvalt ka 3D prinditavaid jahutuskanaleid.



Sele 8 Akukasti õhuvool

3. Materjalide ja tootmistehnoloogia valik

Paralleelselt 3D modelleerimisega sooritati materjalikatsetusi ja suheldi materjali tarnijatega, et õiged vahendid oleksid õigel ajal olemas. Selleks, et leida võimalusi veel kergema akukasti ehitamiseks, tuli põhjalikult üle vaadata eelmise aasta materjalid ja tugevusarvutused. Samas peab alati silmas pidama võistlussarja reeglistikku, mis seab materjalivalikule teatud piirangud. Komposiitmaterjalist akukastis on varasemalt kasutatud armatuurina kas põimitud või ühesuunalist süsinikkangast.

3.1 Materjali valikut piiravate reeglite analüüs

Reegleid, mis akukasti materjalide valikut piiravad on palju, enamus käivad terase ja alumiiniumi kasutamise kohta. Meie disaini eelduseks on asjaolu, et akukast valmistatakse komposiitmaterjalidest. Allpool on välja toodud vaid need FSG reeglid mis mõjutavad meie disaini [4].

EV 5.4.7 Iga akusegment peab olema elektriliselt isoleeritud, kasutades sobivat ja tulekindlat materjali segmentide vahel ja segmentide peal, et vältida kaarleegi tekkimist segmentide vahelisest kontaktist või tööriistade pillamisest akukasti hoolduse ajal. Õhku ei peeta sel puhul sobivaks isolatsioonimaterjaliks.

EV 5.5.3 Kõik akukasti materjalid peavad olema tulekindlad, ehk vastama tulekindlusstandardile UL94 V-0 või FAR 25.853(a)(1)(i).

EV 5.5.5 Komposiitmaterjalidest akukastid peavad täitma järgmisi nõudeid:

- Perimeetri nihketugevuse ja kolme punkti katsetest saadud infot peab kasutama, et tõestada piisav tugevus.
- Iga kinnituspunkt vajab minimaalselt 2 mm paksu terasest seibi. Teisi materjale võib kasutada kui piisav tugevus on tõestatud.

Nagu selgub reeglitest, peab akukasti sisemus olema elektriliselt isoleeritud. Kuna süsinikkiud on elektrijuht, peaks seinad katma isoleeriva materjaliga. Varasemalt on selle jaoks kasutatud Nomex paberit [6]. Pindade katmine selle materjaliga on tüütu ja keeruline, kuna selle nakkumine liimiga on halb. Alternatiivina tekkis idee teha kogu akukast aramiidkangast. See tähendaks tootmise lihtsamaks muutumist, kuna materjal ei juhi elektrit ja sellest tulenevalt ei peaks hiljem seintele eraldi lisama isoleerivat materjali.

Tabel 2 FEST18 akukasti laminaadid

Põhja laminaat	TW 0/90; UD 0; TW 45/45; Rohacell S 10mm; TW 45/45; UD 0; TW 0/90
Vertikaalseinad + kaas	TW 0/90; UD 0; TW 45/45; Rohacell S 5mm; TW 45/45; UD 0; TW 0/90

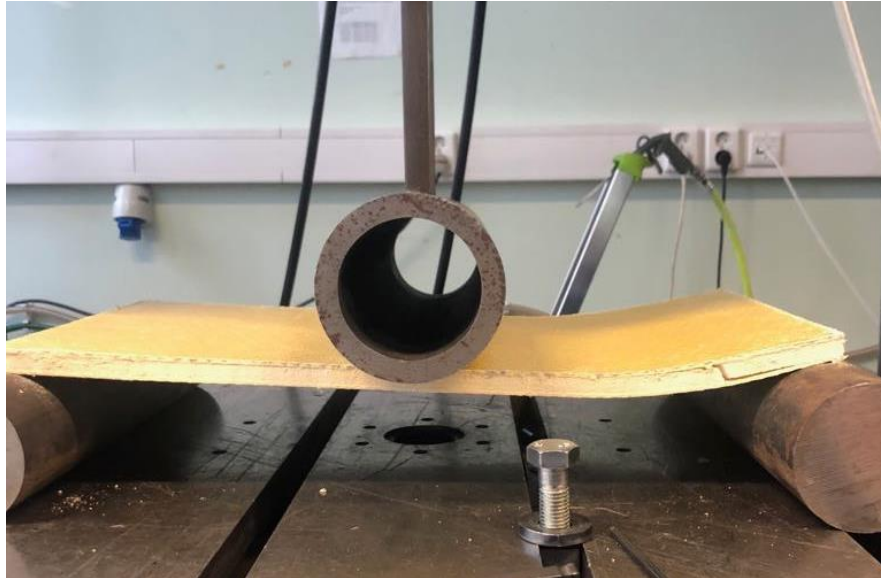
Eelmisel aastal kasutati kõikides laminaatides täitematerjalina Rohacell S vahtu, mis valiti oma tulekindlusomaduste tõttu. Sel aastal ei õnnestunud sama materjali uuesti hankida, mistõttu tuli valida uus täitematerjal. Kuna reeglid nõuavad, et kõik akukasti materjalid peavad vastama tulekindlusstandardile UL94 V-0, on valik üsna kesine. Valikusse jäid alumiiniumkärge ning Nomex kärge. Kuna 10 mm paksust alumiiniumkärge oli kere tootmise jaoks nagunii vaja, otsustati põhja laminaadis kasutada just seda. Koha peal oli ka olemas 5mm paksust Nomex kärge, seega otsustati seda seinte laminaadis kasutada. Materjalide omadusi uurides selgus ka, et kärgeomadused on mehaanilistelt omadustelt paremad.

3.2 Katsetused aramiidkangaga

Aramiidkanga katsetamiseks oli tarvis lamineerida katsekehad ja need katsepingis katki tõmmata. Aramiidkangast ei olnud võimalik eelnevalt analüüsida, kuna puudus materjali omaduste kohta piisav informatsioon. Sel puhul otsustati lamineerida kolme punkti katsekeha (3P). Laminaadis kasutati FEST18 akukastiga identset kangakihtide paigutust. Lamineerimisel kasutati olemasolevat 175g/m² kangast. Katsetulemused näitasid, et laminaat pole piisavalt jäik. Seejärel lamineeriti uued katsekehad 300g/m² põimitud kangaga. Ka sel puhul jäid tulemused pigem kehvaks. Mõlemal kolme punkti painde katsel tekkis purunemine vahus (Sele 9). Lisaks olid katsekehad võrreldes süsinikuga oluliselt raskemad. Tabelis on välja toodud võrdlus süsinikkiu laminaadi ja parima aramiidkanga laminaadi vahel. Tulemuste tõttu otsustati ka edaspidi kasutada isolatsioonimaterjalina Nomex paberit.

Tabel 3 Võrdlus aramiidlaminaadi ja süsiniklaminaadi vahel 3P katsel

Materjal	Jõud purunemisel (N)	Kaal (g)
Aramiidkangas	3450	710
Süsinikkangas	9150	600



Sele 9 Aramiidlaminaadi kolme punkti katse

3.3 Tootmistehnoloogia valik

Süsinikdetailide tootmiseks on kolm meetodit: märglamineerimine, vaakuminfusioon ja eelimmutatud kanga lamineerimine [7]. Märglamineerimisel asetatakse kuiv armatuur vormi või klaasile ning lisatakse pintsliga või rulli abil maatriks ehk sel puhul epoksiidvaik. Vaakuminfusiooni meetodiga laotakse kogu laminaat kuivalt lamineeritava pinnale ning tõmmatakse vaakumkile ja vaakumpumba abil vaakumisse. Seejärel lastakse voolikust vaiku sisse. Eelimmutatud kangas on õige kogus vaiku juba sees ning detail lamineeritakse, tõmmatakse vaakumisse ning kuumutatakse ahjus kõvenemiseni.

UL94 V-0 standardile vastavad epoksiidvaigud on üldjuhul suure viskoossusega, mistõttu ei saa kasutada vaakuminfusiooni meetodit. Kõige tugevama laminaadi saaks kasutada eelimmutatud kangast, kuna sinna on tehases lisatud ideaalne kogus vaiku. Märglamineerimise ja infusiooniga on võimalik aga lisada liiga palju vaiku, mistõttu võib kangakihtide vahele jääda kas õhk või vaigukiht. Seeläbi langevad ka tugevusomadused. Kuna sponsorkorras ei õnnestunud eelimmutatud kanga tootjatelt kangaid hankida, jäädgi märglamineerimise juurde. Kasutusele jäi ka eelmisest aastast tuttav epoksiidvaik Sika Biresin CR134 FR.

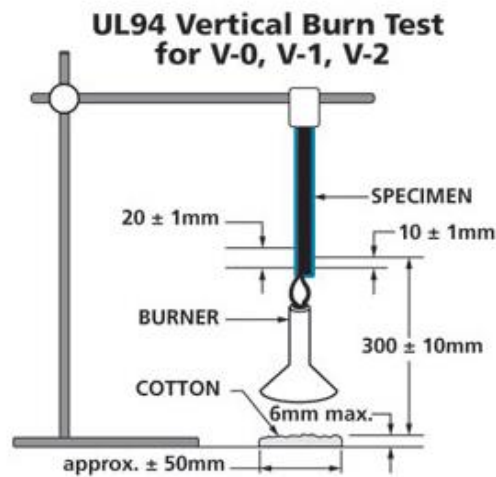
3.4 UL94 V-0 katsetused

Epoksiidvaik Sika Biresin CR134 FR on tehnilise spetsifikatsiooni järgi vastav UL94 V-0 standardile 4mm paksuse juures. Kuna reegel EV 5.5.3 nõuab, et kõik akukasti materjalid peavad vastama sellele standardile laminaadis kasutatud paksuste juures ja meie süsinikulaminaadid on kuni 1mm

paksud, otsustati teha oma katsed standardile vastavuse tõestamiseks. Selleks, et parandada tulekindlusomadusi, hangiti sõprusmeeskonna DHBW Engineering Stuttgart soovitusel lisandit Brenntag BCA FR-001-LV (vt. Lisa 1).

UL94 V-0 katsetuse protsess [8]:

- Katsetused viiakse läbi 10 teimiga iga paksuse kohta
- Viis katsekeha iga paksuse kohta katsetatakse pärast nende 48 tunnist seisutamist 23 kraadi juures
- Viis katsekeha iga paksuse kohta katsetatakse pärast nende 7 päevast seisutamist 70 kraadi juures
- Iga katsekeha kinnitatakse vertikaalselt
- Iga katsekeha paigutatakse leegi kohale nii, et selle alumine serv on põleti torust 10mm kõrgusel
- Katsekeha põletatakse sinise 20mm kõrge leegiga teimi alumisest servast 10 sekundit ning siis eemaldatakse. Kui põlemine lõppeb 30 sekundi jooksul, põletatakse teimi uuesti 10 sekundit. Kui katsekeha peaks tilkuma või pudunema, maanduvad kukuvad osad vati peale, mis on asetatud teimist 300mm allapoole.



Sele 10 UL94 vertikaalse katse skeem [8]

Klaasile lamineeriti märjalt laminaat, kust hiljem lõigati välja 125mm x 13mm teimid. Lamineerimisel lisati vaigule ka lisandit. Lisand moodustas maatriksist 15%. Seejärel viidi läbi põletamiskatsetused standardile vastava varustusega laborisse Tallinna Tehnikaülikooli Loodusteaduste majas.

Selleks, et laminaat vastaks UL94 V-0 standardile, peavad katsekehad vastama järgmistele nõuetele [8]:

- Teimid ei tohi leegiga põleda rohkem kui 10 sekundit pärast esimese põletamise lõpetamist
- Summaarne põlemisaeg ei tohi ületada 50 sekundit mõlema partii 5 teimikul
- Teim ei tohi klambrini ära põleda
- Teimidelt tilkunud või pudenenud tükid ei tohi süütada katsekehade alla paigutatud vatti
- Pärast teise põletamise lõpetamist ei tohi teimil esineda leegita tuhastumist, mis kehtaks rohkem kui 30 sekundit

Katsetulemused näitasid, et minimaalse paksusega laminaat akukastis vastab UL94 V-0 standardile. Akukastis kasutusel olevad süsinikulaminaadid on 0,5mm kuni 1mm paksud.

Tabel 4 UL94 V-0 katsetuste tulemused minimaalse paksusega akukasti laminaadile

2 Kihti/ 0.5mm 15% CFRP	Esimene põletus	Teine põletus	PASS
Teim 1	<1 s	<1 s	
Teim 2	<2 s	<4 s	
Teim 3	<3 s	<1 s	
Teim 4	<5 s	<1 s	
Teim 5	<1 s	<1 s	
Kogu aeg(<50s!)	<12 s	<8 s	<20 s
Teim 6	<7 s	<1 s	
Teim 7	<5 s	<1 s	
Teim 8	<3 s	<1 s	
Teim 9	<9 s	<1 s	
Teim 10	<2 s	<1 s	
Kogu aeg (<50s!)	<26 s	<5 s	<31 s

4. Tugevusanalüüsid ja arvutused

Selleks, et valida sobiv laminaat, tuleb mõista akukastile mõjuvaid jõudusid ja süsinikkiust kanga omadusi. Reegel EV 5.5.9 näeb ette, et akukast ja selle kinnituspunktid peavad vastu pidama järgmistele kiirendustele [4]:

- 40 g pikisuunas (sõidusuunas)
- 40 g külgsuunas (vasakule ja paremale)
- 20 g vertikaalsihis (üles ja alla)

Teades mooduli massi, on võimalik tuletada jõud, mis nendes olukordades akukastile mõjuvad.

Tabel 5 Akukastile mõjuvad jõud

Ühe mooduli mass	6,7 kg		
Jõud kiirenduse 20 g juures (1 moodul)	1314,54	1315	N
Jõud kiirenduse 40 g juures (1 moodul)	2629,08	2629	N
Jõud kiirenduse 20 g juures (6 moodulit)	7887,24	7887	N
Jõud kiirenduse 40 g juures (6 moodulit)	15774,48	15774	N

Kiudarmeeritud komposiitstruktuuri omaduste prognoosimine on homogeensete materjalidega võrreldes oluliselt keerulisem. Kuna süsinikkanga omadused on alati parimad kanga kiu suunas, peab laminaati koostades silmas pidama mõjuvaid jõuliike ja laminaadile mõjuvate jõudude suundasid. Erinevaid kangatüüpe on akukastis kasutusel kaks: ühesuunaline ja põimitud kangas. Ühesuunaliselt kangal jooksevad süsiniku kiud ühes suunas, mistõttu on tema tugevusomadused samuti parimad selles suunas. Põimitud kangal on jooksevad süsiniku kiud üksteisega risti, mistõttu on kahes suunas omadused võrdsed. Antud teadmised omandati kursusel MXX0050 Komposiitmaterjalid.

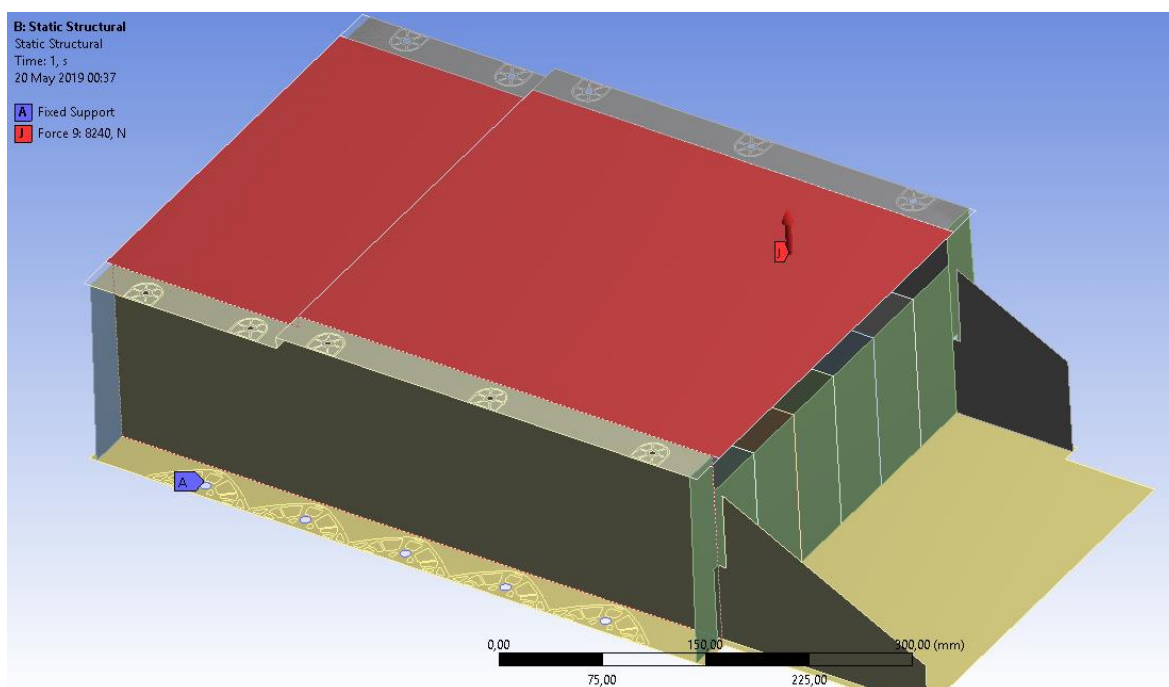
4.1 Akukasti analüüs ja katsekehad

Akukasti laminaadi määramiseks ja analüüsimiseks kasutati programmi ANSYS 2019R1. Antud programmis on võimalik läbi viia LEM analüüs, ehk kasutati lõplike elementide meetodit. Analüüsi

tulemuse hindamiseks kasutati Tsai-Wu hindamiskriteeriumit, mis jälgib kõiki anisotroopsete materjalide suundadest tulenevaid tugevusomadusi ja toob sealt välja kõige hullemal olukorra [9].

Geomeetria viidi programmi sisse pindadena, millele hiljem süsinik ja täitematerjal kihtidena lisatakse. Pindade vahele loodi ühendused, mis simuleerivad liimliidet. Analüüsis tappe ei arvestatud. Analüüs ehitati üles, kasutades kõiki akukasti detaile, vastupidiselt varasemale, kus on kaane analüüs teostatud eraldi. Analüüsis kasutatud süsinikkanga omadused on tuletatud Marek Lentsiuse katseandmetest [10]. 10mm paksuse alumiiniumkärje andmed [11] ja 5mm paksuse Nomex kärje andmed [12] on võetud toodete tehnilistest spetsifikatsioonidest.

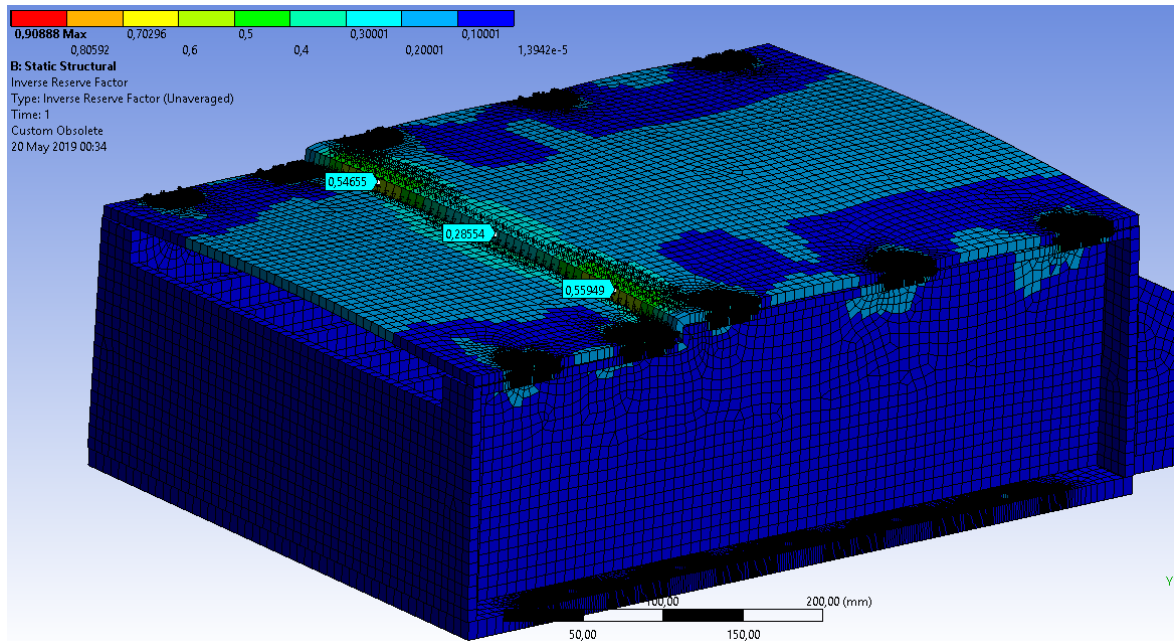
Analüüsis piirati põhja kinnitusankrute avadel liikumine x-, y- ja z- telje suunas ning ümber nende, mis simuleerib kere küljes kinni olemist. Seejärel määrati vastavatele pindadele eelpool välja toodud jõud (Sele 11). Korruga on võimalik analüüsida vaid ühe telje suunalisi jõude, mistõttu viidi läbi üks analüüs iga olukorra kohta, kokku seega kuus. Esimene analüüs ehitati üles sama laminaadiga, mis oli kasutusel ka FEST18 akukastis. Muudatus tehti ainult täitematerjalide näol.



Sele 11 z-telje suunalise tugevusanalüüsi rajatingimused

Tabel 6 Esialgsed analüüsitud laminaadid

Vertikaalseinad ja kaas	TW 0/90; UD 0; TW 45/45; 5mm Nomex; TW 45/45; UD 0; TW 0/90
Põhi	TW 0/90; UD 0; TW 45/45; 10mm Al; TW 45/45; UD 0; TW 0/90

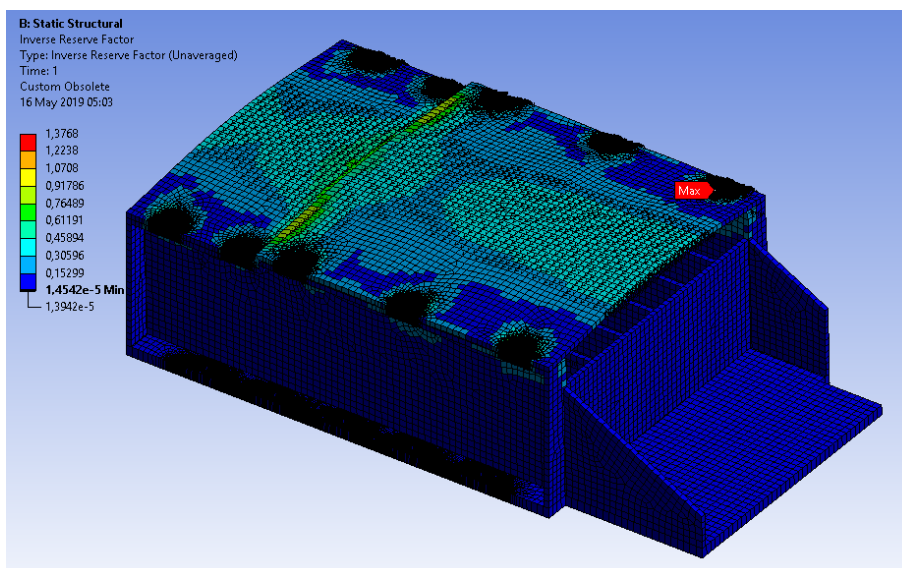


Sele 12 Esimene tugevusanalüüs z-telje suunas (Tsai-wu faktor)

Esimesed analüüsid näitasid, et Tsai-Wu väärtus ei ületa mitte ühegi jõulokorra puhul kriitilist piiri 1,0. Maksimaalseks Tsai-Wu väärtuseks on 0,55. Analüüsi pilt näitab, Tsai-Wu kriteeriumit kõige kriitilisemas laminaadi kihis, ehk kihis, kus väärtus on suurim. Antud tulemuste põhjal võib öelda, et purunemist ei toimu. On mõistlik kihte optimeerida ning sooritada uued analüüsid. Järgmiste analüüside jaoks eemaldati laminaadist ühesuunaline kangas.

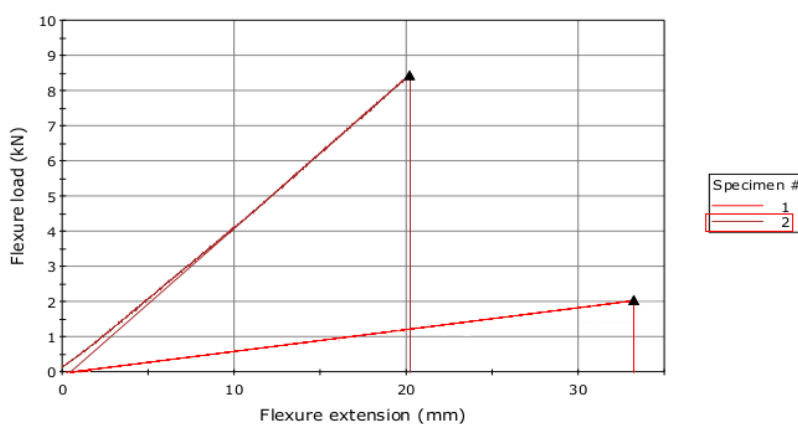
Tabel 7 Teises analüüsis kasutatud laminaadid

Vertikaalseinad ja kaas	TW 0/90; TW 0/90; 5mm Nomex; TW 90/90; TW 0/90
Põhi	TW 0/90; TW 45/45; 10mm Al; TW 45/45; TW 90/90



Sele 13 Teine tugevusanalüüs z-telje suunas (Tsai-Wu faktor)

Teine analüüs andis maksimaalseks Tsai-Wu väärtuseks 0,85. See tulemus on juba üsna lähedal purunemisele. Läbipainet 16,528 mm on samuti juba üsna palju. Otsustati teha antud laminaatidega füüsilised katsekehad, et näha kas selline lahendus võistluste jaoks täidetava kontrollarvutusmooduli läbib.

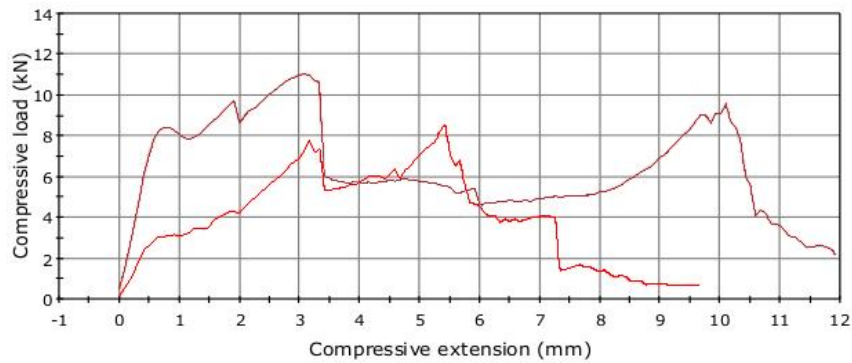


	Specimen label	Flexure load at max (kN)	Flexure extension at Break (mm)	Modulus (Automatic) (GPa)	Specimen note 1	Energy at Break (Standard) (J)
1	5mm Nomex TW TW	2,01	33,20	13,70		26,94
2	10mm Al TWUDTW	8,44	20,18	112,54		84,86

Sele 14 Akukasti laminaatide kolme punkti painde katsetused

Kolme punkti katsekehad analüüsitud laminaatidega pädesid. Tulemused kanti sisse võistlussarja poolt antud arvutusmoodulisse, mille järgi täideti nõutud tugevusvaru põhjale 1,61, seintele ja kaanele 1,06 (Sele 16).

Graph 1



	Specimen label	Maximum Shear load (kN)	Compressive extension at Maximum Shear load (mm)
1	5mm kärg	8,678	5,4
2	10mm alu kärg	11,053	3,0

Sele 15 Akukasti paneelide nihketugevuse katsetused

Nihketugevuse katsekehad pädesid samuti, saavutades tugevusvaru põhjale 1,03, seintele ja kaanele 1,03 (Sele 16). Arvestades, et kui SES-i poolt arvatud tugevusvaru alla 1,0 langemisel ei saa akukast tehnilisest kontrollist läbi, võib järeldada, et laminaat on optimaalne.

Safety Factors

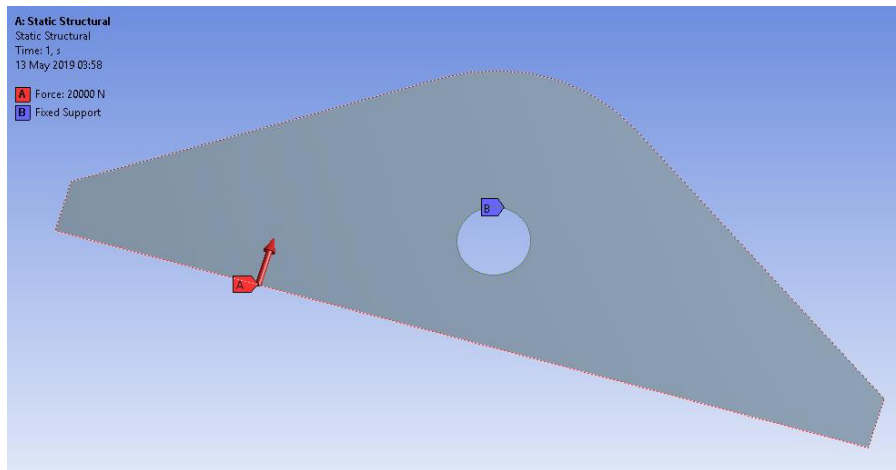
Bending Strength		1,61	1,06
Flexural Rigidity		109,39	42,66
Shear		1,03	1,02
		PASS	PASS

Sele 16 Varutegurid võistlussarja arvutusmooduli järgi

4.2 Põhja kinnitusankrute projekteerimine

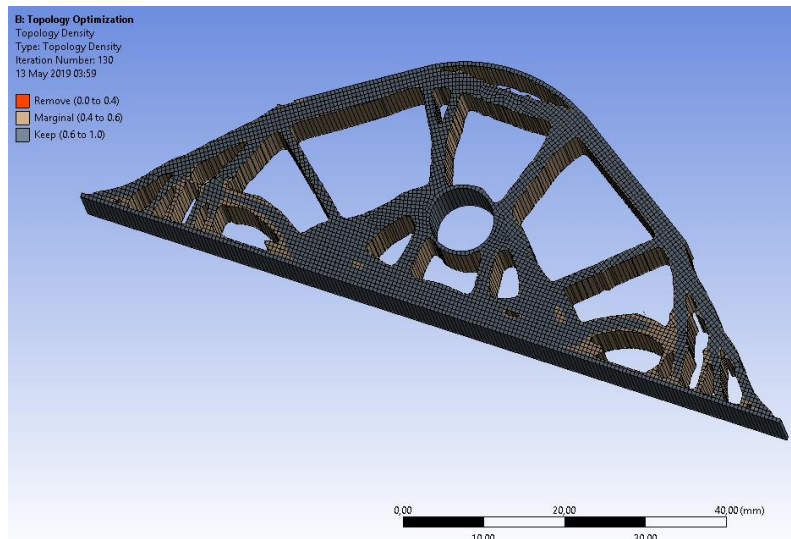
Akukast kinnitub kere külge kümne M8 poldiga. Selleks, et tagada tugevus akukasti kinnituspunktides, on tarvis laminaadis kasutada kinnitusankruid. Põhja kinnitusankrud peavad vastu pidama x-, y- ja z-telje suunas jõule 20 kN, ilma et laminaat puruneks. Kinnitusankrud valmistatakse vesilõikuse teel 6082 T6 alumiiniumist.

Kinnitusankrud on 2D topoloogiliselt optimeeritud programmis ANSYS 2019R1. Analüüsimisel defineeriti kaks jõuolukorda. Ühel puhul määrati jõud suurusega 20 kN ankrude külgsuunas suunaga mööda y-telje kinnitusava poole. Teisel juhul mõjub sama suur jõud avale, suunaga külgsuunas poole. Need jõuolukorrad kirjeldavad akukastile mõjuvat külgsuunas mõlemat poole kinnitusankrutes (Sele 17).



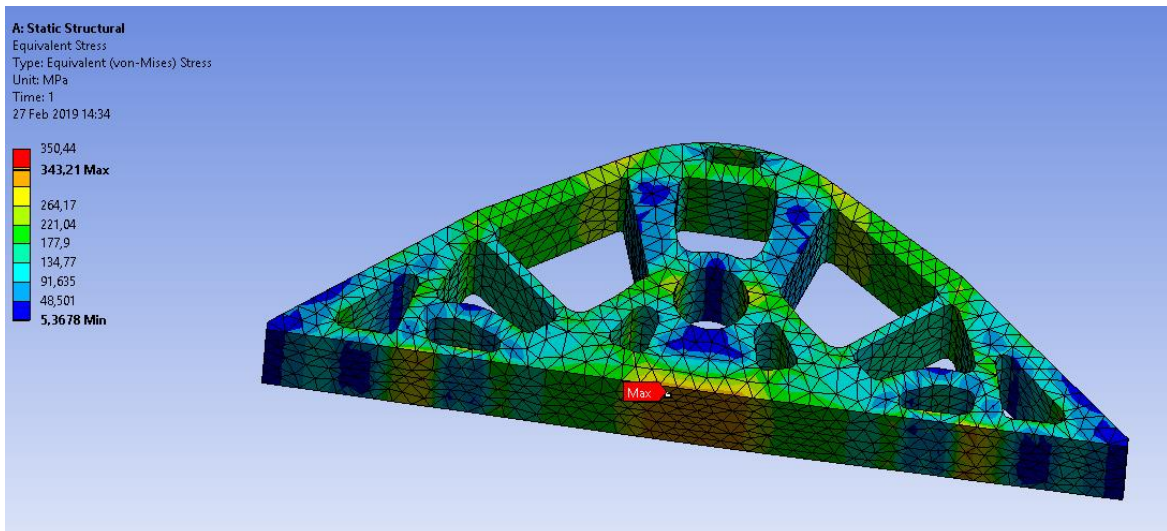
Sele 17 Kinnitusankrute topoloogilise analüüsi rajatingimused

Algselt sisse viidud geomeetria le määrati võrgustiku suuruseks 0,5 mm, jooksutati 130 iteratsiooni. Selle tulemusena tekkinud geomeetria lihtsustati hiljem, et seda oleks võimalik toota (Sele 18).



Sele 18 Topoloogilise optimeerimise tulemus

Pärast geomeetria lihtsustamist tehti kinnitusankrute staatiline analüüs samade jõududega, et valideerida lõpliku geomeetria tugevus (Sele 19). Lihtsustades jäeti servade raadiuseks 2 mm, mis on vesilõikuseks sobilik. Lõpptoode kaalub 24,4 g, mis on 10 g kergem tavapäraselt projekteeritud kinnitusankrust.



Sele 19 Topoloogiliselt optimeeritud kinnitusankru LEM analüüsi tulemus

4.3 Tappide tugevusarvutused

Selleks, et valideerida akukasti paneele ühendavate tappide tugevus, viidi läbi vajalikud arvutused. Tapid töötavad piki- ja ristisuunaliste jõudude puhul nihkele, mistõttu on tarvis leida kasutatava süsiniklaminaadi nihketugevus (vt. Valem 4.1). Nihkepinge arvutati katsekeha andmete põhjal. Katsekehal suruti läbi laminaadi võll diameetriga 25mm. Arvutusteks vajalikud valemid leidsin Mehaanikainseneri käsiraamatust [13]. Antud lõputöös käsitletakse vaid külgmise välisseina sõidusuunalisi jõude. Arvutused viidi läbi ka kõigi teiste tappidega.

$$\tau = \frac{F}{S} = \frac{F}{2 * \pi * r * t} \quad (4.1)$$

kus F – jõud purunemisel, N,

S – süsiniku ristlõikepindala, mm^2 ,

r – võlli raadius, mm,

t – laminaadi paksus, mm.

$$\tau = \frac{7890}{2 * \pi * 12,5 * 0,5} = 200,9 \text{ MPa}$$

Seejärel saab leida jõu, mille juures laminaat tapi kohast puruneb vastavalt valemile (4.2).

$$F = (S_1 + S_2) * EL * SS * 0,001 * n \quad (4.2)$$

kus S_1 – kihi paksus, mm,

S_2 – kihi paksus, mm,

EL – Tapi serva pikkus, mm,

SS – Nihkepinge, Mpa,

n – Tappide arv.

$$F = (0,5 + 0,5) * 46 * 200,9 * 0,001 * 6 = 55,45 \text{ kN}$$

55,45 kN > 15,774 kN, seega laminaat ei purune

Kõikide tappidega arvutuste läbi viimisel selgus, et kõik tapid peavad vastu jõududele, mis neile igas suunas mõjuvad.

4.4 Süsinikku laminaatide elektrijuhtivus

Reegel EV 3.1.2 ütleb, kõik auto küljes olevad detailid mis võivad muutuda elektrit juhtivaks ja asuvad kõrgepinge komponentidest vähem kui 100 mm kaugusel, peavad olema väiksema takistusega kui 5 Ω [4].

Kogu akukast allub sellele reeglile ning varasematest aastatest on teada, et süsiniku laminaadi takistus on tavaliselt kõrgem kui 5 Ω . On kasutatud vaskvõrku, mille ribad lamineeritakse kinnitusankrute vahele. Et leida veelgi parem lahendus, otsustati katsetada vaskvõrku laminaadis erinevate kihtide vahel ja erinevas koguses (vt. Tabel 8). Lamineeriti kokku kuus katsekeha, mille takistust mõõdeti hiljem 1 A voolu juures (Sele 20). Esimesed kolm katsekeha lamineeriti täpselt sama moodi, kasutades kahte alumiiniumist kinnitusankrut ja mõlemal pool vahtu kolme kihti süsinikku. Katsekehade kinnitusankrutest pandi läbi poldid, et simuleerida päris olukorda autos. Igalt katsekehalt mõõdeti kaks takistust: poldi ja kinnitusankru vaheline ning poldi ja laminaadi vaheline.

Tabel 8 Elektri juhtivuse katsekehad

	Laminaadi kirjeldus	Takistused 1 A voolu juures
I katsekeha	Tavaline laminaat ilma vaskvõrguta	R1 = 246 mΩ R2 = 2,2 Ω
II katsekeha	10 mm lai vaskvõrgu riba kinnitusankrust kinnitusankruni	R1 = 41 mΩ R2 = 3 Ω
III katsekeha	10 mm lai vaskvõrgu riba kinnitusankrust kinnitusankruni. Vaskvõrk ja alumiinium on ühendatud juhust liimiga	R1 = 30 mΩ R2 = 2,5 Ω
IV katsekeha	Vaskvõrk süsinikukihtide vahel	R1 = 4,1 mΩ R2 = 3.5 Ω
V katsekeha	Vaskvõrk lisatud laminaadi peale	R1 = 3,9 Ω R2 = 0,7 Ω



Sele 20 Elektrijuhtivuse katsekehad

Tulemused näitasid, et kõige parema üldmise tulemuse annavad kinnitusankrute vahelised vaskvõrgu ribad. Samas ei ole mõistlik juhtivat liimi kasutada, kuna see on äärmiselt kallis. Katsekehadel, millel kinnitusankrud ei ole omavahel vaskvõrguga ühendatud, on takistus juba piiripealne ning võib päris detailil mõõtmete tõttu veel kasvada. Akukasti laminaadis otsustati ühendada kinnitusankrud vaskvõrguribadega laminaadi keskel.

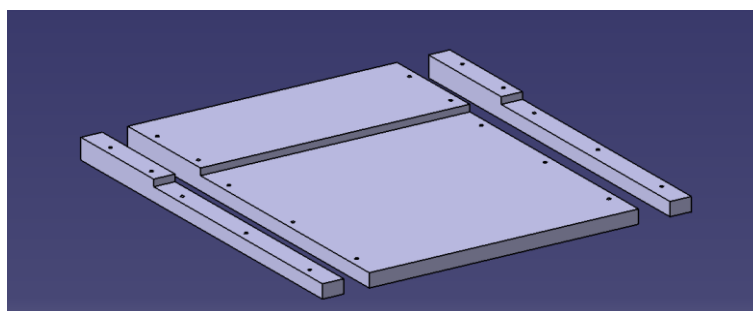
5. Tootmine

Akukasti põhi, esimene sein, tagumine sein, vertikaalsed vaheseinad ning elektroonikasektsiooni seinad on toodetud klaasile lamineerides. Küljeseinad ning kaas vajasid tootmiseks vormi. Varasemalt on toodetud vajaminevad vormid niiskuskindlast vineerist. See eeldab osavust, vastasel juhul ei pruugi lõpptooted kokku istuda. Sel aastal otsustati akukasti küljeseinade kuju tõttu vormid valmistada MDFist. MDF on puitmaterjal, mis on valmistatud peeneks jahvatatud puiduosakeste kokkupressimise teel [14]. Küljeseinade vormid tehti selliselt, et need oleks võimalik asetada klaasile. Selliselt sai teha vormid minimaalse suurusega, et kiirendada freesimist ja muuta tootmist odavamaks (Sele 22). Vormid freesiti välja vastavalt 3D mudelile 30mm paksusest MDF plaadist. Akukasti elektroonikasektsiooni kaane lamineerimiseks kasutati samuti MDF vorme, mis osaliselt freesiti (Sele 21).



Sele 21 Elektroonikasektsiooni kaane ja õhukanali vormid

Kuna MDF on poorne ning otse peale lamineerides imenduks vaik materjali sisse, oli tarvis MDF vormidele peale kanda pinnakate. Pinnakate peab olema selline, et see jätkaks sileda pinna, täites ära kõik poorid. Variantideks olid pritspahtel, epoksiidvaiguga immutamine, lakkimine, ja spetsiaalne *sealer*. Pinnakattena otsustati kasutada kemikaali Jost Chemical B-25 sealer, mis on just selliseks otstarbeks mõeldud (vt. Lisa 2).



Sele 22 Akukasti seinte ja kaane tootmiseks vajalikud vormid

Kasutades vahtu, oli eelmistel aastatel võimalik lamineerida kõik paneelid ühe vaakumtsükliga. See tähendab, et esimene süsinikkiust laminaadikiht, vahust täitematerjal ja ka teine laminaadikiht oli võimalik lamineerida ühe korraga. Kuna uue akukasti puhul kasutatakse täitematerjalina kärgmaterjali, ei saa paneele nii toota. Ühe vaakumitsükliga lamineerides imenduks kärgmaterjali tühimikesse vaiku, mis ei ole aktsepteeritav. Et sellist olukorda vältida, tuli lamineerida kõigepealt laminaadikihid eraldi ning need seejärel sama epoksiidvaiguga liimida täitematerjali külge.

Alustades laminaadikihtide lamineerimisest, valmistati kõigepealt ette klaas, kuhu kanti pärast hoolikat puhastamist atsetooniga peale vormieraldusvaha. Vormieraldusvaha tagab selle, et epoksiidvaik ei nakku klaasi pinnaga ja laminaat on võimalik hiljem klaasi küljest eemaldada. Vormieraldusvaha kantakse peale kihiti, jättes iga kihi pealekandmise vahele 10-15 minutit. 3-5 kihi pealekandmisest piisab, et tagada turvaline lamineerimine. Seejärel asetati kuiv süsinikkangas kilega kaetud lauale, kus kanti poroloonist rulliga kangasse epoksiidvaik. Märjad kangad asetati klaasile ning kaeti eralduskangaga. Eralduskanga peale asetatakse hingav polüesterkangas, mille eesmärgiks on vaakumi ühtlane jaotamine. Seejärel asetatakse detailide ümber vaakumteip, millega ühendatakse vaakumkile (Sele 23). Siis tõmmatakse vaakumpumba abil detailid vaakumisse, mis surub kangakihid omavahel kokku ja jätab klaasi poole kvaliteetse pinna. Eralduskangaga kaetud pind jääb karedaks. Laminaat jäetakse ööpäevaks vaakumisse, mille jooksul vaik kõveneb. Samu põhimõtteid kasutati ka MDF vormidele lamineerides.



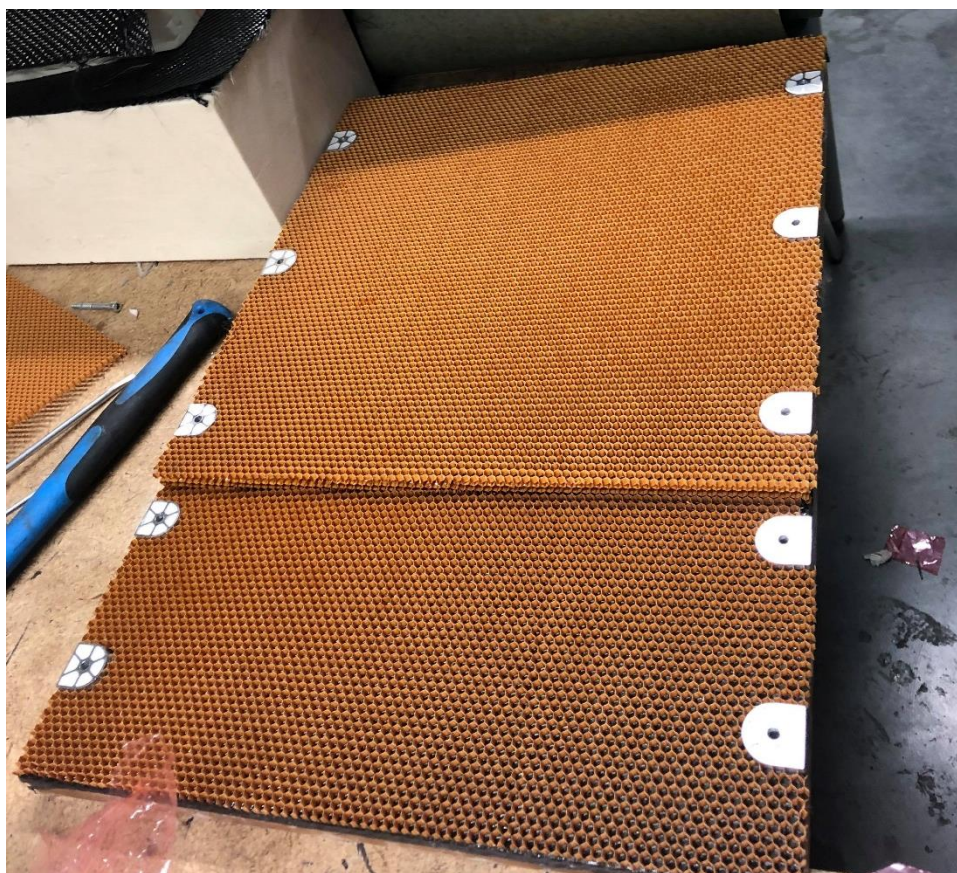
Sele 23 Märglamineerimisel kasutatavad materjalid

Pärast laminaatide kõvenemist kanti neile pintsliga peale õhuke kiht epoksiidvaiku, seejärel asetati märjatud alale täitematerjal. Täitematerjali peale asetati eralduskile, hingav kangas ja vaakumkile. Teostati uus vaakum. Seda protsessi korrati, et täitematerjaliga siduda ka teine laminaadikiht (Sele 24). Kinnitusankruid sisaldava põhja laminaati lisati kinnitusankrute vahele vaskvõrgu ribad.



Sele 24 Lõplik laminaat pärast laminaadikihtide ja täitematerjali sidumist

Vormile lamineerides jäeti esimene laminaadikiht vormi külge ning puuriti kinnitusankrute avad. Laminaadikiht kaeti epoksiidvaiguga. Seejärel asetati laminaadikihi peale kinnitusankrud, mis kinnitati poltidega. Poldid tagavad täpse positioneerimise. Seejärel sobitati kinnitusankrute ümber täitematerjal ja need ühendati vaskvõrguga (Sele 25). Pärast vaakumit liimiti külge ka teine laminaadikiht.



Sele 25 Akukasti kaas enne teise laminaadikihi liimimist

Klaasile lamineeritud valminud paneelid saadeti vesilõikusesse, mis tagab täpse tulemuse. Vormi lamineeritud detailid oli võimalik tänu vormide disainile freesida. Freesimine teostati koostöös meeskonnaliikme Magnus Loosiga. Pärast freesimist viiliti freesi poolt jäetud kumerad nurgad täisnurkseks.

Kui kõik seinad ja põhi oli lõiketööluse läbinud, sai hakata paneele kokku sobitama. Tapid ei istunud kohe kokku, mistõttu viiliti tapiavad pool millimeetrit suuremaks. Seejärel prooviti kogu akukast kokku ning kohendati veelkord tappe. Seejärel kasutati paneelide sidumiseks lamineerimisel kasutatud epoksiidvaiku, mida paksendati klaaskiu pulbriga. Vaiguga seotud paneelid asetati pinge alla, kasutades pitskruve ja koormarihma. Pärast vaigu tahenemist lihviti paneelide vahel välja pressitud vaik maha.



Sele 26 Kokku liimitud akukast

Et tagada piisav tugevus põhja kinnitusankrute ümber ja tagaseina liitel, lamineeriti nendes kohtadesse lisaks ülekate laminaadiga [TW 0/90, UD 0, TW 45/45]. Samaaegselt liimiti külge ka elektroonikasektsiooni välisseinad, kasutades õrna vaakumit. Et tagada elektriline isoleeritus akukasti elektroonikasektsioonis, kaeti seinad ja põrand Nomex paberiga. Lisaks paigutati sinna vaheseinad.

Pärast paneelide liimimist paigutati akukasti moodulid ja elektroonikasektsiooni komponendid. Seejärel oli tarvis elektroonikasektsiooni kaanele teha DC-DC mooduli jaoks avad ning paigutada õhusuunajad (Sele 27).



Sele 27 Akukasti elektroonikasektsiooni kaas õhusuunajatega (ilma kanalita)

Valminud akukasti massiks mõõdeti 3,2 kg, mis on 1 kg kergem FEST18 akukastist. Koos elektroonika ja moodulitega mõõdeti massiks 43,2 kg. Võrreldes eelmise akupakiga on uus lahendus pool kilogrammi raskem.

KOKKUVÕTE

Käesoleva lõputöö ülesandeks oli projekteerida ja valmis toota FS Team Tallinna 2018/2019 hooaja vormeli FEST19 akukast.

Projekteerimisele eelnes analüüs eelmise vormeli FEST18 akukasti tugevuste ja puudujääkide leidmiseks. Tulemuste ning uue auto üldeesmärkide põhjal oli võimalik akukasti projekteerimiseks seada vajalikud algparameetrid. Projekteerimisel lähtuti FSG reeglitest. Eesmärkideks seati massi alandamine, piisava jahutuse tagamine ja kasutusmugavuse parandamine.

Projekteerimine algas esialgsete moodulite põhjal geomeetria loomisega ning selle edasi andmisega kere projekteerijale. Sellele järgnes geomeetria edasi arendamine, mille käigus muudeti akukasti tagumine osa madalamaks, et tuua keres paiknev mootorite kontroller allapoole. Seejärel projekteeriti 3D prinditav jahutuskanalite süsteem, mille abil saab auto taga paiknev ventilaator imeda piisava koguse jahutavat õhku läbi akukasti moodulite.

Leidmaks tootmiseks sobilikke materjale, viidi läbi katsetused aramiidkangaga, mille tulemused jäid nõrgaks. Sooritati ka tulekindluskatsed, et tagada materjalide vastavus võistlussarja reeglistikule. Tootmistehnoloogia valikul jäi taaskord peale märglamineerimine.

Akukasti seinte ja kaane laminaadid pandi paika LEM analüüsiga programmis ANSYS 2019R1, kus sooritati analüüsid kõikide akukasti jõuolukordade puhul. Optimeerides uute täitematerjalidega laminaate jõuti tulemusteni, mida valideerides füüsilise katsekehaga saadi tugevusvarudeks 1-1,1. Akukasti kinnitusankrud optimeeriti topoloogiliselt, mille läbi saavutati tavapärasest 10g kergem lahendus. Paneele ühendavatele tappidele tehti käsitsiarvutused, et valideerida piisav tugevus. Tagamaks akukasti laminaadi piisavalt väike takistus, viidi läbi katsetused erinevate vaskvõrgu paigutustega laminaadis.

Uus geomeetria tähendas, et kõiki paneele ei saanud lamineerida klaasile. Külgsentele ja kaanele freesiti MDF vormid, mis kaeti sobiva pinnakattega. Kõigepealt lamineeriti süsinikukihid eraldi ning hiljem liimiti need täitematerjali külge. Pärast töödeldi toodetud paneele freesimise või vesilõikusega. Valmis paneelid ühendati tappide ja epoksiidvaigu abil. Eelmise hooaja akukastiga võrreldes õnnestus vähendada massi üks kilogramm.

Kokkuvõtlikult võib öelda, et FEST19 akukast on oma eesmärgid täitnud. Kogu akupaki kaal jäi sarnaseks eelmise hooajaga, ehkki lisati juurde 2 kg jagu akuelemente. Kasutusmugavus on oluliselt paranenud, mis tuleb esile akukasti autosse paigutamisel. Jahutussüsteem on veel testimisfaasis.

SUMMARY

The aim of this thesis was to design and manufacture the accumulator container of FS Team Tallinn's 2018/2019 season race car FEST19.

Before designing, a thorough analysis of the strengths and weaknesses of the previous season's accumulator container was carried out. Based on the results and new ideas, the initial design parameters were set for the new solution. The design followed the rules imposed by FSG. Goals of reducing the weight of the container, providing sufficient cooling and improving ease of use.

The design began with creating the initial geometry based on the measurements of the modules. The initial geometry was sent out to the chassis designer. This was followed by the continuous development of the shape, during which the rear end of the container was lowered in order to make room for the motor controllers in the chassis. 3D printable cooling scoops were designed to allow the cooling fans to move optimal amounts of air through the modules.

In order to find the suitable materials to use in the construction of the container, tests were conducted with aramid fibres which did not give desired results. Flammability tests were carried out to prove the materials compliance to FSG rules. Wet laminating was determined to be the suitable manufacturing method.

The vertical walls and cover of the container were analysed in ANSYS 2019R1, in which the laminates were determined by analysing all load cases present in the container. By optimising the lay-ups together with the new core materials optimal laminates were achieved with safety factors of 1-1.1. The attachment inserts were topologically optimised which resulted in a 10g weight saving per insert. Panel joints were calculated by hand to prove the necessary strength. In order to lower the resistance in the accumulator laminates, tests with different copper mesh setups were done.

The new geometry meant that all panels could not be laminated onto glass. Side walls and cover needed moulds which were milled out of MDF and then covered with special sealer. The skins of the laminates were laminated first and bonded with the core material later in two stages. The finished laminates were milled or waterjet cut. The resulting panels were assembled and bonded with epoxy resin. Compared to the previous accumulator container, a weight saving of 1 kg was achieved.

In conclusion, it can be said that the new container fulfilled the set goals. The weight of the assembled accumulator is the same as last year, despite adding 24 battery cells. Ease of use is improved which is present while attaching the container to the chassis. The cooling system is still in testing phase.

KASUTATUD KIRJANDUS

1. Formula Student Team Tallinn. [Võrgumaterjal] [Kasutatud: 10.05.2019. a.]
<https://formulastudent.ee/>
2. Formula Student Team Tallinn arhiiv. [Võrgumaterjal] [Kasutatud: 10.05.2019. a.]
<https://formulastudent.ee/en/60-aastat-eesti-vormelautot/>
3. Formula Student - World Ranking Lists. [Võrgumaterjal] [Kasutatud: 13.05.2019. a.]
<https://mazur-events.de/fs-world/>
4. Formula Student Germany Rules. [Võrgumaterjal] [Kasutatud: 13.05.2019. a.]
https://www.formulastudent.de/fileadmin/user_upload/all/2019/rules/FS-Rules_2019_V1.1.pdf
5. Laserpaagutusseade Formiga p100 [Võrgumaterjal] [Kasutatud: 19.05.2019. a.]
<https://www.ttu.ee/instituut/mehaanika-ja-toostustehnika-instituut/teenused-64/3d-printimine/laserpaagutusseade-formiga-p100-6/>
6. SynKraft® VSP H2. [Võrgumaterjal] [Kasutatud: 13.05.2019. a.]
<https://www.synflex.com/en/insulate/synthermr/detail/synkrafr-vsp-h2-3/>
7. Competition Car Composites / Simon McBeath. Veloce Publishing, 2016
8. UL94 vertikaalse testi parameetrid. [Võrgumaterjal] [Kasutatud: 13.05.2019. a.]
<http://web.rtpcompany.com/info/ul/ul94v012.htm>
9. Tsai-Wu kriteerium. [Võrgumaterjal] [Kasutatud: 13.05.2019. a.]
<https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/tsai-wu-criterion>
10. Marek Lentsius, 2015. FORMULA STUDENT KLASSI VORMELAUTO MONOKOKK-KERE PROJEKTEERIMINE. – Tallinna Tehnikaülikool

11. Alumiiniumkärje tehnilised andmed. [Võrgumaterjal] [Kasutatud: 13.05.2019. a.]

https://www.hexcel.com/user_area/content_media/raw/HexWeb_CRIII_DataSheet.pdf

12. Nomex kärje tehnilised andmed. [Võrgumaterjal] [Kasutatud: 13.05.2019. a.]

https://www.toraytac.com/media/44191f02-69bf-4337-a375-5deb70e1105c/OxQZug/TAC/Documents/Data_sheets/Adhesives_and_Core/Honeycomb_core/Nomex-honeycomb-core-aerospace-grade_PDS.pdf

13. Mehaanikainseneri käsiraamat / üldtoimetaja P.Kulu. Tallinn : TTÜ kirjastus, 2015

14. MDF materjal. [Võrgumaterjal] [Kasutatud: 19.05.2019. a.]

https://www.ttu.ee/public/e/ehitusteaduskond/Instituudid/Ehitiste_projekteerimise_instituut/Oppematerjalid/Erikurus/2._Materjalid.pdf

**BRENNTAG EPOXY
CURATIVES AND DILUENTS
Data Sheet**



BCA FR-001-LV - Phosphonate Ester Flame Retardant

DESCRIPTION:

BCA FR-001-LV is high phosphorous containing oligomeric phosphonate flame retardant that can be used in a variety of applications requiring the highest standard of flame resistance. BCA FR-001-LV can be used at loading levels below those of other organophosphorous containing flame retardants. BCA FR-001-LV can be used to replace or in combination with other flame retardants such as brominated epoxy resins. It is useful in thermoset and thermoplastic resins based formulations. Properly formulated systems containing BCA FR-001-LV will pass FAR25.853 a & b (OSU 65/65/200) flame and smoke specifications as well as UL 94-0 flame specification.

ADVANTAGES:

- Low Volatility Content
- Good Flame Retardant Efficiency
- Excellent Thermal Stability
- High Phosphorous Content

APPLICATIONS:

- Aircraft Interior Parts
- Electrical Potting and Encapsulation
- Printed Circuit Boards

STORAGE LIFE:

This product has a shelf life of two years from the date of manufacture when stored at ambient temperature in the original unopened container.

HANDLING PRECAUTIONS:

Please refer to the BCA FR-001-LV Safety Data Sheet.

TYPICAL PROPERTIES	
Appearance	Clear to Off-White Liquid
Viscosity (cPs @ 25°C)	20000
Active Concentration (%)	100
Specific Gravity (25°C)	1.22
Flash Point (Closed Cup °C)	146
Phosphorous Content (%)	21.5
Acid Number (mg KOH/g)	< 2



*Providing Solutions
Through Technology*

While the data presented in this information sheet reflects the present state of our knowledge and is believed to be accurate and reliable, it is provided without liability as a courtesy only and is to be used and relied upon at the reader's sole risk. Readers should make their own determination as to the suitability of any product for a particular use. We recommend that readers conduct their own product trials before using any particular product. The information provided by us does not absolve the user from the obligation of investigating the possibility of infringement of third parties rights. The recommendations contained herein do not constitute a warranty, either express or implied, as to the fitness or suitability of any product for a particular purpose. For more information and assistance, please contact Technical Services at 55linepulatory@brenntag.com

Brenntag Specialties, Inc. / 1000 Coolidge Street, South Plainfield, NJ 07080 / 800.732.0562

Issued: 10/16 - Revised: 1/17

Sealer B-25

PRODUCT DESCRIPTION

Sealer B-25 is a sealant without releasing properties for porous or absorbent surfaces, such as model boards, weathered and lightly damaged synthetic resin moulds, or MDF surfaces.

With Sealer B-25, you are able to achieve a high-gloss surface that is suitable for use with releasing agents, without having to sand or polish the surface.

APPLICATION

➤ **Sealer B-25** can either be sprayed on or applied using a brush or a piece of cotton cloth.

Optimal glossiness can be achieved by spraying the sealant at a low material pressure using a nozzle with a diameter between 0.5 – 0.8 mm.

When using a piece of cotton cloth, apply the sealant in a circular motion to fill the surface micropores. Then wipe in one direction and ensure the layer is as even as possible.

Two to three coats of Sealer B-25 are enough to produce a saturated and glossy surface. Allow 10 minutes between coats when applying at room temperature.

For excellent demoulding performance, it is essential to apply a releasing agent after sealant application. We recommend using Mold Sealer S-31 or the water-based alternative Aqua Release 250 as a semipermanent releasing agent.

PHYSICAL PROPERTIES: (at 25° C)

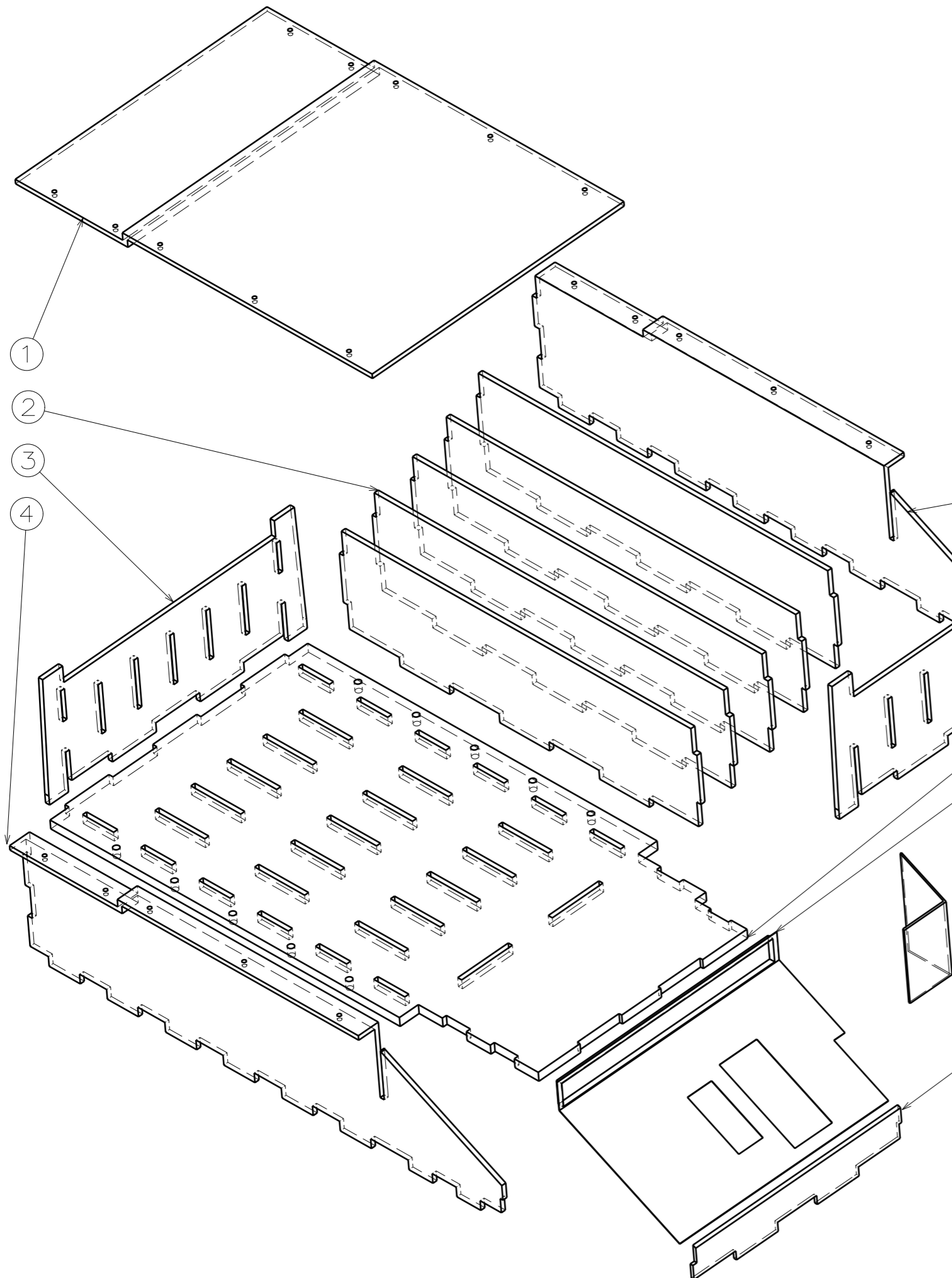
Weight per litre	0.98 – 1.02 kg/l
Flash point	> 41°C
Available sizes	0.5, 1.0 or 5.0 Litre

Last updated 03/2015

JUST CHEMICALS GMBH
Gottlieb-Daimler-Straße 10
69514 LAUDENBACH
GERMANY

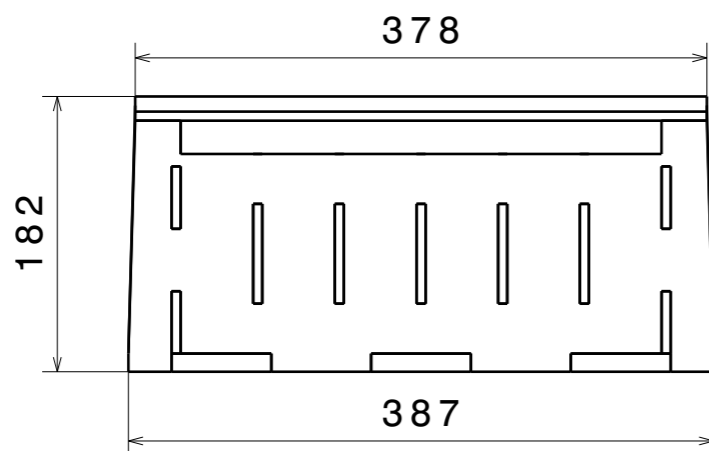
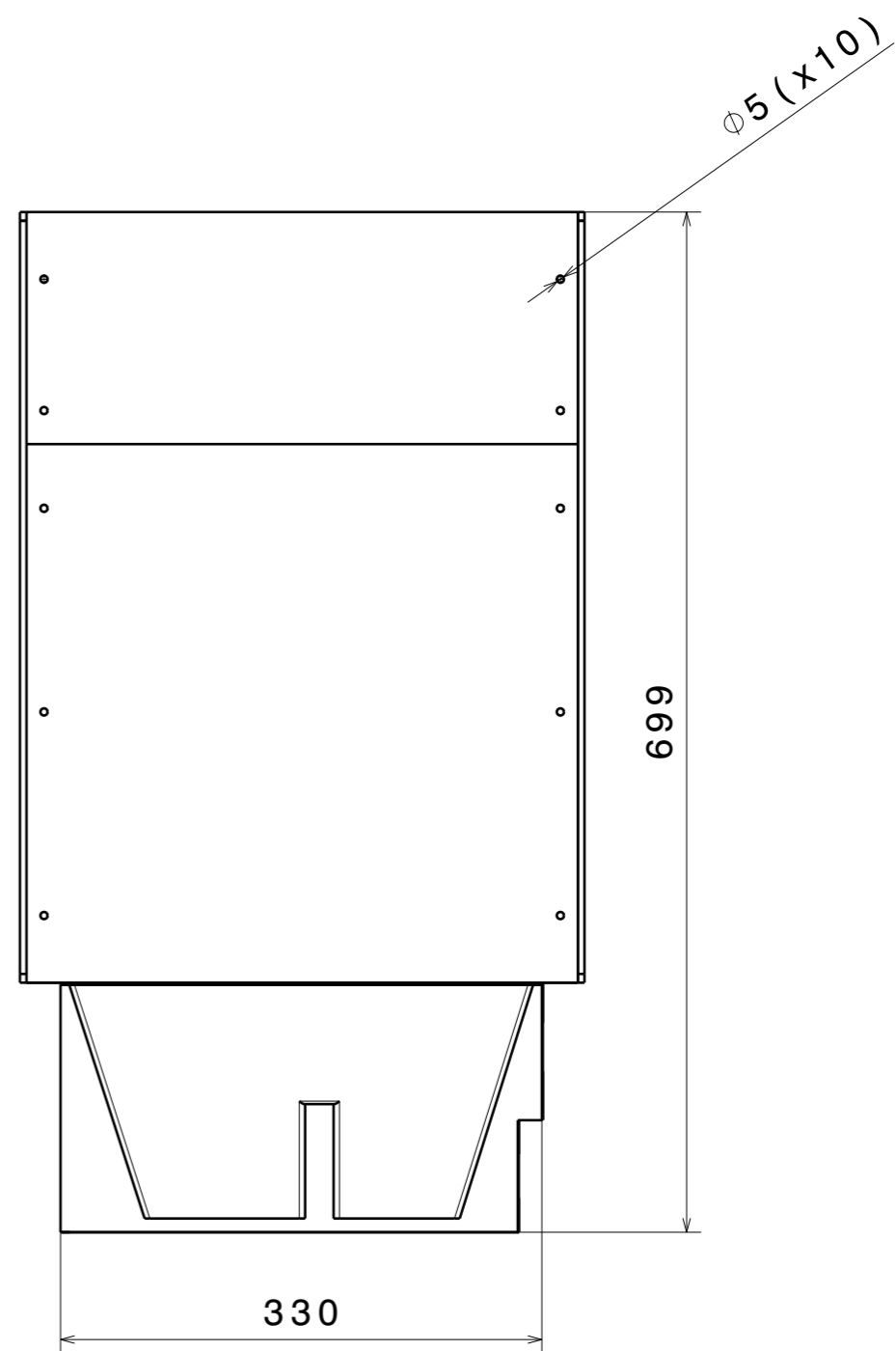
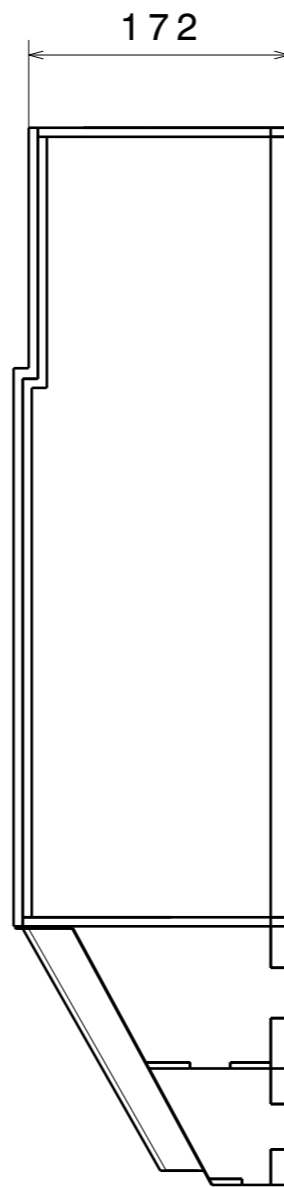
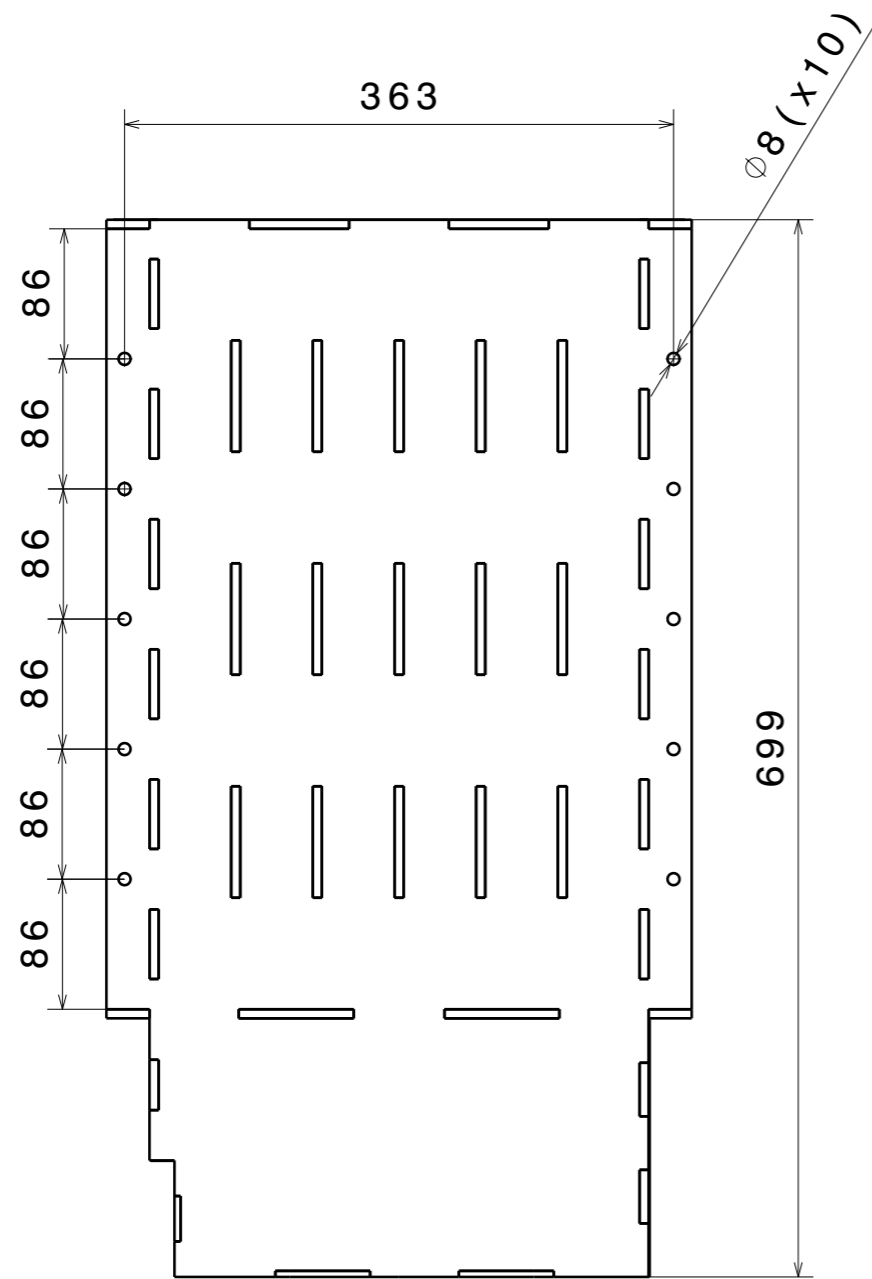
Tel 0049(0)-6201 - 42810
Fax 0049(0)-6201 - 45590
Email info@jost-chemicals.de
www. jost-chemicals.de

GRAAFILINE OSA



ITEM	QTY	ID	PART
1	1	623-ACC-00080	Cover
2	5	623-ACC-00081	Inner vertical wall
3	1	623-ACC-00082	Rear wall
4	1	623-ACC-00083	Right outer wall
5	1	623-ACC-00084	Left outer wall
6	1	623-ACC-00085	Front wall
7	1	623-ACC-00086	Floor
8	1	623-ACC-00087	Electronic section cover
9	1	623-ACC-00088	Wall 1
10	1	623-ACC-00089	Wall 2
11	1	623-ACC-0090	Electronic section walls
12	1	623-ACC-00091	Wall 3

	Material: CFRP	Unmarked Tolerances ISO - 2768	Mass: 3,2(kg)	Scale: 1:5
Drawn	Rait Läänemets	Title: Accumulator container		
Checked				
Approved				
Tallinn TU		Sheet: 1/1	ID: 623-ACC-A0008	



	Material:	CFRP	Unmarked Tolerances	Mass:	Scale:
			ISO - 2768	3,2(kg)	1:5
Drawn	Rait Läänemets	Accumulator container			
Checked					
Approved					
Tallinn UT		Sheet:	ID:		
		1/1			