

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL

INSENERITEADUSKOND

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

**ÕHUTAKISTUST VÄHENDAVA SÜSTEEMI
PROJEKTEERIMINE TUDENGIVORMELILE FEST18**

DESIGN OF A DRAG REDUCTION SYSTEM FOR FORMULA STUDENT CAR
FEST18

BAKALAUREUSETÖÖ

Üliõpilane: Kaarel Haavajõe

Üliõpilaskood: 155476 MAHB

Juhendaja: Maarjus Kirs, Nooremteadur

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 esitatud nõuetele

“.....” 201.....

Juhendaja:

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

“.....”.....201... .

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE

Autor: Kaarel Haavajõe

Lõputöö liik: Bakalaureusetöö

Töö pealkiri: Õhutakistust vähendava süsteemi projekteerimine tudengivormelile FEST18

Kuupäev: 21.05.2019

57 lk

Ülikool: Taltech

Teaduskond: Inseneriteaduskond

Instituut: Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

Töö juhendaja: nooremteadur Maarjus Kirs

Sisu kirjeldus:

Antud lõputöö ülesanne on projekteerida formula student klassi kuuluvale tudengivormelile FEST18 õhutakistust vähendav süsteem. Töö eesmärkideks on tutvuda olemasolevate lahendustega ning projekteerida kompaktne süsteem, mis vastaks Formula Student Germany reeglitele. Detailide massi optimeerimisega tagati süsteemi kergus. Süsteem on projekteeritud, kasutades programmi CATIA V5 R21, tugevusarvutused teostati programmis ANSYS 19.0. Teostatud volavussimulatsiooniks kasutati programmi Star-CCM+.

Projekteeritud tooted on valmistatud tiimisiselt TalTechis ning Tallinna Tehnikakõrgkoolis. Komplekteerimisel pandi suurt rõhku süsteemi kaubanduslikule välimusele.

Märksõnad: Õhutakistust vähendav süsteem, CATIA V5 R21, ANSYS 19.0, hägusloogika kontrollid

ABSTRACT

Author: Kaarel Haavajõe

Type of the work: Bachelor Thesis

Title: Design of a drag reduction system for formula student car FEST18

Date: 21.05.2019

57 pages

University: TalTech

School: School of Engineering

Department: Department of Electrical Power Engineering and Mechatronics

Supervisor of the thesis: Early stage researcher Maarjus Kirs

Abstract:

The aim of this bachelor thesis was to design and manufacture a drag reduction system for FS Team Tallinn 2017/2018 year season formula car FEST18. The purpose of the work is to familiarize with existing solutions and to design a compact system that complies with Formula Student Germany rules. The optimization of the system was ensured by optimizing the mass of the parts. The system has been designed using CATIA V5 R21, strength calculations were performed in ANSYS 19.0. The Computational Fluid Dynamics was used for Star-CCM +.

The system is made in TalTech and Tallinna Technical College. Assembling parts, emphasis was placed on details appearance.

Keywords: Drag reduction system, CATIA V5 R21, ANSYS 19.0, Fuzzy logic controller

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Lõputöö teema: **Õhutakistust vähendava süsteemi projekteerimine tudengivormelile FEST18**

Lõputöö teema inglise keeles: **Design of a drag reduction system for formula student car FEST18**

Üliõpilane: **Kaarel Haavajõe, 155476 MAHB**

Eriala: **Mehhatroonika**

Lõputöö liik: **Bakalaureusetöö**

Lõputöö juhendaja: **Maarjus Kirs**

Lõputöö esitamise tähtaeg: **“21” mai 2019a**

Üliõpilane (allkiri)

Juhendaja (allkiri)

Õppekava juht (allkiri)

SISUKORD

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE	3
ABSTRACT	4
LÕPUTÖÖ ÜLESANNE	5
TABELITE JA ILLUSTRATSIOONIDE LOETELU	7
EESSÕNA	8
LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU	9
SISSEJUHATUS.....	10
1. VÕISTLUSSARJA REEGLID [2].....	12
1.1. Üldised reeglid.....	12
1.2. Aerodünaamika reeglid.....	12
2. TEISTE TIIMIDE LAHENDUSED.....	14
2.1. Tudengivormelis kasutatavad lahendused	14
3. PROJEKTEERIMINE	16
3.1. Projekteerimist piiravad tingimused	17
3.2. Mootori valik.....	18
3.3. Projekteeritud elemendid.....	21
4. ANALÜÜS	24
4.1. Tagatiiva tugevus analüüs.....	24
5. TOOTMINE	27
5.1. 3D-prinditud detailid.....	27
5.2. Lõiketöötlus.....	28
5.3. Lamineerimine	30
5.4. Komplekteerimine	31
6. DRS-SÜSTEEMI JUHTIMINE	32
6.1. Servomootori tööpõhimõte.....	32
6.2. DRS-süsteemi juhtimine.....	33
KOKKUVÕTE	36
SUMMARY	38
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU	40
GRAAFILINE OSA	42

TABELITE JA ILLUSTRATSIOONIDE LOETELU

Sele 1.1 Maksimaalsed aerodünaamika elementide mõõtmed [2].	13
Sele 2.1 Formula1 tagatiiva DRS lahendus [3]	14
Sele 2.2 Formula Student TU BRno Racing polditav lahendus [4]	15
Sele 2.3 FS Team Tallinn 2014 aasta tudengivormeli pneumaatiline lahendus [5].	15
Sele 2.4 FS Team UAS Sankt Augustin ülekandega lahendus [6]	15
Sele 3.1 FEST18 aerodünaamiliste näitajate võrdlus erinevates DRS-asendites [7]	16
Sele 3.2 Aerodünaamiliste kehade võrdlus [8]	17
Sele 3.3 Õhukiirus tagatiiva kolmanda profiili ümber [7].	18
Sele 3.4 Ekraanitõmmis profiilist optimaalse aerotsentriga ning mootori asetusega.	19
Sele 3.5 Sobivaks osutunud servo Savox SV-1260MG [9].	20
Sele 3.6 Kolmanda profiili võlli ning mootori rapid	21
Sele 3.7 Võlli katmik ning servomootori liidese stabilisaator.	21
Sele 3.8 Tagatiiva otsaplaadid	22
Sele 3.9 Tagatiiva kolmanda profiili sisestruktuur	22
Sele 3.10 Rapidi võll ning otsaplaadi poldi kinnitus insert.	23
Sele 4.1 FEST18 Tagatiiva FEM -analüüs	24
Sele 4.2 Tagatiiva rapidi topoloogiline analüüs	25
Sele 4.3 FS Team Tallinna Tudengivormeli FEST18 CFD simulatsioon.	25
Sele 4.4 Tagatiiva võlli katmik.	26
Sele 5.1 Laserpaagutust illustreeriv ekraanitõmmis [14]	27
Sele 5.2 Laserpaagutatud katmik ning servo liidese stabilisaator	28
Sele 5.3 Laserpaagutatud mootori kinnitus rapid	28
Sele 5.4 Tagatiiva sisestruktuuride toorik	29
Sele 5.5 Laserlõigatud otsaplaadi vaht ning poldi kinnitus insert.	29
Sele 5.6 Treitud võll rapidi ning otsaplaadi ühendusest	29
Sele 5.7 Tagatiiva kolmanda profiili vorm	30
Sele 5.8 Otsaplaadi vaht koos insertiga ning lõplik otsaplaat	30
Sele 5.9 Tagatiiva profiili liimimine.	31
Sele 5.10 FEST18 komplekteeritud tagatiib	31
Sele 6.1 Servoajami tööpõhimõte.	32
Sele 6.2 PWM -signaali tööpõhimõte [23]	33
Sele 6.3 Hägusloogika kontrolleri skeem.	33
Sele 6.4 Juhtplaadis genereeritava PWM- signaali skeem	34
Sele 6.5 FS Team Tallinn suletu tiivaga kiirendusalal [25].	35
Sele 6.6 FS Team Tallinn avatud tiivaga kiirendusalal [25].	35
Tabel 3.1 Tagatiiva kolmandale profiilile mõjuvad jõud kiirusel 110 km/h	18
Tabel 3.2 Sobiva mootori valik	20

EESSÕNA

Antud bakalaureusetöö valmis Formula Student Team Tallinn meeskonna vajadusest luua aktiivne õhutakistust vähendav süsteem 2017/2018. aasta vormelile FEST18. Töö koostamine ning katsete läbiviimine leidis aset Tallinna Tehnikaülikoolis ning Tallinna Tehnikakõrgkoolis.

Soovin tänu avaldada enda lõputöö juhendajale, nooremteadur Maarjus Kirsile, Formula Student Team Tallinn liikmetele, eriti komposiitmeeskonna kaptenile Kalev Karbile, meeskonna juhendajale Rico Jaanipere ning varem sarjas kaasa löönud tudengitele ehk veteranidele.

LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU

FEM – Lõplike elementide meetod (ingl k Finite Element Method)

CFD – Arvutuslik vedeliku dünaamika (ingl k Computational Fluid Dynamics)

DRS – Õhutakistust vähendav süsteem (ingl k Drag Reduction System)

CAD – Raalprojekteerimine (ingl k Computer-aided design)

RAPID – Laserpaagutatud detail, 3D- printimise teel.

PWM – Pulsilaiusmodulatsioon (ingl k Pulse Width modulation)

FEST14 – 2013/2014. aasta FS Team Tallinna poolt valmistatud vormel (ingl k Formula Estonia 14)

FEST17 – 2016/2017. aasta FS Team Tallinna poolt valmistatud vormel (ingl k Formula Estonia 17)

FEST18 – 2017/2018. aasta FS Team Tallinna poolt valmistatud vormel (ingl k Formula Estonia 18)

SISSEJUHATUS

Tudengivormelisari Formula Student on tootearendusvõistlus, mis on mõeldud eelkõige inseneri eriala omandavatele üliõpilastele. Selle eesmärk on anda tudengile reaalne auto projekteerimise ja valmistamise kogemus, projekteerides ning ehitades prototüüpvormelit. Formula Student tudengivormeli klassi kuuluva elektrivormeliga on võimalik hooaja lõpus osaleda ka erinevates riikides toimuvatel võistlustel. Reeglite järgi on lubatud ühe vormeliga osaleda võistlustel ainult ühe 12-kuulise hooaja jooksul, seega tuleb igal aastal nullist projekteerida ning toota uus sõiduk. Vormel projekteeritakse ning ehitatakse valmis kaheksa kuu jooksul, millele järgneb kahekuuline testperiood ning hooaja lõpus võistlusperiood.

FS Team Tallinn koosneb meeskonnast, kuhu kuuluvad kahe kooli, Tallinna Tehnikaülikooli ja Tallinna Tehnikakõrgkooli insenerid. Meeskond loodi 2007. aastal ja sellest ajast on ehitatud üle kümne tudengivormeli, mis on võistlustel silma paistnud ning mis on võitnud nii mõnegi poodiumikoha. Viimane valminud vormel, FEST18, mille õhutakistust vähendava süsteemi projekteerimine on antud lõputöö teemaks, võitis konkurentide eest mitmeid esimesi ning teisi kohti erinevatel aladel.

Nimelt panevad tudengid võistlusperioodil valminud elektrivormeli proovile tihedas konkurents, võisteldes teiste tippülikoolidega staatilistel ja dünaamilistel aladel. Staatilistel aladel peavad tudengid kaitsma oma lahendusi oma ala tippspetsialistidest kohtunike ees. Lisaks sellele tuleb kaitsta ka vormeli tootmiskulude aruannet, mis annab tudengile hea ülevaata insenerimaailma majandulikust poolest.

Igal aastal tehakse reeglites ka muudatusi ning dünaamilistele aladele võistleva pääsemiseks peab vormel läbima põhjaliku tehnilise kontrolli, kus kontrollitakse sõiduki vastavust reeglitele. Dünaamilised alad koosnevad kiirendus-, kurvisuutlus-, sprindi- ning kestvusvõistlusest.

Formula Student Team Tallinna esimesed vormelid valmisid toruraamist [1]. 2015. aastal jõuti järeldusele, et toruraam on optimeeritud miinimumini ning konkurents püsimeks ning ka enese arendamiseks tuleks kasutusele võtta alternatiivne materjal. Tudengivormeli meeskond proovib igal aastal muuta vormeli kaalu võimalikult väikeseks, seega otsustati 2015. aastal valmistada esimene süsinikkiust monokokkere.

Meeskond alustas aerodünaamika paketi projekteerimisega juba 2011. aastal, kuid pärast testimist jõudis esimene pakett auto külge alles järgneval aastal. Aerodünaamika võeti kasutusele, et konkurents püsides suudaks vormel saavutada kiiremaid ringiaegu.

Õhutakistust vähendavat süsteemi loodi esmakordselt 2014. aastal, mis oli ehitatud pneumaatilisele süsteemile. Kuna lahendus oli raske ning polnud piisavalt efektiivne, lõpetati esialgu selle kasutamine. Kuid võistlushooaja FEST17 ajal märkas meeskond, kuidas süsteemi omavat konkurenti saatis edu,

ning jõudis järeldusele, et tudengivormelile FEST18 on vaja projekteerida õhutakistust vähendav süsteem.

Antud bakalaureusetöö ülesanne ongi projekteerida ja valmistada tudengivormeli FEST18 õhutakistust vähendav süsteem. Peamisteks eesmärkideks on luua võimalikult efektiivne, töökindel ning kerge lahendus. Eesmärkide saavutamiseks tuleb arvestada aerodünaamika paketi poolt mõjuvaid jõude erinevates situatsioonides ning tagada oma töös konkreetsus ning täpsus, viies süsteem vastavusse FSG reeglitega. Antud süsteemi modelleerimiseks kasutatakse projekteerimistarkvara CATIA V5 R21. Voolavusanalüüsid on teostatud programmis Star-CCM+ ning lõpliku elementide meetodit kasutati analüüsimiseks programmis ANSYS 19.0.

1. VÕISTLUSSARJA REEGLID [2]

Nagu igas võistlussarjas, on ka Formula Student tootearendusvõistlusel reeglid, mida peab jälgima nii võistlustel, aga ka juba vormeli disainimisfaasis. Vormel tuleb projekteerida ja valmis ehitada Formula Student Germany reeglite järgi. Enne võistlusi peab auto läbima tehnilise kontrolli ja reeglitele mittevastavaid vormeleid rajale ei lasta. Vormel peab vastama reeglitele ka rajalt tulles, sest kontrolli võidakse teostada ka pärast ükskõik millist võistlusala etappi, seega on väga oluline silmas pidada, et juba disainifaasis viiakse oma lahendused reeglitega vastavusse, et vältida hilisemaid probleeme ja võistlusest eemalejäämist.

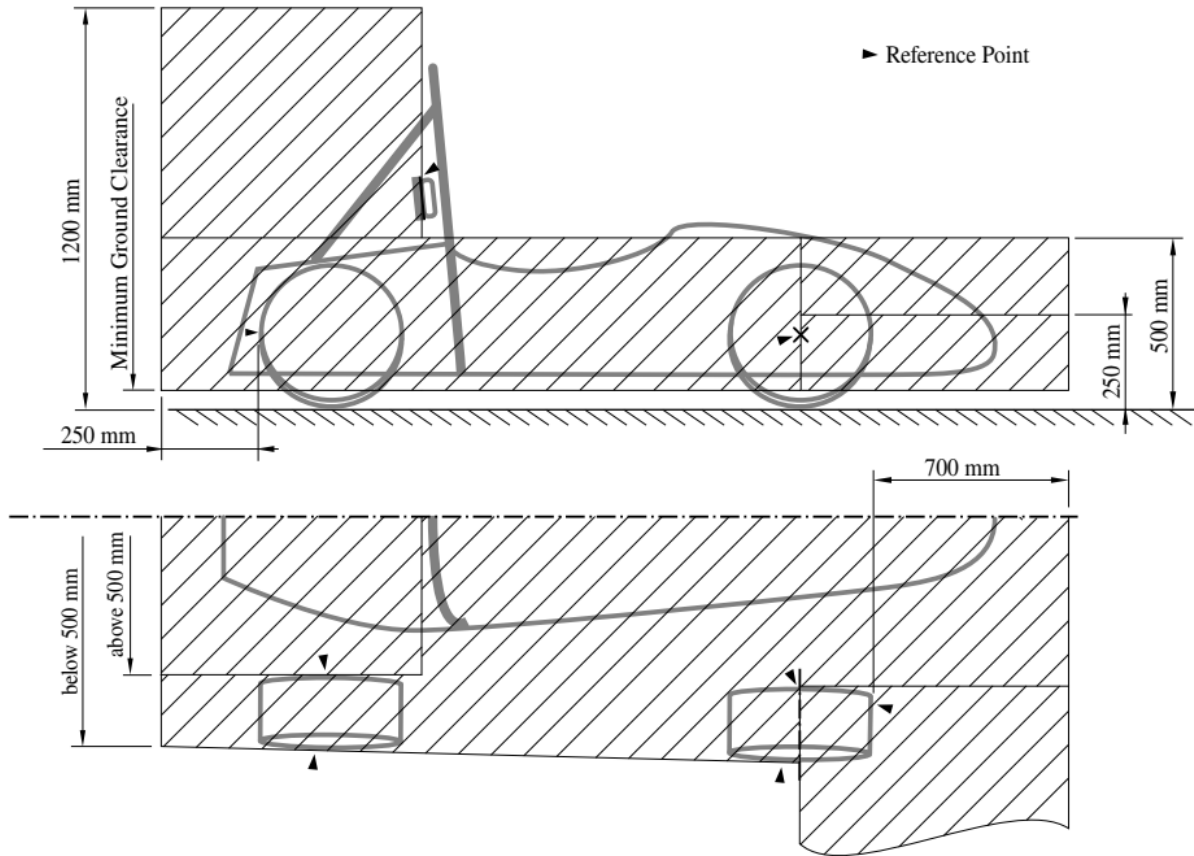
1.1. Üldised reeglid

- T1.1.1: Vormeli statsionaarne põhjakõrgus, mis tahes kohast mõõdetuna välja arvatud rehvidest, peab olema minimaalselt 30 mm maapinnast.
- T1.1.2: Mis tahes aerodünaamiline element, mis on kõrgemal kui 500mm maapinnast, ei tohi olla rehvi sisemisest pinnast laiem.

1.2. Aerodünaamika reeglid

- T1.2.1: Aerodünaamiline element on spetsiaalselt projekteeritud süsteem, mis kinnitub autole, et juhtida õhuvoolu ümber auto, tagades suurema survejõu ning väiksema takistusjõu. Süsteemi kinnitus ei ole aerodünaamiline element, kui ta ei taga aerodünaamilist efekti.
- T1.2.2: Kõik ettepoole suunatud aerodünaamilised servad, mis võivad kokku puutuda jalakäijaga, peavad olema horisontaalsete seina puhul minimaalselt 5mm raadiusega ning vertikaalsete servadega minimaalselt 3mm raadiusega.
- T1.2.3: Mis tahes aerodünaamiline element, mis paikneb peatoe esikülge läbivast tasandist tagapool, peab olema madalamal kui 1.2m maapinnast.
- T1.2.4: Aerodünaamilised elemendid ei tohi ulatuda taha poole rohkem kui 250mm rehvi kõige tagumisest pinnast (Sele 1.1).
- T1.2.5 Kõik aerodünaamika reeglid peavad olema täidetud nii juhiga kui ka ilma juhita.
- T1.2.6 Kõik aerodünaamilised elemendid ei tohi mis tahes suunas läbi painduda rohkem kui 25mm, 50N jõu juures.

- T1.2.7: Aerodünaamiline element, mille pindala on suurem kui 225cm^2 , ei tohi jõu mõjumise suunas läbi painduda rohkem kui 10mm , 200N jõu juures.



Sele 1.1 Maksimaalsed aerodünaamika elementide mõõtmed [2].

2. TEISTE TIIMIDE LAHENDUSED

DRS ehk Drag Reduction System on autospordis laialdaselt kasutust leidnud aerodünaamiline element, mille eesmärk on vähendada autole õhu poolt tekitatavat takistusjõudu, et saavutada suurem tippkiirus ja parem ringiaeg [3]. Tavaliselt käib mõiste reguleeritava tagatiiva kohta, kus aerodünaamilisel elemendil või elementidel on seadistatud kaks lülitatavat asendit. Lülitus toimub tavaliselt juhi poolt ning on lubatud rajal vaid sirgetel, et tagada ohutus suurema kiiruse ja väiksema survejõu juures. Süsteemid on kasutusel näiteks F1, F2, DTM ja ka GT3 sarjades (Sele 2.1).

Tudengivormeli sarjas on aktiivaero reeglid teistest mootorispori sarjadest leebemad, et tagada sarja põhimõte - innovatsioon tootearenduses. Lubatud on kasutada DRS-süsteemi nii esi- kui ka tagatiival. Seejuures ei sätestata ära ka seda, kas lülituse peaks tegema juht või auto juhtelektroonika.



Sele 2.1 Formula1 tagatiiva DRS lahendus [3]

2.1. Tudengivormelis kasutatavad lahendused

DRS ehk õhutakistust vähendav süsteem on tõestanud end ka juba tudengivormeli klassis. Antud süsteem on nii efektiivne, et erinevad tiimid on leidnud innovatiivseid lahendusi, tagades siiski süsteemi põhilise olemuse. Üheks lihtsamaks viisiks on teha tagatiiva otsaplaatidele erinevad poltimiskohad, kuhu tiivaprofiili kinnitada. Lahenduse plussiks on tema lihtsus ning töökindlus, kuid peamine miinus selle lahendus juures on see, et seda ei ole võimalik sõidu ajal muuta (Sele 2.2). Antud lahendust on valdavalt kasutanud ka FS Team Tallinn.

Mõned tiimid on oma lahendustes läinud Formula1 teed. Nimelt on projekteeritud profiilide liigutamiseks tiiva keskele tigu- või pneumaatiline ülekanne. Antud süsteemi saab piloot sõidu ajal vastavalt olukorrale kontrollida. Suureks miinuseks võib pidada antud lahenduse puhul kaalu, sest õhu hoiustamiseks tuleb kasutada suruõhupaaki (Sele 2.3). Antud lahendust kasutas esmakordselt FS Team Tallinn oma vormeli aerodünaamikapakil 2014. aastal.

Viimastel aastatel on hakatud kasutama profiilide liigutamiseks servomootorit. Antud variant on leidnud laialdast kasutust elektrivormelite seas. Mootor paigaldataks tagatiiva põhiprofiili sisse,

millest tuleb välja ülekanne, mis muudab vastavalt vajadusele profiili asendit (Sele2.4). Servomootorit kasutades on võimalik lasta juhtida piloodil kas nuppudega või siis automaatselt juhtimissüsteemiga. Analoogset süsteemi kasutab ka FS Team Tallinna vormel FEST18, millel põhineb ka antud lõputöö.



Sele 2.2 Formula Student TU BRno Racing polditav lahendus [4]



Sele 2.3 FS Team Tallinn 2014 aasta tudengivormeli pneumaatiline lahendus [5]

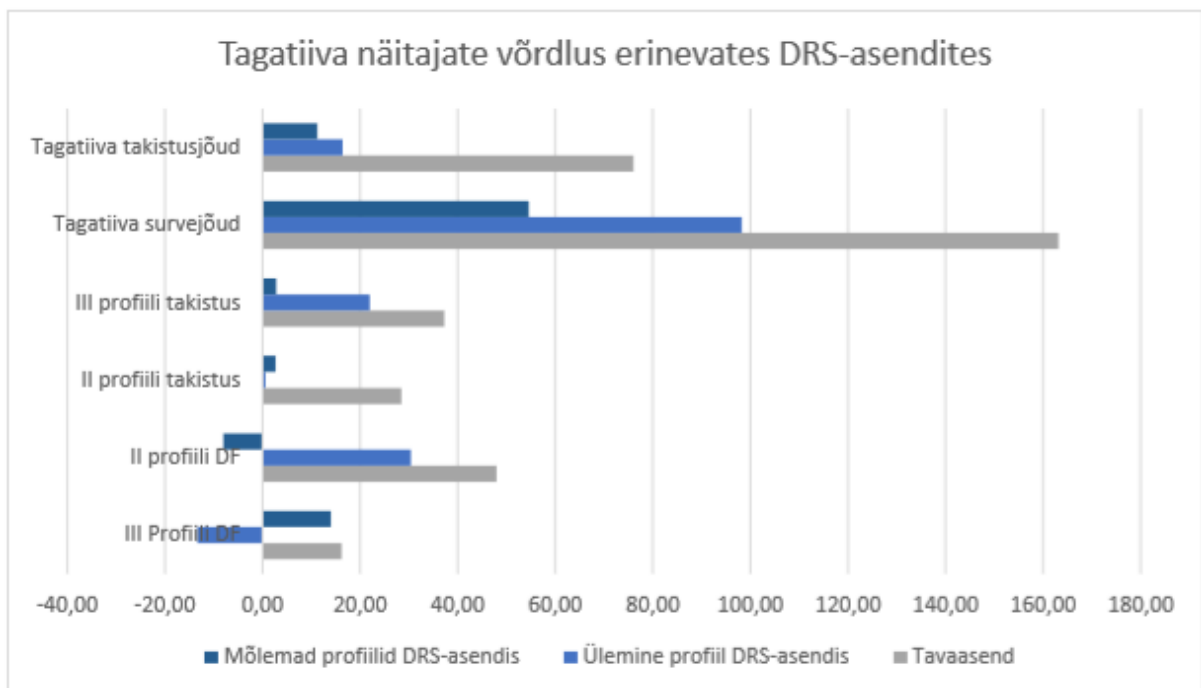


Sele 2.4 FS Team UAS Sankt Augustin ülekandega lahendus [6]

3. PROJEKTEERIMINE

Tagatiib on vormelauto kõige ebaefektiivsem ning ka kõige suurema takistusega aerodünaamiline element, tekitades 37% meie auto kogutakistusest [7]. Umbes 90% tagatiiva takistusest moodustavad teine ja kolmas profiil - see kinnitab vajadust kasutada juhitavaid profile.

Tiimi aerodünaamika spetsialistid on ette määranud, et mõttekas on kasutada DRS-i vaid kolmandal profiilil, kuna teise profiili juhtimine vähendab takistusjõudu vaid 5 N kiirusega 15,3 meetrit sekundis. Samas kolmanda profiili juhtimine vähendab kogu auto õhutakistusjõudu ligi viiekordselt (Sele 3.1) [7].



Sele 3.1 FEST18 aerodünaamiliste näitajate võrdlus erinevates DRS-asendites [7]

Servomootori lülitatava profiili sisse viimisel on tähtis leida kõnealuse profiili aerodünaamiline tsenter. Seda selleks, et auto liikumisel ei mõjuks parasiitjõudusid, mis profiili tahaksid nii-öelda pikali lükata. Kui aerodünaamiline tsenter ühtib mootori võlli tsentriga, on sõites profiili puhkeasendiks just kinnine asend. Lülitus tagab avatud ehk pikaliasendi. Tiiva aerodünaamilise tsentri arvutas välja aerodünaamika eest vastutav meeskonnaliige. Aerodünaamiline tsenter selgitati välja voolavusanalüüside käigus. Teades tsentrit, on võimalik alustada õhutakistust vähendava süsteemi projekteerimisega. Silmas tuleb pidada süsteemi lihtsust ning kompaktsust.

3.1. Projekteerimist piiravad tingimused

Tudengivormeli FEST18 õhutakistust vähendava süsteemi projekteerimisel on mõningad tingimused, millest tuleb rangelt kinni pidada. Üks peamisi põhjuseid, mis paneb projekteerimisele piiranguid, on võistlussaraja reeglid. Nimelt on reeglites öeldud, kui kaugele auto taha tohib aerodünaamiline element ulatuda. Seega peab silmas pidama ülemise tiivaprofiili ära keeratas, et profiil poleks lubatud mõõtmetest väljas (Reegel T1.2.4).

Teiseks on ära mainitud, kui lai tohib olla tagatiib, seega peab arvestama tagatiiva otsaplaatide külge kinnitamisel, ega mõni element välja ei ulatuks (Reegel T1.1.2). Üheks olulisemaks tingimuseks võib pidada reeglit, mis sätestab, et aerodünaamiline element ei tohi läbi painduda mitte rohkem kui 10mm. Seda reeglit arvestades tuleb projekteerida vastav tiivaprofiili kinnitus (Reegel T1.2.7).

Arvestada tuleb ka teiste meeskonna liikmetega ning nendega kooskõlastades leida parim lahendus. Mootor sai paigutatud tiivaprofiili sisse ning kuna mootori töötamiseks ning kontrollimiseks on vaja juhtmeid, tuli juhtmestajatega koostöös leida lahendus, kuidas neile kõige parem juhtmeid vedada. Väga oluline on arvestada oma tehnilistes lahendustes ka aerodünaamika disaini eest vastutavate spetsalistidega, sest iga element, mis asub tiiva küljes ja ei ole aerodünaamiline, segab paketi efektiivsust. Seega tuleb kõik väljaspool tiiba olevad detailid disainida tilga kujuga, kuna tilgal on kõige väiksem õhutakistus (Sele 3.2).

Shape	Drag Coefficient
Sphere	0.47
Half-sphere	0.42
Long Cylinder	0.82
Short Cylinder	1.15
Streamlined Body	0.04
Streamlined Half-body	0.09

Measured Drag Coefficients

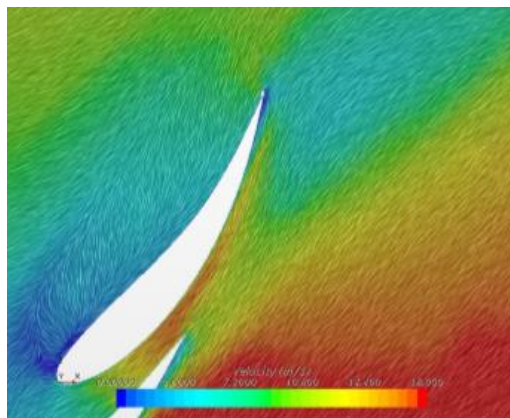
Sele 3.2 Aerodünaamiliste kehade võrdlus [8]

Aerodünaamiline efektiivsus on tiimisiseselt põhiargument, millist lähtuvalt muudetakse disaini, sest soov on hoida võimalikult suurt survejõudu ning võimalikult väikest takistusjõudu. Projekteerimisel tekitab suurt raskust tiivaprofiili kitsus, kuna sinna sisse on plaanitud panna servomootor. Et profiil oli liiga kitsas, tuli aerodünaamilist tsentrit muuta lähtudes tulemusest, mis saadi volavusanalüüsi tehes.

3.2. Mootori valik

Mootori valikul peab esmalt paika panema kriteeriumid, millele mootor peab vastama. Seega tuleb esmalt aru saada, millised jõud tagatiiva kolmandale profiilile mõjuvad. Jõud arvutas tiimis aerodünaamikaga tegelev insener, kasutades programmi Star-CCM+, voolavusanalüüside tegemiseks (Sele 3.3). Analüüs teostati poole auto kohta, sest suuremad simulatsioonid teostavad ühe analüüsi korral 1000 iteratsiooni ning võtavad keskmiselt võimsamal sülearvutis aega 6 tundi [7].

Pärast simulatsiooni teostamist ning aeroinseneriga konsulteerimist, sai koostatud tabel, kus on üles märgitud kolmandale profiilile mõjuvad jõud. Simulatsioonist tuli välja, et poolele profiilile mõjub kiirusega 110 km/h, survejõudu 30,6 N ning samal kiirusel takistusjõudu 48 N. Teades neid jõude, saab välja arvutada poolele tiivale mõjuva surve- ja takistusjõus summa, milleks tuli 56,9 N. Seega tervele tagatiiva kolmandale profiilile mõjub simulatsiooni järgi 113,8 N (Tabel 3.1). Teisendades tiivale mõjuva jõu (113,8 N) kilogrammideks, saame, et tiiva liigutamiseks kiirusel 110 km/h on vaja rakendada profiilile 11.6 kg. Seega üheks tingimuseks mootori valikul võib lugeda selle, et servo peab suutma liigutada 11.6 kg



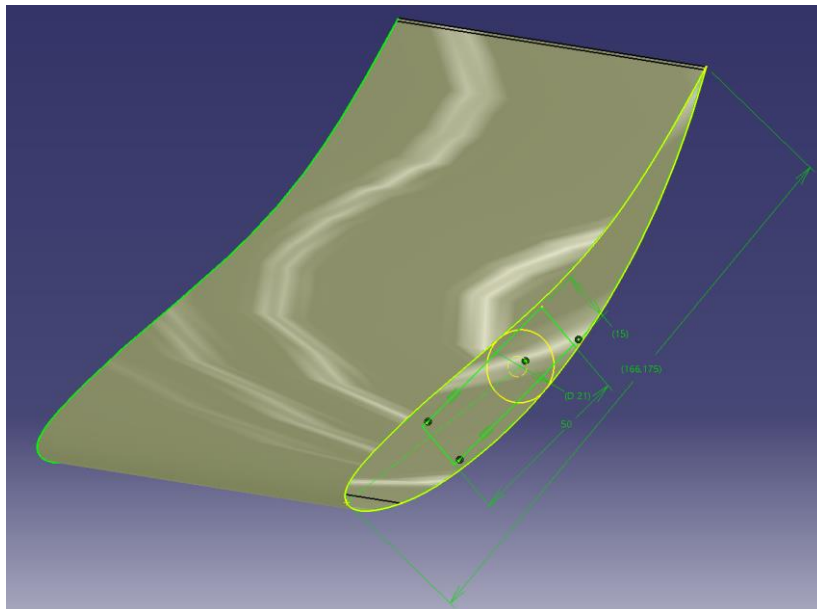
Sele 3.3 Õhukiirus tagatiiva kolmanda profiili ümber [7]

Tabel 3.1 Tagatiiva kolmandale profiilile mõjuvad jõud kiirusel 110 km/h

	Analüüs kiirusel 110 km/h, mõlemad profiilid all
Tagatiiva Kolmanda DF (Pool Profiili)	30,6 N
Tagatiiva kolmanda Drag (Pool Profiili)	48 N
Tagatiiva Kolmanda Drag+DF (Pool Profiili)	56,9 N
Tagatiiva Kolmanda Drag+DF (Terve Profiil)	113,8 N

Järgnevalt tuleb tead, kui palju on tiivaprofiilis ruumi mootorile. Seega tuleb esmalt leida üles aerodünaamiline tsenter ehk siis koht, kus on tiiba kõige kergem keerata. Et tiiva liigutamisega tsentri asukoht muutub, sai asukoha määramiseks tiiva asend kinniseks määrata. Tsenter arvutati jällegi voolavusanalüüside käigus (Sele 3.4, tähistatud pideva kollase ringjoonega).

Olenemat sellest, et tsentrist on tiiba kõige kergem keerata, peab mootor suutma ka sõites tekkivatele jõududele vastu pidada, tiivaprofiili kinni hoides. Teades keeramis kohta, saab paika panna mootori optimaalsed mõõtmed, mille määramisel tuleb arvestada, et profiili ning mootori vahele jääks ruumi, et sinna projekteerida tiiva ning servo kinnitus. Kõige kriitilisem on mootori laiuse ning pikkusega, sest tiivaprofiil piirab neid mõõde kõige rohkem. Mootori kõrgus ei määra nii suurt rolli, sest selleks tiivas ruumi on. Kuid sellest võib järeldada, et kõige optimaalsemad mootori mõõtmed oleksid laiuse poolest 15 mm ning pikkuse poolest 50 mm (Sele 3.4, tähisatud pideva rohelise joonega).



Sele 3.4 Ekraanitõmmis profiilist optimaalse aerotsentriga ning mootori asetusega

Lisaks kõigele sellele on oluline, et sobilik mootor oleks võimalikult kiire. Võistlussõidu ajal on iga sekund oluline ja iga muutuv element muudab auto kiirust, pidamist või tunnetust, eriti kui tegemist on vormeli survejõuga, mille kadumisel võib piloot kaotada vormeli üle kontrolli. Seega on oluline tagada kiire tiivaposisiooni vahetus.

Kuna tegemist on võistlusega, on väga oluline vähendada ja optimeerida igal võistlushooajal vormeli kaalu. Seega tuleb silmas pidada, et uus lahendus ei lisaks vormelile liialt kaalu. Antud põhjusel sobiks servo, mis oma kaalu poolt oleks kõige kergem.

Tabel 3.2 Sobiva mootori valik

	Savox SV-1260MG [9]	Savox Servo SA-1258TG [10]	TGY-5513MD [11]
Kaal	29,5 g	52,4 g	52,4 g
Pöördemoment	12,0 Kg/cm	12,0 Kg/cm	12,0 Kg/cm
Mõõtmed:			
Laius	15 mm	20,2 mm	20,2 mm
Pikkus	35 mm	40,2 mm	40,5 mm
Kõrgus	30,7 mm	37,2 mm	44,2 mm
Sisendpinge	7,4 V	6 V	6 V
Kiirus	0,055 S/60°	0,08 S/60°	0,18 S/60°

Parim mootor FS Team Tallinna tudengivormeli aerodünaamika efektiivsuse tõstmiseks on Savox SV-1260MG (Tabel 3.1). Kõik servod tagavad tingimuse, kus mootori jõudlus peab olema suuteline vastu pidama voolavusanalüüsis simuleeritud tulemusele, kuid mõõtmete poolest osutus kõige sobivamaks Savox servo, mudeliga SV-1260MG, sest teised valikus olnud mootorid ei mahuks oma mõõtmetega tiivaprofiili sisse (Sele 3.5). Lisaks selgus, et antud servo on valikutest kõige kergem, millega on tagatud õhutakistust vähendava süsteemi kergus. Samui on antud mootor kiireim valikutest, olles suuteline tiiva positsiooni kiirelt vahetama.



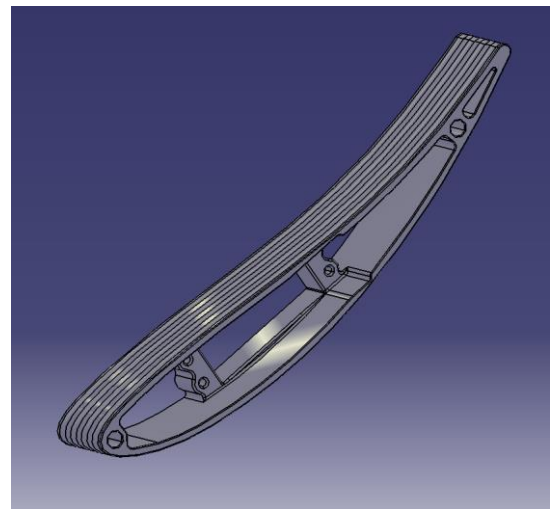
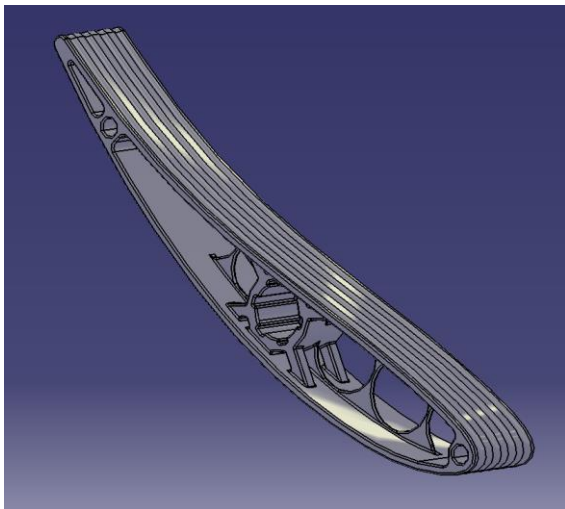
Sele 3.5 Sobivaks osutunud servo Savox SV-1260MG [9]

3.3. Projekteeritud elemendid

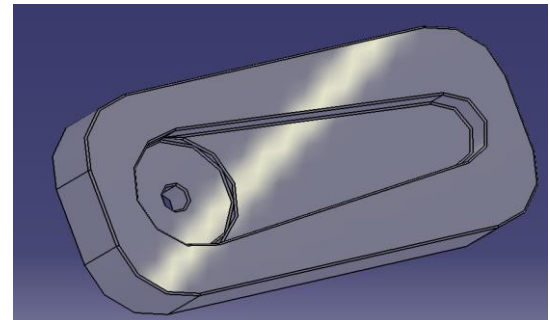
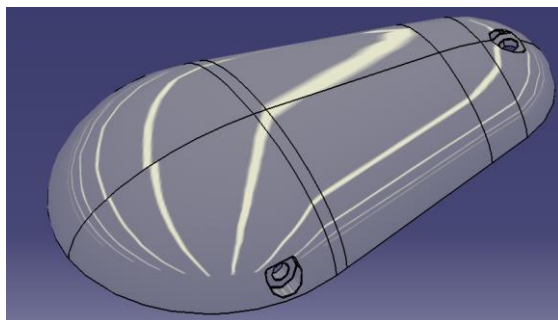
Leidnud aerodünaamilise tsentri ning profiiliga sobiva mootori, saab hakata projekteerima DRS (Drag Reduction System)-süsteemile vaja minevaid detaile.

Projekteerimist tuleb alustada tiivaprofiile ning mootorit või võlli ühendavast rapidist (3D-prindiud detail). Antud detailidele on tehtud servomootori korpus ja võlli välisdiameetri järgi keskele ava. Arvestama peab ka sellega, et detail oleks piisavalt jäik ning struktuurne. Selleks on lisatud materjali mootori või võlli kinnitamiseks. Laserpaagutatud detailidele on peale tehtud sooned, et tagada nende liimimisel parem haakuvus. Detailidel on ka tugevdatud ning keerrestatud poltimisavad, mida saab vajadusel kasutada tiiva poltimiseks tagatiiva otsaplaatide külge. 3D-prinditud detailid on võimalikult ära optimeeritud, tagades sellega detailide kergus (Sele 3.6).

Laserpaagutatud detailide hulka kuulub veel võlli katmik ning servomootori liidese stabilisaator. Kuna võlli kattev katmik on otsaplaadi küljes, tuleb disainida antud detail tilga kujuga, et vähendada sõites tekkivad takistusjõudu. Stabilisaator asub otsaplaadi sees ning tema eesmärk on hoida servo liidest paigal, mille järgi on ka antud detail projekteeritud (Sele 3.7).

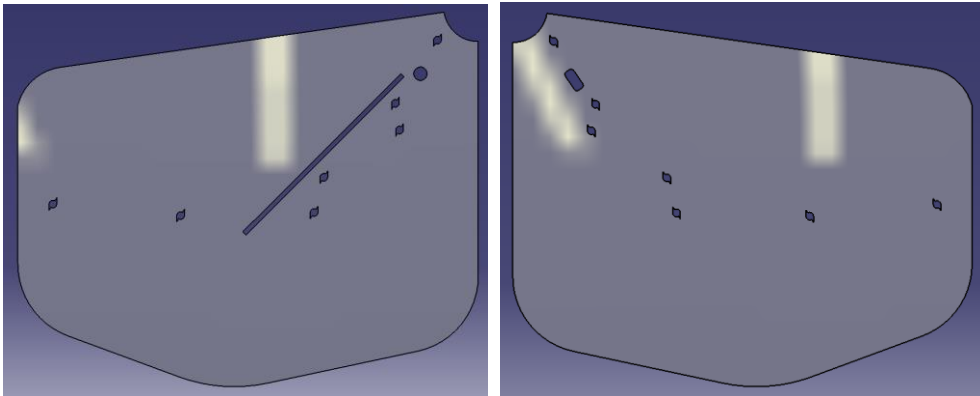


Sele 3.6 Kolmanda profiili võlli ning mootori rapid

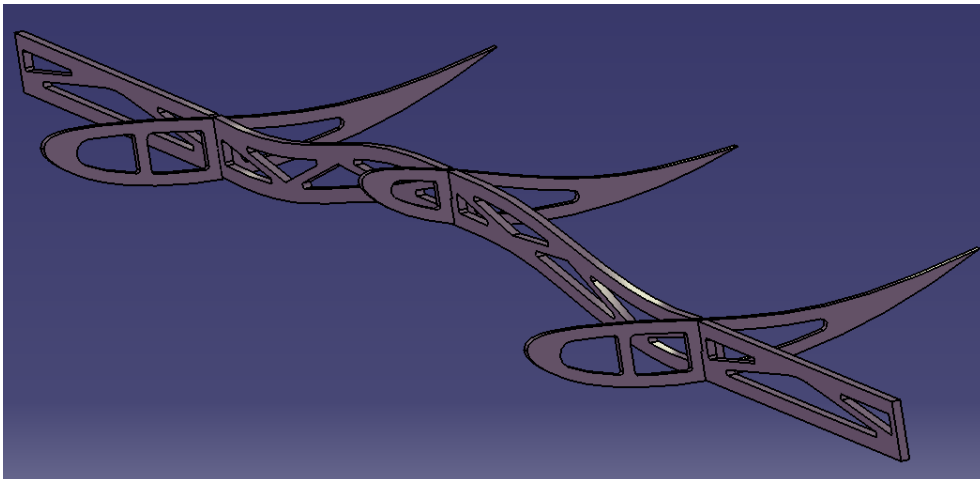


Sele 3.7 Võlli katmik ning servomootori liidese stabilisaator

Tagatiiva otsaplaatide asukoht, mõõtmed ning kuju on paika pandud aerodünaamika disainiga tegeleva inseneri poolt, kuid sellegi poolest tuleb otsaplaadi vahetude sisse teha poltimisavade kohale sobilik inserdi ava. Lisaks sellele on ühele vahetudesse tehtud pikklik ava kanali jaoks, mida mööda vedada juhtmed, sest üheks õhutakistust vähendava süsteemi eesmärgiks oli ka luua kompaktne lahendus. Teisele otsaplaadi vahule on tehtud pesa mootori liidese stabilisaatorile (Sele 3.8).



Sele 3.8 Tagatiiva otsaplaadid

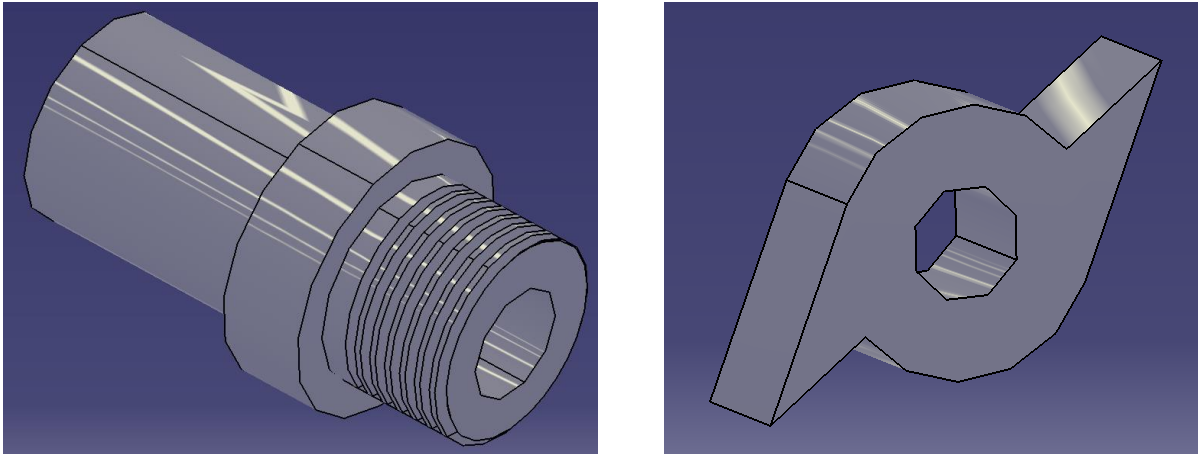


Sele 3.9 Tagatiiva kolmanda profiili sisestruktuur

Tagatiiva sisestruktuuride ülesanne on anda profiilile jäikust. Jäikus tagatakse ära optimeeritud, tugevdusribidega, vahust ning süsinikkiust koosnevast struktuurist. Sellisel juhul vastab tagatiiva profiil reeglile, kui tagatakse jäikus kohunike poolt kontrollitud jõule (Reegel T1.2.7). Struktuurid disainitakse vastavalt profiili kujule, mille on jällegi paika pannud aeroinsener (Sele 3.9), kuid stukturide vajalikkust või mõõtmed selgitatakse välja LEM-meetodiga.

Profiili kinnitamiseks otsaplaadi külge on vajalik võll, mis ühendab rapidit ning otsaplaati. Ühtlasi jookseb antud detail ka laagril, mis asetseb otsaplaadi sees, tagades väiksema takistuse, mis

omakorda soodustab servol tiiva positsooni vahetamist. Võllil on ka kõrgem aste, mis töötab justkui puksina, hoides profiili otsaplaadist eemal. Võll läbib ava, mis on disainitud vähemalt kolme juhtme läbi viimiseks, ning peal on keere, et oleks võimalus otsaplaati profiili külge kinni keerata (Sele 3.10). Viimase detailina on modeleeritud otsaplaadi sisse, poltimisavadele, insert. Antud detail ei lase poldiga kinnitades süsinikkiust ja vahust koosnevat struktuuri lõhkuda. Inserti kõrvad hoiavad detaili vahu ning süsinikkiu vahel paigal (Sele3.10).



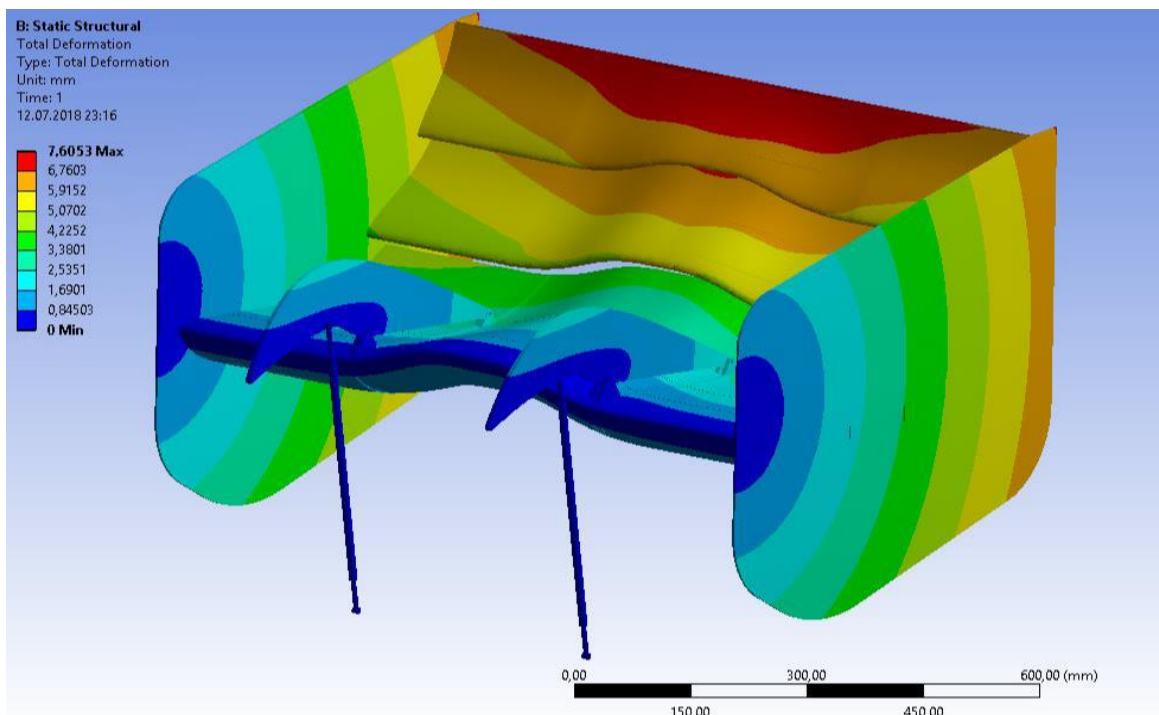
Sele 3.10 Rapidi võll ning otsaplaadi poldi kinnitus insert

4. ANALÜÜS

4.1. Tagatiiva tugevus analüüs

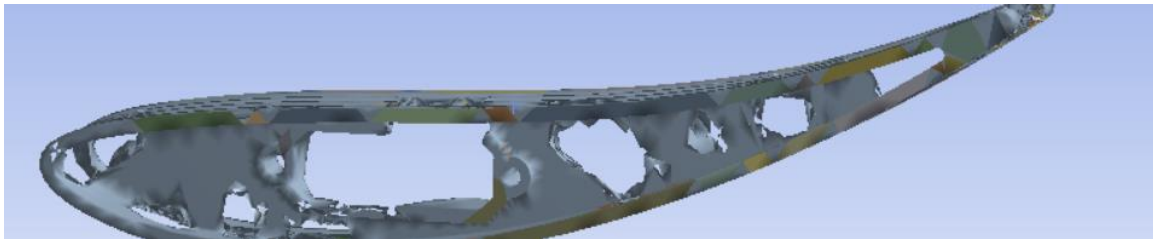
Tudengivormeli FEST18 aerodünaamika paketi tugevusanalüüsideks kasutatakse Ansys 19.0 programmi LEM-analüüsi (ing k Finite Element Method) ehk lõplike elementide meetodit. FEM põhineb keerulise geomeetria väiksemateks ja lihtsamateks elementideks muutmisel. Analüüsi numbriline väärtus kogu geomeetria jaoks saadakse elementide summeerimisel kindla eeskirja järgi. Geomeetriast moodustatud elementide kogumit nimetatakse võrgustikuks (ingl k mesh-iks). Analüüsi õiguspärasuse määrab ära elementide hulk - mida rohkem on elemente, seda täpsem on analüüs. Lisaks sellele mõjutab täpsust elementide suurus ning kuju. Parima tulemuse saab kasutades võrdkülgsete kolmnurka elementidena [12].

Võistlussarjas on reegel, mis sätestab, et aerodünaamiline element ei tohi 200 N jõu juures läbi painduda rohkem kui 10 millimeetrit jõudude mõjumise suunas (Reegel T1.2.7). Pärast projekteerimist annab FEM-analüüs ülevaate, kas lahendus vastab reeglitele. Lisaks sellele on võimalus kontrollida, kas aeropakett vastab võistlusolukorra jõududele ning pingetele. Jõud, mis mõjub tiivale, saadakse voolavusanalüüsist. Saadud surve- ja takistusjõud määrati igale tiivaprofiilile eraldi ning tiib kinnitati analüüsis nii nagu ta kinnitaks ka vormeli külge. FEST18 tagatiib paindub maksimaalselt 7,6 millimeetrit. Antud tulemus ei lähe ühegi reeglga vastuollu (Sele 4.1).



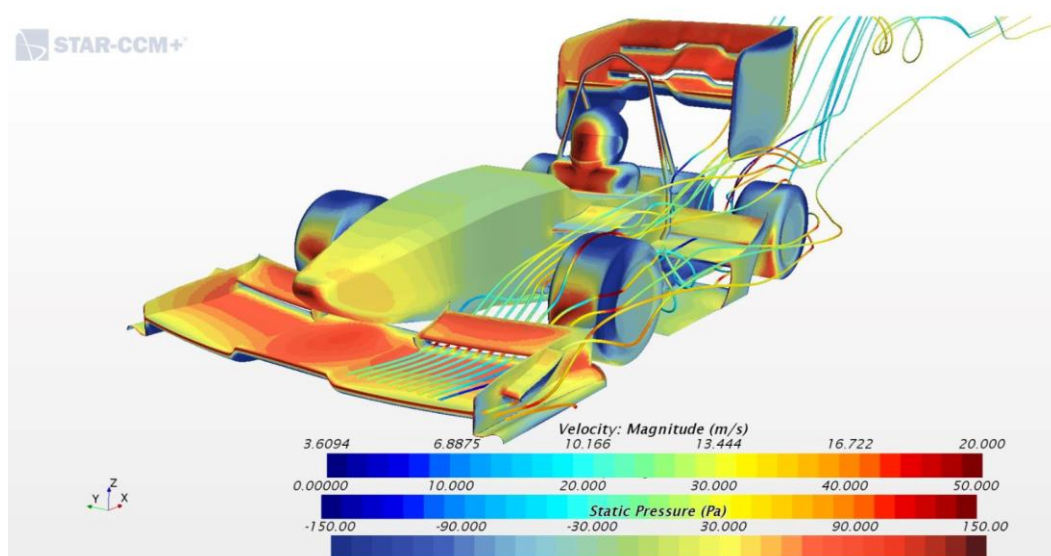
Sele 4.1 FEST18 Tagatiiva FEM -analüüs

Ühek eesmärgiks oli tagada tudengivormeli FEST18 õhutakistust vähendava süsteemi kergus. Seega sai teostatud DRS-süsteemi detailidele topoloogiline analüüs, mis andis tulemuseks optimeeritud detaili. Topoloogiline analüüs sai teostatud tagatiiva rapiditele. Antud analüüsi rajatingimusteks oli ära määratud detaili maksimaalne lubatud läbipaine, ning pinnad, mida oli lubatud optimeerida. Saadud tulemusest oli võimalik välja lugeda, kohad, kust saaks materjali kokku hoida, tagades sellega detailide kergsuse (Sele 4.2).



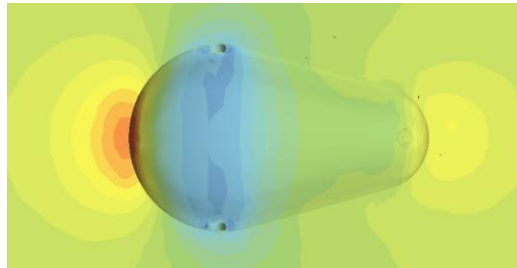
Sele 4.2 Tagatiiva rapidi topoloogiline analüüs

Voolavusanalüüsi (ingl k CFD- computational fluid dynamics) tagamaad on sarnased FEM-analüüsile. CFD on vedelikumehaanika haru, mis kasutab arvutusanalüüsi ja andmestruktuure vedelikuvoogudega seotud probleemide analüüsimiseks ja lahendamiseks [13]. Voolavusanalüüsi üles ehitades moodustatakse geometriast samuti võrgustik, mille täpsuse määrab ära samad tingimused, mis tugevusanalüüsi tehes. Simulatsioonist on võimalik välja lugeda, võistlusolukorras vormelile tekitatava surve- ja takistusjõu väärtused. Simulatsiooni erinevus reaalsusega on ligikaudu 2% [7]. Kuna Eestis puuduvad tuuletunnelid, on FS Team Tallinnal suurepärase võimalus oma tulemused kätte saada simuleerides (Sele 4.3).



Sele 4.3 FS Team Tallinna Tudengivormeli FEST18 CFD simulatsioon

Projekteeritud kate võllile sai disainitud tilga kujuga, et vähendada võllilt tulevat takistusjõudu. Katmikule teostatud CFD-analüüsist võib järeldada, et detail võinuks olla eest natuke laiem ning pikemalt taha koonduda, kuna detaili eesmine osa tekitab vähesel määral õhutakistust ning teatud maalt hakkab õhkt detaililt eralduma (Sele 4.4). Kuna detail valmis just enne võistlusi, ei olnud aega disaini muuta.



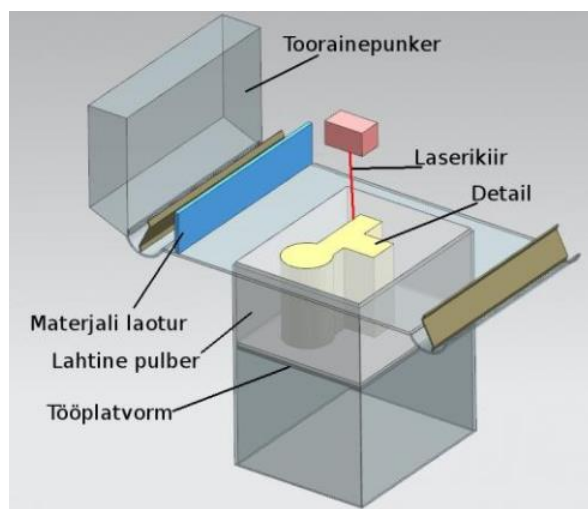
Sele 4.4 Tagatiiva võlli katmik

5. TOOTMINE

FS Team Tallinn toodab valdaval kõik oma detailid ise – umbes 90% projekteeritud detailidest valmivad Tallinna Tehnikaülikoolis või Tallinna Tehnikakõrgkoolis. On vaid mõned üksikud ostutooted nagu amordid, mootorid, kontrollid ja mõni üksik freesimistö, mis ostetakse teenusena sisse või saavad teoks tänu sponsoritele. DRS-süsteemis on ostutooteks servomootor, laager ning süsinikkiust kanal juhtmete vedamiseks läbi otsaplaadi.

5.1. 3D-prinditud detailid

Laserpaagutus ehk 3D-prinditud geomeetria põhineb 3D CAD-mudeli põhjal. Protsess põhineb kihitöötusel, sest detail valmib kihhaaval. Printimine toimub eelkuumutatud kambris tööplatvormil. Kõigepealt laotatakse platvormile õhuke pulbrikiht, millele järgneb laseriga pulbri sulatamine detaili ristlõike ulatuses, pärast mida langetatakse platvormi 0.1 mm [14]. Protsess kordub kuni kõik prinditava detaili ristlõiked on töödeldud (Sele 5.1).



Sele 5.1 Laserpaagutust illustreeriv ekraanitõmmis [14]

Tudengivormeli õhutakistust vähendava süsteemi jaoks on prinditud nii mõnigi detail. 3D-prinditud detailide eeliseks on geomeetriliste piirangute puudumine ehk saab printida, valmistada keerulisi detaile, minimaalse seinapaksusega kuni 0.5 mm (Sele 5.2). Kinnitus mootori jaoks on paagutatud tiiva profiili ning servo korpuse järgi. Servomootori sügavus rapidis määrab ära tiiva ning otaplaadi vahelise kauguse (Sele 5.3). Prinditavaks materjaliks kasutab tudengivormel polüamiid plastipulbrit.



Sele 5.2 Laserpaagutatud katmik ning servo liidese stabilisaator



Sele 5.3 Laserpaagutatud mootori kinnitus rapid

5.2. Lõiketöötlus

Detailide vesilõikamisel juhitakse pumba abil survestatud vesi kuskil 3800 Bar juures läbi peenikese düüsi. Vesi läbib düüsi tugeva ning ühtlase survega 100 m/s. Antud lõikeviisiga saab lõigata kummi, plastikut, klaasi või isegi graniiti, kuid sellisel juhul lisatakse veejoale abrasiivosakesi. Tundengivormeli auto FEST18 jaoks on vesilõikuses välja lõigatud tiibade sisestruktuurid (Sele 5.4). Vesilõikus jälgib kontuuri, mida mööda detaile toorikust välja lõigata, tarvis läheb DXF-formaadis joonist [15].



Sele 5.4 Tagatiiva sisestruktuuride toorik

Laserlõikus on laserit materjali lõikamiseks kasutatav tehnoloogia. Laserlõikusel suunatakse suure võimsusega laseri väljundit optiliste elementidega. Materjali lõikamiseks jälgib programm kontuuri, et lõigata sobilik muster. Jällegi kasutab see DXF-formaadis joonist. Laserkiir teravustatakse materjali pinnale, mis seejärel sulab või hoopis põleb läbi materjali [16]. FS Team Tallinn lõikab laserlõikusega poldi kinnitus inserte polüoksümetüleenist (POM) ning otsaplaadi vahte polümetakrimiidist [17] (PMI) (Sele 5.5).



Sele 5.5 Laserlõigatud otsaplaadi vaht ning poldi kinnitus insert



Sele 5.6 Treitud võll rapidi ning otsaplaadi ühendusest

Treimine on masinaehituse laialdaselt levinud lõiketöötuse viisi. Lõiketöötuse olemus peitub toorikute pindmise kihi eemaldamises, et saada soovitud kujuga, mõõtmete ja külladase kvaliteediga pindu [18]. Tudengivormelis treitakse kõik detailis ise, Tallinna Tehnikakõrgkoolis, eelnevalt G-koodi masinasse sisestades. Treitud võlli materjaliks on alumiinium 6082 T6 (Sele 5.6).

5.3. Lamineerimine

Tudengivormeli FEST18 meeskond kasutab tiivaprofiilide lamineerimiseks välja freesitud EB700 epoksiid baasil vorme, kuna antud materjali soojuspaisumine on sama, mis süsinikkiul [19] (Sele 5.7). Kui tegemine on lihtsa süsinikkiust plaadiga, nagu näiteks otsaplaadiga, lamineeritakse detail puhtale klaasile. Vajalike detaililide lamineerimiseks tuleb esmalt ette valmistada vorm, selleks tuleb esmalt puhastada ning siis kanda pinnale vormieemaldusvaha. Asetades süsinikkangad vormile, vajadusel koos insertidega ning vahuga, et tagada detaili jäikus, läheb detail ahju, kus saavutab oma lõpliku kõvaduse (Sele 5.8).



Sele 5.7 Tagatiiva kolmanda profiili vorm



Sele 5.8 Otsaplaadi vaht koos insertidga ning lõplik otsaplaat

5.4. Komplekteerimine

Komplekteerimist alustatakse aeropaketi sisestruktuuride ning rapide liimimisest profiili külge, kasutades kahekomponentset epoksüliimi Teroson EP5055 (Sele 5.9). Samuti liimitakse rapidi külge võll, ümber mille, hakkab tiib positsiooni vahetama. Antud liim suurepärase nakkuvusega ning on sobilik alumiinium, terase ning fiiberkomposiitmaterjalide ühendamiseks. FS Team Tallinn kasutab just seda toodet, kuna antud liimil säilib ka tugevus kõrgetel välistemperatuuridel [20].



Sele 5.9 Tagatiiva profiili liimimine

Järgnevalt tuleb vedada juhtmed läbi kanali, et oleks võimalik mootorit ka juhtida. Kanaliks on kasutatud süsinikkiust toru, otsaplaadi sees. Pärast juhtmestust saab asetada tiiva otsaplaatide külge, kust ühest otsast kinnitub tiib läbi otsaplaadi servo külge ning teiselt poolt otsaplaadis oleva laagri külge õhukese mutriga. Võllile ning laagriale läheb peale katmik, tagades sellega väiksema õhutakistuse (Sele 5.10).



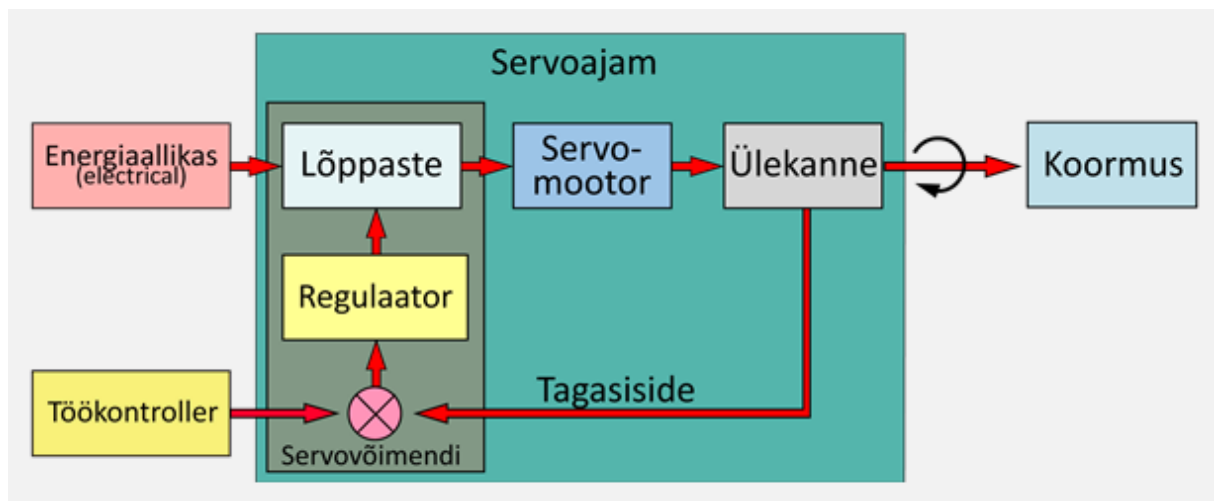
Sele 5.10 FEST18 komplekteeritud tagatiib

6. DRS-SÜSTEEMI JUHTIMINE

6.1. Servomootori tööpõhimõte

Servomootorid on iseseisvad, väiksed elektrilised seadmed, mis on võimelised pöörama või liigutama suhteliselt suuri masina osi. Oma mõõtmel võivad mootorid olla erinevad, kui ka pisemad servod on suutelised liigutama suuri raskuseid üsna täpselt. Servod on leidnud tänapäeval laialdast kasutusmänguasjades, koduelektronikas või lennukites [21].

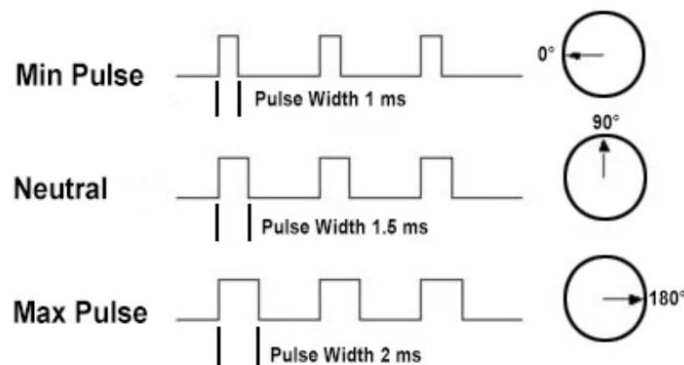
Servoajam koosneb servomootorist ja servovõimendist. Servomuundur reguleerib etteantud momendi ja kiiruse saavutamiseks mootori mähistesse antava voolu. Servovõimendi koosneb põhiosadena lõppastmest ja regulaatorist. Regulaator tagab etteande- ja tegelike suuruste pideva võrdlemisega mootori täpse töö ka muutuva koormuse tingimustes (Sele 6.1). Nimikiiruse kiirendades kestab tihti vaid mõne millisekundi, millele järgneb sama kiire pidurdus, seejuures peab positsioneerimistäpsus olema sajandikmillimeetri suurusjärgu täpsusega [22].



Sele 6.1 Servoajami tööpõhimõte

Servosid kontrollitakse muutuva elektrilise pulsi pikkusega ehk pulsilaiusmodulatsiooniga (PWM), mis saadetakse signaal juhtmest servosse. Tavaliselt saab servomootor keerata ainult 90° mõlemas suunas, mootori neutraal asendi suhtes, ehk siis servo võlli tööala on 180°. Servomootori neutraalne positsioon tagatakse, kui servol on mõlemas suunas sama palju potentsiaalset pöörlemist. Mootorisse saadatud PWM ütleb ära soovitud võlli asukohta ning põhinedes pulsi kestvusele keeratakse rootor soovitud kohta [23]. Servomootor eeldab pulsi üldjuhul iga 20 millisekundi (ms) tagant ning pulsi pikkuse järgi tuvastatakse ära, kui kaugele peab mootor võlli keerama. Näiteks 1.5 ms pulss laseb mootoril keerata võlli neutraalsesse asendisse. Kui pulsi pikkus on väiksem kui 1.5ms

keeratakse võlli neutraalsest asendist 90° vastupäeva, kuid pulsi pikkusel pikem kui 1.5ms keeratakse võlli 90° päripäeva algasendi suhtes (Sele 6.2) [23].

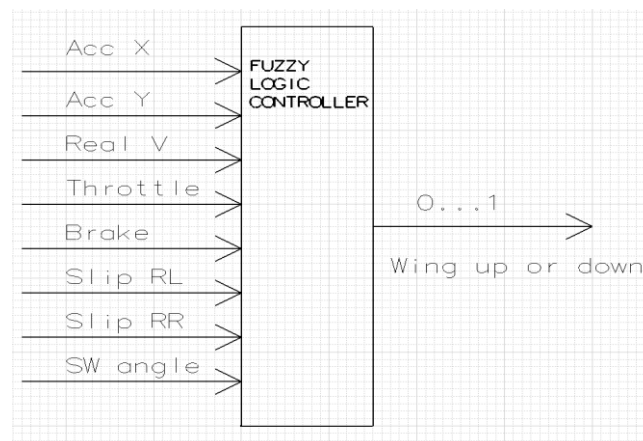


Sele 6.2 PWM -signaali tööpõhimõte [23]

6.2. DRS-süsteemi juhtimine

FS Team Tallinna DRS-süsteemi juhtimine saab alguse vormeli juhtimissüsteemis. Vormel kasutab erinevaid sensoreid, et tuvastada auto hetkeolek. Sensoritest liiguvad andmed elektoonilisse kontrollüksusesse ehk vormeli juhtplaati, kus pärast andmete töötlemis antakse vormeli juhtajust signaal edasi mootori kontrollerrisse või mõnesse muusse seadmesse, et muuta vormeli olekut.

DRS-süsteem kasutab tiiva positsooni muutmiseks andmeid mitmelt erinevalt sensorilt, mis liiguvad juhtajust edasi hägusloogika kontrollerrisse (ingl k fuzzy logic controller), kus andmetega sooritatakse hägusloogika tehteid. Kuna kontrollerrisse minevate andmete väärtused on 0 ja 1 vahel, siis vastavalt hägusloogika skeemile tekib väljundväärtus samuti vahemikus 0..1. Saadud tulemuse alusel võetakse vastu otsus tiiva positsooni muutmiseks ning otsus saadetakse tagasi juhtplaati [24].

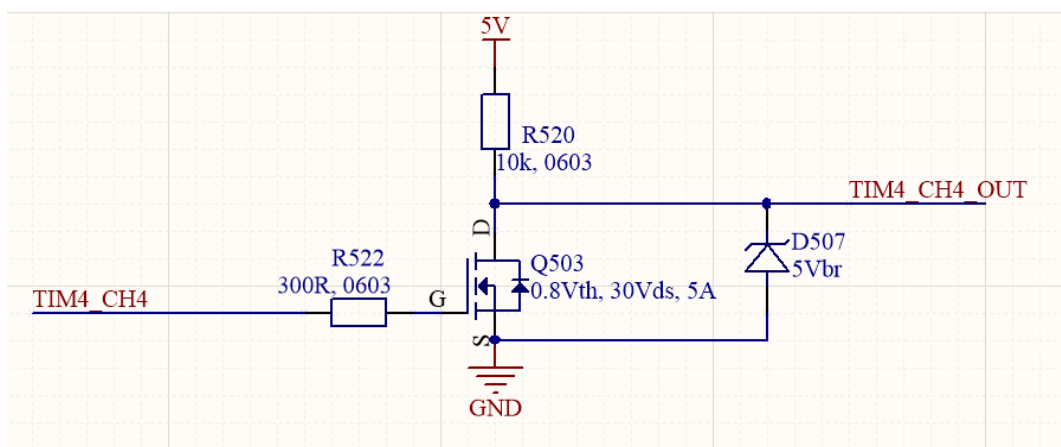


Sele 6.3 Hägusloogika kontrolleri skeem

Sensorite andmed, mida kasutatakse DRS-süsteemi tiiva profiili positsiooni määramiseks (Sele 6.3):

- sõidu suunas kiirendust X (ingl k Acceleration X)
- külgiirendus Y (ingl k Acceleration Y)
- reaalne kiirus V (ingl k Real V)
- gaasipedaal (ingl k Throttle)
- piduripedaal (ingl k Brake)
- tagumis vasaku rehvi libisemine (ingl k Rear Right Slip)
- tagumise parema rehvi libisemine (ingl k Rear Left Slip)
- roolinurk (ingl k Steering Wheel Angle)

Tudengivormeli FEST18 õhutakistust vähendavat süsteemi juhib elektrooniline kontrollüksus, genereerides vastavat pulssi. Juhtplaat saadab iga teatud aja tagant mosfetti signaali, mis lülitab servomootori signaalile sobiliku pinge, antud juhul 5 V, ümber servomootorisse. Kui mosfett signaali ei saa, jookseb pinge maandusess. Kui juhtaju saab hägusloogika kontrollerist signaali tiiva positsiooni muutmiseks, muudab juhtplaat pulsi pikkust, millele vastavalt avatakse või sulgetakse profiil (Sele 6.4).



Sele 6.4 Juhtplaadis genereeritava PWM- signaali skeem

Vormelil olev alalisvool on 24V, kuid tagatiiva kolmanda profiili positsioone muutev servomootor kasutab töötamiseks 7.4V. Antud pinge saamiseks on akukastis vastav toiteskeem, kus muundatakse pinge mootorile sobilikuks.



Sele 6.5 FS Team Tallinn suletu tiivaga kiirendusalal [25]



Sele 6.6 FS Team Tallinn avatud tiivaga kiirendusalal [25]

KOKKUVÕTE

Käesoleva lõputöö ülesandeks oli projekteerida ning valmistada FS Team Tallinna 2017/2018. aasta hooaja võistlussõiduki FEST18 õhutakistust vähendav süsteem.

Algselt uuriti olemasolevad lahendusi ning tutvuti konkurentide lahendustega. Saadud teadmistega ning võimaliku lahendusega asuti projekteerima aeropaketi efektiivsuse tõstmiseks õhutakistust vähendavat süsteemi. Projekteerimisel lähtuti tudengivormeli klassi kuuluva vormelisarja FSG (Formula Student Germany) reeglite poolt seatud piirangutest. Samuti peeti silmas, et projekteeritud DRS (ingl k Drag Reduction System) -süsteem oleks töökindel, võimalikult kompaktne ning kerge ja näeks välja esinduslik.

Enne õhutakistust vähendava süsteemi projekteerimist sai nõu peetud aerodünaamika simulatsioonide eest vastutava inseneriga ning kooskõlastati tingimused, millele peab süsteem vastama. Arutelu käigus pandi paika jäikus, millele peavad DRS-süsteemi detailid vastama. Jäikus saadi voolavusanalüüsi tehes, mida teostas meeskonna aerodünamikaspetsialist. Lisaks sellele andis tiiva voolavussimulatsioon tiivaprofiili aerodünaamilise tsentri, mille ümber disainiti süsteem. Viimaseks pandi paika minimaalsed mõõtmed, mida võib servomootor omada, et mootor mahuks ära tiivaprofiili sisse.

DRS-süsteemi projekteerimist alustati rapidite modelleerimisest, kus peeti silmas tiivaprofiili mõõtmeid, optimaalseid mõõtmeid mootorile ning antud detailide jäikust. Rapiditele disainiti liimimiseks sooned, tagades liimimiseks piisavalt liimpinda.

Valmis disainitud rapiditele sai järgnevalt projekteeritud vastavad otsaplaadid, kus ühele otsaplaadil pidi projekteerima servomootor liidesele sobiliku stabilisaatori. Teisele otsaplaadile disainiti rapidist välja tuleva võlli laagri pesa. Nii laagri pesa kui ka mootori liidese stabilisaator lamineeriti süsinikkiud kangaga.

Projekteerimisele järgnes tootmine, mille käigus rapidid, otsaplaadi küljes olev katmik ning servomootori liidese stabilisaator laserpaagutati. Tiivaprofiilide jäikuse tagamiseks lõigati vesilõikusest välja sisestruktuur. Laserlõikusest lõigati välja otsaplaadi vahud, poldi kinnitus inserdid. Antud detailid lamineeriti süsinikkiud kangaga. Lisaks sellele lamineeriti ka tiivaprofiilid, mille lamineerimiseks kasutati välja freesitud vorme.

Pärast tootmist algas detailide komplekteerimine, kus esmalt liimiti tiivaprofiilid, sisestruktuurid ning rapidid omavahel kokku. Pärast liimimist komplekteeriti tagatiiva detailid omavahel kokku. Saades tagatiiva komplekseks toimus, tiiva auto külge sobitamine ning kinnitamine.

Kokkuvõtteks saab öelda, et valminud FEST18 õhutakistust vähendav süsteem täitis püstitatud eesmärgid. Projekteerides saavutati FSG reeglitele vastav kompaktne süsteem, mis tõstis FS Team

Tallinna aeropaketi efektiivsust. Tudengivormelile FEST18 projekteeritud esimene elektriline DRS-süsteem sai võistlustel kiita nii kohtunikelt kui ka võistlussarja konkurentidelt.

SUMMARY

The topic of the thesis concerns the production and manufacturing of the drag reduction system (DRS) for the FS Team Tallinn's formula racing car, which was used in the 2017/2018 season of the Formula Student competition (FEST18).

Before production started, already existing and competitors' solutions were taken into consideration. The first phase was to design a drag reduction system with the aim of improving the efficiency of the rear wing. The FSG (Formula Student Germany) rules and restrictions were taken into account as guidelines for developing the design, which took into consideration the aspects of compactness, the overall look of the car and the reliability of the system.

Before designing the drag reduction system, all of the requirements were agreed upon with the lead engineer responsible for the simulations of the aerodynamics. Together with the engineer, the required rigidity of the DRS parts was worked out. The rigidity of the DRS was estimated by conducting an outflow analysis, done by the team's aerodynamic specialist. In addition, the analysis enabled pinpointing the aerodynamical center of the wing profile. This center was eventually used as a basis for the design that followed. Finally, the minimal size a servo motor could have in order to fit into the wing profile was specified.

The workflow of the design started from the modelling of the rapids, for which the limitations to wing profile measurements, motor measurements and rigidity of the parts were taken into account. Special grooves were designed onto the surface of rapids, creating an optimal area for the adhesive. Next, the end plates for the rapids were designed. One of the end plates received a stabilizer for the servo motor interface, while the other required a special slot for the rapids' shaft bearing. Both of these were laminated with carbon fiber.

The second phase was manufacturing. During the process, the required parts, which included the rapids, the end plate coverings and the servo motor interface stabilizer, were laser sintered. To ensure rigidity of the wing profile, its inner structure was produced with water jet cutting technology. Laser cutting was used to cut out the end plate foams and the bolts inserts. These parts were then laminated with carbon fiber as well. For laminating the wing profile itself, specially milled moulds were used.

After manufacturing, the final phase involved the assembly of the parts. Firstly, the wing profiles, the inner structures and the rapids were glued together. After that, the components of the rear wing were assembled. The assembled result was mounted to the formula's core structure.

In conclusion, it can be said that the drag reduction system completed for the FEST18 (DRS) fulfilled its purpose. The outcome was a compact system which corresponded to all of the FSG rules and

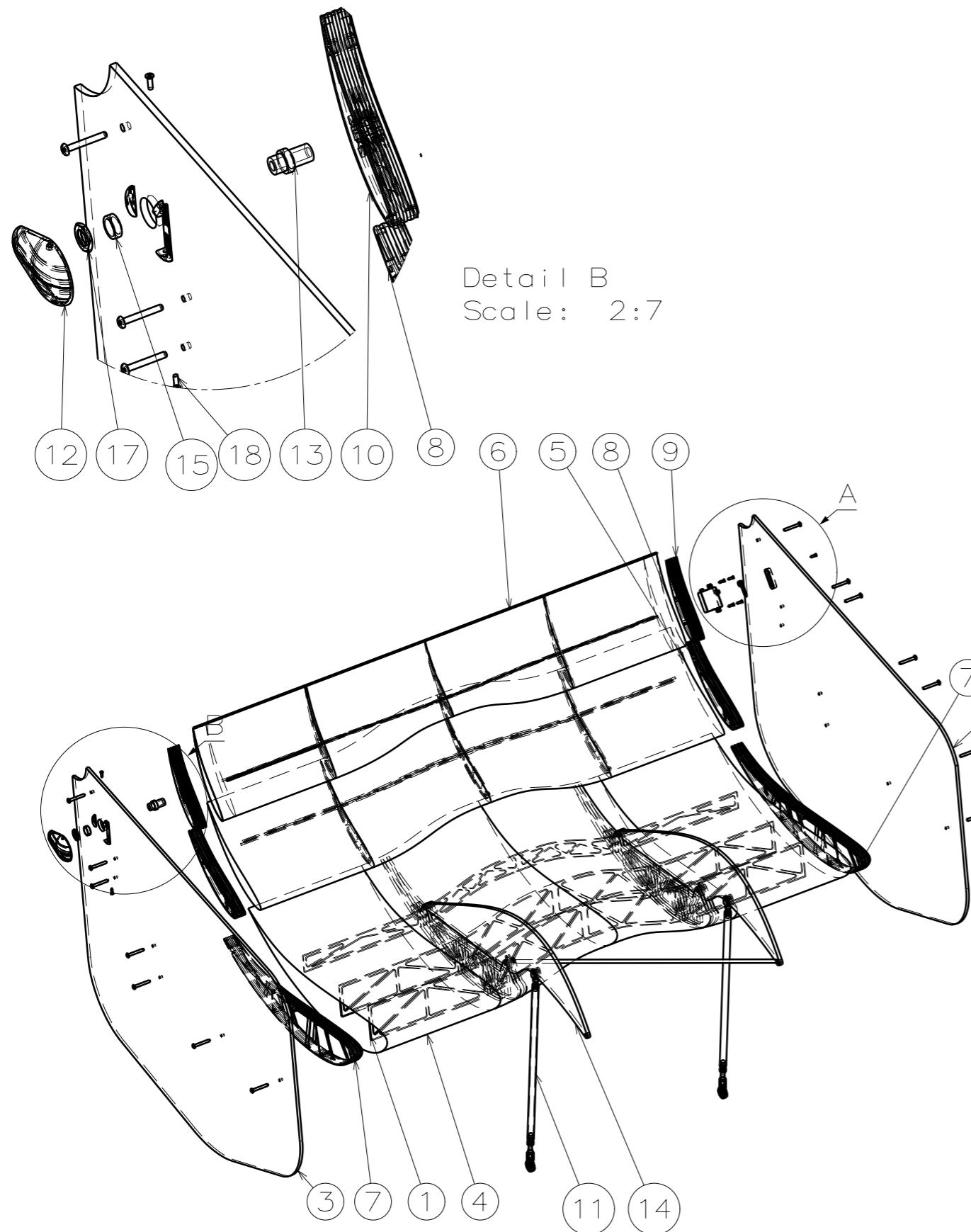
increased the efficiency of the rear wing used by FS Team Tallinn. The DRS produced during the season of FEST18 was the first electrical DRS produced to receive praise from the judges as well as from the other competitors during the competition that year.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

1. Toruraamist üleliikumine süsinikmonokokile [Võrgumaterjal] [Tsiteeritud: 14. mai 2019. a.]
<https://formulastudent.ee/hooajad/fest15/>
2. Formula Student Germany rules. [Võrgumaterjal] [Tsiteeritud: 14. mai 2019. a.]
https://www.formulastudent.de/fileadmin/user_upload/all/2019/rules/FS-Rules_2019_V1.1.pdf
3. Formula1 Read Bull tiimi DRS lahendus. [Võrgumaterjal] [Tsiteeritud: 14. mai 2019. a.]
https://www.formula1.com/en/championship/inside-f1/rules-regs/Drag_Reduction_System.html
4. Formula Student TU Brnd Racing. [Võrgumaterjal] [Tsiteeritud: 14. mai 2019. a.]
<https://fsczech.smugmug.com/Photo/2017/Friday/>
5. FS Team Tallinn 2014 aasta vormel [Võrgumaterjal] [Tsiteeritud: 14. mai 2019. a.]
<https://formulastudent.ee/wp-content/uploads/2018/08/3-7.png>
6. FS Team UAS Sankt Augustin [Võrgumaterjal] [Tsiteeritud: 14. mai 2019. a.]
https://fsaustria.at/media/2018-2/?afg10_page_id=44#afg-10
7. Tamm, Klemet- Gustav. FORMULA STUDENT KLASSI VORMELAUTO AERODÜNAAMIKAPAKETI ARENDUS. Tallinn: Tallinna Tehnikaülikool, 2018
8. Aerodünaamilised kehad [Võrgumaterjal] [Tsiteeritud: 14. mai 2019. a.]
<https://www.quora.com/Why-are-companies-not-designing-aerodynamic-bodies-for-every-car>
9. Savox Servo sv-1260MG[Võrgumaterjal] [Tsiteeritud: 14. mai 2019. a.]
<https://www.savox-servo.com/Servos/Coreless-Motor/Savox-Servo-SV-1260MG-Digital-High-Voltage-Coreless-Motor-Metal-Gear/>
10. Savox Servo SA-1258TG[Võrgumaterjal] [Tsiteeritud: 14. mai 2019. a.]
<https://www.savox-servo.com/Servos/Coreless-Motor/Savox-Servo-SA-1258TG-Digital-Coreless-Motor-Titanium-Gear/>
11. TGY-5513MD Servo [Võrgumaterjal] [Tsiteeritud: 14. mai 2019. a.]
https://hobbyking.com/en_us/turnigytm-tgy-5513md-ds-mg-servo-12kg-0-18sec-54-5g.html
12. Karp, Kalev. AKUKASTI PROJEKTEERIMINE FORMULA STUDENT KLASSI VORMELAUTOLE. Tallinn: Tallinna Tehnikaülikool, 2017
13. CFD- analüüsi põhitõed [Võrgumaterjal] [Tsiteeritud: 14. mai 2019. a.]
<https://www.simscale.com/docs/content/simwiki/cfd/whatis CFD.html>
14. TTÜ laserpaagutus [Võrgumaterjal] [Tsiteeritud: 14. mai 2019. a.]

- <https://www.ttu.ee/instituut/mehaanika-ja-toostustehnika-instituut/teenused-64/3d-printimine/laserpaagutusseade-formiga-p100-6/>
15. Vesilõikuse põhimõte [Võrgumaterjal] [Tsiteeritud: 14. mai 2019. a.]
<http://www.balticsteel.ee/vesiloikus/>
 16. Laserlõikuse põhimõte [Võrgumaterjal] [Tsiteeritud: 14. mai 2019. a.]
<https://fractory.com/et/laserloikuse-ajalugu/>
 17. Treimise põhimõte [Võrgumaterjal] [Tsiteeritud: 14. mai 2019. a.]
https://www.hariduskeskus.ee/opiobjektid/lukkseptood/?KURSUSE_TEEMAD_T%C3%96%C3%96TAMINE_TREIPINGIL
 18. Rohacell materjali andmeleht [Võrgumaterjal] [Tsiteeritud: 14. mai 2019. a.]
<https://www.rohacell.com/product/rohacell/en/products-services/rohacell-a/>
 19. Necuron materjali andmeleht [Võrgumaterjal] [Tsiteeritud: 14. mai 2019. a.]
<https://www.easycomposites.co.uk/#!/patterns-moulds-and-tooling/tooling-and-modelling-board/EP700-High-Temperature-Epoxy-Tooling-Board.html>
 20. Teroson EP5055 liimi andmeleht [Võrgumaterjal] [Tsiteeritud: 14. mai 2019. a.]
https://www.henkel-adhesives.com/br/en/product/structural-adhesives/terason_ep_5055.html
 21. Servomootori selgitus [Võrgumaterjal] [Tsiteeritud: 14. mai 2019. a.]
<http://ee.china-steppermotor.com/news/baigela-15711830.html>
 22. Servomootori tööpõhimõte [Võrgumaterjal] [Tsiteeritud: 14. mai 2019. a.]
https://www.tthk.ee/MEH/Taiturid_9.html
 23. PWM -Signaali tööpõhimõte [Võrgumaterjal] [Tsiteeritud: 14. mai 2019. a.]
<https://www.jameco.com/jameco/workshop/howitworks/how-servo-motors-work.html>
 24. Hägusloogika controller [Võrgumaterjal] [Tsiteeritud: 14. mai 2019. a.]
<https://www.omega.co.uk/technical-learning/pid-fuzzy-logic-adaptive-control.html>
 25. FSG pildid võistlustel Hockenheimis [Võrgumaterjal] [Tsiteeritud: 14. mai 2019. a.]
<https://media.formulastudent.de/2018/Hockenheim>

GRAAFILINE OSA

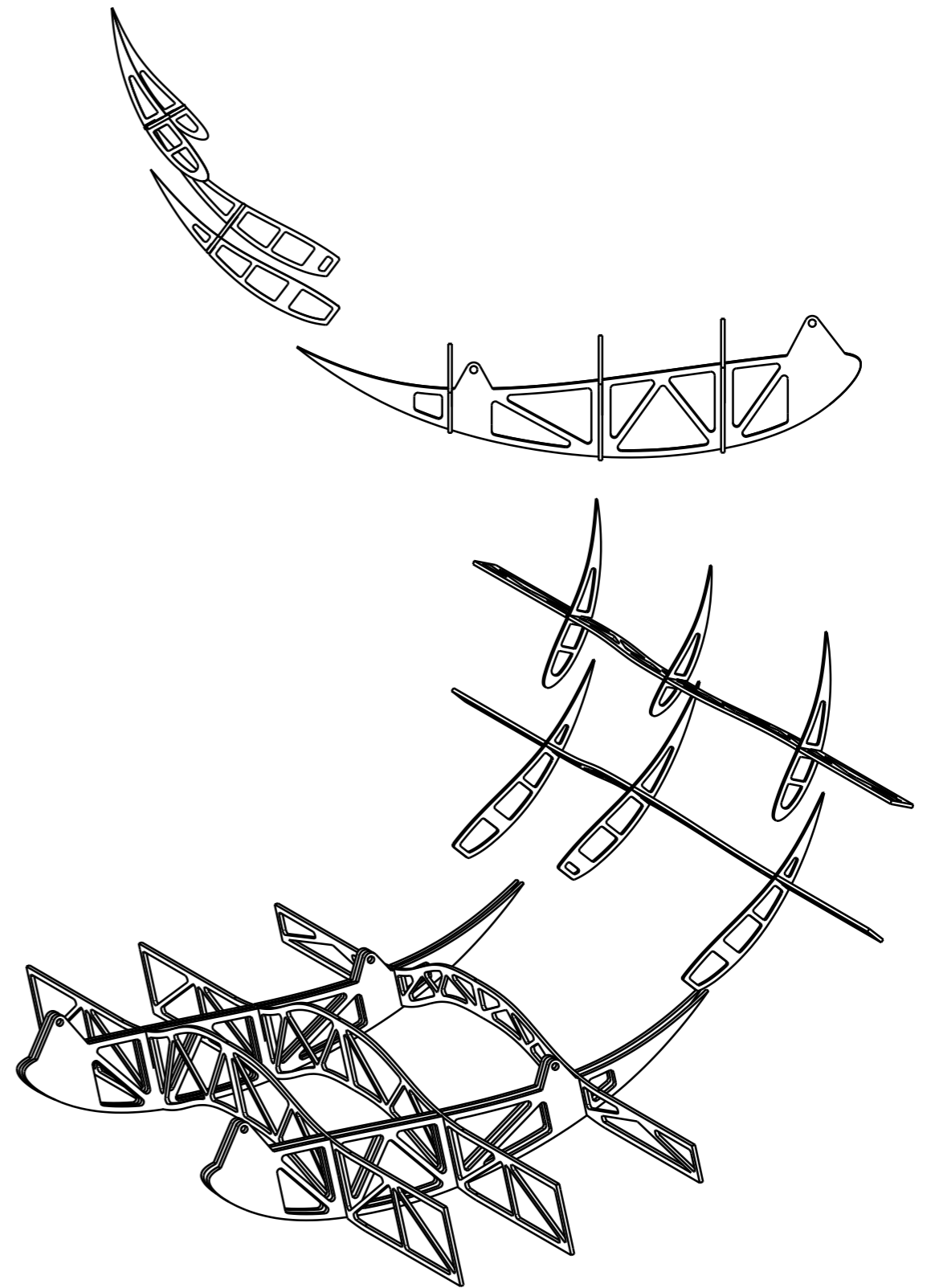
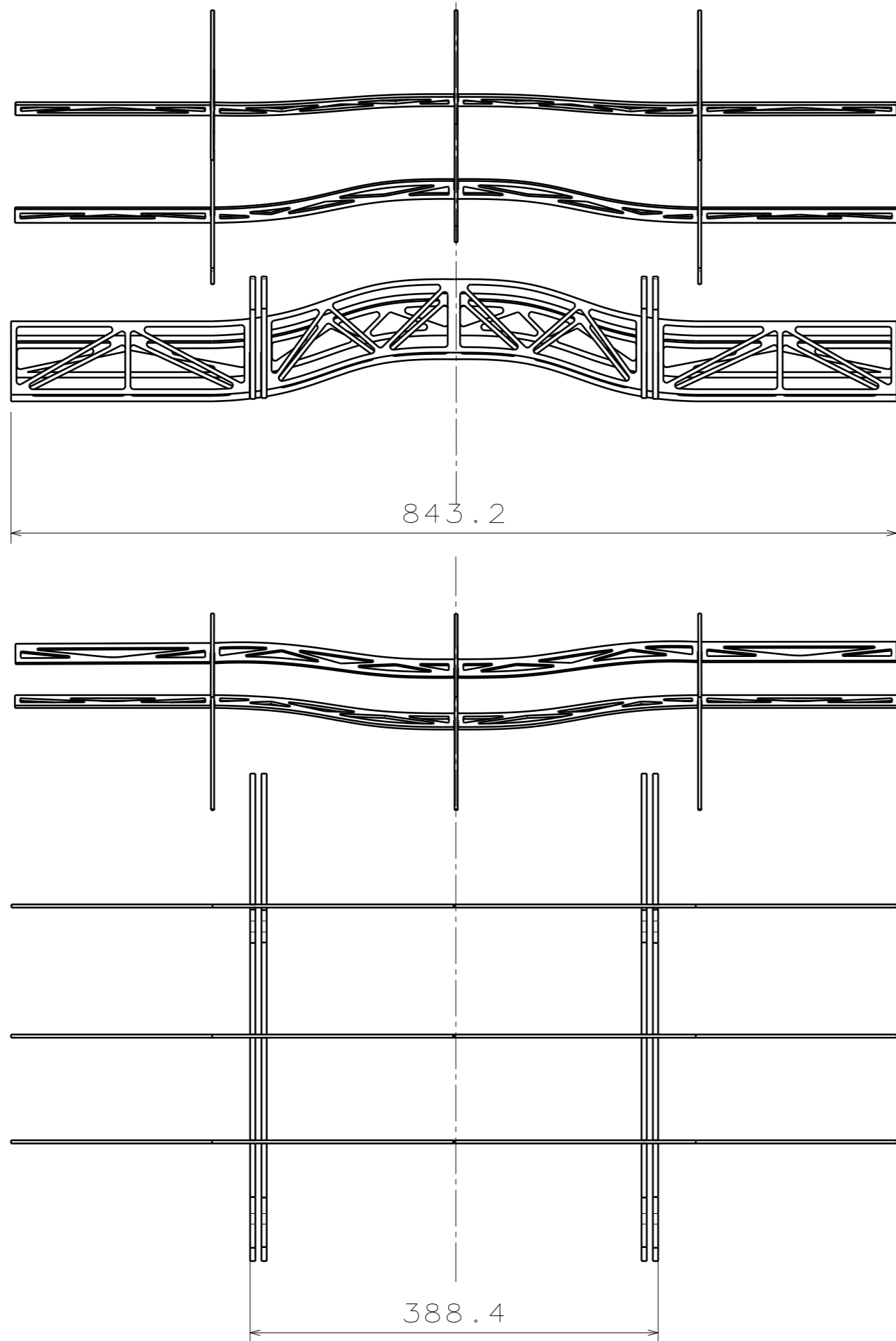


Detail B
Scale: 2:7

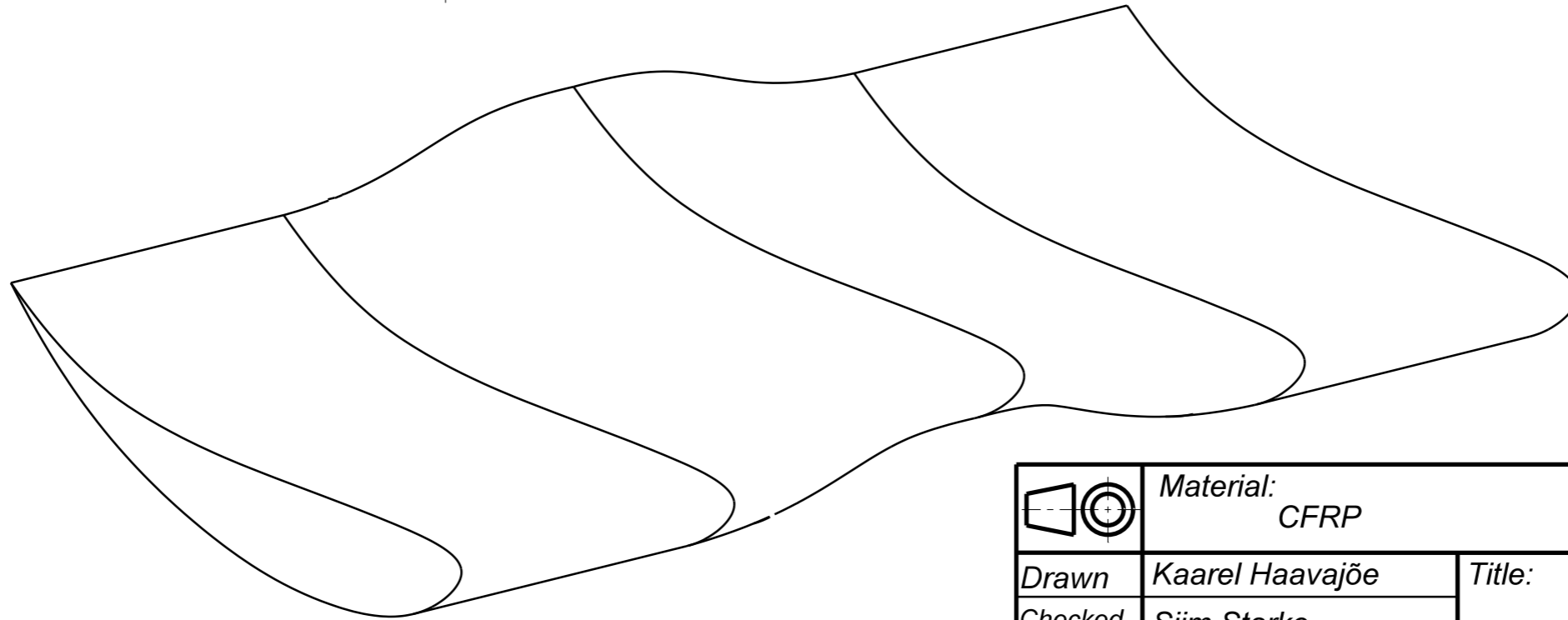
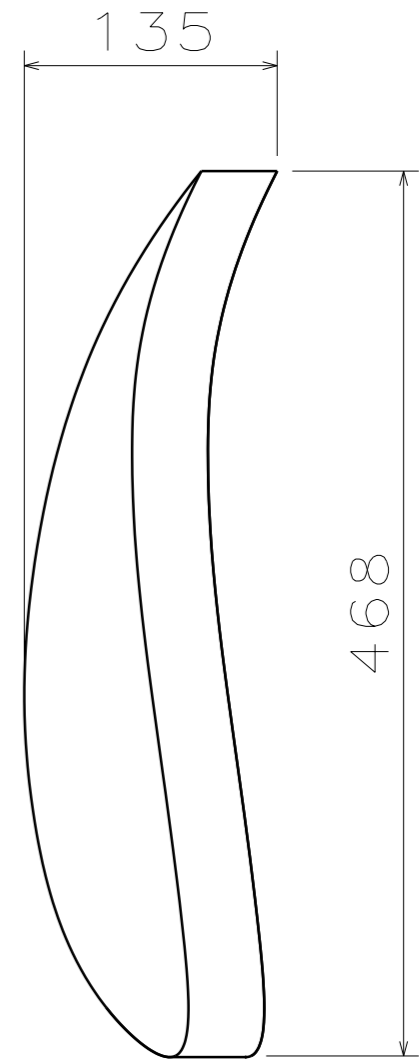
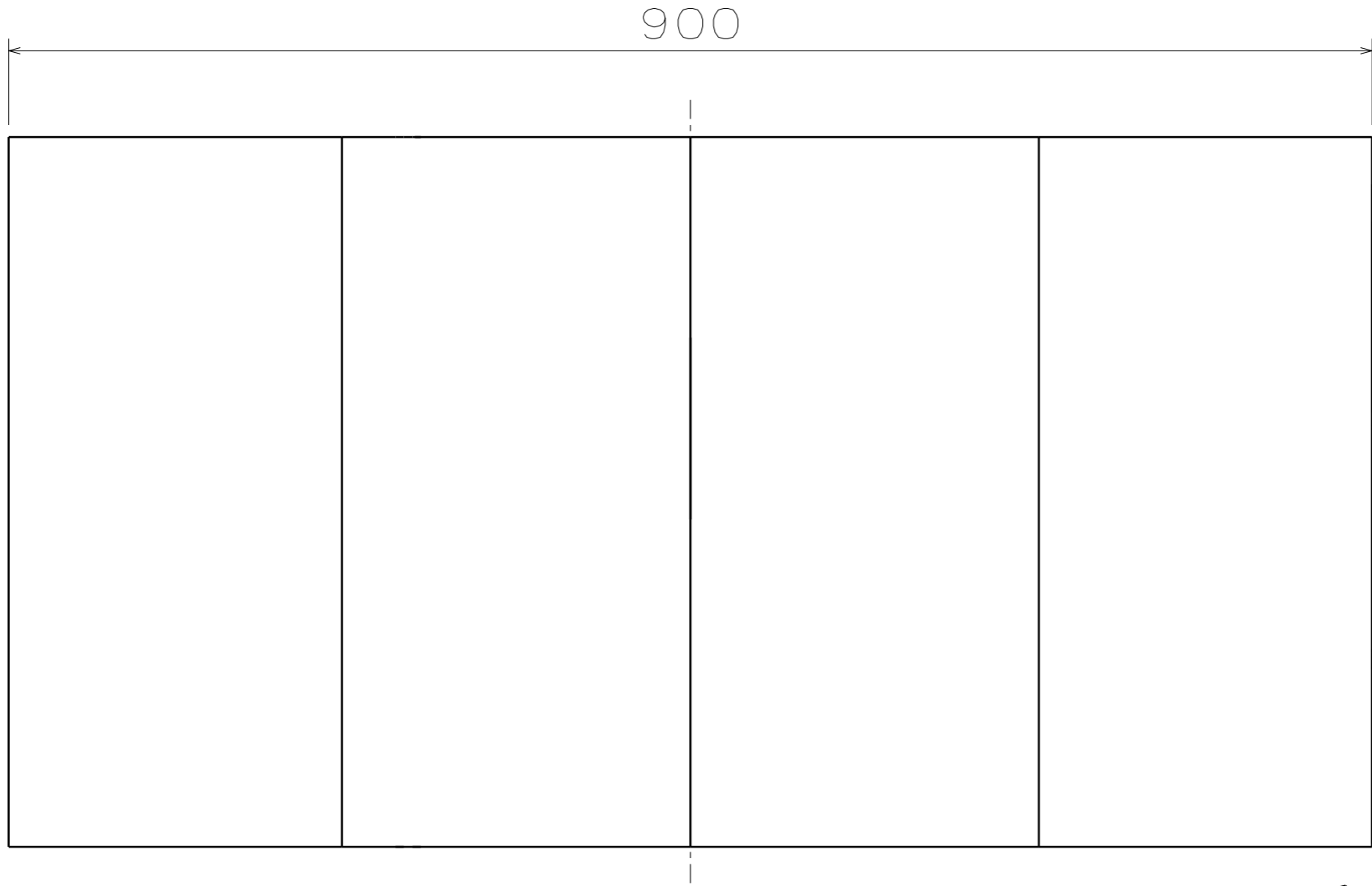
Detail A
Scale: 1:5

ITEM	QTY	ID	PART
1	1	624-FR-00070	Ribs
2	1	624-FR-00074	Left Endplate
3	1	624-FR-00075	Right Endplate
4	1	624-FR-00076	Main Profile
5	1	624-FR-00077	Secondary Profile
6	1	624-FR-00078	Third Profile
7	2	624-FR-00105	Main Profile Rapid
8	2	624-FR-00106	Secondary Profile Rapid
9	1	624-FR-00107	Third Profile Left Rapid
10	1	624-FR-00108	Third Profile Right Rapid
11	3	624-FR-00109	Attachment Roads
12	1	624-FR-00110	Endplate Cover
13	1	624-FR-00111	Shaft
14	2	624-FR-00120	Swan Neck
15	1	624-FR-00121	Bearing
16	1	624-FR-00122	Savox Servo Motor
17	1		DIN 936-8 M12x1
18	3		DIN 7991 10.9 M3x5
19	1		DIN 965 M3x10
20	4		DIN 7991 M2x8
21	14		ISO 7380 10.9 ST M5 x 20

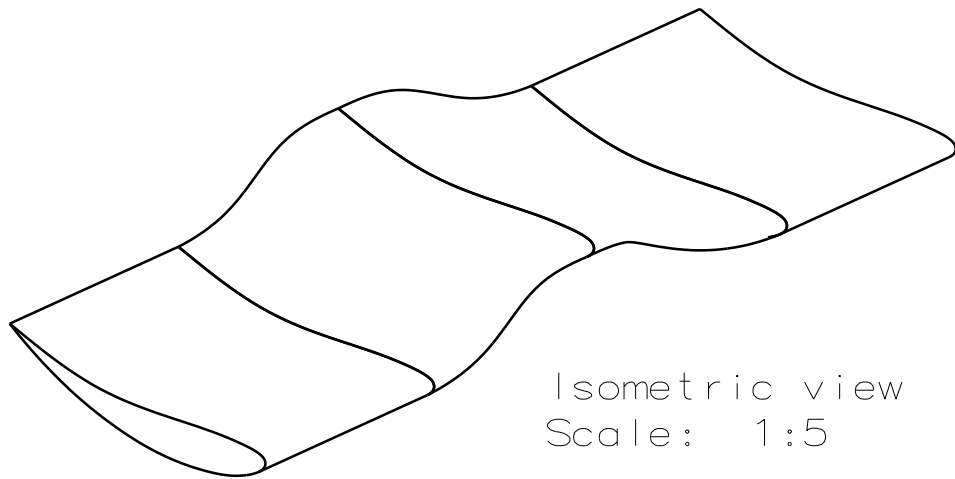
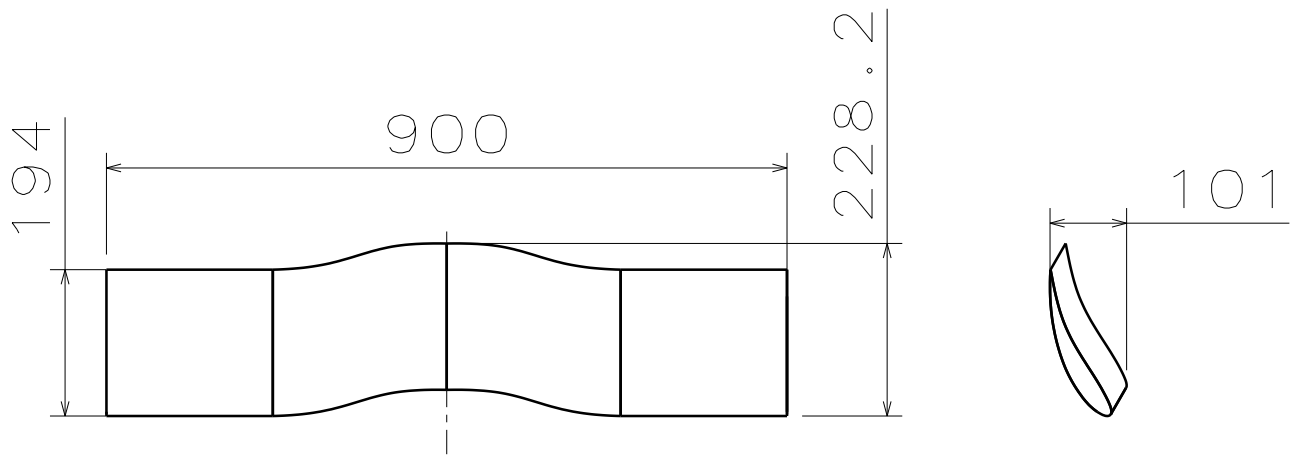
	Material: CFRP	Unmarked Tolerances ISO - 2768	Mass: 2,45(kg)	Scale: 1:9
Drawn	Kaarel Haavajõe	Title: Rear Wing Assembly		
Checked	Siim Starke			
Approved	Indek Petjärv			
Tallinn TU UAS		Sheet: 1/1	ID: 624-FR-A0007	



	Material: CFRP	Unmarked Tolerances ISO - 2768	Mass: 1,55(kg)	Scale: 1:4
Drawn	Kaarel Haavajõe	Title: Ribs		
Checked	Siim Starke			
Approved	Indek Petjärv			
Tallinn TU UAS		Sheet: 1/1	ID: 624-FR-00070	

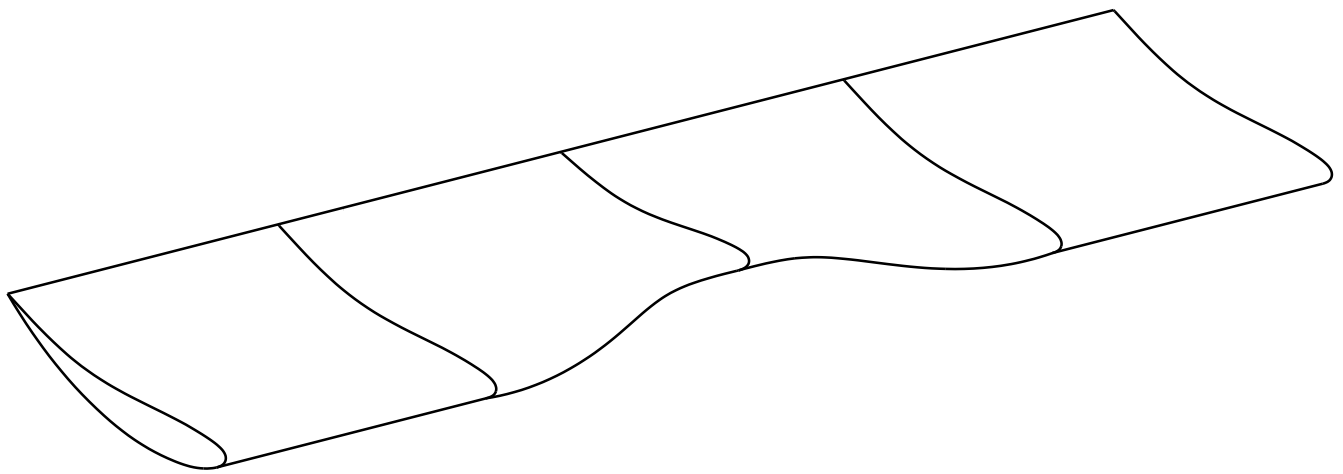
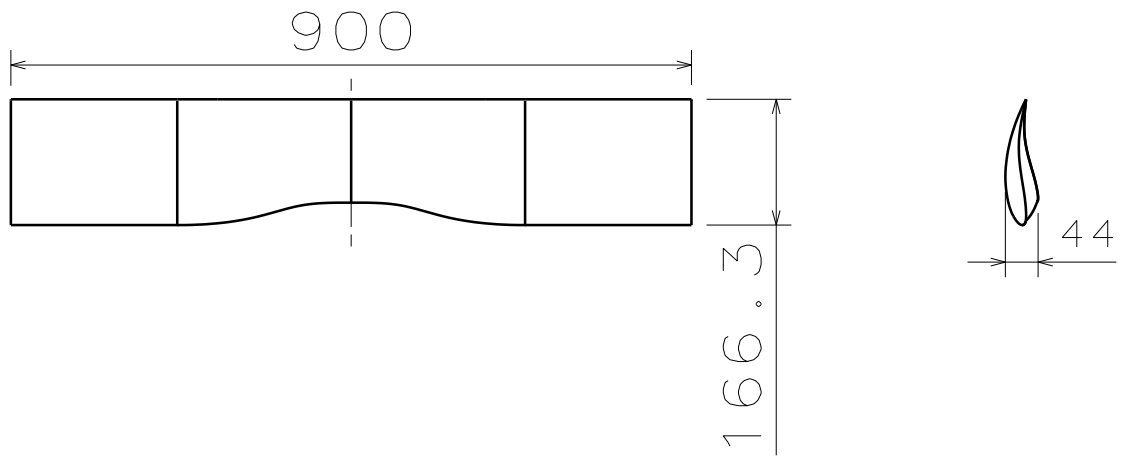


	Material: CFRP	Unmarked Tolerances ISO - 2768	Mass: 0.6(kg)	Scale: 1:4
Drawn	Kaarel Haavajõe	Title: Main Profile		
Checked	Siim Starke			
Approved	Indek Petjärv			
Tallinn TU UAS		Sheet: 1/1	ID: 624-FR-00076	



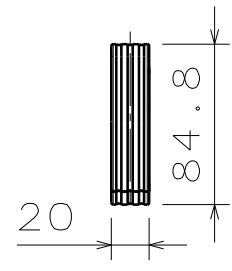
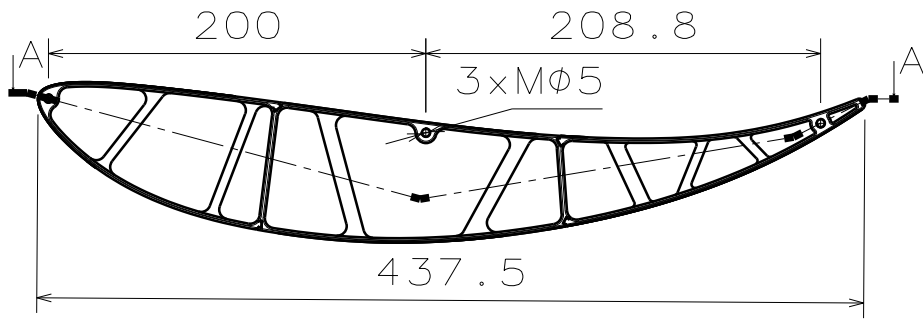
Isometric view
Scale: 1:5

	Material: CFRP	Unmarked Tolerances ISO - 2768	Mass: 0,45(kg)	Scale: 1:10	
Drawn	Kaarel Haavajõe	Title: Secondary Wing			
Checked	Siim Starke				
Approved	Indrek Petjärv				
Tallinn TU UAS		Sheet: 1/1	ID: 624-FR-00077		

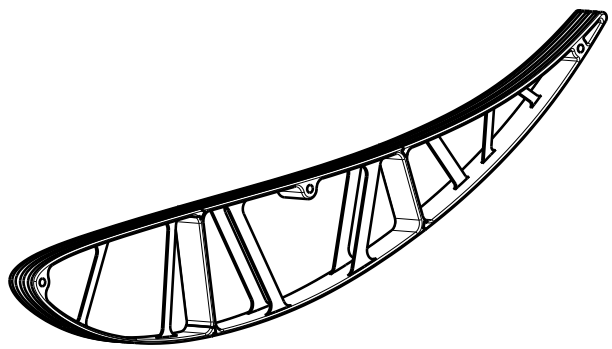


Isometric view
Scale: 1:4

	Material: CFRP	Unmarked Tolerances ISO - 2768	Mass: 0,4(kg)	Scale: 1:10
Drawn	Kaarel Haavajõe	Title: Third Wing		
Checked	Siim Starke			
Approved	Indrek Petjärv			
Tallinn TU UAS		Sheet: 1/1	ID: 624-FR-00078	

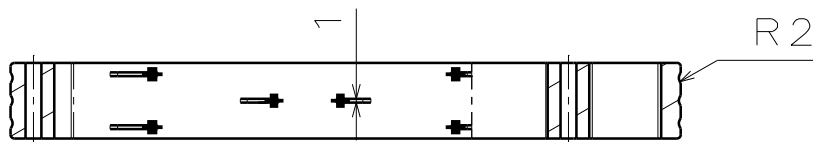
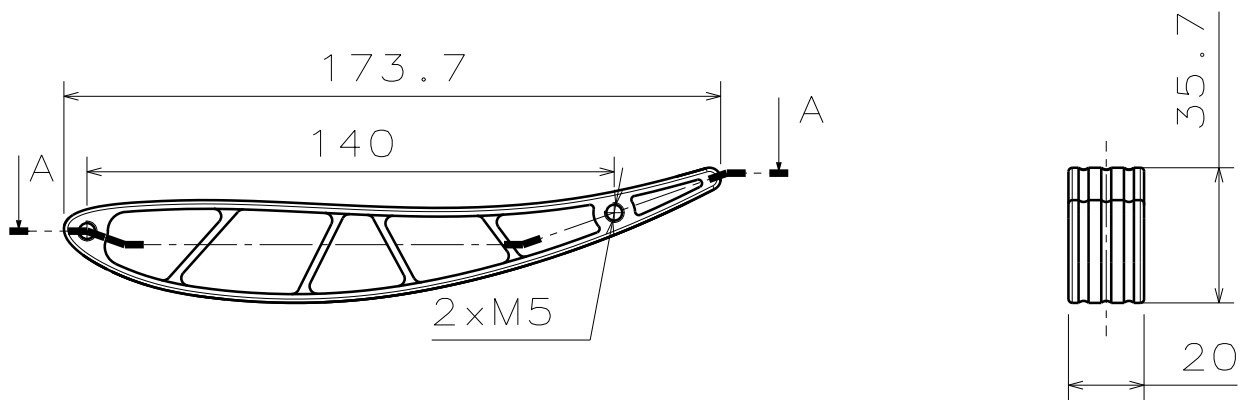


Section view A-A
Scale: 1:4

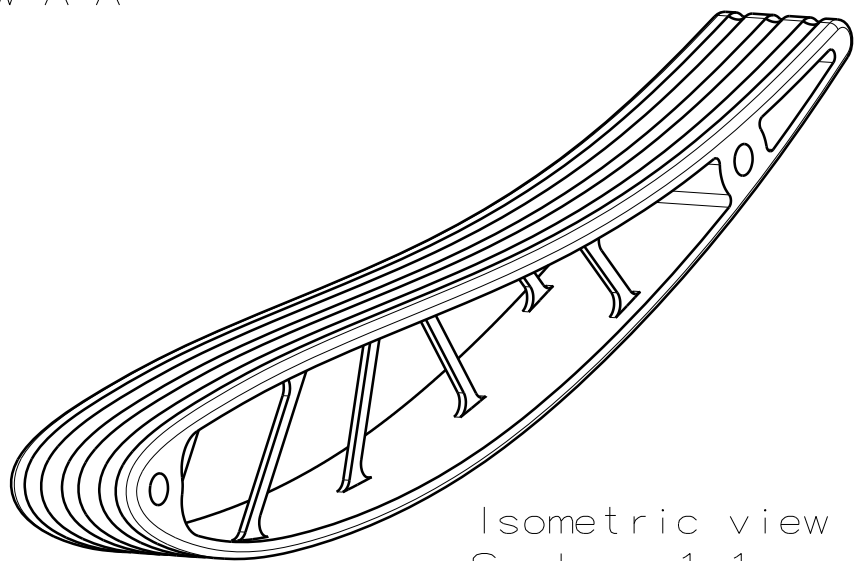


Isometric view
Scale: 1:4

	Material: CFRP	Unmarked Tolerances ISO - 2768	Mass: 0,45(kg)	Scale: 1:10
	Drawn Kaarel Haavajõe Checked Siim Starke Approved Indrek Petjärv	Title: Main Wing Rapid		
Tallinn TU UAS		Sheet: 1/1	ID: 624-FR-00105	

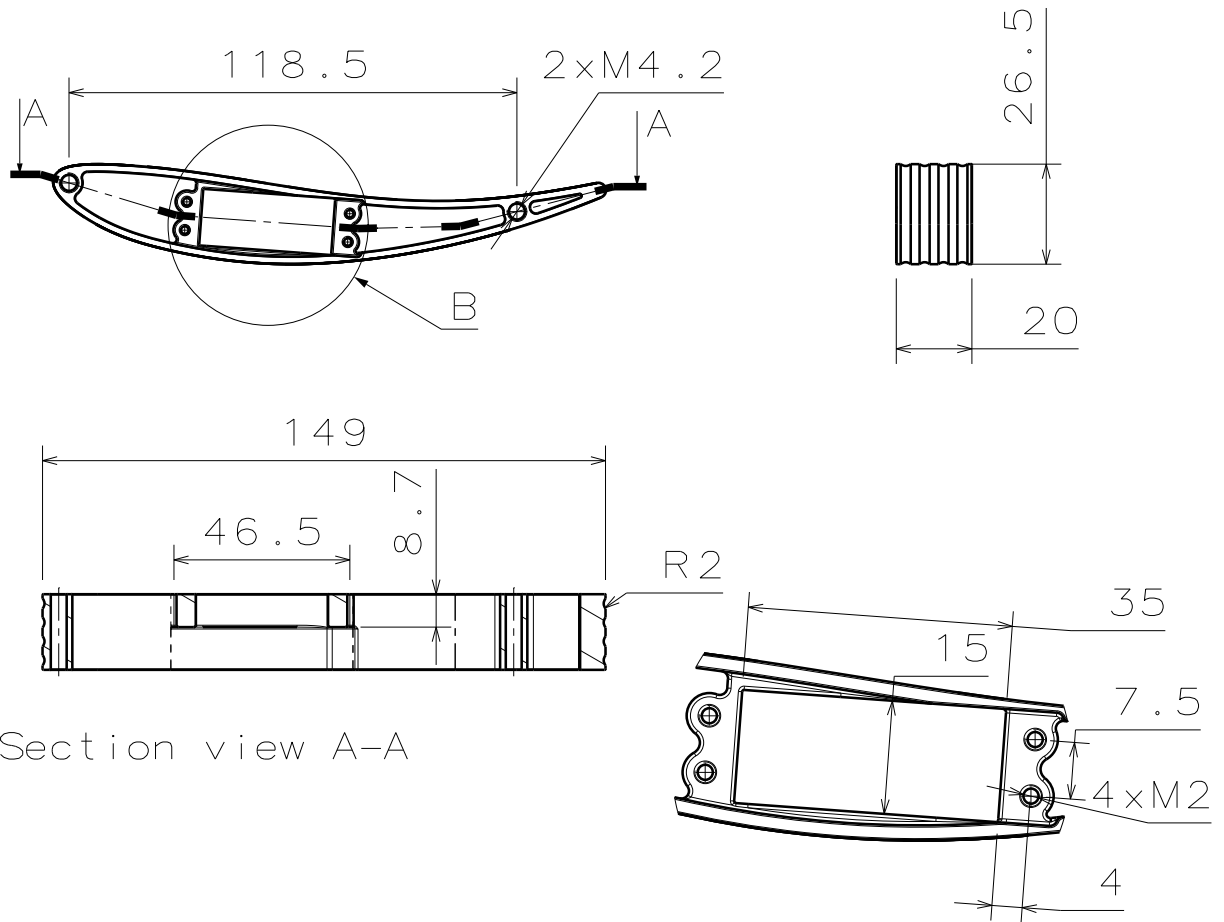


Section view A-A



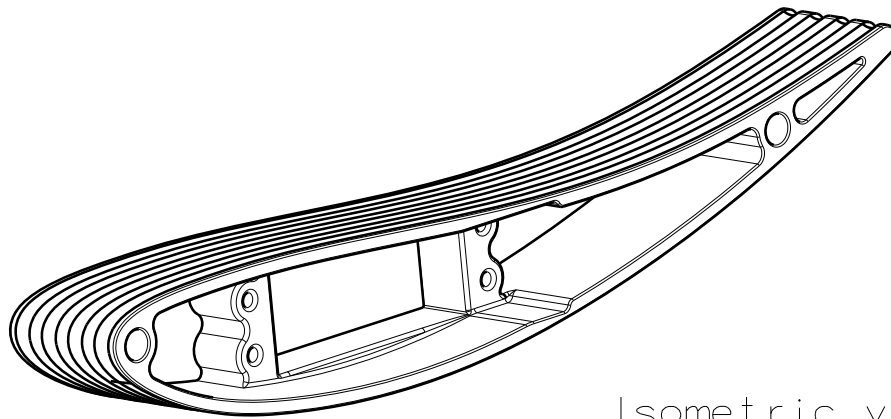
Isometric view
Scale: 1:1

	Material: PA-6	Unmarked Tolerances ISO - 2768	Mass: 0,02(kg)	Scale: 1:2
Drawn	Kaarel Haavajõe	Title: Secondary Wing Rapid		
Checked	Siim Starke			
Approved	Indrek Petjärv			
Tallinn TU UAS		Sheet: 1/1	ID: 624-FR-00106	



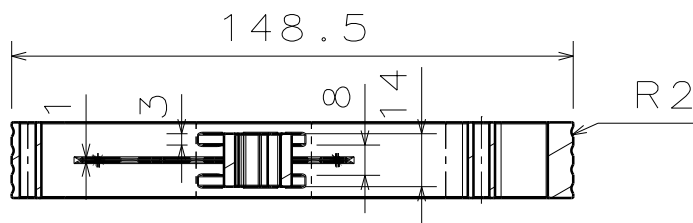
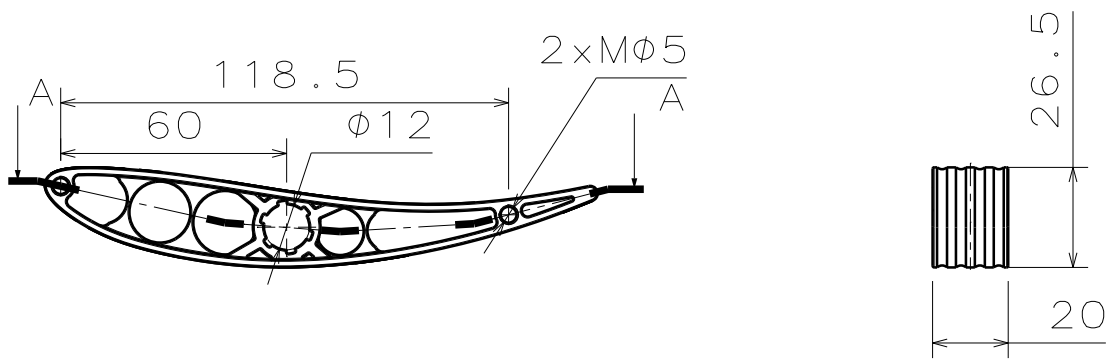
Section view A-A

Detail B
Scale: 1:1

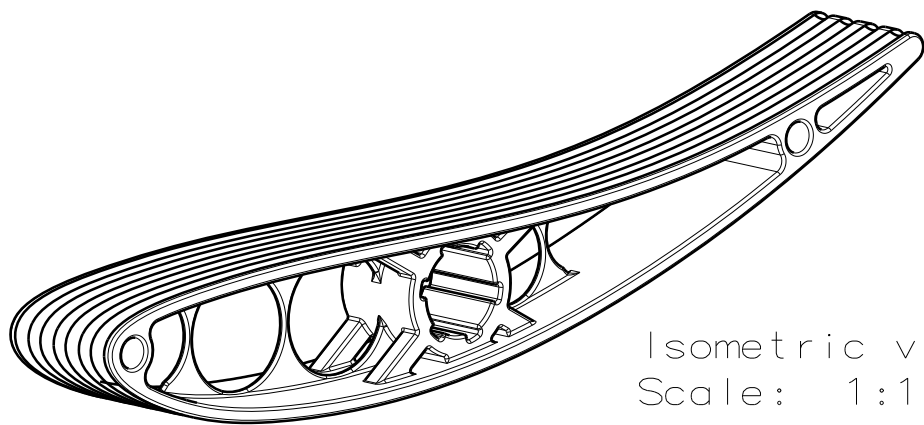


Isometric view
Scale: 1:1

	Material: PA-6	Unmarked Tolerances ISO - 2768	Mass: 0,01(kg)	Scale: 1:2
Drawn	Kaarel Haavajõe	Title: <i>Third Wing Left Rapid</i>		
Checked	Siim Starke			
Approved	Indrek Petjärv			
Tallinn TU UAS		Sheet: 1/1	ID: 624-FR-00107	

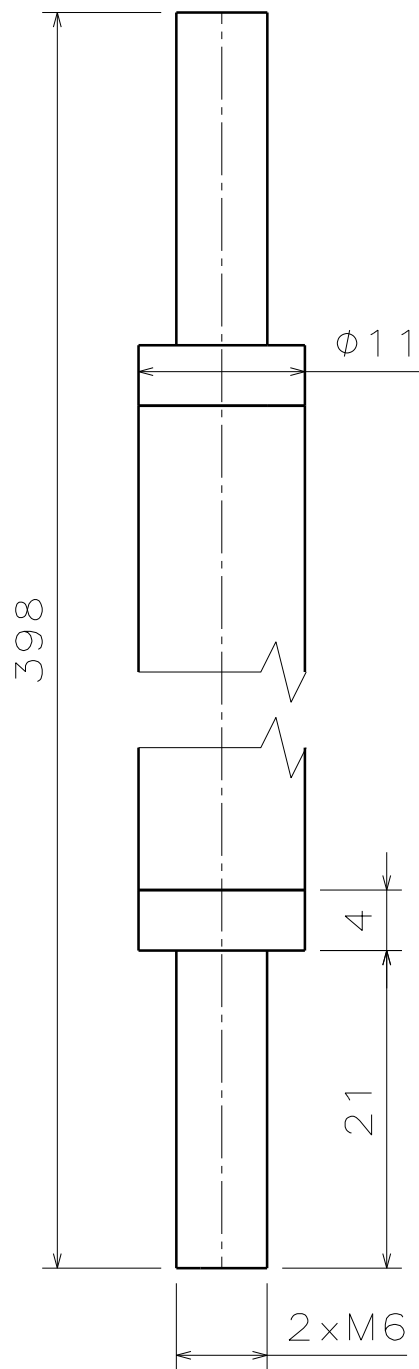


Section view A-A

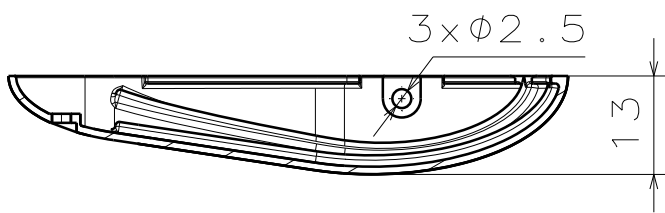
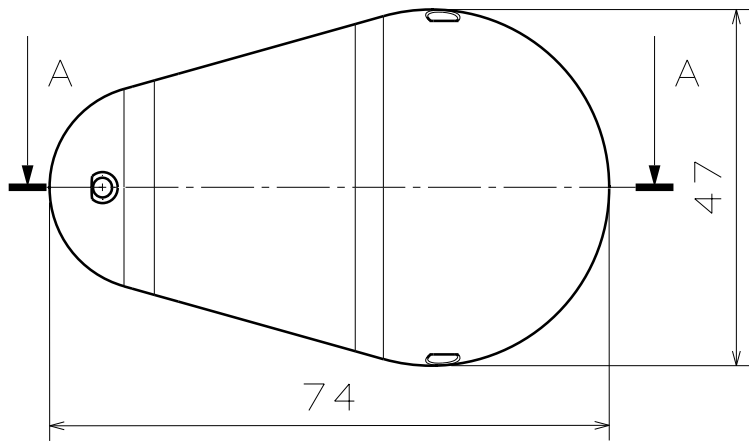


Isometric view
Scale: 1:1

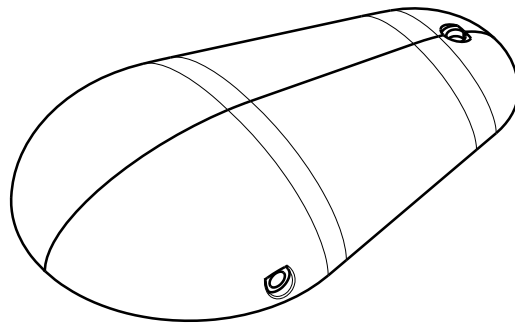
	Material: PA-6	Unmarked Tolerances ISO - 2768	Mass: 0,01(kg)	Scale: 1:2
Drawn	Kaarel Haavajõe	Title: <i>Third Wing Right Rapid</i>		
Checked	Siim Starke			
Approved	Indrek Petjärv			
Tallinn TU UAS		Sheet: 1/1	ID: 624-FR-00108	



	Material: CFRP	Unmarked Tolerances ISO - 2768	Mass: 0,17(kg)	Scale: 1:1
Drawn	Kaarel Haavajõe	Title: Shat		
Checked	Siim Starke			
Approved	Indrek Petjärv			
Tallinn TU UAS		Sheet: 1/1	ID: 624-FR-00109	

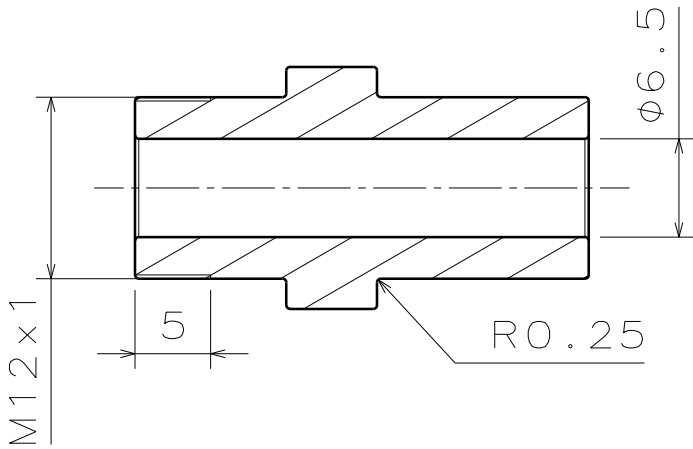
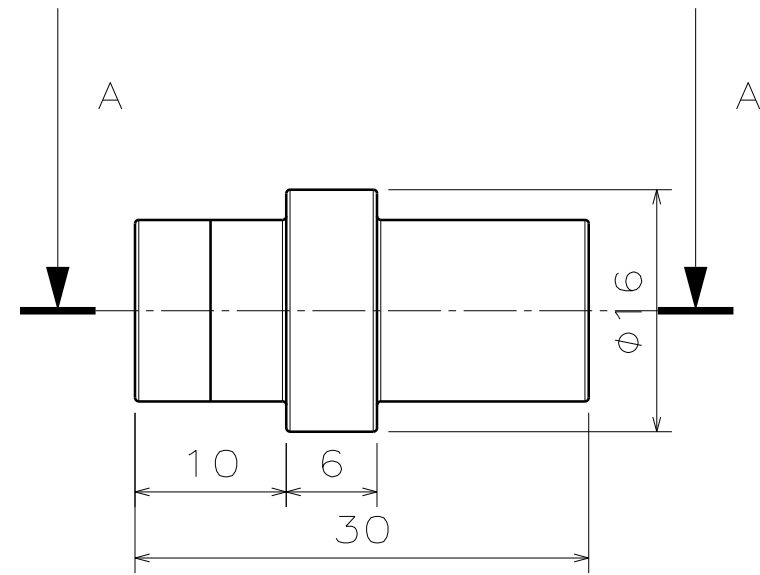


Section view A-A

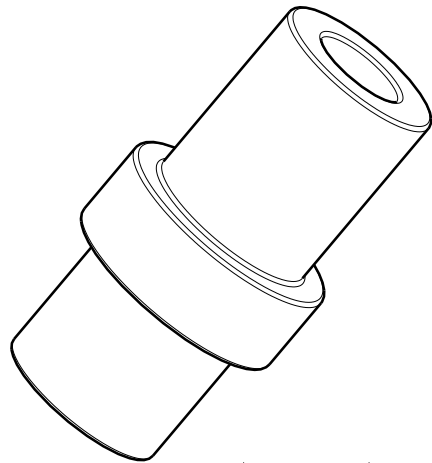


Isometric view

	Material: PA-6	Unmarked Tolerances ISO - 2768	Mass: 0,01(kg)	Scale: 1:1
Drawn	Kaarel Haavajõe	Title: <i>Endplate Cover</i>		
Checked	Siim Starke			
Approved	Indrek Petjärv			
Tallinn TU UAS		Sheet: 1/1	ID: 624-FR-00110	

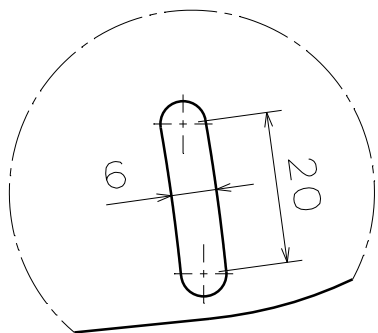
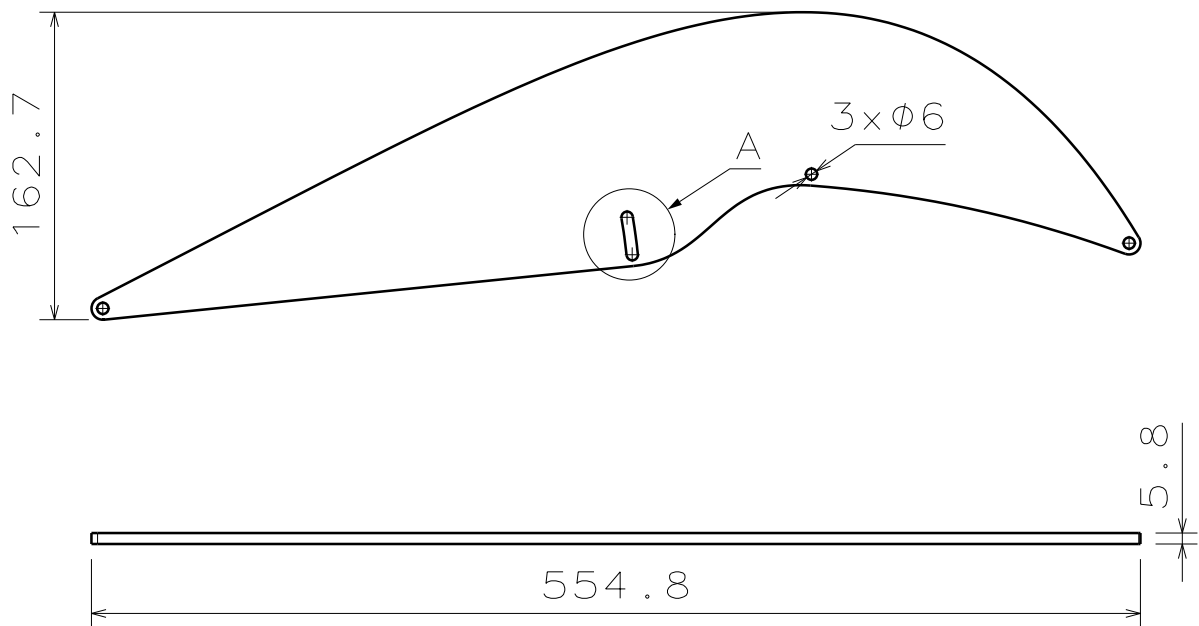


Section view A-A

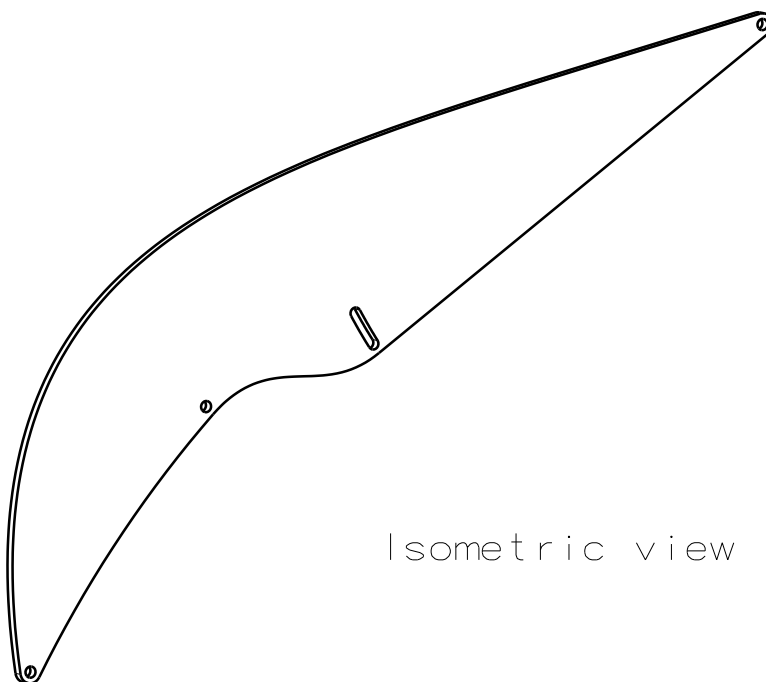


Isometric view
Scale: 2:1

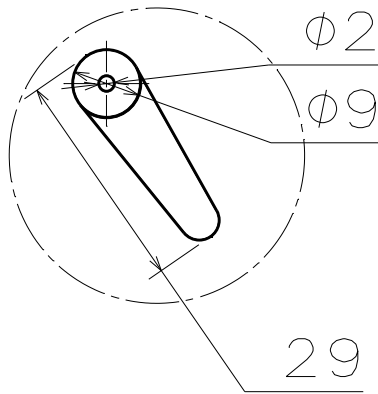
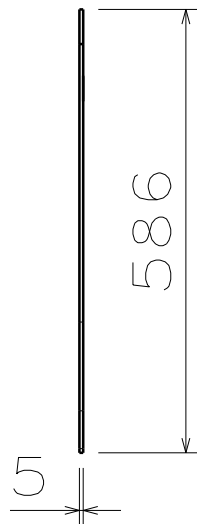
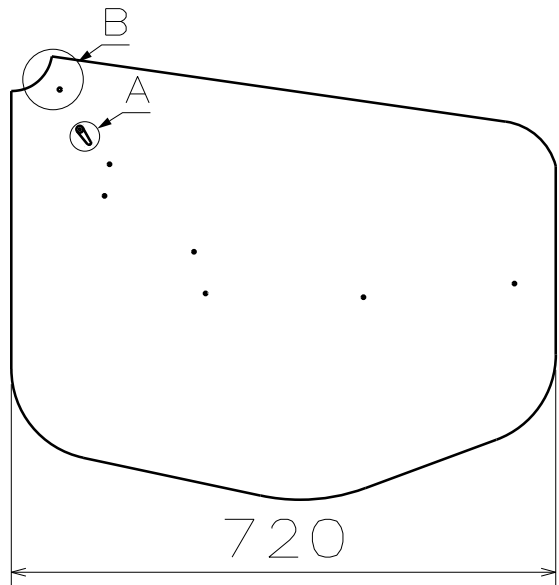
	Material: CFRP	Unmarked Tolerances ISO - 2768	Mass: 0,01(kg)	Scale: 2:1
Drawn	Kaarel Haavajõe	Title: Shat		
Checked	Siim Starke			
Approved	Indrek Petjärv			
Tallinn TU UAS		Sheet: 1/1	ID: 624-FR-00111	



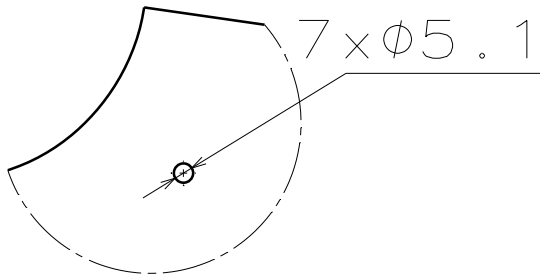
Detail A
Scale: 1:1



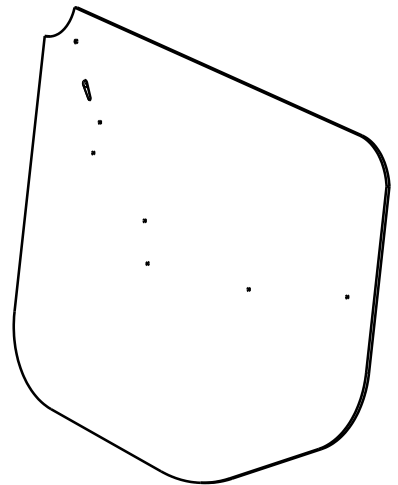
	Material: CFRP	Unmarked Tolerances ISO - 2768	Mass: 0,3(kg)	Scale: 1:4
Drawn	Kaarel Haavajõe	Title: Swan Necks		
Checked	Siim Starke			
Approved	Indrek Petjärv			
Tallinn TU UAS		Sheet: 1/1	ID: 624-FR-00120	



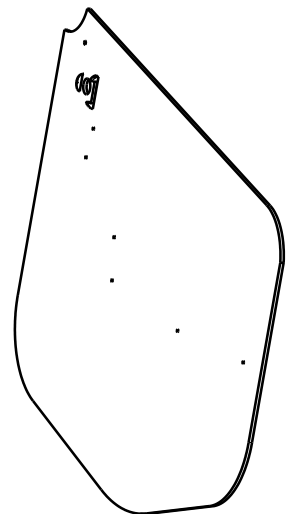
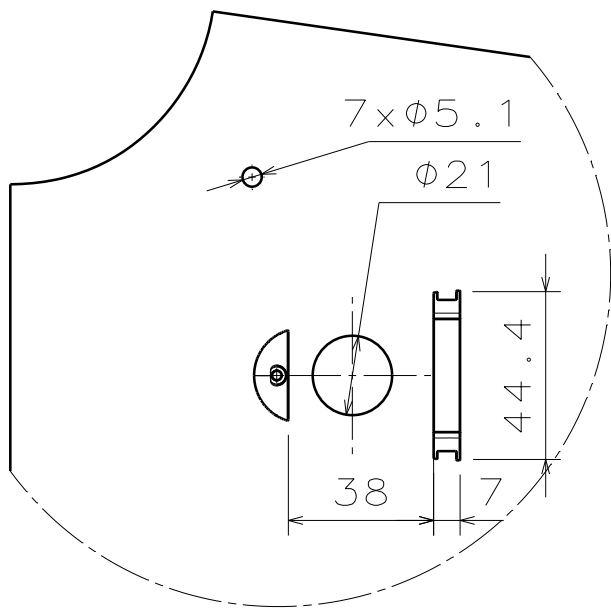
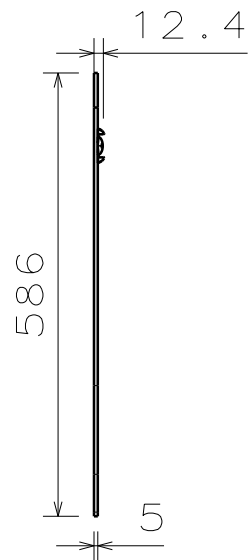
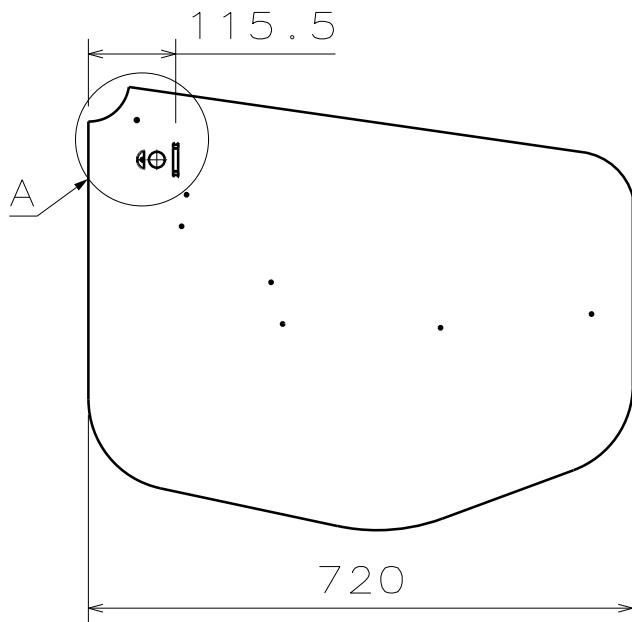
Detail A
Scale: 1:1



Detail B
Scale: 1:2



	Material: CFRP	Unmarked Tolerances ISO - 2768	Mass: 0,5(kg)	Scale: 1:10
	Drawn Kaarel Haavajõe Checked Siim Starke Approved Indrek Petjärv	Title: Left Endplate		
Tallinn TU UAS		Sheet: 1/1	ID: 624-FR-00074	



Detail B
Scale: 1:2

Isometric view
Scale: 1:10

	Material: CFRP	Unmarked Tolerances ISO - 2768	Mass: 0,5(kg)	Scale: 1:10
	Drawn Kaarel Haavajõe Checked Siim Starke Approved Indrek Petjärv	Title: <h2 style="text-align: center;">Right Endplate</h2>		
Tallinn TU UAS		Sheet: 1/1	ID: 624-FR-00075	