



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL  
INSENERITEADUSKOND  
Virumaa kolledž

**4G võrgu kaudu juhtiva lendava mehitamata  
vaatlussõiduki arendus**

**Development of Unmanned Aerial Vehicle Cotrolled via 4G  
Network**

TELEMAATIKA JA ARUKATE SÜSTEEMIDE ÕPPEKAVA LÕPUTÖÖ

Üliõpilane: Jarmo Sommer

Üliõpilaskood: 182742EDTR

Juhendaja: Sergei Pavlov, Lektor

# 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.

“16” detsember 2021.

Autor: Jarmo Sommer

/ allkiri /

Töö vastab rakenduskõrgharidusõppe lõputööle/magistritööle esitatud nõuetele

“....” ..... 20.....

Juhendaja: .....

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

“....” ..... 20.....

Kaitsmiskomisjoni esimees .....

/ nimi ja allkiri /

## **LIHTLITSENTS LÕPUTÖÖ ÜLDSUSELE KÄTTESAADAVAKS TEGEMISEKS JA REPRODUTSEERIMISEKS**

Mina Jarmo Sommer (sünnikuupäev: 08.10.1993)

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose 4G võrgu kaudu juhtiva lendava mehitemata vaatlussõiduki arendus, mille juhendaja on Sergei Pavlov,
  - 1.1. reprodutseerimiseks säilitamise ja elektroonilise avaldamise eesmärgil, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;
  - 1.2. üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.
2. Olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta kolmandate isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ja teistest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

# TalTech Inseneriteaduskond Virumaa kolledž

## LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

**Üliõpilane:** Jarmo Sommer, 182742EDTR Õppekava, peeriala: EDTR73, telemaatika tarkvara

**Juhendaja(d):** lektor, Sergei Pavlov, sergei.pavlov@taltech.ee

**Konsultant:** -

### Lõputöö teema:

*(eesti keeles):* UAV vaatlus droon mis lendab 4G võrgus. Lennuki tiivad on kokku volditavad, mis muudab ta transportimise ajal kompaktsemaks.

*(inglise keeles):* A UAV observation drone that flies over a 4G network. The wings of the aircraft are foldable, which makes it more compact during transport.

### Lõputöö põhieesmärgid:

1. Disainida UAV lennuki droon Ehitada UAV droon füüsiliselt valmis.
2. Ehitada UAV droon füüsiliselt valmis.
3. Sooritada UAV edukas lennu katsetus.

### Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Lennuki disainimine ja modelleerimine, lennuki komponentide soetamine(mootor, aku, servomootorid, kontrollid jne.)	15.10.21
2.	Lennuki füüsiline ehitamine ja komponentide füüsiline lisamine droonile	15.11.21
3.	Lennuki kodeerimine ja esmakatsetused siseruumis	15.12.21
4.	Lennuki katsetused, peenhäälestus	22.12.21
5.	Dokumentatsiooni	05.01.21

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

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

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

**Konsultant:** ..... "....." ..... 20.....a

/allkiri/

**Programmijuh:** .....

/allkiri/

“.....” ..... 20.....a

# SISUKORD

EESSÕNA .....	8
LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU .....	9
SISSEJUHATUS .....	11
1 ANALÜÜS .....	12
1.1 UAV tüübid .....	12
1.2 UAV tüüpide võrdlus .....	12
1.2.1 Üherootorlised .....	13
1.2.2 Mitmerootorlised .....	14
1.2.3 Fikseeritud tiibadega.....	14
1.2.4 Fikseeritud tiibadega hübriid-VTOL .....	15
1.3 Olemasolevad UAV lahendused .....	15
1.4 UAV lennukitel kasutatav riistvara .....	16
1.4.1 Jõuallikas .....	16
1.4.2 Energiaallikas .....	16
1.4.3 Juhtimisseadmestik .....	17
1.4.4 Navigeerimine.....	17
1.4.5 Lennukontroller.....	17
1.4.6 Autopiloot .....	18
1.4.7 Antennid .....	18
1.4.8 Õhukiiruse andur.....	18
1.4.9 Vaatlusseadmed.....	19
1.4.10 Juhtimine .....	19
1.5 UAV nõuded.....	20
2 UAV REALISATSIOON.....	21
2.1 UAV disain.....	21
2.1.1 UAV kere.....	21
2.1.2 UAV esitiivad .....	22
2.1.3 UAV tagatiivad .....	23
2.2 3D mudeli loomine .....	23
2.2.1 Solidworks.....	23
2.3 3D mudeli realiseerimine.....	24
2.4 Riistvara.....	25
2.4.1 Raspberry Pi 3 Model B .....	25
2.4.2 Holybro Pixhawk 4.....	26

2.4.3	Pixhawk 4 GPS moodul .....	27
2.4.4	Holybro PM07-V2.3.....	28
2.4.5	Huawei E5576-320 mobiilne Wi-Fi ruuter.....	28
2.4.6	EMAX GT4020 420Kv .....	28
2.4.7	9g digitaalne servomootor .....	29
2.4.8	Pixhawk digitaalne õhukiiruse andur .....	30
2.4.9	Raspberry Pi High Quality Camera .....	30
2.4.10	LiPo aku .....	31
2.4.11	Juhtimispuht.....	32
2.4.12	Juhtimisjaam .....	32
2.5	Tehnoloogiad .....	33
2.5.1	Linux .....	33
2.5.2	PX4 .....	33
2.5.3	Mission Planner .....	33
2.5.4	GStreamer .....	34
2.6	Lennuki komplekteerimine.....	34
2.6.1	Lennuki kere komplekteerimine.....	34
2.6.2	Riistvara häälestamine .....	35
3	VALIDEERIMINE .....	38
3.1	Töö nõuetele vastavus .....	38
3.2	Testimine .....	39
4	VÕIMALIKUD EDASIARENDUSED .....	42
	KOKKUVÕTE .....	43
	SUMMARY.....	44
	KASUTATUD MATERJALIDE LOETELU .....	45
	LISA1.....	50

## **EESSÕNA**

Antud lõputöö sündis ideest, et Kaitseliidu Toompea malevkonnal puudub pika distantssi vaatlusmissioonideks võimekus ja tehnika. Idee on autori algatatud ja ei ole Toompea malevkonna tellimus.

Antud lõputöö eesmärgiks on projekteerida fikseeritud tiibadega UAV mehitamata lennuk, millel on reaalaaja videosilla ühendus. Projekteeritud lennuk kasutab 4G LTE võrgu signaali. Projekteerimisel on võetud arvesse reaalseid probleeme, mis võivad missiooni vältel tekkida. Töö tulemusena peaks valmima piiramatu lennukaugusega mehitamata lennuk, mis hakkab oma missioone täitama Toompea malevkonnas.

Soovin tänada oma juhendajat nõuannete ja juhendamise eest.

Võtmesõnad: 4G, UAV, lennuk, autonoomne, diplomitöö



## LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU

UAV – *Unmanned Aerial Vehicle* ehk mehitamata sõiduk

LTE – Mobiilsidestandard

Droon – mehitamata sõiduk k.a meresõidukid, maapealsed autonoomselt sõitvad sõidukid

3D – *Three-dimensional*, kolmemõõtmeline ehk ruumiline

VTOL – *Vertical take-off and landing* ehk droon, mis suudab tõusta maanduda vertikaalselt ja lennata nagu lennuk

LIDAR – *Light Detection And Ranging*, laserskaneerimisseade

LiPo – *Lithium polymer battery*, liitiumpolümeeraku

GNSS – *Global Navigation Satellite System*, globaalne satelliitnavigatsioonisüsteem

GPS – *Global Positioning System*, üleilmne asukoha määramise satelliitnavigatsiooni süsteem (omanik on Ameerika Ühendriikide valitsus)

GLONASS – *Global navigation satellite system*, üleilmne asukoha määramise satelliitnavigatsiooni süsteem (süsteemi juhib ja haldab Venemaa)

SLAM – *Simultaneous Localization and Mapping*, samaaegne lokaliseerimine ja kaardistamine algoritmide abil.

FPV – *First-person view*, otsepilt mehitamata sõiduki kaamerast juhtimisjaama.

PLA – *Polylactic acid*, 3D printeri printimismaterjal

CAD – *Computer-aided design*, raalimisprojekteerimine, kus valmistatakse 2D ja 3D objekte

SLDAMS – *Solidworks Assembly Document*, Solidwork tarkvara *Assembly* faili formaat

CSI – *Camera Serial Interface*, kaamerate ja seadmete vaheline liides

USB – *Universal Serial Bus*, universaalne jadasiin

HDMI – *High-Definition Multimedia Interface*, standard digitaalse kõrglahutusega video ja heli edastamiseks

GPIO – *General Purpose Input/Output*, mitmeotstarbeline sisend/väljund, kus kasutaja saab ise kontrollida signaali käitumist

Kv – Mootori koormamata pöörete arv ja mähistega ühendatud juhtmete tippingeh suhe. Aitab teha kindlaks, kui kiiresti mootor pöörleb, kui sellele rakendatakse antud pinge.

ADC – *Analoog-to-digital converter*, muudab analoogsignaali digitaalsignaaliks

Ubuntu – Kaasaegne avatud lähtekoodiga operatsioonisüsteem

I2C – *Inter-Integrated Circuit*, kahesuunaline kahejuhtmeline jadasiin, mis kasutab siiniga ühendatud seadmete vahel andmete saatmiseks ja haldamiseks

MAVProxy – on võimas käsureapõhine maapealse jaama tarkvara

NGROK – platvormide ülene rakendus, mis avab kohaliku serveri pordid internetti

TCP - *Transmission Control Protocol*, edastusohje protokoll, levinum transpordikihi võrguprotokoll

## SISSEJUHATUS

Käesoleva lõputöö teema on 4G andmeside juhtimisel lendava mehitamata vaatlusõhusõiduki arendus.

UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*) on mehitamata õhusõiduk, mida ei juhi lendur. Juhtimine on tagatud kas operaatori poolse kaugjuhtimisega või lendab sõiduk iseseisvalt ehk automaatselt. UAV-d saab juhtida kasutades viite järgnevat sidemeetodit: raadiosagedus, Wi-Fi, ühe või mitme SIM-kaardiga LTE/4G võrk, satelliit või 5G andmeside.

Esimesed UAV droonid võeti kasutusele militaarvaldkonnas. Esmalt kasutati neid väljaõppe sihtmärkidena. Luure- ehk vaatlus-UAV võeti esmaselt kasutusse Vietnami sõja ajal.

Töö eesmärk on arendada mehitamata vaatlusõhusõiduk, mida saavad kasutada sõdurid lahinguväljal. Lahinguväljal on info oluline, sest see annab sõduritele strateegilise eelise. UAV annab võimaluse vaadelda kaugemale, kuhu üksiksõduri varustus ei võimalda näha. UAV saadud info põhjal saab juhtkond võtta vastu läbimõeldumaid otsuseid.

Arendatav UAV õhusõiduk hakkab kasutama 4G võrku andmeside pidamiseks. Operaatoril on reaajas videoühendus UAV õhusõidukiga. Lennuki juhtimine on poolautonoomne. Lennuk suudab täita kaardipõhiseid missioone, aga õhkutõusmisel ja maandumisel on vaja operaatori abi.

Kaitseliidu Tallinna maleva Toompea malevkonnal puudub võimekus kaugemalt distantilt teha õhuvaatlust. Praegu on kaitseliidus kasutusel Quadcopter droon, mille lennukaugus ja -aeg on piiratud. Diplomitöö eesmärk on luua Toompea malevkonnale suurema lennuulatusega vaatlus UAV.

Arendatavale lennukile on loodud võimalikult täpne 3D mudel kasutades Solidworks keskkonda. Lennukil on järgnev riistvara: Holybro Pixhawk 4 lennukontroller, HolyBro Pixhawk 4 M8N GPS moodul, HolyBro Pixhawk PM07 toitejaotus, Raspberry Pi 3 Model B, Huawei E3382 internetipulk, Raspberry Pi High Quality kaamera. Riistvara kasutab järgmist tarkvara: Ubuntu Linux, PX4, GStreamer ja Mission Planner.

Töö järgnevates osades antakse detailsem ülevaade projekti teostamisest. Analüüsitakse olemasolevaid lahendusi ja tehnoloogiaid. Kirjeldatakse disainitud 3D mudelit. Selgitatakse UAV komplekteerimiseks vajalikke tehnoloogiaid, komponente ja tarkvara. Kirjeldatakse lennuki komplekteerimisetappe. Lõpetuseks analüüsitakse projekteeritud lennuki vastavust seatud nõuetele, ning arutatakse edasiarendamise võimalusi tulevikus.

# 1 ANALÜÜS

Mehitamata õhusõidukeid ei juhita otse lennuki pardalt. Tehnoloogia kiire areng on võimaldanud mitmetel ettevõtetel valmistada palju selliseid erinevaid õhusõidukeid, mida kasutatakse mitmesugustel eesmärkidel. [1]

Selles peatükis antakse ülevaade erinevatest UAV tüüpidest ja võrreldakse neid omavahel. Antakse ülevaade olemasolevatest lahendustest ja riistvarast, mida nende valmistamiseks on kasutatud. Olemasolevate lahenduste disaini ja riistvara analüüsitakse eraldi. Käesolevas töös kirjeldatakse valitud lahendusi ja riistvara. Viimaks kirjeldatakse autori valmistatud mudelit ja valmistatava UAV nõudeid.

## 1.1 UAV tüübid

UAV mehitamata õhulennukeid liigitatakse järgnevate kategooriate järgi: suurus, lennukaugus, varustus ja eesmärk. UAV disaini kategoriseeritakse järgmiselt:

- Ühe rootoriga UAV
- Mitme rootoriga UAV
- Fikseeritud tiibadega UAV
- Fikseeritud tiibadega hübriid-VTOL (*vertical take-off and landing*) UAV

## 1.2 UAV tüüpide võrdlus

Mitme rootoriga UAV on kõige populaarsem droonitüüp UAV maastikul [1]. Kõigil neljal UAV disainitüübil on olemas omad plussid, miinused ja eesmärgid. Käesolevas peatükis vaadeldakse ja võrreldakse erinevaid droonitüüpe. UAV võrdlustabel (Tabel1) annab kiire ülevaate plussidest, miinustest ja peamistest kasutusvaldkondadest [1].

Tabel 1.1 UAV tüüpide võrdlus tabel

<b>Tüüp</b>	<b>Plussid</b>	<b>Miinused</b>	<b>Tüüpilised kasutusvaldkonnad</b>
Ühe rootoriga	Suur kandevõime Pikk lennuaeg (sisepõlemismootor) Suur lennukiirus	Kallis Keeruline juhtida Ohtlik Nõuab palju hooldust	Õhus LIDAR ( <i>light detection and ranging</i> ) laserskaneerimine Aerovaatlus

<b>Tüüp</b>	<b>Plussid</b>	<b>Miinused</b>	<b>Tüüpilised kasutusala</b>
Mitme rootoriga	Kerge juhitavus Madal hind Kasutuslihtsus Võib tegutseda piiratud alal	Lühike lennuaeg Väike kandevõime	Aerofotograafia ja video Õhukontroll
Fikseeritud tiibadega	Pikk lennuaeg Suur ala katvus Suur lennukiirus Keskmine kandevõime	Vajab kogenumat juhti Vaja palju õhuruumi Ei suuda hõljuda ühe koha peal Vajab õhku tõusmiseks ja maandumiseks rada ning ruumi	Õhukaardistamine Vaatluse ja luure teostamine
Fikseeritud tiibadega hübriid	Pikk lennuaeg Suur ala katvus VTOL võimekus Keskmine kandevõime	Pole täiuslik ei hõljumisel ega lendumisel Kallis	Kauba vedamine

### **1.2.1 Üherootorilised**

Üherootorilisel UAV-l on kaks rootorit: pearootor ja sabarootor. Oma välimuselt meenutab see helikopterit [2]. Üherootorilised helikopterid on populaarsed, aga neid on keeruline juhtida, selleks on vaja rohkem kogemust ja lennutunde läbida [1]. Üherootorilistele on võimalik paigaldada sisepõlemismootor, mis muudab nende lennuaja pikemaks [3]. Üherootorilisi masinaid kasutatakse näiteks LIDAR laseri vedamiseks [1].

### **1.2.2 Mitmerootorlised**

Mitmerootoriline droon on kõige levinum droonitüüp, kuna seda on kerge juhtida ja neljast tüübist on see kõige odavam [2]. Mitmerootoriline droon on kõige lihtsam ja odavam valik „silmade taevasse saamiseks“ [1]. Peamiseks jõuallikaks on neil elektrimootorid ja toide on enamasti LiPo akudelt [1]. Mitme rootori negatiivseks küljeks on piiratud lennuaeg, sest näiteks ainuüksi gravitatsiooniga võitlemiseks kulub neil palju energiat. Mitmerootorlisi masinaid kasutatakse peamiselt videote jäädvustamiseks ja aerofotograafiaks [3].

Plussid:

- Kerge juhitavus (kerge algajatele),
- Hind,
- Kasutuslihtsus,

Miinused:

- Lühike lennuaeg,
- Väike kandevõime. [1]

### **1.2.3 Fikseeritud tiibadega**

Fikseeritud tiibadega UAV kasutab lendu tõusmiseks tiibu ja tõukejõudu [2]. Edasiliikumiseks tõukejõu kasutamine pikendab lennuaega ja võimaldab läbida pikemaid distantse [2]. Sisepõlemismootoriga lennuki lennuaeg on mitu korda pikem kui elektrimootoriga lennuki lennuaeg [1].

Peamiseks negatiivseks küljeks on suutmatus ühes kohas hõljuda, mis välistab üldise arefotograafilise töö. UAV lennukite õhikutõusmine ja maandumine on keerulisem. UAV suurusest oleneb see, kas ta vajab õhikutõusmiseks katapultit või rada. Maandumiseks kasutatakse võrku, rada või langevarju. Väikesemõõtmelisi droone saab visata õhku käest ja need suudavad maanduda „kõhuli“ avamaal. Peamiselt kasutatakse neid õhukaardistamiseks. [1]

Plussid:

- Pikk lennuaeg,
- Suur ala katvus,
- Suur lennukiirus,
- Keskmise kandevõime,

Miinused:

- Vajab kogenumat juhti,
- Vajab palju õhuruumi,
- Ei suuda hõljuda ühel kohal,
- Vajab tõusmis- ja maandumisrada ja -ruumi. [1]

#### **1.2.4 Fikseeritud tiibadega hübriid-VTOL**

Hübriid-VTOL UAV on hübriid fikseeritud tiibadega lennukist ja multirootorist. Sellisel masinal on mõlema tüübi omadusi: see suudab hõljuda ühel kohal ja liikuda nagu lennuk, mis omakorda tagab pikema lennuaja. Arendamisel kasutatakse mitmesuguseid disaine. Levinuim disain on fikseeritud tiibadega UAV lennuk, millele on lisatud vertikaalsed tõstemootrid. Peamist potentsiaali tuleviks nähakse seda tüüpi droonidel logistika valdkonnas pakkide transportimisel. [1]

Plussid:

- Pikk lennuaeg,
- Suur ala katvus,
- VTOL võimekus,
- Keskmise kandevõime,

Miinused:

- Pole täiuslik ei hõljumisel ja lendamisel,
- Kallis. [1]

### **1.3 Olemasolevad UAV lahendused**

Turul olevate UAV lennukite valik on suur ja mitmekesine. Müüakse amatöörmasinatelt kuni militaarklassi kuuluvaid lennukeid, mille hinnavahe on võib kõikuda paarikümnest eurost mitme miljonini. [4]

Lennuki disainiga UAV mehitamata lennukitest esineb peamiselt fikseeritud tiibadega tüüpe, sest neid on lihtsam toota. [5]

Kokkuvolditavate tiibadega UAV lennukeid kasutatakse peamiselt kahel eesmärgil: vaatlus-UAV-d ja lahing-UAV-d. Vaatluseks kasutatava mehitamata lennuki eesmärk on vaatluse teostamine ja info kogumine. Lahingdroonid jagunevad kaheks: droonid, mis kannavad lõhkematerjali ja droonid, mille sisse on lisatud detoneeriv lõhkeaine, mis plahvatab kokkupuutel (kamikaze droonid).

Mõlemat tüüpi droone lastakse lendu torust, millest need väljuvad ühe nupuvajutusega. UAV-d heidetakse torust välja tootja määratud kineetilise jõuga.

Kokkuvolditavaid vaatlus-UAV-sid toodavad järgmised ettevõtted:

- Advanced Ceramics Research (Coyote) [6]
- Lockheed Martin, USA (Dubbed Outrider) [7]
- WB group (Warmate TL) [8]

Kokkuvolditavaid lahing-UAV-sid toodavad järgmised ettevõtted:

- Uvision, Isreal (Hero-30) [9]
- HAVELSAN, Türgi (Beacher) [10]
- Kalashnikov Group, Venemaa (Silent) [11]

## **1.4 UAV lennukitel kasutatav riistvara**

Kuigi UAV-d teenivad mitmesuguseid eesmärke, on nende kaheks põhifunktsiooniks lendamine ja navigeerimine. Lennuvõimekuse saavutamiseks peab olema lennukil täidetud mitu tingimust, näiteks peab olemas olema jõuallikas, lennukikere, propeller, aku või vedelkütus. Käesolevas peatükis kirjeldatakse UAV-des kasutatavaid riistvarasid.

### **1.4.1 Jõuallikas**

UAV vajab õhus lendamiseks tõukejõudu. Lennukimootorid muudavad vedelkütuse või elektrienergia mehaaniliseks energiaks, mis annab lennukile vajaliku tõukejõu. Lennukitele annavad tõukejõudu järgmised mootorid:

- Elektrimootor: harjastega mootor ja harjasteta mootor [12]
- Sisepõlemismootor [13]
- Rakettmootor [14]

### **1.4.2 Energiaallikas**

Tõukejõu tekitamiseks on vaja energiaallikat, mis käivitaks jõuallika. Praegu on kasutusel ja arendamisel kuus erinevat energiaallikat:

- Patareid/akud,
- Päikeseenergia,
- Vesinik,
- Fossiilkütus,



- Lasersaatja,
- Maapealesest energiaallikast juhtmega. [15]

### **1.4.3 Juhtimisseadmestik**

Mehitamata õhusõidukite tööks on servomootorid hädavajalikud, sest nendega on võimalik liigutada eleroone ja kõrgustüüre.

Servomootor on elektriseade, mis liigutab väljundvõlli kindla nurga, kiiruse ja asendi all. Servomootor koosneb mootorist, mis on ühendatud asukoha anduriga ja kontrolloriga. [16]

### **1.4.4 Navigeerimine**

Droonid kasutavad orienteerumiseks peamiselt globaalset navigatsioonisatelliitide süsteemi (GNSS *Global Navigation Satellite System*), näiteks GPS (*Global Positioning System*) ja GLONASS (*global navigation satellite system*) [17]. GPS signaal ei ulatu igale poole, näiteks tunnelitesse, kaevandustesse ja tööstuslikesse kateldesse. Selle probleemi lahendamiseks on loodud erinevaid lahendusi:

- Nägemisstabiilsuse andurid,
- SLAM (*Simultaneous Localization and Mapping*),
- 3D LIDAR,
- Infrapuna,
- Ultraheli. [18]

### **1.4.5 Lennukontroller**

Lennukontroller on UAV nõndanimetatud aju, mis juhib erinevaid andureid ja mootoreid ning muud lennuki juhtimiseks vajalikku riistvara. Lennukikontrolleri töö on muuta lennujuhi otsused algoritmide alusel erinevateks signaalideks. Näiteks, kui soovitakse lennukit kiirendada, siis lennukontroller saadab soovitud kiiruse elektroonilistele kiiruskontrolleritele, mis teisendavad selle soovitud kiiruse signaaliks, mida loevad mootorid [19]. Lennukontrollerite tootjaid on erinevaid, aga peamine tööülesanne on neil sama. Näited erinevate tootjate lennukontrolleritest:

- HOBBYPOWER KK2.15,
- LHI PRO RACING F3 FLIGHT CONTROLLER,
- HOBBYKING RACE 32 MICRO,

- OPENPILOT CC3D FLIGHT CONTROLLER,
- TAULABS SPARKY 2.0 FLIGHT CONTROLLER. [20]

#### **1.4.6 Autopiloot**

UAV autopiloodisüsteemid võimaldavad mehitamata õhusõidukil täita terve missiooni autonoomselt, vajamata operaatori sekkumist. Autopiloodisüsteemid on keerulisemad ja need on kohandatud arvutitele või nutiseadmetele, mis töötavad Windows, Linux või Android operatsioonisüsteemidega [21]. Autopiloodi riistvara tootvad ettevõtted:

- CUAV,
- Holybro,
- mRO,
- Cubepilot. [22]

#### **1.4.7 Antennid**

UAV-d edastavad ja võtavad vastu mitmesuguseid signaale näiteks: GPS/GNSS signaale, telemeetria- ja andurite andmeid, mobiilside- ja Wi-Fi-sidesignaale. GNSS-antennid võtavad vastu GNSS-i tähtkuju satelliitide edastatud signaale. UAV-d ja mehitamata sõidukid kasutavad saadud signaale ajastuse, kiiruse ja asukoha määramiseks. [23]

Mehitamata sõiduk suhtleb maapealse jaamaga ning selleks vajab ta signaali edastamiseks ja vastuvõtmiseks antenni – muundurit, mis muudab elektrienergia elektromagnetlaineteks ja/või vastupidi. Kasutatakse järgnevaid antennide tüüpe:

- Lineaarselt ja tsirkulaarselt polariseeritud antennid,
- Suund- ja mitmesuunalised antennid,
- Mikrolaineantennid ja -side. [23]

#### **1.4.8 Õhukiiruse andur**

Fikseeritud tiibadega ja VTOL lennukid kasutavad õhukiiruse andureid, et määrata kindlaks kiirus, millega lennuk läbi õhu lendab. Väiksemad lennukid on vastuvõtlikumad tuuleilidele, mis võib põhjustada lennuki aeglustumist või seismajäämist õhus. [24]

Õhukiiruse andur on elastse toruga ühendatud Pitot'i toru külge. Õhukiiruse anduri küljes on kaabel, mis ühendab anduri lennukontrolleriga. [25]

Õhukiiruse anduri tootjaid on erinevaid, aga need andurid töötavad samal põhimõttel. Toodetakse analoog- ja digitaalset andureid. Digitaalsete andurite sisse on lisatud temperatuuriandur, et anda võimalikult täpseid andmeid.

Tootjate andurid:

- Holybro Pix 32 digitaalne andur,
- Mateksys ASPD-4525 digitaalne andur,
- Qiotek ASP5033 digitaalne andur,
- Mateksys ASPD-7002 analoogandur. [26]

### **1.4.9 Vaatlusseadmed**

Mehitamata lennukitele lisatakse FPV (*first person view*), et edastada otsevideot maapealsele operaatorile. Tänu kaamerale on võimalik UAV masinal lennata väljapoole operaatori silmaulatust. FPV tehnoloogia kasutab video edastamiseks ja vastuvõtmiseks raadiosignaali. Reaalaja videovoog on seotud signaali tugevusega drooni ja juhtimisjaama vahel. Signaali on võimalik võimendada, seoses sellega suureneb ka võimalik vahemaa drooni ja operaatori vahel. [17]

FPV otsevideo on võimalik edastada läbi 4G andmesidevõrgu, kasutades selleks kaameramoodulit, andmemoodulit ja 4G modemit [17].

### **1.4.10 Juhtimine**

UAV lennuk vajab lendamiseks maapealset jaama, mis saadab ja võtab vastu lennuki signaale. Lennukontroller teisendab selle signaali juhtsignaaliks. Tänapäeval on erinevaid võimalusi valida, mis seadmega ja signaaliga juhtida mehitamata masinaid. [27]

Lennukit saab juhtida 900MHz, 2,4GHz ja 5,8GHz kaugjuhtimispuldiga, mille lennuulatus on 1-30km. Mida madalam on sagedus, seda kaugemale lendab lennuk, aga samas kauguse suurenedes muutub ka FPV otsepilt kehvemaks. [27]

Üha populaarsemaks muutuvad Bluetooth ja Wi-Fi (2.4GHz) sagedusel töötavad droonid. Droonid ühenduvad nutiseadmega Wi-Fi võrku, läbi mille on võimalik droone kontrollida. Drooni juhtimiseks tuleb alla laadida rakendus. [27]

4G andmeside on andnud tugeva tõuke piiramatu raadiusega lennumasinade tekkele. Juhtimine toimub läbi andmeside, selleks peab lennuk omama 4G andmeside võimekust UAV pardal. Samuti peab 4G andmeside olema olemas ka maapealses juhtimisjaamas. [27]

4G on neljanda põlvkonna mobiilside. 4G kasutab laiaribaühendust ja töötab seadmega mis toetab 4G ühendust. 4G levib mobiilside mastidelt või kõrgematelt objektidelt millele on lisatud 4G signaali edastamise seadmed. 4G mast suudab toetada suurem hulk kasutajad kui tema eelkäija 3G. [28]

Militaarvaldkonnas kasutatavad lennukid lendavad võimendatud raadioside abil, milevib 50-400 km raadiuses. Piiramatu lennukauguse annab UAV lennukitelesatelliitsignaal. [27]

## **1.5 UAV nõuded**

Käesolevas peatükis käsitletakse nõudeid, millele loodav UAV peab vastama.

Lennukile seatud nõuded:

- UAV kere on vastupidav ja kergkaaluline.
- UAV kahjustada saanud osasid on võimalik asendada.
- UAV tiivad on kokkuvolditavad transpordiasendisse.
- UAV tiivaulatus on minimaalselt 2m.
- UAV on kaugjuhitav 4G võrgust.
- UAV on poolautonoomne.
- UAV-l on kaamera.
- Operaatoril on kaamerast otseülekanne juhtimisjaama.
- UAV asukohta on võimalik jälgida kaardil.

## 2 UAV REALISATSIOON

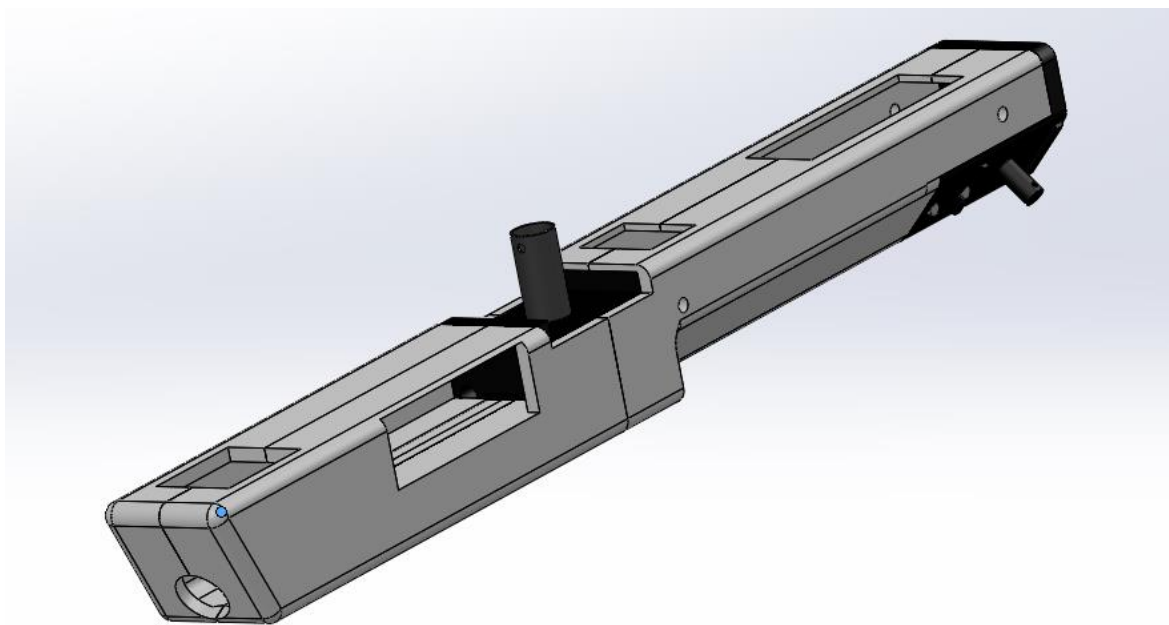
Käesolevas peatükis kirjeldatakse lennuki disaini ja valmistatud mudelit. Antakse ülevaade lennuki modelleeritud komponentidest. Tutvustatakse UAV-le valitud riistvara ja tehnoloogiaid. Kirjeldatakse lennuki komplekteerimise etappe ükshaaval.

### 2.1 UAV disain

Disainitud lennuk kuulub fikseeritud tiibadega UAV-de klassi, aga väikse erinevusega, sest loodud lennuki tiibasid saab kokku ja lahti voltida. UAV lennuki disainimisel on arvesse võetud järgmisi aspekte: kompaktsus, suurus, ehituslihtsus, tugevus ja kahjustatud osade asenduse lihtsus.

#### 2.1.1 UAV kere

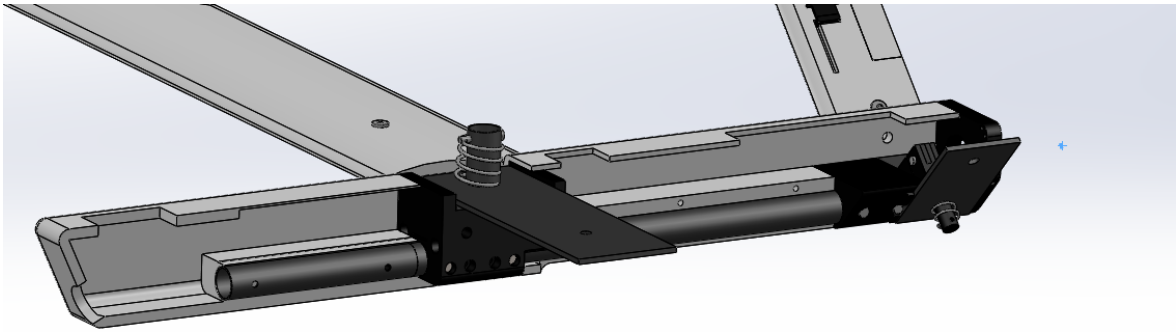
Lennuki kere on valmistatud kahest osast: nähtav kere ja tugevatud siseskelett. Nähtav kere on vahtplastist (Joonis 1). Skeleti disaini materjaliks on valitud pressitud süsinik ja süsinik PLA (*Polylactic acid*).



Joonis 1. UAV välikere.

Lennuki kere on disainitud kandilise geomeetrilise kujundi alusel, et lennuki sisse paigaldatav riistvara mahuks sinna võimalikult kompaktselt ära. Lennuki kere koosneb mitmest osast, sest kui mingi osa saab kahjustada, ei pea välja vahetama tervet keret. Piisab üksnes kahjustatud osa asendamisest.

Siseskeleti (Joonis 2) eesmärk on muuta lennuk tugevaks ja võtta enda kanda liikuvad osad. Skeletti külge jäävad võllid, mille toetusel on võimalik tiibu transpordi- ja lennuasendisse voltida.

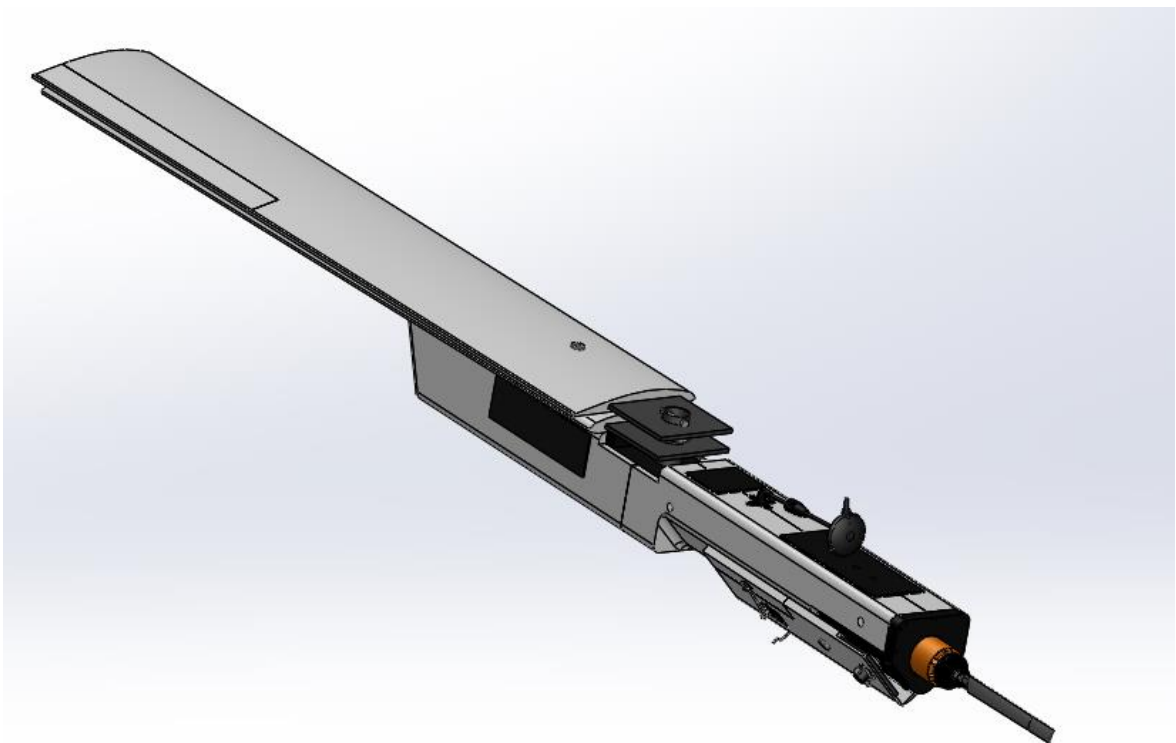


Joonis 2. UAV siseskelett.

### 2.1.2 UAV esitiivad

Esitiivad on klassikalise ristküliku kujuga. Ristküliku kuju annab UAV-le lühikese lendutõusmise ja maandumise distantssi. Seda on ka lihtne ja odav ehitada.

Tiibade disainimisel on tuginetud põhimõttele, et kahjustatud tiiba peab olema võimalik eemaldada ja asendada uue tiivaga. Tiivad on võimalik kokku voltida üksteise peale, kerega horisontaalselt, lennuki nina poole (Joonis 3). Ainus tiiva küljes olev elektrooniline osa on servomootor.



Joonis 3. Transpordiasendis UAV.

### 2.1.3 UAV tagatiivad

Lennuki tagatiivad on V-kujulised, sest selline ehitus võimaldab kasutada vähem komponente ja nii on tiibu lihtsam kokku voltida (Joonis 4) . V-kujulise sabaga lennuki manööverdamisvõimekus on väiksem. Antud lennuki juures ei ole suur manööverdamisvõimekus väga oluline, sest UAV on disainitud vaatlusõhusõidukiks ja need lendavad peamiselt otse ning horisontaalselt.



Joonis 4. V-kujuline tagatiiva disain.

## 2.2 3D mudeli loomine

UAV disaini loomisel ja juurutamisel on lähtutud sellest, et lennuk oleks transportimise lihtsustamiseks kompaktne ja ei nõuaks suurt operaatoripoolset pingutust masina lennuvalmidusse viimisel. Selle eesmärgi saavutamiseks on lennuk disainitud selliselt, et tiibasid saab kokku ja lahti voltida. Operaator ei pea tiibasid eraldi lennuki külge kinnitama.

### 2.2.1 Solidworks

Mudelite modelleerimiseks ja omavahel üheks tervikuks ühendamiseks on kasutatud Solidworks keskkonda. See on kolmemõõtmeline raalprojekteerimise (CAD) tarkvara.

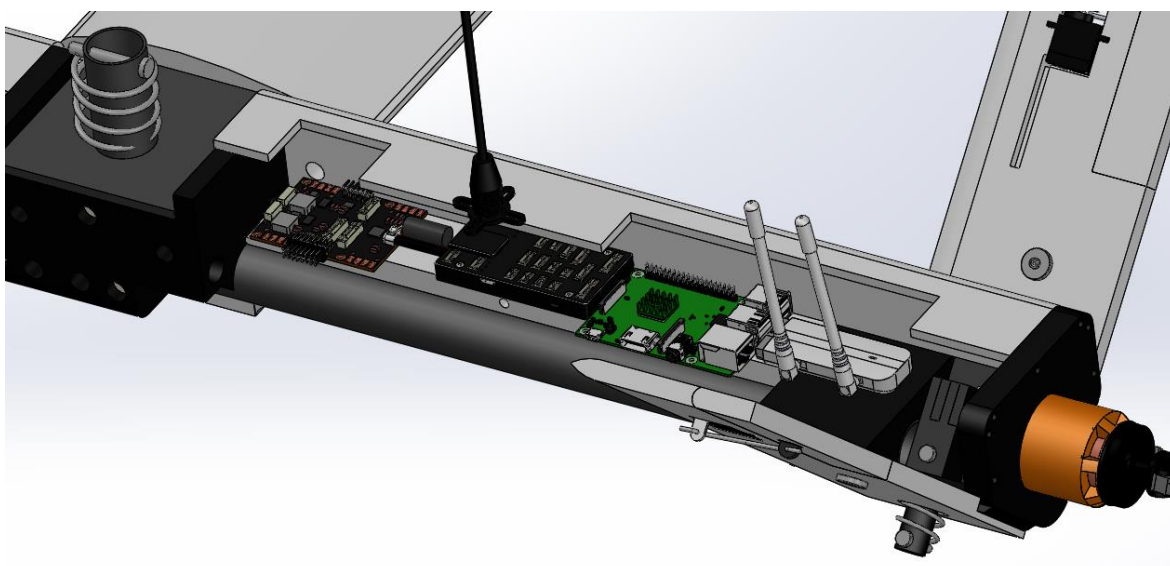
Kasutati Solidworks tarkvaras 3D mudelite modelleerimise rakendust. Teisi Solidworksiga seonduvaid rakendusi ei ole projektis kasutatud.

## 2.3 3D mudeli realiseerimine

Kogu UAV ühendatud mudel koosneb 92 mudelist. Kokku on modelleeritud 68 erinevat detaili, millest 40 on autori disain ja 28 on modelleeritud joonise või füüsilise objekti põhjal.

- Esitiivad koosnevad kuueteistkümnest detailist
- Tagatiivad koosnevad kuueteistkümnest detailist
- Kere koosneb kolmekümne üheksast detailist
- Riistvara koosneb kahekümne ühest detailist

Riistvara on modelleeritud jooniste või füüsiliste objektide alusel. Riistvara modelleerimisel on lähtutud sellest, et komponendid näeksid välja võimalikult sarnased füüsiliste objektidega. Modelleeritud riistvara komponendid näitavad, kas riistvara mahub lennukisse või mitte (Joonis 5).



Joonis 5. Riistvara asetus UAV kere sees.

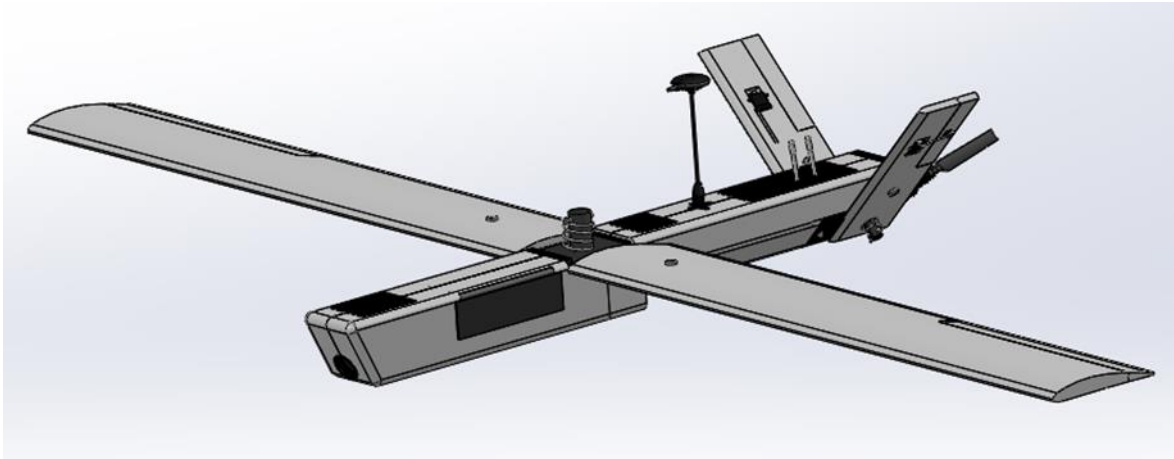
Lennuki kere on modelleeritud kahes osas: välikere ja siseskelett. Välikere on modelleeritud nii, et sinna sisse mahuks skelett ja riistvara. Lennuki ninas paiknevad vaatlusseade ja aku. Lennuki keskele, kus on kõige tugevam konstruktsioon, on paigaldatud riistvara. Skeletti disainitud keskraam ja tagaraam on ühendatud toruga, mis on omakorda kinnitatud poltidega. Välikere toetub ja kinnitub kogu skeletile. Keskraami ja tagaraami külge kinnituvad tiivad.

Esitiivad ja tagatiivad koosnevad kahest osast: tiib ja adapterplaat. Adapterplaat teeb võimalikuks tiibade kokkuvoltimise. Tiibu on võimalik adapteri küljest eemaldada



tihtviga. Tiibadesse on modelleeritud servomootorite pesad. Servomootoritega juhitakse lennukit.

SLDAMS (*Solidworks Assembly Document*) faili dokument näitab, missuguseks kujuneb valmistatav UAV lennuk (Joonis 6).



Joonis 6. UAV diagonaalvaates.

## 2.4 Riistvara

Käesolevas peatükis antakse ülevaade lennukisse paigaldatavast riistvarast. Riistvara sisaldab lennukontrolleri, autopiloodi, juhtimis- ja vaatlustehnoloogiaid.

### 2.4.1 Raspberry Pi 3 Model B

Raspberry Pi 3 Model B (Joonis 7) on mängukaardi paki suurune miniarvuti, mida saab kasutada erinevate toimingute teostamiseks, sealhulgas interneti kasutamiseks. Sel on sisseehitatud traadita ühendused Wi-Fi ja Bluetooth. Raspberryl on neli USB 2.0 porti, Gigabit Etherneti pesa, HDMI (*High-Definition Multimedia Interface*) väljund ja 3,5mm stereoheli pesa. [29]



Joonis 7. Raspberry Pi 3 Model B

Raspberry omab 40 üldotstarbelist sisendväljundit, mille külge saab lisada olemasolevaid GPIO (*General Purpose Input/Output*) riistvarasid. Arvutil on eraldi CSI (*Camera Serial Interface*) kaamera pesa. [29]

Raspberry kasutab vabavaralist operatsioonisüsteemi, mis on internetis saadaval. Raspberry miniarvutile on võimalik paigaldada operatsioonisüsteeme, mis muudavad arvuti mängukonsooliks, samuti süsteeme, mis võimaldavad kasutada tavapäraseid arvutifunktsioone, nagu näiteks interneti kasutamine, dokumentide koostamine, filmide vaatamine. [29]

Raspberry arvutil puudub andmesalvestamiseks vajalik andmekandja. Andmed salvestatakse välisele SD-kaardile, mis on vaja eraldi lisada.

Tabel 2.1 Raspberry Pi 3 Model B tehnilised andmed

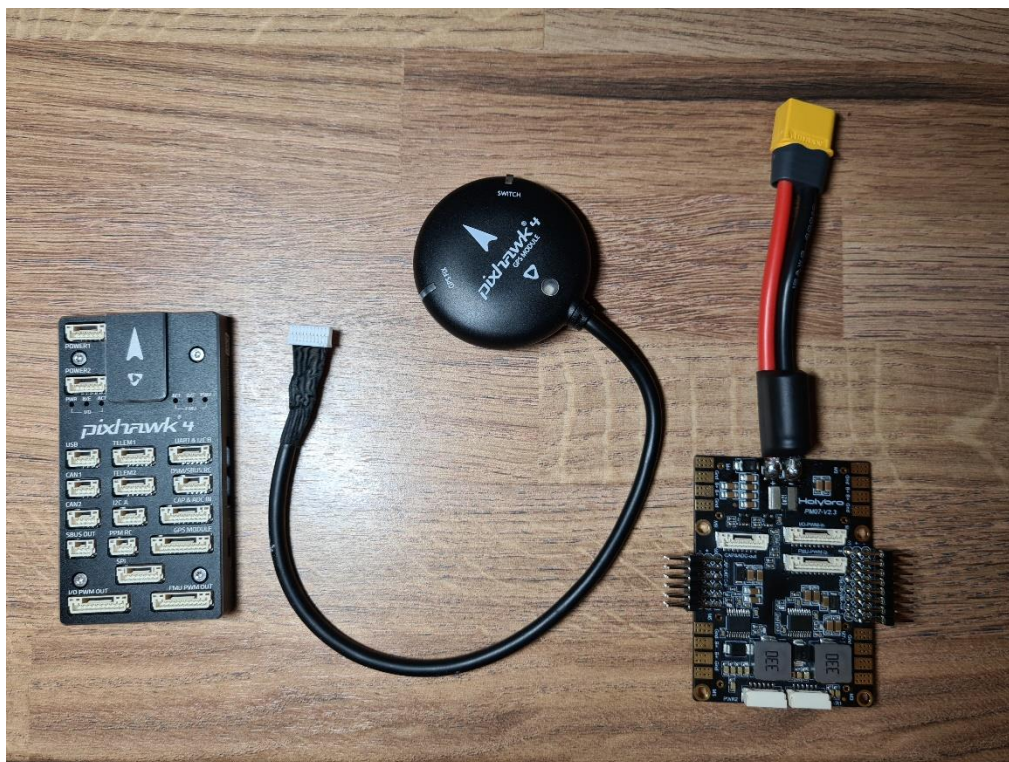
Protsessor	Neljatuumaline 1,2 GHz Broadcom BCM2837 64-bitine protsessor
Graafika	Kahetuumaline VideoCore IV® multimeedia kaasprotsessor
Mälu	1 GB LPDDR2
Operatsioonisüsteem	käivitub Micro SD-kaardilt, kus töötab Linux operatsioonisüsteemi versioon või Windows 10 IoT
Andmekandja	SD-kaart
Ühenduvus	802.11 b/g/n Wi-Fi , 2,4 GHz Bluetooth
Liidesed	4x USB 2.0, 1x HDMI, 1x micro USB, 3,5mm AUX, 40x GPIO üldotstarbelist sisendväljundit.
Suurus	85 x 56 x 17mm

Raspberry miniarvutit kasutatakse UAV lennukis pardaarvutina, mille kaudu saab juhtida teisi riistvarakomponente. Lisaks sellele saadab see ka maapealsele jaamale videopildi ja lennukiandmeid, nagu näiteks liikumiskiiruse, asukoha ja kõrguse.

Kõige eelneva haldamiseks on Rasperryle paigaldatud operatsioonisüsteem. Tänu sellele saab avada arvutis rakendusi, mis tagavad ühendused riistvarakomponentidega.

#### **2.4.2 Holybro Pixhawk 4**

Pixhawk 4 (Joonis 8) on kergkaaluline autopiloot ja lennukontroller, mis juhib erinevaid sõidukitüüpe: maapealsed sõidukid, veesõidukid, õhusõidukid (multirootorid, fikseeritud tiibadega lennukid ja VTOL-id). [30]



Joonis 8. Paremt vasakule loendatud Holybro Pixhawk4 lennukontroller, Pixhawk GPS moodul, Holybro PM07-V2.3 toitejaotis.

Pixhawk 4 kasutab lennuki oleku määramiseks andureid. Kontrolleri külge on võimalik ühendada mitmeid erinevaid andureid, nagu näiteks güroskoop, kiirendusmõõtur, baromeeter ja magnetomeeter. [30]

Kontroller vajab GPSi või muud positsioneerimissüsteemi, mis võimaldab Pixhawk 4 süsteemil kasutada automaatrežiimi ja muudab UAV autonoomseks [30].

Pixhawk 4 lennukontrollerile on eelinstalleeritud PX4 püsivara. PX4 tarkvara saadab andurite ja mootorite info maapealsesse jaama, kus on olemas tarkvara lennuki andurite kogutud andmete kuvamiseks. [30]

Juhtimisjaam saadab infot lennukile vastu vajalikke korrektureid tegemiseks. Kontroller muudab selle info signaaliks, mille saadab vastutavale väljundile. Pixhawk 4 kontrollib väljunditega näiteks: mootorit, eleroone, langevarju.. [30]

Pixhawk 4 on loodava UAV „aju“. Selle eesmärk on stabiliseerida lennuki asendit, koguda anduritelt andmeid ja saata need loetaval kujul juhtimisjaama. Samuti muudab Pixhawk 4 juhtimisjaama käsklused väljunditele loetavaks, positsioneerib lennuki asukohta kaardil, kasutades GPS antenni, ning muudab lennuki autonoomseks.

### 2.4.3 Pixhawk 4 GPS moodul

Pixhawk 4 GPS moodul (Joonis 8) on Pixhawk 4 lennukontrolleri moodul, mille abil lennuk tuvastab enda asukoha, kasutades vähemalt nelja satelliidi signaali

kombinatsiooni. GPS toetab globaalseid satelliitnavigatsioonisüsteeme. GPS moodul on Pixhawk 4 lennukontrolleriga ühendatud pistikuga. [31]

Pixhawk 4 GPS moodul muudab lennuki autonoomseks. See tuvastab ja edastab lennuki asukoha, lennukiiruse ja kõrguse.

#### **2.4.4 Holybro PM07-V2.3**

Holybro PM07-v2.3 on voolu toitemoodul ja toitejaotusplokk (Joonis 8). Ploki sisendvool on 7-51V ja väljundvool 5V. Plokk varustab vooluga kõiki väljundeid, et sellega ei koormataks lennukontrollerit. Toitemoodul saadab autopiloodile teavet aku voolu ja pinge kohta, mis edastatakse mootorile ja lennujuhile. [32]

Käesolevas projektis annab plokk väljundvoolu tõukemootorile, servomootoritele, Pixhawk 4 lennukontrollerile ja Raspberry Pi arvutile.

#### **2.4.5 Huawei E5576-320 mobiilne Wi-Fi ruuter**

Huawei E5576-320 on mobiilne Wi-Fi ruuter, mis töötab SIM-kaardiga. Mobiilne andmeside levib ruuterist edasi Wi-Fi signaalina. Korraga on selle külge võimalik ühendada 16 seadet. Maksimaalne võimalik allalaadimiskiirus on 150 Mbps ja üleslaadimiskiirus 50Mbps. Ruuteri aku kestab kuni 6 tundi. [33]

Huawei ruuter vahetab välja esialgselt plaanitud Huawei netipulga E3372. Huawei netipulk ei pruugi toetada Linux operatsioonisüsteemi. Kuna Raspberry Pi toetab Wi-Fi ühendust, siis otsustati internetiühenduse saamiseks kasutada taskuruuterit.

#### **2.4.6 EMAX GT4020 420Kv**

EMAX GT4020 on harjadeta elektrimootor (Joonis 9). Kv kirjeldab mootori konstant kiirust ehk mootori pöörete arvu, kui sellel rakendata 1V ilma koormuseta. Mida rohkem on mootoris Kv-d seda suurem on pöörete arv. Teisest küljest kasutatakse madalama Kv-ga mootoreid raskete droonite tõsteks, kuna soovitakse pöörata suuri propellereid, et seejärel saavutada suurem pöördemoment [34]. Mootoril on 5,5kg tõukejõud. Soovitav toide 5S-6S LiPo aku. [35]





### 2.4.8 Pixhawk digitaalne õhukiiruse andur

Pixhawk digitaalne õhukiiruse andur omab kõrge eraldusvõimega madala nihkega digitaalset rõhuandurit (Joonis 11). Andur on vastupidavam kui selle eelkäijad, mis kannatasid pikkadest kaablitest tingitud müra all. Anduril on MS4525DO andur, mis on võimeline mõõtma kuni 100m/s kiirust. Andur kasutab andmete saatmiseks 0,84 Pa 14-bitilisi andmeid 24-bitilisest delta-sigma ADC-st (*analog-to-digital converters*). Anduril on sisseehitatud temperatuuriandur. [25]

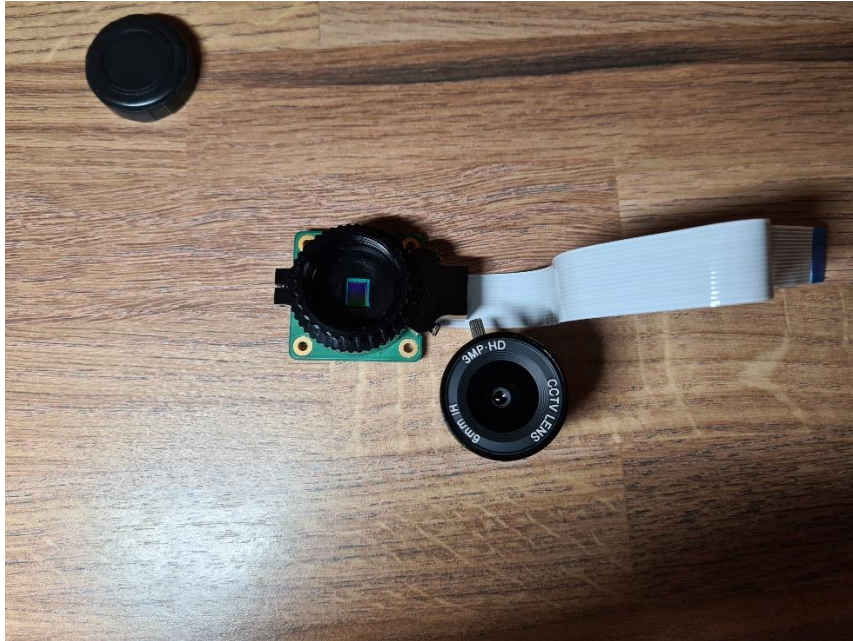


Joonis 11. Pixhawk õhukiiruse andur.

Fikseeritud tiibadega lennuki autopiloot ei suuda tuvastada lennuki seismajäämist õhus. Selle probleemi vältimiseks lisatakse lennukile õhukiiruse andur, mis tuvastab lennuki kiiruse ümbritsevas õhus ja lennuki seismajäämise õhus. lennuki õhus seismajäämise. Lennuki seiskumist õhus võib põhjustada liiga tugev vastutuul. Õhukiiruse anduri saadud info analüüsitakse läbi lennukontrolleri poolt ja lisatakse juurde kiirust, et lennata vastutuult.

### 2.4.9 Raspberry Pi High Quality Camera

Raspberry HQ on Raspberry kolmanda põlvkonna kaamera (Joonis 12). Kaameral on 12.3 megapiksline Sony IMX477R andur. Kaameral endal puudub objektiiv, selle asemel on tal C- ja CS-adapter, mille külge saab lisada erinevaid objektiive. Objektiivid on manuaalse fookusega. Raspberry HQ sobib kõigile Raspberry Pi mudelitele, mis ühilduvad CSI pistikuga, välja arvatud Zero sari. [37]



Joonis 12. Raspberry Pi High Quality Camera.

Lennukile paigaldataks Raspberry HQ kaamera 6mm lainurk objektiiviga. Kaamera ühendatakse CSI pistikutesse lintkaabliga. Kaamera hakkab näitama operaatorile reaalaaja pilti.

#### **2.4.10 LiPo aku**

Liitiumpolümeerakud ehk LiPo on akutüüp, mida kasutatakse paljudes olmeelektroonikaseadmetes. Neid toodetakse erineva suuruse ja võimusega. LiPo elemendi sisepinge on 3.7V. Kui liidetakse kokku 2 LiPo elementi, siis nende voltide arv liidetakse. Aku mahtuvus näitab, maksimaalset energiahulka, mida saab akust teatud kindlatel tingimustel kasutada. C reiting on mõõtühik, mis näitab, kui kiiresti saab akut saab tühjendada ilma et seda kahjustataks. [38]

Projektis kasutakse TCPWORTH firma 22,2V 6000mAh mahtuvusega akut (joonis 13). Akuvoolu toitel on kõiki lennuki pardal olevaid riistvarad.



Joonis 13. TCBWORTH 22,2V 6000mAh LiPo aku.

### 2.4.11 Juhtimispuht

Lennuki juhtimiseks kasutatakse Speedlink SL-6515-BK juhtmega mängupulti (Joonis 14). Juhtmega puht valiti selleks, et side arvuti ja puldi vahel oleks stabiilsem.



Joonis 14. Speedlink mängupult.

### 2.4.12 Juhtimisjaam

Maapealseks juhtimisjaamaks on Windows 10 operatsioonisüsteemiga sülearvuti. Arvutisse on installeeritud lennuki juhtimiseks vajalik tarkvara. Operaator kasutab lennuki juhtimiseks ja info vastu võtmiseks 4G võrku.



## 2.5 Tehnoloogiad

Käesolevas peatükis antakse ülevaade projektis kasutatavatest tarkvaradest. Projektiga seotud tarkvarad on vabavaralised.

### 2.5.1 Linux

Linux on avatud lähtekoodiga operatsioonisüsteem, mis võimaldab riistvara ja tarkvara vahelist suhtlust. Linux tarkvara kasutatakse tänapäeval paljudes erinevates valdkondades. Tulenevalt Linuxi avatud lähtekoodist, on sellest tehtud väga palju erinevaid distributsioon [39]

Projektis kasutatakse Linuxi Ubuntu versiooni. See on desktopipõhine ja kasutajasõbralikum kui Linuxi originaalversioon.

### 2.5.2 PX4

ArduPilot on avatud lähtekoodiga autopiloodi tarkvara, mis on võimeline juhtima peagu kõiki sõidukisüsteeme. PX4 koosneb navigatsioonitarkvarast. PX4 tarkvara võimaldab lennukil lennata autonoomselt. Tarkvara on laetud Pixhawk 4 riistvarasse tehase poolt, aga see vajab aegajalt värskendamist. [40]

PX4 annab lennukile autonoomsuse ja hoiab sõidukit stabiilsena.

### 2.5.3 Mission Planner

Mission Planner on täisfunktsionaalne õhusõidukite maapealne juhtimisjaam. Mission Planner on vabavaraline rakendus (Joonis 14). See näitab lennuki asukohta ja erinevate andurite andmeid, näiteks lennuki kiirust, kõrgust ja akutaset. Tarkvaras on võimalik planeerida autonoomseid missioone erinevatele sõidukitüüpidele. [41]

Mission Planner rakenduses koostatakse autonoomseid programme, mille järgi mehitamata sõiduk liigub. Tarkvara siseselt saab muuta lennuki kontrollimise sätteid, näiteks määrata puldi nuppude tegevusi.



Joonis 15. Mission Planneri tarkvara kuvatõmmis.

## 2.5.4 GStreamer

GStreamer on interneti toel töötav tunnelipõhine multimeedia raamistik. GStreamer toetab erinevaid meediavorminguid, nagu näiteks MP3, AVI, Ogg/Vorbis ja paljusid teisi. [42]

GStreamerit kasutatakse videosilla voogedastuseks, et operaator näeks reaalajas olevat pilti.

## 2.6 Lennuki komplekteerimine

Käesolevas peatükis kirjeldatakse lennuki kere valmistamist ning riistvara ja tarkvara omavahelist ühendamist. Tööprotsessi kirjeldatakse etappide kaupa. Graafiline osa on lisatud kui LISA 1.

### 2.6.1 Lennuki kere komplekteerimine

Lennuki kere komplekteerimiseks on esmalt soetatud e-poest materjalid ja tarvilikud jupid: kaks süsinikust toru, neli süsinikplaati, vedrud, süsinikusaldusega PLA filament ja vahtplast.

Esimeses etapis prinditakse Ender 3 3D printeriga välja kõik mudelid, mida läheb lennuki ehitamiseks vaja. Kokku prinditakse välja 11 mudelit. Mudelite nimetused: keskraam, tagaraam, kaamera\_luuk, aku\_luuk, Pixhawk\_luuk, mootori\_luuk, toru adapter, parem\_tagumise\_tiiva\_kinnitus\_toru (2x), parem\_tagumise\_tiiva\_kinnitus (2x).

Teiseks etapiks on luustiku ehitamine. Keskraami ja tagaraami vahele jääb süsiniktoru, mille sisse on puuritud mõõdetud asukohaga augud. Keskraami ja tagaraami vahelisele torule kinnitatakse 3D prinditud toruadapteriga järgmine süsiniktoru, mis muudab luustiku pikemaks. Kõik need komponendid ühendatakse omavahel M4 poltidega.

Kolmandas etapis ehitatakse esimeste tiibade kinnitused. Keskraami külge kinnitatakse vertikaalselt lühem 30mm läbimõõduga süsiniktoru, mis kinnitatakse 4m poldiga. Süsinikplaatidesse on lõigatud vesilõikusega 30mm ja 15 mm avad. Plaadi 30mm ava ja toru sobituvad tsentrisse. Plaadid paigaldatakse üksteise peale suhtes 180 kraadi. Paigal hoitakse plaate survevedruga. Survevedrut hoiab kinni tihvt.

Tagatiiva kinnitusplaadid kinnitatakse eraldi tagaraami külge kummalegi poole. Esimeseks peab kokku panema 2 prinditud vahelüli nurkseotise ja poldiga. See tuleb järgmisena paigutada tagaraami sissepoole, kus asuvad avad. Väljastpoolt sisestatakse prinditud 15 mm läbimõõduga silindrid, mis kinnituvad tihvtidega. Silindrid hoiavad raami sees olevaid tiiva kinnitusdetalle kinni. Silindrite otsa pannakse plaadid, millesse on lõigatud avad. Plaadi ava ja silinder lähevad tsentrisse. Plaat asetseb tagaraami suhtes vertikaalselt. Plaat hoitakse kinni vedrusurvega.

Neljandas etapis valmistatakse lennuki välikere. See lõigatakse välja vahtplastist nelja osana. Osad kinnituvad süsinikluustiku külge. Üks pool välikerest kinnitatakse kohe luustiku külge ja teine pool hiljem, kui elektroonika on paigaldatud. Keresse on elektroonika jaoks lõigatud avad. Kere elektroonika luugid on varasemalt välja prinditud ja need lisatakse projekti lõpus.

Viiendas etapis valmistatakse vahtplastist tiivad. Tiivad kinnituvad lennuki tiivahoidmisplaatide külge tihvtiga. Tiibadesse on sisse lõigatud avad elektroonika jaoks. Tiibade eleroonid teibitakse pealmselt poolelt teibiga tiibade külge. Eleroone juhitakse servomootoriga. Servomootori ja eleroonide vahele on painutatud metallist varras, mis ühendab nad omavahel.

Kuuendas etapis, kui elektroonika on paigaldatud, kinnitatakse paika teine kerepool ja lisatakse elektroonika hooldamisavade luugid.

### **2.6.2 Riistvara häälestamine**

Esimeses etapis laetakse Raspberry Pi 3 model B miniarvutisse Linux Ubuntu 32-bitiline operatsioonisüsteem. Operatsioonisüsteemi ei saa otse laadida Raspberry arvutisse, kuna tal puudub lokaalne andmekandja. Ubuntu tuleb laadida personaalarvutisse ja sealt edasi, kasutades Etcher programmi, et salvestada see *flash* failina SD-kaardile. SD-kaart tuleb sisestada järgmisena arvutisse, kuhu on vaja operatsioonisüsteem paigaldada. Kasutaja peab järgmisena seadistama personaalsed seadistused. [43]

Teises etapis luuakse internetiühendus ja Raspberry ühendatakse 4G võrguga. Raspberry Pi 3B-l on olemas sisseehitatud traadita kohtvõrk (Wi-Fi). Raspberry ühendatakse Wi-Fi võrku, kasutades selleks SIM-kaardiga töötavat taskuruuterit.

Kolmandas etapis on vajalik seadistada Pixhawk 4 lennukontroller. Lennukontrollerit seadistatakse Mission Planner tarkvaras, kasutades selleks kaabliühendust. Mission Planneris peab lennukontrollerisse laadima õhusõiduki tüübi, selle projekti puhul on see fikseeritud tiibadega lennuk. Järgmisena on vaja kalibreerida Pixhawkis sees olevad andurid, nagu näiteks kompass, güroskoop jne. [44]

Neljandas etapis ühendatakse GPS moodul. GPS moodul ühendub lennukontrolleriga 10 kontaktilise I2C (*Inter-Integrated Circuit*) adapteriga GPS mooduli pistikusse. GPS ühendab ennast automaatselt lennukontrolleriga. GPS-i peab pärast ühendamist kalibreerima Mission Planner rakenduses. GPS ei pruugi leida signaali siseruumis, soovituslik on seda katsetada välitingimustes. [45]

Viiendas etapis ühendatakse lennukontrolleri külge õhukiiruse andur. Pitot toru paigaldatakse lennuki nina otsa sellisena, et väike ava toru otsas ulatub lennusuunas paar sentimeetrit nina otsast välja. Jälgida tuleb, et toru ots ei jääks tõukemootori tuulde, muidu näitab andur juhtimisjaama valeinfot. Andur ise ühendub kontrolleriga I2C pistikuga. Pärast ühendamist peab anduri kalibreerima Mission Planner rakenduses. [46]

Kuuendas etapis lisatakse kontrollerile toitemoodul, mis annab voolu lennukontrollerile ja jaotab toidet väljunditele. Toitemoodulist PWR1 pistikust ühendame 6-juhtmelise I2C adapteriga Pixhawk lennukontrolleri POWER 1 pistikusse. Läbi toitemooduli juhitakse väljundeid. Selleks on vaja 10-juhtmeline I2C kaabel kontrolleri I/O PWM OUT pistikust toitejaotusmooduli I/O PWM IN pistikusse ühendada. Peale kaablite ühendamist on vaja toitejaotusmooduli seaded seadistada Mission Planner tarkvaras. [47]

Seitsmendas etapis lisatakse toitejaotusmoodulile servomootorid. Servomootor lisatakse toitemooduli PMU-PWM-out GPIO-sse. PMU-PWM-out väljundites puudub 5V vool. 5V vool tuuakse sisse LiPo akust. Selleks lisatakse vahele voolumuundur, mis muudab 22.2V 5-voldiseks vooluks. Servomootorid peab pärast seda seadistama õigesse asendisse, kasutades Mission Planner tarkvara. [48]

Kaheksandas etapis lisatakse toitemooduli külge tõukemootor. Tõukemootor joodetakse toitemooduli külge. Signaalikaabel läheb M1 ühendusse, mille kaudu juhitakse mootori gaasi. [48]

Üheksandas etapis muudetakse Raspberry miniarvuti Wi-Fi sätteid nii, et see ühenduks automaatselt Wi-Fi-ga. See on vajalik, sest lennukis puudub graafiline võimekus. [49]

Kümnendas etapis ühendatakse Raspberry PI kaamera Raspberry Pi 3B miniarvutiga [50]. Seejärel ühendatakse otsepilt maapealse juhtimisjaamaga, kasutades Wi-Fi võrku. Videopilt voogedastatakse GStreamer rakendusse [51].

Üheteistkümnendas etapis ühendatakse riistvaraliselt omavahel Raspberry Pi ja Pixhawk. Pixhawk kontrollerist ühendatakse TELEM1 pistikust Raspberry Pi 3B GPIO pin vahel kaabel. Selle ühendamiseks valmistatakse spetsiaalne kaabel, mille ühes otsas on I2C adapter ja teises GPIO adaptrid. [52]

Kaheteistkümnendas etapis ühendatakse tarkvaraliselt Raspberry Pi 3B, Pixhawk lennukontroller ja juhtimisjaam. Selleks kasutatakse RealVNC serverit, et saada ligipääs Ubuntu operatsioonisüsteemile. Järgmisena käivitatakse Raspberry terminalis MAVProxy, mis annab ligipääsu Pixhawk lennukontrollerile. Pärast seda käivitatakse Raspberry terminalis NGROK, mis annab ühenduse juhtimisjaama ja Raspberry Pi arvuti vahel. Viimaks tuleb minna Mission Planner programmi ja valida TCP (*Transmission Control Protocol*) ühendus. [53]

Viimases etapis ühendatakse mängupult Mission Planner tarkvaraga ja seadistatakse puldi kangid ja nupud. [54]

### **3 VALIDEERIMINE**

Käesolevas peatükis analüüsitakse valminud projekti vastavust seatud nõuetele ja käsitletakse riistvara testimist.

#### **3.1 Töö nõuetele vastavus**

Üks esmaseid nõudeid oli, et UAV kere oleks kergkaaluline ja vastupidav. UAV tiivad ja välikere ehitatakse vahtplastist ja tugevamad osad süsinik- ja süsinikusisaldusega PLA-st. Riistvara kaal kasvas, kuna netipulga asemel kasutatakse taskuruuterit ja lennukile lisatakse õhukiiruse andur. Kaal oluliselt palju ei muutunud ja jäi nõutud kaaluvahemikku.

UAV on disainitud sellisena, et lennuki kere koosneb mitmest erinevast osast. See kergendab kahjustatud osade väljavahetamist. Lennuki tiivad on eemaldatavad. Lennuki disaini on selle lahendusega samuti kerge muuta.

Lennuki tiibade mehaanika on disainitud võimaldama tiibade fikseerimist transpordiasendisse ja lennuasendisse. Lennuasendisse seades fikseeruvad tiivad kindlasse positsiooni vedrusurvega.

Lennuki tiivaulatus peab olema minimaalselt 2m, et muuta õhusõiduk suurematel kõrgusetel tuulele vastupidavamaks. Lennuki tiivaulatus on 211,5cm.

Seatud on nõue, et lennuk on juhitud 4G võrgus. Lennukit juhitakse Wi-Fi võrgus. Wi-Fi võrk luuakse lennukile Huawei taskuruuteriga, mis saab oma levi 4G võrgust. Wi-Fi vastuvõtjaks on Raspberry Pi 3B miniarvuti, mis on lüüks lennukontrolleri ja maapealse juhtimisjaama vahel.

Lennuk on varustatud Pixhawk 4 lennukontrolleriga, mis on samas ka autopiloot. Kontroller suudab täita Mission Planner programmis koostatud missioone. Lennuk on poolautonoomne kuna sel puudub lendutõusmiseks ja maandumiseks tarvilik varustus.

UAV-le on lisatud Raspberry HQ kaamera, mis on ühendatud Raspberry arvutiga. Kaamera otseülekanne saadetakse operaatorile läbi interneti voogedastuse kaudu GStreamer rakendusse.

Lennuk tuvastab oma asukoha Pixhawk 4 GPS mooduli abil. Lennukontroller saadab selle info Mission Planner programmi, kasutades Raspberry Pi pardaarvuti ja keskjaama internetiühendust. Lennuki asukoht märgitakse Google satelliitkaardil, mida Mission Planner vaikimisi kasutab.

## 3.2 Testimine

Lennuk on arendamise faasis ja ei ole tervikuna valmis. Riistvaradest on testitud Pixhawk 4 lennukontrollerit, GPS moodulit, toitejaotust, LiPo akut ja Mission Planner tarkvara.

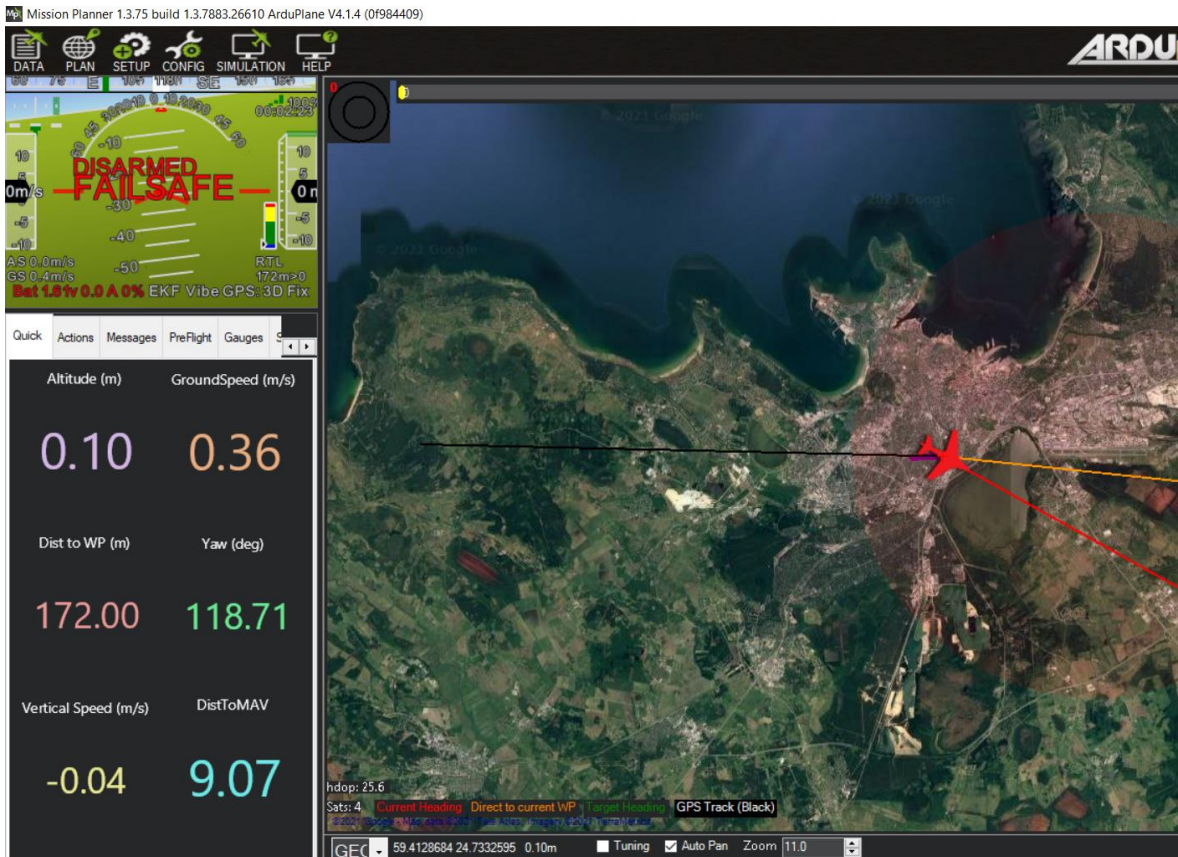
Lennukontrollerit ja GPS moodulit testiti koos. Kontrolleri ühendati USB kaabli abil arvutiga ning Mission Planner tuvastas nii kontrolleri kui ka GPS mooduli. Testimise käigus kalibreeriti kontrolleri ja GPS mooduli kompassid ning kontrolleri kiirendusmõõtur. Kontrolleri kompass kinnitas kalibreerimise esimese katsega (Joonis 16), GPS kompass suudeti ära kalibreerida kolmandal katsel. Kontrolleri kiirendusmõõturi kalibreerimine õnnestus esimesel katsel ja ilma tõrgeteta.



Joonis 16. Kompassi kalibreerimine Mission Planner tarkvaras.

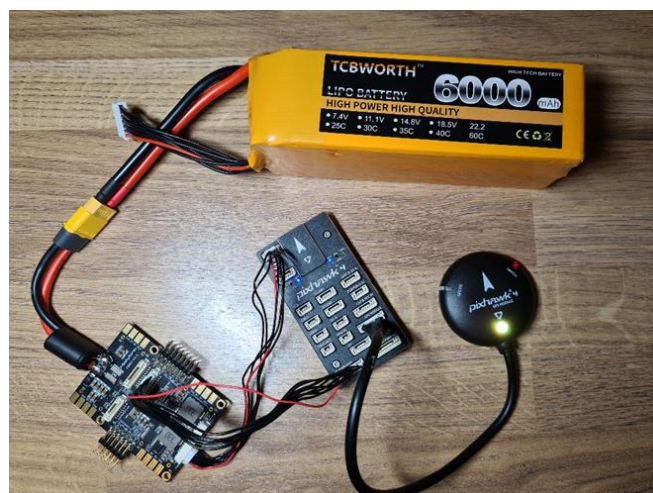
Järgmisena testiti õhusõiduki enda asukoha leidmist. Esimesel katsel jäi asukoht leidmata. Kontrollerile tehti kaks taaskäivitust, kuid GPS asukoha tulemus jäi leidmata. GPS ei suutnud asukohta tuvastada, sest siseruumides GPS levi ei ole. GPS suutis leida oma asukoha 10 sekundiga kui GPS moodul asetati aknast väljapoole (Joonis 17).





Joonis 17. Asukoha leidmine Mission Planner tarkvaras.

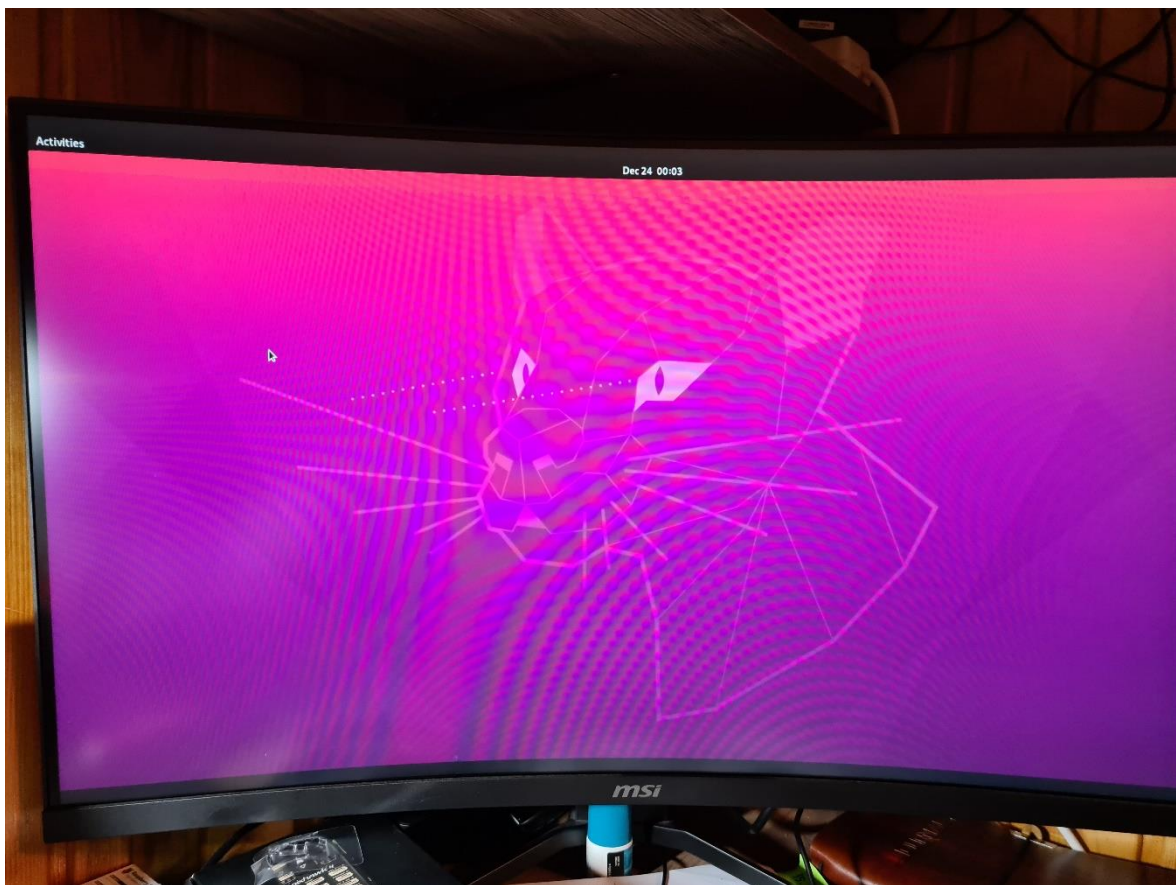
Testiti oli Holybro PM07-V2.3 toitemooduli töökorra kontroll. Lennuk sõltub LiPo aku voolust ja seda jaotab toitemoodul. Toitemoodulit kontrolliti Pixhawk 4 ja GPS moodulil. Esimesel katse ei õnnestunud, kuna aku laetustase ei olnud piisav kontrolleri ja GPS mooduli tööle rakendamiseks. Teisel katsel laeti aku täis ja korrati esimest katset. Teisel katsel töötasid kõik seadmed (Joonis 18). Aku mahtuvust ja tühjakslaadimist ei katsetatud.



Joonis 18. Holybro PM07-V2.3 toitemooduli testimine.



Raspberry Pi 3B laeti alla Ubuntu versioon 20.04.03 32bit operatsioonisüsteem(Joonis 19). Esimene katsel ei muudetud *network-config* failis Wi-Fi sätteid. Ubuntu laadis teatud etappini ja andis veateate, et puudub interneti ühendus. Teisel katsel muudeti Wi-Fi sätteid ja operatsioonisüsteem jätkas veateate kohapealt edasi laadimist. Järgmine tõrge tekkis kasutajanime ja parooli sisestamise osas. Vaikimisi on kasutajanimi ja parool „Ubuntu“. Veateateks väljastas, et „Ubuntu“ on vale parool. Kolmandal katsel loodi uus *flash* fail, muudeti ära Wi-Fi sätet ja paigaldati SD-kaart Raspberry Pi arvutisse. Sellel katsel vaikimisi kasutajatunnus ja parool töötasid. Peale seda sisestati käsklus graafilise töölauda alla laadimiseks. Laadimine võttis aega 20 minutit. Testimise lõppfaasis on saadud järeldusele, et versioon 20.04.03 graafiline osa on liiga võimas Raspberry Pi 3B mudeli jaoks. Graafiline osa kiilub kinni.



Joonis 19. Ubuntu v20.04.03 töölaud.

## 4 VÕIMALIKUD EDASIARENDUSED

Lõputöö raames projekteeriti vaatlus-UAV mehitamata sõiduks. Loodud UAV on autonoomne ning kasutab 4G võrku info edastamiseks ja vastuvõtmiseks. Lennukil on kaamera, mis on otseühenduses maapealse juhtimisjaama operaatori ees oleva ekraaniga. Põhilised funktsioonid on loodud UAV-l olemas, kuid kasutajakogemuse parandamiseks võiks funktsioone täiendada või neid lisada.

Primaarsed lisad, mida võiks tulevikus edasi arendada, on järgnevad:

- Raadioside lisamine: Alternatiivside, kui 4G ühendus peaks mingil põhjusel katkema.
- Lisakaamera: Disainitud lennukil on üks kaamera, mis vaatleb lennuki lennusuunda. Lisada võiks veel ühe kaamera, millega saaks ümbrust jälgida 360 kraadi ulatuses.
- Masinnägemine: Õpetada lennukit ära tundma objekte ja jälitama objekti.
- Voolujoonelisus: Muuta UAV kere aerodünaamilisemaks. See aitaks säästa akut, kuna lennukil oleks väiksem õhutakistus.

## KOKKUVÕTE

Käesoleva lõputöö eesmärk oli projekteerida UAV mehitamata vaatluslennuk, mis kasutab lendamiseks 4G võrku ja omab FPV kaamera võimekust. Loodud UAV on mõeldud eriülesannete täitmiseks. Tehnoloogia, mida lennukile paigaldatakse võimaldab sooritada missioone autonoomselt.

Töö käigus analüüsiti olemasolevaid UAV tüüpe ja tehnoloogiaid. Analüüside põhjal valiti UAV tüübiks fikseeritud tiibadega lennuk ja tehnoloogia, mida lennuk hakkab kasutama.

Töö on jaotatud kaheks osaks. Projekti esimeses pooles loodi Solidworks keskkonnas täpne lennuki mudel vastavalt seatud nõuetele. Lennuki mudel näitab lennuki osasid ja riistvara paigutust lennukis. Loodi 68 mudelit, millest 40 on autori enda looming ja disain ning 28 mudelit on modelleeritud joonise või füüsilise eseme järgi. Kogu projekt koosneb 92 modelleeritud mudelist.

Projekti teises pooles kirjeldatakse valitud riistvara ja tehnoloogiaid. Kirjeldatakse projekti ehitamist planeeritud etappide järjekorras. Testitakse lennuki riistvara töökorras olekut ja kirjeldatakse esile tekkinud probleeme.

Projekteeritud mehitamata UAV omadused võimaldavad lennata kaugemale kui telemeetria sagedusel töötav lennuk. Lennuki maapeale juhtimisjaama operaator omab reaajas otsepilti UAV pardalt.

Lennuk ei ole füüsiliselt valmis, aga on arenduse ja projekteerimise faasis. Dokumentis on toodud edasiarenduse võimalused ja nende vajalikkuse põhjendused. Lennuki mõningaid riistvarasid ja tehnoloogiaid on testitud.

## **SUMMARY**

The purpose of this diploma thesis was to design an unmanned aerial vehicle (UAV) for observational and surveillance purposes that uses a 4G network and has FPV camera capability. The created UAV is designed to perform special tasks. The technology installed on the aircraft allows missions to be performed autonomously.

Existing UAV types and technologies were analysed in the course of the work. Based on the analyses, the fixed wing aircraft was chosen as the UAV type and the technology to be used by the aircraft were selected.

The work is divided into two parts. In the first half of the project, an exact aircraft model was created in the Solidworks environment according to the set requirements. The aircraft model shows the parts of the craft and the arrangement of the onboard hardware. 68 models were created, of which 40 are the author's own creation and design, and 28 models are modelled according to a drawing or a physical object. The whole project consists of 92 modelled models.

The second half of the project describes the selected hardware and technologies. The construction of the project is described in the order of the planned stages. The condition of the aircraft hardware is tested and any problems encountered are described.

The design features of the UAV allow it to fly further than any aircraft that relies on telemetry frequencies. The operator of the ground control station of the aircraft has a live image from an onboard camera of the UAV.

The aircraft is not physically ready, but is in the development and design phase. The document presents the possibilities for further development and the reasons for their necessity. Some of the aircraft's hardware and technologies have been tested.

## KASUTATUD MATERJALIDE LOETELU

- [1] <https://www.auav.com.au/articles/drone-types/>, „DRONE TYPES: MULTI-ROTOR VS FIXED-WING VS SINGLE ROTOR VS,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.auav.com.au/articles/drone-types/>. [Kasutatud 12 11 2021].
- [2] R. Nelion, „The Different Types of Drones you Should Know about,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://buybestquadcopter.com/drone-types/>. [Kasutatud 20 11 2021].
- [3] <https://www.adorama.com/alc/different-drone-types-and-their-differences/>, „The 4 Different Drone Types and Their Differences,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.adorama.com/alc/different-drone-types-and-their-differences/>. [Kasutatud 20 11 2021].
- [4] H. Jin, „Different Types Of Drones 2021: Top Full Guide,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://lucidcam.com/different-types-of-drones/>. [Kasutatud 13 12 2021].
- [5] [https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/pdf/2018/18/mateconf\\_ijcaet-isampe2018\\_02045.pdf](https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/pdf/2018/18/mateconf_ijcaet-isampe2018_02045.pdf), „Design of a Low-Cost Fixed Wing UAV,“ [Võrgumaterjal]. Available: [https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/pdf/2018/18/mateconf\\_ijcaet-isampe2018\\_02045.pdf](https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/pdf/2018/18/mateconf_ijcaet-isampe2018_02045.pdf). [Kasutatud 13 12 2021].
- [6] [https://defense-update.com/20071003\\_coyote\\_uav.html](https://defense-update.com/20071003_coyote_uav.html), „Coyote – Air Deliverable Expendable UA,“ [Võrgumaterjal]. Available: [https://defense-update.com/20071003\\_coyote\\_uav.html](https://defense-update.com/20071003_coyote_uav.html). [Kasutatud 17 11 2021].
- [7] J. Judson, „Outrider: Lockheed debuts multi-domain tube-launched drone,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.defensenews.com/digital-show-dailies/dsei/2017/09/12/outrider-lockheed-debuts-multi-domain-tube-launched-drone/>. [Kasutatud 17 11 2021].
- [8] <https://www.wbgroup.pl/en/produkt/warmate-tl-loitering-munitions-system/>, „WARMATE Tube Launch,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.wbgroup.pl/en/produkt/warmate-tl-loitering-munitions-system/>. [Kasutatud 17 11 2021].
- [9] D. Hambling, „Israel Is Already Selling Kamikaze Micro-Drones That Will Change Modern,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.popularmechanics.com/flight/drones/a18032/hero-30-uvision-israeli-drone/>. [Kasutatud 17 11 2021].
- [10] S. Kikrak, „New kamikaze UAV from HAVELSAN: FEDAI,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.defenceturk.net/havelsandan-yeni-kamikaze-ih-fedai>. [Kasutatud 17 11 2021].
- [11] <https://www.uasvision.com/2017/06/22/kalashnikov-starts-serial-production-of-silent-drone/>, „Kalashnikov Starts Serial Production of Silent Drone,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.uasvision.com/2017/06/22/kalashnikov-starts-serial-production-of-silent-drone/>. [Kasutatud 17 11 2021].

- [12 <https://oscarliang.com/quadcopter-motor-propeller/>, „How to Choose FPV Drone Motors,“  
] [Võrgumaterjal]. Available: <https://oscarliang.com/quadcopter-motor-propeller/>. [Kasutatud 29 11 2021].
- [13 <https://www.aieuk.com/blog/unmanned-aerial-vehicles-propulsion-systems/>, „UAV  
] (Unmanned Aerial Vehicles) Propulsion Systems,“ [Võrgumaterjal]. Available:  
<https://www.aieuk.com/blog/unmanned-aerial-vehicles-propulsion-systems/>. [Kasutatud 29  
11 2021].
- [14 T. Rogoway, „China's High-Speed Drone Is Rocket-Powered And All About Doing What  
] Satellites Can't,“ [Võrgumaterjal]. Available: [https://www.the-drive.com/the-war-  
zone/30121/chinas-high-speed-recon-drone-is-rocket-powered-and-all-about-doing-what-  
satellites-cant](https://www.the-drive.com/the-war-zone/30121/chinas-high-speed-recon-drone-is-rocket-powered-and-all-about-doing-what-satellites-cant). [Kasutatud 29 11 2021].
- [15 A. Arriansyah, „The 6 known ways to power a drone,“ [Võrgumaterjal]. Available:  
] <https://www.techinasia.com/talk/6-known-ways-power-a-drone>. [Kasutatud 29 11 2021].
- [16 J. Sabhadiya, „What Is Servo Motor?,“ [Võrgumaterjal]. Available:  
] <https://www.engineeringchoice.com/servo-motor/>. [Kasutatud 29 11 2021].
- [17 F. Corrigan, „How Do Drones Work And What Is Drone Technology,“ [Võrgumaterjal].  
] Available: [https://www.dronezon.com/learn-about-drones-quadcopters/what-is-drone-  
technology-or-how-does-drone-technology-work/](https://www.dronezon.com/learn-about-drones-quadcopters/what-is-drone-technology-or-how-does-drone-technology-work/). [Kasutatud 29 11 2021].
- [18 Z. Dukowitz, „What Are GPS-Denied Drones and Why Are They Important?,“  
] [Võrgumaterjal]. Available: <https://uavcoach.com/gps-denied-drones/>. [Kasutatud 29 11  
2021].
- [19 T. Gudde, „Flight Controllers explained for everyone.,“ [Võrgumaterjal]. Available:  
] <https://fusion.engineering/flight-controllers-explained-for-everyone/>. [Kasutatud 29 11  
2021].
- [20 <https://www.mydronelab.com/accessories/quadcopter-flight-controller.html>,  
] „QUADCOPTER FLIGHT CONTROLLERS: THE PROCESS BEHIND EVERY QUADCOPTER,“  
[Võrgumaterjal]. Available: [https://www.mydronelab.com/accessories/quadcopter-flight-  
controller.html](https://www.mydronelab.com/accessories/quadcopter-flight-controller.html). [Kasutatud 29 11 2021].
- [21 [https://www.unmannedsystemstechnology.com/category/supplier-directory/electronic-  
\] systems/autopilot-systems/](https://www.unmannedsystemstechnology.com/category/supplier-directory/electronic-systems/autopilot-systems/), „UAV Autopilot Systems Overview,“ [Võrgumaterjal]. Available:  
[https://www.unmannedsystemstechnology.com/category/supplier-directory/electronic-  
systems/autopilot-systems/](https://www.unmannedsystemstechnology.com/category/supplier-directory/electronic-systems/autopilot-systems/). [Kasutatud 29 11 2021].
- [22 A. d. Team, „Autopilot Hardware Options,“ [Võrgumaterjal]. Available:  
] <https://ardupilot.org/plane/docs/common-autopilots.html>. [Kasutatud 29 11 2021].
- [23 [https://www.unmannedsystemstechnology.com/category/supplier-directory/electronic-  
\] systems/antennas-microwave-products/](https://www.unmannedsystemstechnology.com/category/supplier-directory/electronic-systems/antennas-microwave-products/), „Drone & UAV Antenna,“ [Võrgumaterjal].  
Available: [https://www.unmannedsystemstechnology.com/category/supplier-  
directory/electronic-systems/antennas-microwave-products/](https://www.unmannedsystemstechnology.com/category/supplier-directory/electronic-systems/antennas-microwave-products/). [Kasutatud 29 11 2021].

- [24 <https://docs.px4.io/master/en/sensor/airspeed.html>, „Airspeed Sensors,“ [Vörgumaterjal].  
] Available: <https://docs.px4.io/master/en/sensor/airspeed.html>. [Kasutatud 13 12 2021].
- [25 <http://www.holybro.com/product/digital-air-speed-sensor/>, „Digital Air Speed Sensor,“  
] [Vörgumaterjal]. Available: <http://www.holybro.com/product/digital-air-speed-sensor/>.  
[Kasutatud 08 12 2021].
- [26 A. d. Team, „Using an Airspeed Sensor,“ [Vörgumaterjal]. Available:  
] <https://ardupilot.org/plane/docs/airspeed.html#airspeed-sensor-type>(09.12.2021.  
[Kasutatud 09 12 2021].
- [27 E. Team, „What Frequency Do Drones Use?,“ [Vörgumaterjal]. Available:  
] <https://aerocorner.com/blog/what-frequency-drones-use/>. [Kasutatud 09 12 2021].
- [28 <https://www.broadbandcompared.co.uk/guides/what-is-4g-everything-about-4g-explained>,  
] „What is 4G? Everything about 4G Explained,“ [Vörgumaterjal]. Available:  
<https://www.broadbandcompared.co.uk/guides/what-is-4g-everything-about-4g-explained>.  
[Kasutatud 23 12 2021].
- [29 J. Hildenbrand, „Raspberry Pi 3 review: Still relevant,“ [Vörgumaterjal]. Available:  
] <https://www.androidcentral.com/raspberry-pi-3-review-still-relevant>. [Kasutatud 07 12  
2021].
- [30 [https://docs.px4.io/master/en/getting\\_started/px4\\_basic\\_concepts.html](https://docs.px4.io/master/en/getting_started/px4_basic_concepts.html), „Basic Concepts,“  
] [Vörgumaterjal]. Available:  
[https://docs.px4.io/master/en/getting\\_started/px4\\_basic\\_concepts.html](https://docs.px4.io/master/en/getting_started/px4_basic_concepts.html). [Kasutatud 07 12  
2021].
- [31 P. D. Team, „GPS & Compass,“ [Vörgumaterjal]. Available:  
] [https://docs.px4.io/v1.9.0/en/gps\\_compass/](https://docs.px4.io/v1.9.0/en/gps_compass/). [Kasutatud 07 12 2021].
- [32 [https://docs.px4.io/master/en/power\\_module/holybro\\_pm07\\_pixhawk4\\_power\\_module.ht](https://docs.px4.io/master/en/power_module/holybro_pm07_pixhawk4_power_module.html)  
] ml, „Holybro Pixhawk 4 Power Module (PM07),“ [Vörgumaterjal]. Available:  
[https://docs.px4.io/master/en/power\\_module/holybro\\_pm07\\_pixhawk4\\_power\\_module.ht](https://docs.px4.io/master/en/power_module/holybro_pm07_pixhawk4_power_module.html)  
ml. [Kasutatud 07 12 2021].
- [33 <https://www.4gtemall.com/blog/huawei-e5576-mobile-wifi-3s-test/>, „Huawei E5576  
] Mobile WiFi 3s Test,“ [Vörgumaterjal]. Available: <https://www.4gtemall.com/blog/huawei-e5576-mobile-wifi-3s-test/>. [Kasutatud 07 12 2021].
- [34 J. Reid, „Understanding Kv Ratings,“ [Vörgumaterjal]. Available:  
] [https://www.rotordronepro.com/understanding-kv-ratings/#visitor\\_pref\\_pop](https://www.rotordronepro.com/understanding-kv-ratings/#visitor_pref_pop). [Kasutatud  
14 12 2021].
- [35 [https://gogo-rc.com/store/index.php?route=product/product&product\\_id=4830](https://gogo-rc.com/store/index.php?route=product/product&product_id=4830), „EMAX  
] GT4020 Series 620KV Outrunner Brushless Motors For RC Airplane Drone,“ [Vörgumaterjal].  
Available: [https://gogo-rc.com/store/index.php?route=product/product&product\\_id=4830](https://gogo-rc.com/store/index.php?route=product/product&product_id=4830).  
[Kasutatud 15 12 2021].

- [36 R. i. G. R. Control, „The Difference between Analog and Digital RC Servos,“ [Võrgumaterjal].  
] Available: <https://www.radiocontrolinfo.com/the-difference-between-analog-and-digital-rc-servos/>. [Kasutatud 07 12 2021].
- [37 L. Pounder, „Raspberry Pi High Quality Camera Review: Interchangeable Lenses, Powerful  
] Sensor,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.tomshardware.com/reviews/raspberry-pi-high-quality-camera>. [Kasutatud 08 12 2021].
- [38 B. Scheinder, „A Guide to Understanding LiPo Batteries,“ [Võrgumaterjal]. Available:  
] <https://rogershobbycenter.com/lipoguide>. [Kasutatud 17 12 2021].
- [39 P. Pedamkar, „Differences Between Linux vs Ubuntu,“ [Võrgumaterjal]. Available:  
] <https://www.educba.com/linux-vs-ubuntu>. [Kasutatud 10 12 2021].
- [40 <https://px4.io/>, „px4,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://px4.io/>. [Kasutatud 22 12 2021].  
]
- [41 A. D. Team, „Mission planner Home,“ [Võrgumaterjal]. Available:  
] <https://guide.robosense.com/chapter1/configure-with-mission-planner.html>. [Kasutatud 10  
12 2021].
- [42 [https://gstreamer.freedesktop.org/documentation/application-  
\] development/introduction/gstreamer.html?gi-language=c](https://gstreamer.freedesktop.org/documentation/application-development/introduction/gstreamer.html?gi-language=c), „What is GStreamer?,“  
[Võrgumaterjal]. Available: [https://gstreamer.freedesktop.org/documentation/application-  
development/introduction/gstreamer.html?gi-language=c](https://gstreamer.freedesktop.org/documentation/application-development/introduction/gstreamer.html?gi-language=c). [Kasutatud 16 12 2021].
- [43 N. Drake, „How to install Ubuntu on the Raspberry Pi,“ [Võrgumaterjal]. Available:  
] <https://www.techradar.com/how-to/how-to-install-ubuntu-on-the-raspberry-pi>. [Kasutatud  
13 12 2021].
- [44 <https://guide.robosense.com/chapter1/configure-with-mission-planner.html>, „Configure with  
] Mission Planner,“ [Võrgumaterjal]. Available:  
<https://guide.robosense.com/chapter1/configure-with-mission-planner.html>. [Kasutatud 13  
12 2021].
- [45 [https://docs.px4.io/master/en/gps\\_compass/](https://docs.px4.io/master/en/gps_compass/), „GPS & Compass,“ [Võrgumaterjal]. Available:  
] [https://docs.px4.io/master/en/gps\\_compass/](https://docs.px4.io/master/en/gps_compass/). [Kasutatud 13 12 2021].
- [46 A. D. Team, „Calibrating an Airspeed Sensor,“ [Võrgumaterjal]. Available:  
] <https://ardupilot.org/plane/docs/calibrating-an-airspeed-sensor.html>. [Kasutatud 13 12  
2021].
- [47 <http://www.holybro.com/manual/PM07-Quick-Start-Guide.pdf>, „PM07 Power Management  
] Board,“ [Võrgumaterjal]. Available: [http://www.holybro.com/manual/PM07-Quick-Start-  
Guide.pdf](http://www.holybro.com/manual/PM07-Quick-Start-Guide.pdf). [Kasutatud 13 12 2021].
- [48 [https://docs.px4.io/master/en/power\\_module/holybro\\_pm07\\_pixhawk4\\_power\\_module.ht  
\] ml](https://docs.px4.io/master/en/power_module/holybro_pm07_pixhawk4_power_module.html), „Holybro Pixhawk 4 Power Module (PM07),“ [Võrgumaterjal]. Available:  
[https://docs.px4.io/master/en/power\\_module/holybro\\_pm07\\_pixhawk4\\_power\\_module.ht  
ml](https://docs.px4.io/master/en/power_module/holybro_pm07_pixhawk4_power_module.html). [Kasutatud 13 12 2021].



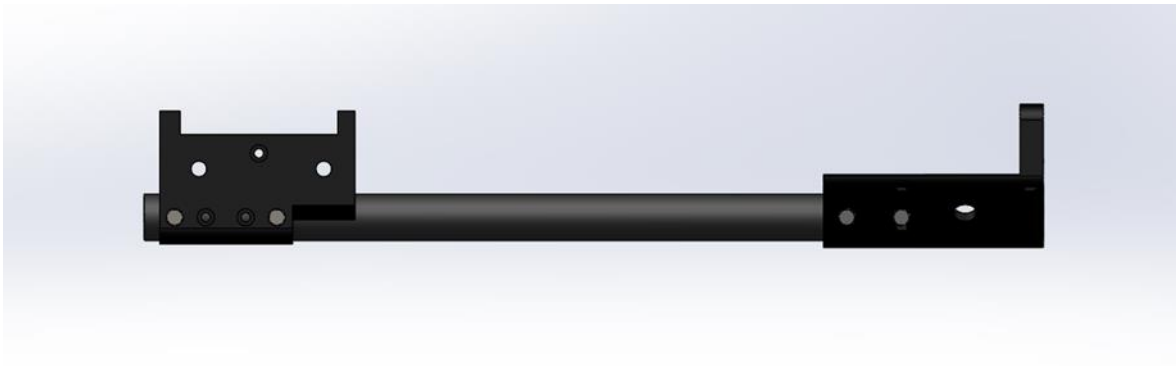
- [49] Soren, „Connecting to your Raspberry Pi,“ [Võrgumaterjal]. Available:  
] <https://raspberrypiHQ.com/how-to-connect-your-raspberry-pi-to-wifi/>. [Kasutatud 14 12 2021].
- [50] <https://www.youtube.com/watch?v=VDWORgW31Sw>, „The New Raspberry Pi HQ Camera is  
] Awesome! - Set Up And Testing,“ [Võrgumaterjal]. Available:  
<https://www.youtube.com/watch?v=VDWORgW31Sw>. [Kasutatud 14 12 2021].
- [51] <https://desertbot.io/blog/how-to-stream-the-picamera>, „How to Stream the PiCamera to  
] your Browser,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://desertbot.io/blog/how-to-stream-the-picamera>. [Kasutatud 14 12 2021].
- [52] L. F. Gonzalez, „Figure 3,“ [Võrgumaterjal]. Available:  
] [https://www.researchgate.net/figure/Connecting-Pixhawk-to-Raspberry-Pi-2\\_fig2\\_305674281](https://www.researchgate.net/figure/Connecting-Pixhawk-to-Raspberry-Pi-2_fig2_305674281). [Kasutatud 14 12 2021].
- [53] <http://www.holdentechnology.com/2020/12/31/ardupilot-with-mobile-data-telemetry/>,  
] „ARDUPILOT WITH MOBILE DATA TELEMETRY,“ [Võrgumaterjal]. Available:  
<http://www.holdentechnology.com/2020/12/31/ardupilot-with-mobile-data-telemetry/>.  
[Kasutatud 14 12 2021].
- [54] A. D. Team, „Joystick/Gamepad,“ [Võrgumaterjal]. Available:  
] <https://ardupilot.org/copter/docs/common-joystick.html>. [Kasutatud 14 12 2021].
- [55] S. Herrick, „Botlink,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://botlink.com/blog/whats-the-difference-between-a-drone-uav-and-uas>. [Kasutatud 16 11 2021].

# LISA1

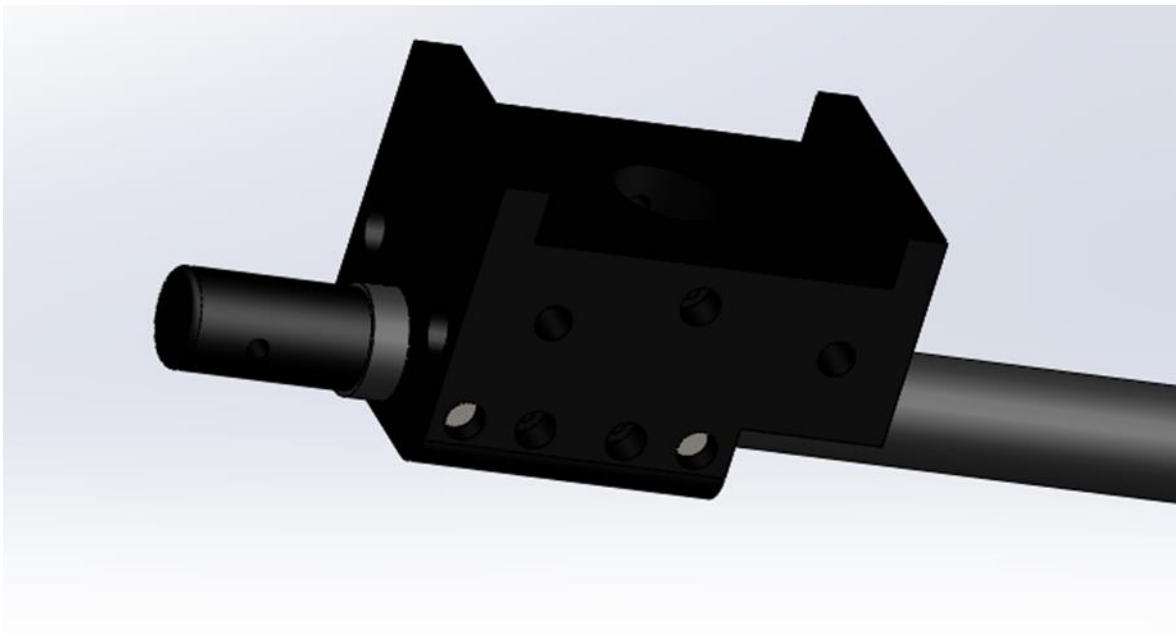
## Etapp 2



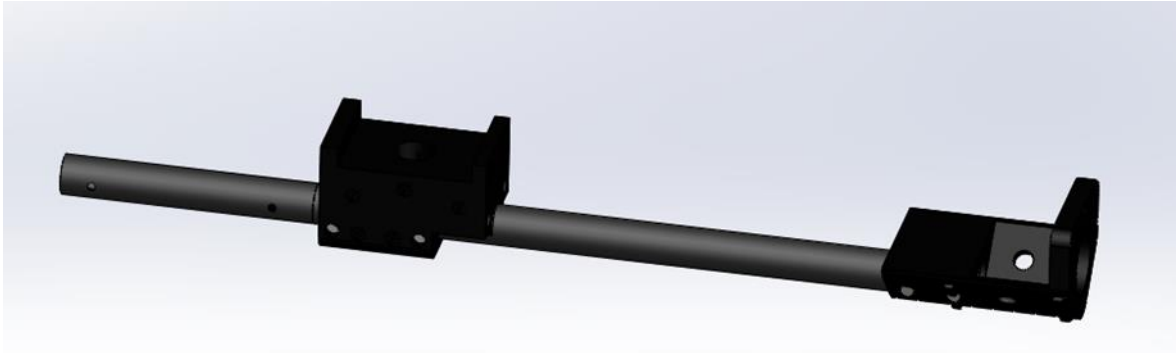
Joonis 20. Etapp 2.1.



Joonis 21. Etapp 2.2.

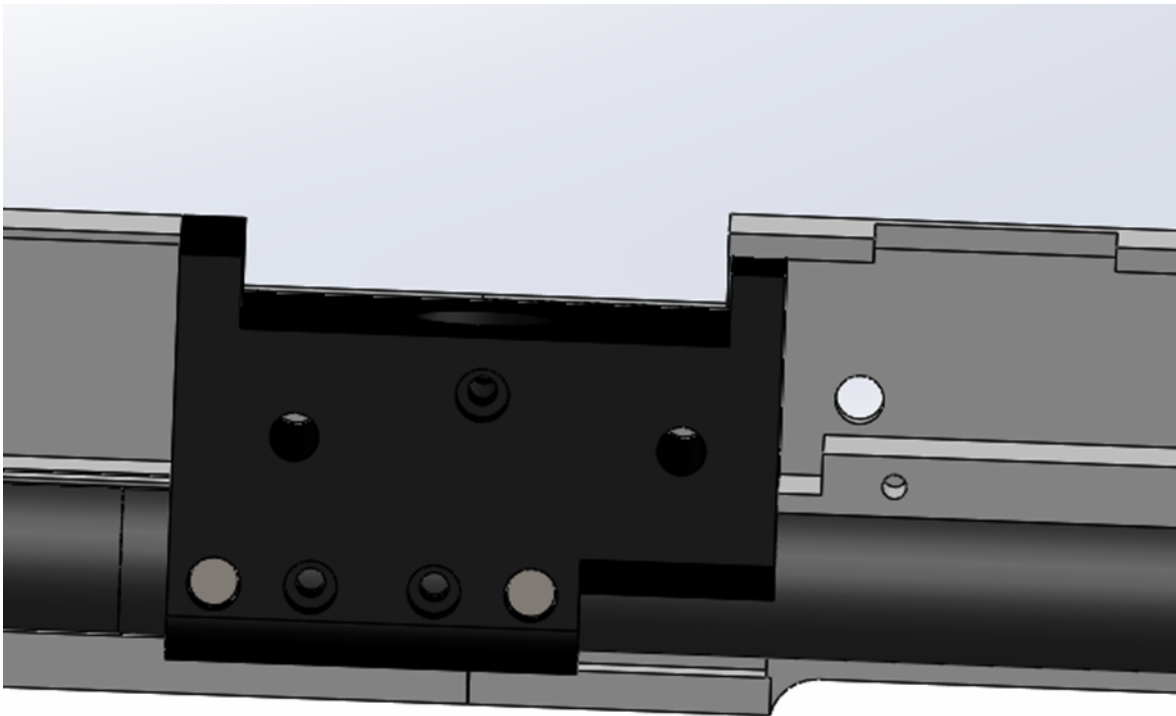


Joonis 22. Etapp 2.3.

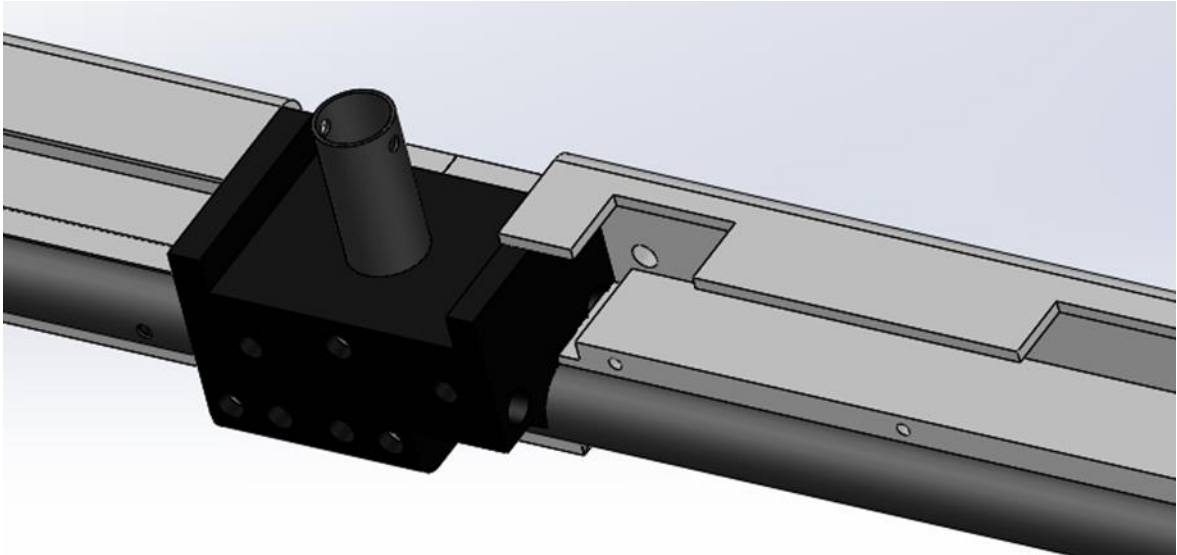


Joonis 23. Etapp 2.4.

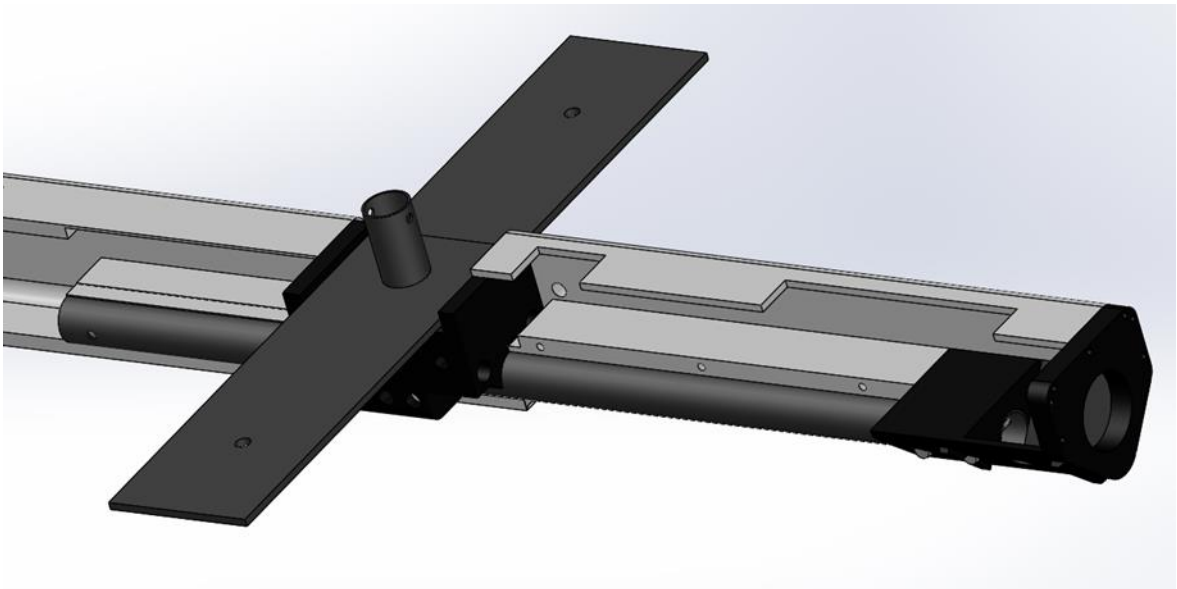
### Etapp 3



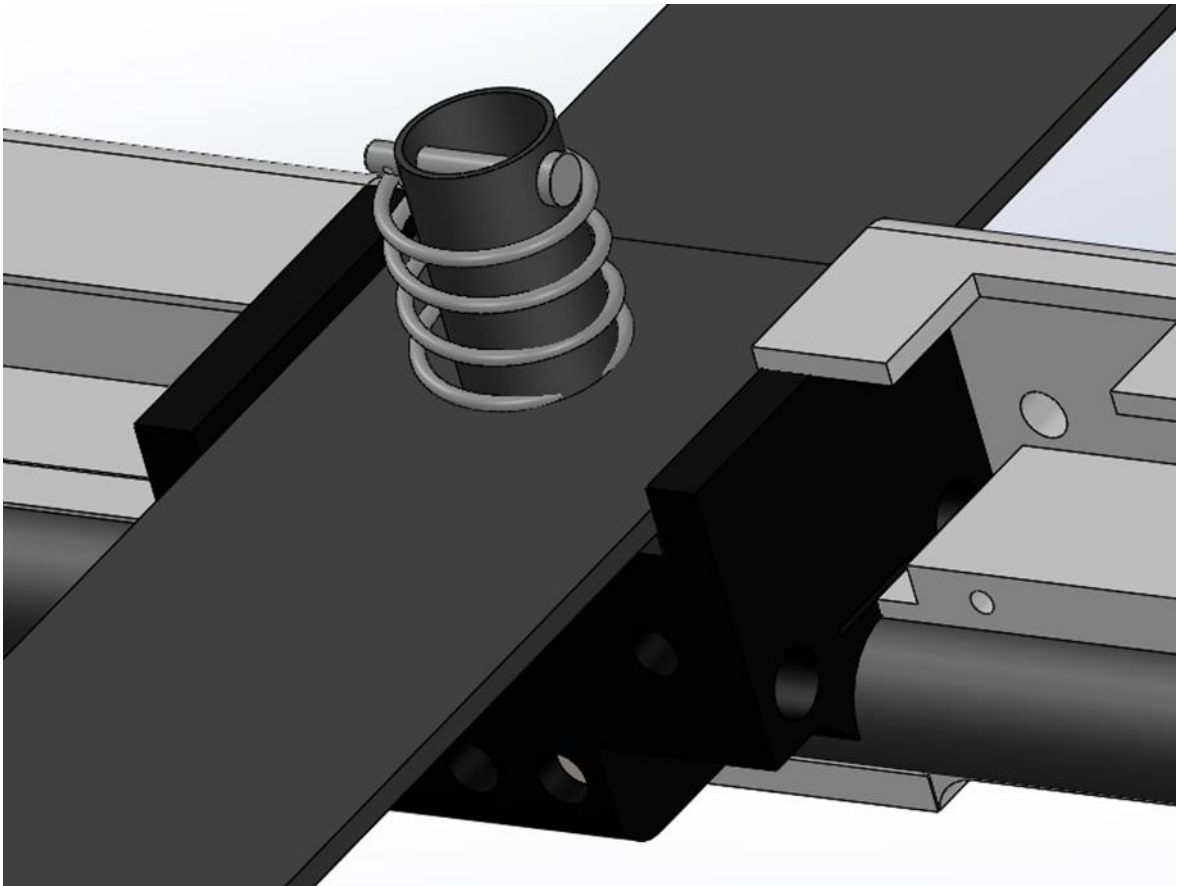
Joonis 24. Etapp 3.1.



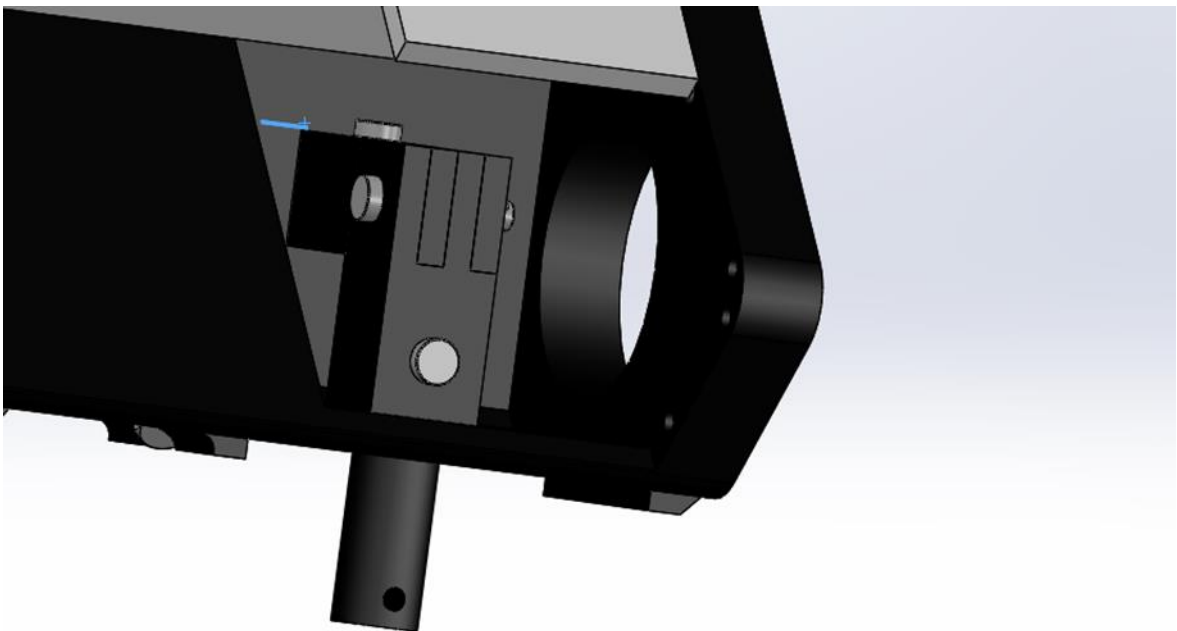
Joonis 25. Etapp 3.2.



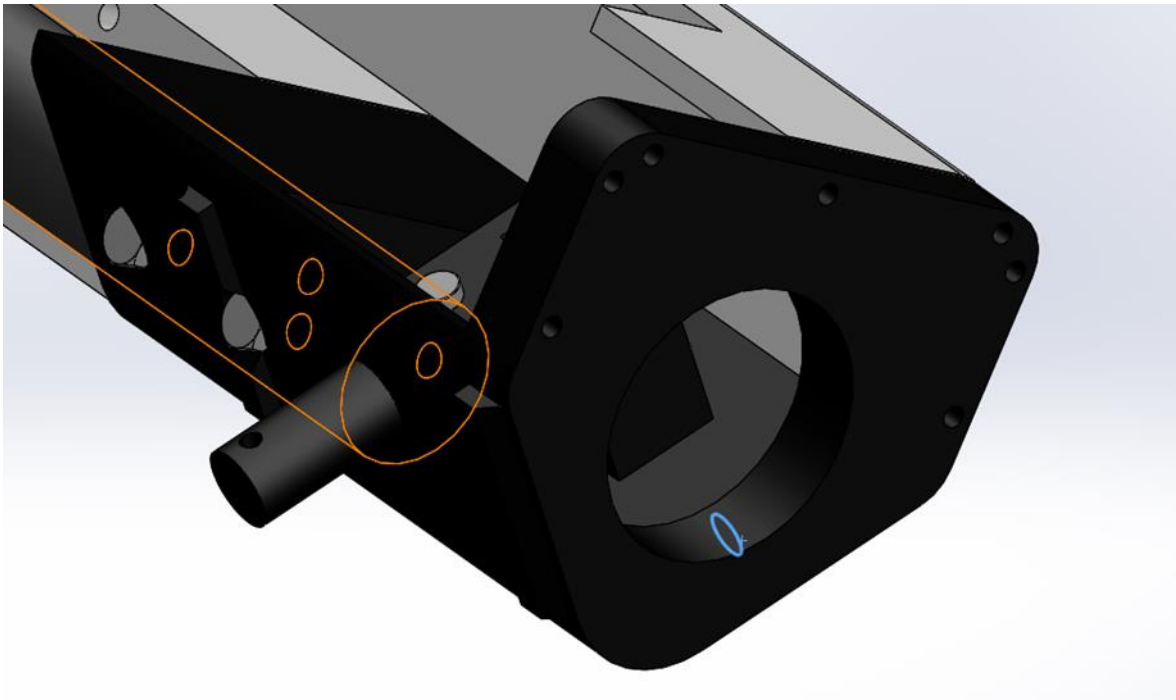
Joonis 26. Etapp 3.3.



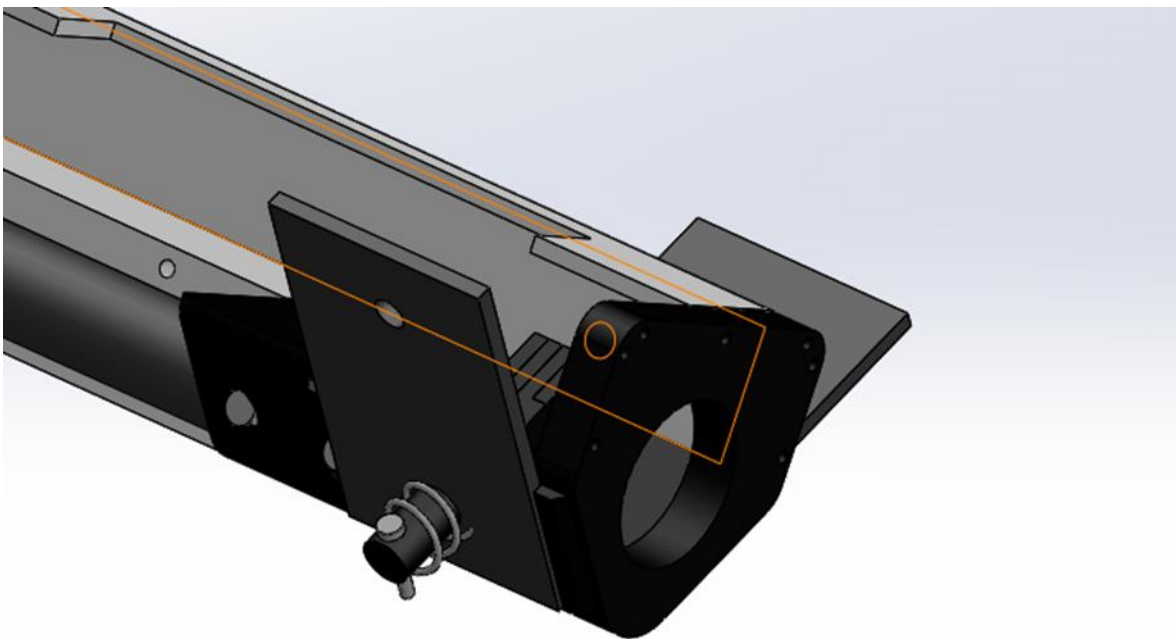
Joonis 27. Etapp 3.4.



Joonis 28. Etapp 3.5.

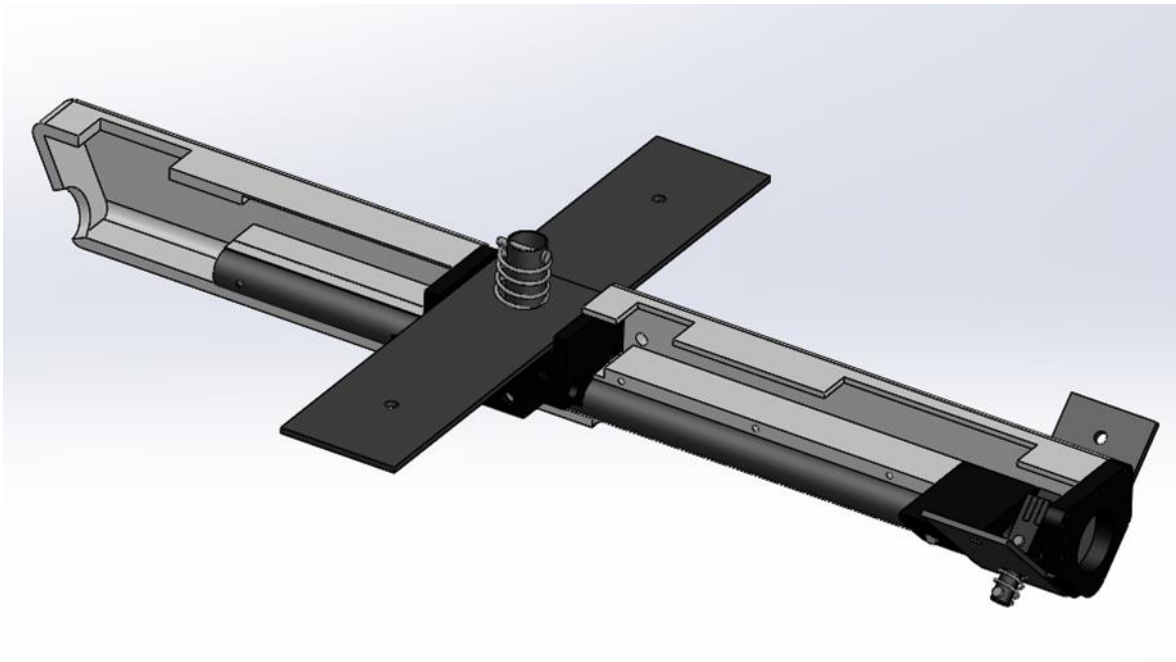


Joonis 29. Etapp 3.6.

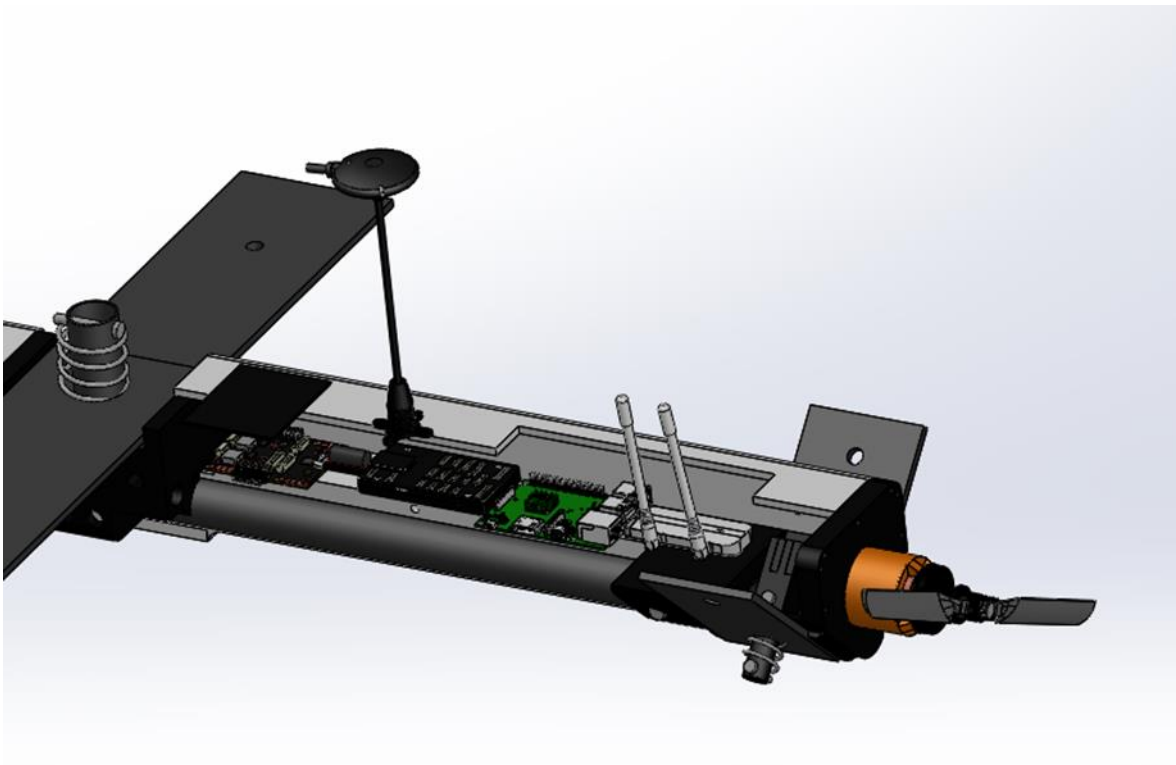


Joonis 30. Etapp 3.7.

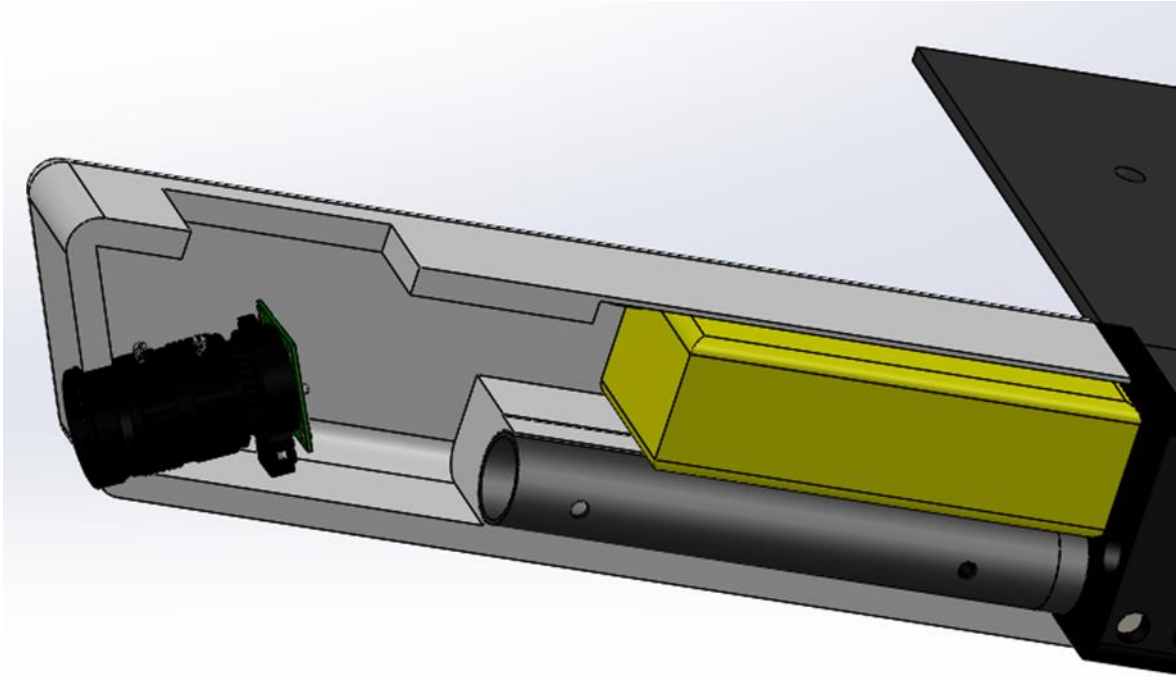
#### **Etapp 4**



Joonis 31. Etapp 4.1.

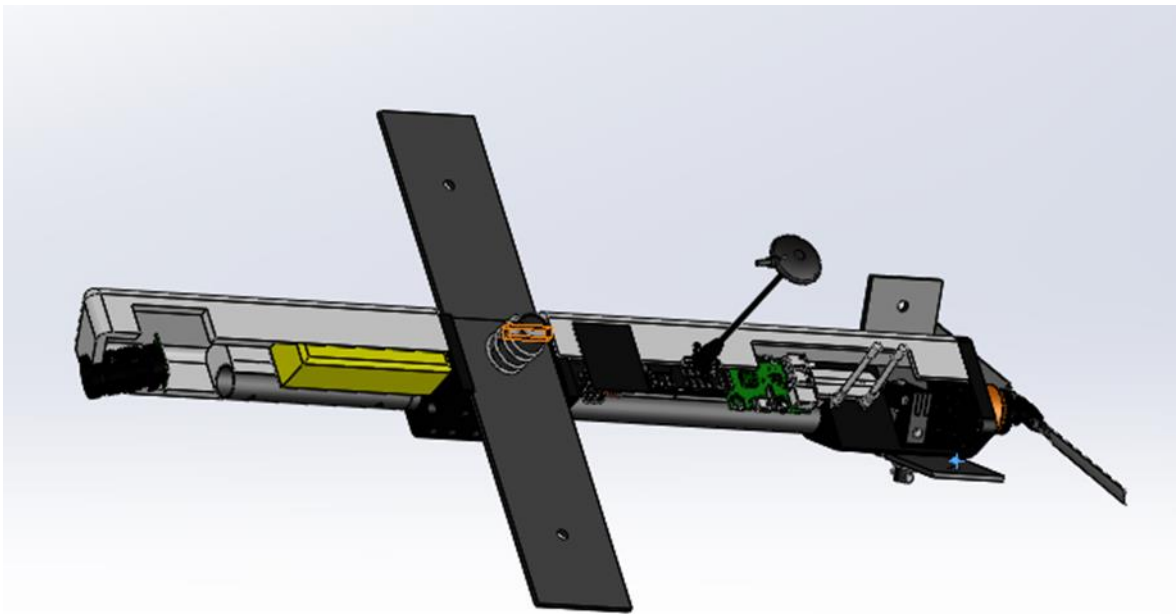


Joonis 32. Etapp 4.2.



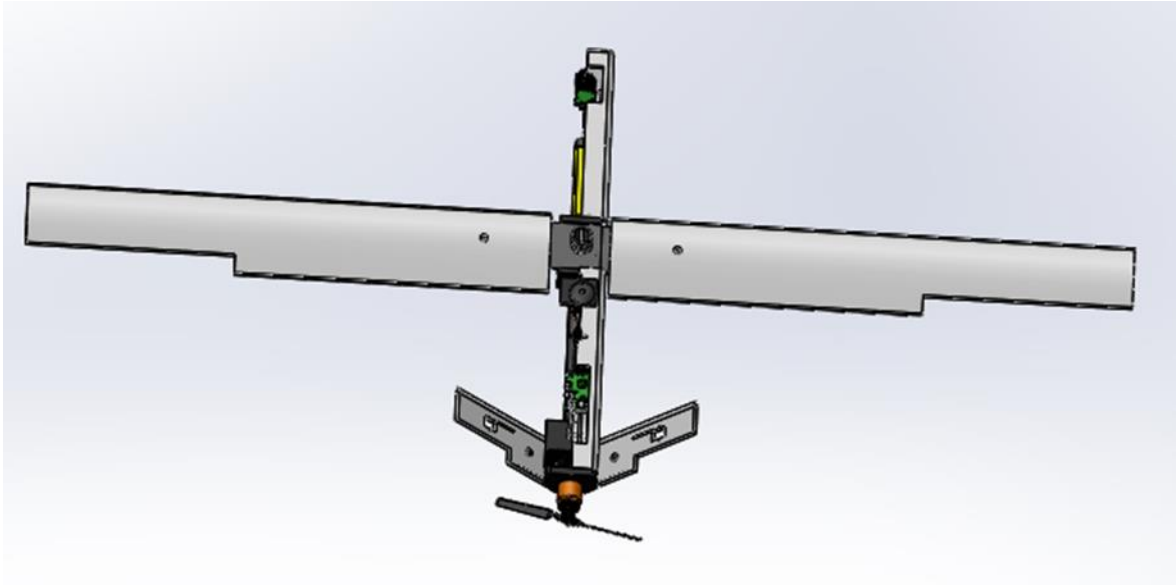
Joonis 33. Etapp 4.3.

## Etapp 5

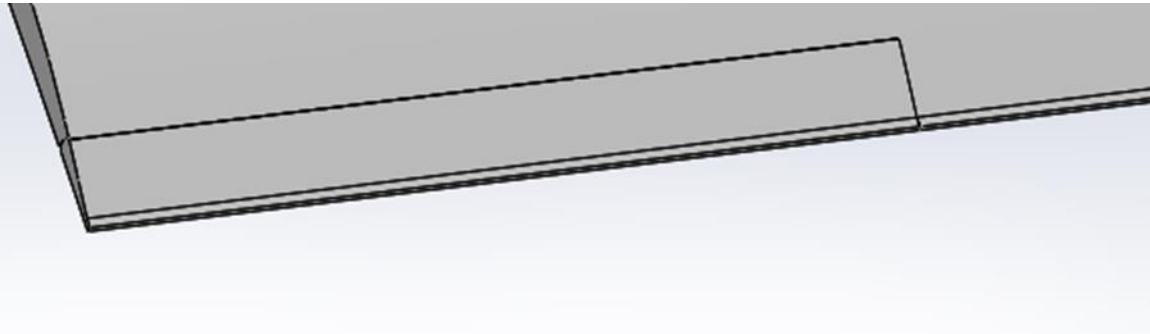


Joonis 34. Etapp 5.1.

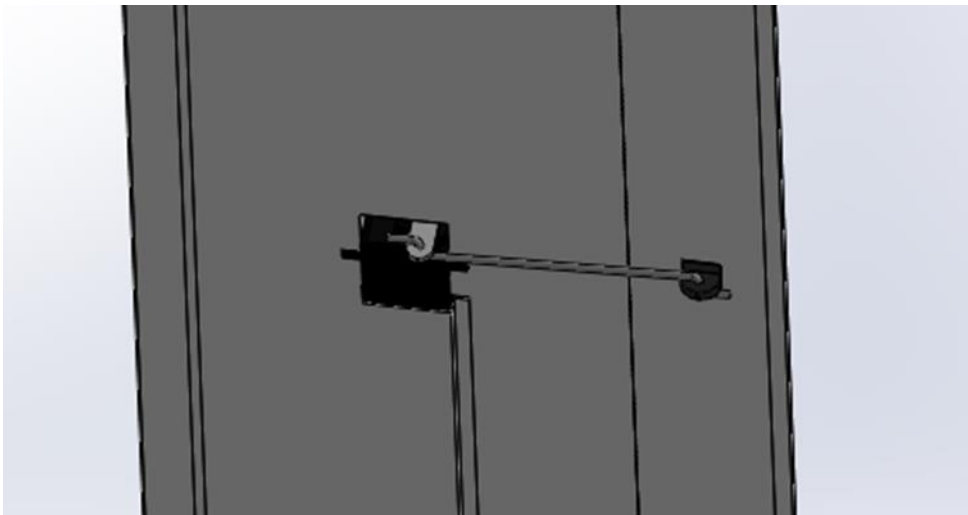




Joonis 35. Etapp 5.2.

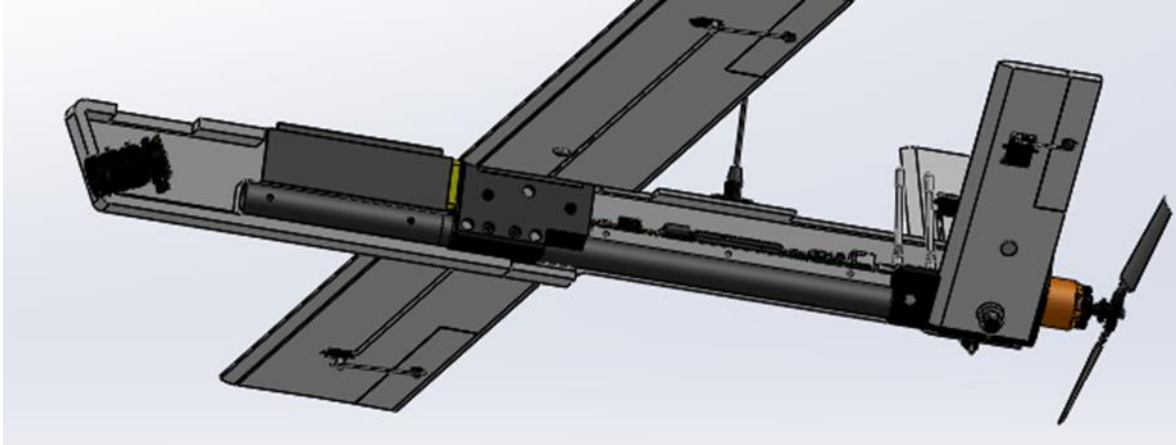


Joonis 36. Etapp 5.3.

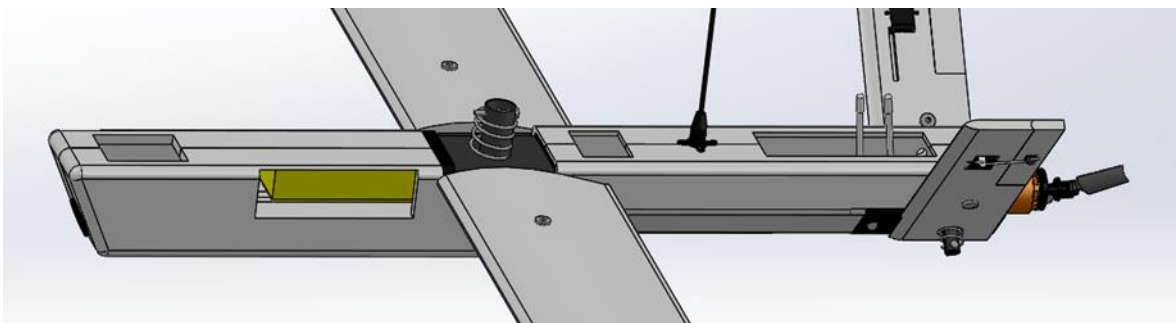


Joonis 37. Etapp 5.4.

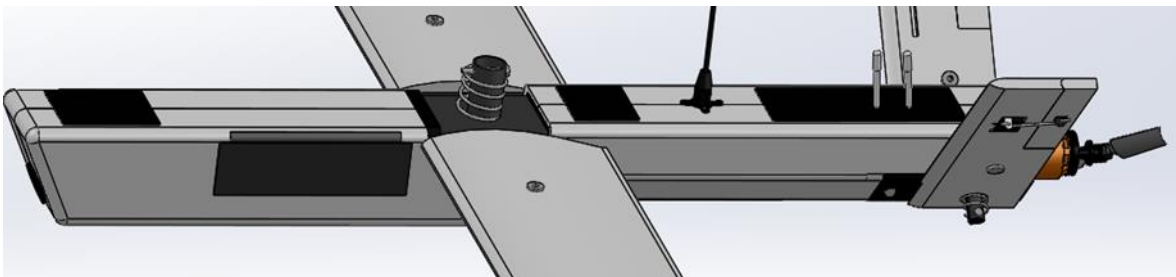
## Etapp 6



Joonis 38. Etapp 6.1.



Joonis 39. Etapp 6.2.



Joonis 40. Etapp 6.3.