



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

EE40LT

Mehitamata õhusõiduki käeshoitava maajaama riistvara arendus

BAKALAUREUSETÖÖ

MEHHATROONIKA ÕPPEKAVA

Üliõpilane: Kristjan Möller

Üliõpilaskood: 124019MAHB

Juhendaja: Oliver Mets

AUTORIDEKLARATSIOON

Deklareerin, et käesolev lõputöö on minu iseseisva töö tulemus.

Esitatud materjalide põhjal ei ole varem akadeemilist kraadi taotletud.

Töös kasutatud kõik teiste autorite materjalid on varustatud vastavate viidetega.

Töö valmis..... juhendamisel

“.....”2017 a.

Töö autor

/allkiri /

Töö vastab lõputööle esitatavatele nõuetele.

“.....”2017 a.

Juhendaja

/allkiri/

Lubatud kaitsmisele.

“.....”2017 a.

..... õppekava lõputööde kaitsmiskomisjoni esimees:

/allkiri/

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Kristjan Möller, üliõpilaskood 124019MAHB
Õppekava, peeriala: Mehhatroonika, bakalaureus
Juhendaja: Oliver Mets, doktorant

Lõputöö teema:

Mehitamata õhusõiduki käeshoitava maajaama arendus.

Development of a handheld ground station for an unmanned aerial vehicle.

Lõputöö põhieesmärgid ja lahendatavad ülesanded ning töö koostamise kava:

1. Lõputöö põhieesmärk on projekteerida etteantud mehitamata õhusõidukile käes hoitav seade, mis võimaldab jälgida õhusõidukilt tulevat telemeetriat ja pilti. Kasutatav õhusõiduk on 500mm tiivaulatusega vaidtiib-tüüpi lennuk. Projekteeritava süsteemi eesmärk on olla üksikvõitlejaga transporditav vaatlusplatvorm lähiluureks. Sellest tulenevalt on nõutav projekteeritavalt süsteemilt kompaktsus ja minimaalne kaal.
2. Maajaam peab võimaldama lennuki manuaalset juhtimist ja eelprogrammeeritud missiooni alustamise täitmist. Kasutajale pildi kuvamiseks peab kasutama vähemalt 7 tollist ekraani. Maajaam peab olema suuteline ühenduma arvutiga võimaldamaks missioonide planeerimist ja lennuparameetrite muutmist. Töö käigus arendatakse seadme mehaaniline ja elektriline lahendus.
3. Mehaaniline osa hõlmab endas korpuse, nuppude ja lülitite trükkplaatide projekteerimist. Korpuse ja nuppude puhul tuleb teha materjalivalik lähtudes prototüübi valmis ehitamise vajadusest.
4. Elektriline osa hõlmab toitesüsteemi dimensioneerimist, akutoite monitoorimise süsteemi, mikrokontrolleri adapterplaadi ja lülitite trükkplaatide skeemide projekteerimist ning juhtmist.
5. Suhtlusel õhusõidukiga kasutatakse Raspberry Pi arvutit. Akutoite monitoorimiseks ja kasutajapoolsete sisestuste arvutite edastamiseks kasutatakse Teensy mikrokontrollerit. Töö käigus programmeeritakse antud mikrokontroller. Mikrokontroller peab tagastama kasutajale aku täituvuse seisundi.

Töö keel: eesti keel

Üliõpilane: Kristjan Möller Allkirjastatud digitaalselt 13. märts 2017 a
/allkiri/

Juhendaja: Oliver Mets Allkirjastatud digitaalselt 13. märts 2017 a
/allkiri/

Sisukord

AUTORIDEKLARATSIOON	2
LÕPUTÖÖ ÜLESANNE	3
EESSÕNA	5
SISSEJUHATUS	6
1. Ülevaade turul pakutavatest seadmetest	7
1.1 Yuneec ST16	8
1.2 peRISKop GCS.....	10
2. Projekteeritava seadme Funtsionaalsus.....	12
3. ELEKTROONIKA	13
3.1 Ettevõttepoolsed komponendid.....	13
3.2 Teensy arendusplaat.....	14
3.3 Toide ja koormus	14
3.4 Skeemid	16
4. MEHAANIKA.....	19
4.1 Algne kontseptsioon	19
4.2 Riskianalüüs.....	21
4.3 Varased versioonid	23
4.3.1 Plastik korpus v1	23
4.3.2 Plastik korpus v1.2.....	25
4.3.3 Plastik korpus v1.3.....	26
4.4 Plastik korpus v1.6.....	28
4.4.1 Mehaaniliste omaduste katsetamine.....	30
5. KULUD	32
5.1 Elektroonika kulud.....	32
5.2 Mehaanika kulud	33
5.3 Kokku	35
6. EDASISED ARENDUSED	36
6.1 Mehaanika	36
6.2 Elektroonika.....	36
Kokkuvõte	38
Summary	39
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU	40
LISAD	41
Lisa 1 E-kiri Periskop-ilt	41
Lisa 2 Teensy kood.....	43
Lisa 3 Teensy 3.2 arendusplaat	44
Lisa 4 Esipaneeli joonis	45
Lisa 5 Tagapaneeli joonis	46
Lisa 6 Korpuse joonis	47
Lisa 7 Teensy laiendusplaat.....	48

EESSÕNA

Käesolev lõputöö kirjutati ettevõttes OÜ ARL TechSystems ligi pooleaastase arendustöö põhjal. Varasemalt puudus ettevõttes kogemus käeshoitavate elektrooniliste seadmete projekteerimisega kuivõrd varasemalt oldi tegeldud vaid õhusõidukite arendamisega. Vaatamata sellele valmistati lõpuks vastupidav seade, mis minimaalse instruksiooniga töötas edukalt ka kogemusteta inimeste kätes.

Sooviksin tänada kõiki ARL TechSystems-i töötajaid, kes kõik andsid oma panuse antud projekti valmimisse. Eriti tahan tänada Martin Tigassoni, kes oli igapäevaselt arendustöö kõrval aidates tootmisega ning pakkudes nõu ja lisavaatenurka uute lahenduste välja mõtlemisel.

Veel tahaksin tänada oma juhendajat, Oliver Metsa, kelle nõuannetest oli nii projekteerimisel kui ka lõputöö kirjutamisel väga palju abi.

SISSEJUHATUS

Ettevõttes, kus antud lõputöö projekteeriti, arendatakse mehitamata õhusõidukeid. ARL TechSystems'i näol on tegemist väikeettevõttega, kus on erinevate mehitamata lennukite projekteerimisega tegeletud üle seitsme aasta. Varasemalt on ettevõtte põhirõhk olnud suuremõdulistel lennukitel (massiga kuni 5 kg), millega pakutakse kaardistamis- ja seireteenust. 2016 aasta novembriks olid valmimas uudse lennuki esmased prototüübid, mis tekitasid vajaduse nende maapealse juhtseadme ehk maajaama järele, mis moodustaks hiljem õhusõidukitega tervikliku süsteemi. Varasemalt ettevõttes puudus ühtne seade lennukite juhtimiseks, pildiedastuseks kui ka olekuparameetrite ehk telemeetria vastuvõtmiseks ja neid ülesandeid täideti üheaegselt paljusid erinevaid seadmeid kasutades. Selline lahendus ei vastanud loodava süsteemi nõuetele ning võeti vastu otsus luua maajaam, mis ühildaks need kolm nõutavat funktsiooni. Ettevõttes tegeles antud projektiga peale autori veel üks insener, kes valis välja seadme sidesüsteemid, kuid seadme korpus ja ülejäänud tarvilik elektroonika jäi autori projekteerida. Käesoleva töö teemaks on loodava maajaama riisvaralise prototüübi areng.

Loodud maajaam on mõeldud töötama koos 500 mm tiivaulatusega vaidtiib tüüpi lennukiga. Lennuki eesmärgiks on olla vaatlus- ja luureplatvorm Kaitseliidu üksustes, mida suudaks transportida ja käidelda üksikvõitleja. Antud ülesanne eeldab maajaama, mis on kaasaskantava süsteemi oluline osa, projekteerimisel suurt tähelepanu tema kompaktsusele, massile ja kasutusmugavusele mitte-ideaalsetes oludes tugiteenustest eemal.

Käesolevas töös esmalt võrreldakse turul olevaid seadmeid loodava süsteemi nõuetega. Seejärel kirjeldatakse ja analüüsitakse lähemalt projekteerimise algul seatud funktsionaalsuse eesmärgid. Töö põhirõhuna kirjeldatakse seadme elektroonilise ja mehaanilise poole arengut erinevates etappides. Korpuse arenduse alguses tehakse seadmele riskianalüüs, hinnates võimalikke ohtusid maajaama käsitlemisel, transportimisel ja koostamisel. Korpuse viimase versiooni valmimise järel viiakse läbi uus riskianalüüs, kus hinnatakse eelnevad ohud üle ja võrreldakse algse hinnanguga. Töö lõpus analüüsitakse seadme kulusid ja kirjeldatakse edasisi arendustöid antud süsteemiga. Seadme mehaaniliste komponentide projekteerimiseks kasutati Solidworks 2015 Premium arvutitarkvara ja vajalikud mikrokontrollerid programmeeriti Arduino keskkonnas.

1. ÜLEVAADE TURUL PAKUTAVATEST SEADMETEST

Enne seadme projekteerimise alustamist uuriti kõigepealt turul pakutavaid tooteid, mis vastaks hilisema süsteemi nõuetele. Otsitavale tootele määrati 3 tingimust, millele see peab vastama.

- Seade peab võimaldama juhtida lennukit ja vastu võtta ning kuvada lennukilt tulevat pilti reaajas olulise viiteta (kuni 0,2 s).
- Seade peab võimaldama telemeetriasisidet, millega oleks võimalik planeerida või edastada lennuki autopiloodile lennuplane.
- Seade ei tohi olla suurem kui lennuk, mille jaoks seda vajatakse (500 x 309 mm).

Turul pakutakse palju erinevaid maajaamu, kuid põhiline, mis nende puhul ei sobi, on seadme suurus ja mass. Suur osa pakutavatest maajaamadest on lahendatud nii-öelda kohvri meetodiga, kus kõik vajaminevad osised pannakse kohvrisesse, mis muutub seeläbi korpuseks. Sellise süsteemi keskmeks on enamasti sülearvuti, millele ühendub külge lisamonitor, sidemoodulid ja juhtimisseadmed. Juhtimisseadmed võivad olla kas korpusesse integreeritud või välised, juhtmega ühendatud juhtkangid. Taolise süsteemi peamiseks eeliseks on operatiivvõimekus kasutushetkel: suuremad ekraanid võimaldavad operaatoril jälgida pilti detailsemalt ja väiksema kurnatusega. Paraku kaasnevad selliste süsteemidega ka suured energiakulud, mis tingivad vajaduse mahukate akude või generaatorite järele. Mõlemad variandid tõstavad seadme massi tasemele, kus loodava süsteemi mobiilsuse võimekus oleks tugevalt pärsitud.

Antud võrdlusesse on toodud kaks erineva tasemega maajaama. Esimene seade on masstoodetav laiatarbe juhtpult ja teine kõrgetasemeline UAV (ingl. k *unmanned aerial vehicle* – mehitamata õhusõiduk) maajaam, loodud sarnaste eesmärkidega. Põhilisteks tehnilisteks parameetriteks, mida hinnatakse, on seadme mass, tööaeg, sideulatus ja hind. Lisaks antakse ülevaade seadmete võimekusest lennuki juhtimisel, lennu planeerimisel ning eelistest ja puudustest.

1.1 Yuneec ST16

Lihtsama seadmena antud võrdlusesse leiti peamiselt meelelahutuslike ja filmimiseesmärgiga droonide tootja Yuneec. Tootja pakub mitut erinevat toodet antud klassis. Võrdlusesse võeti neist võimekaim Eestis vabakaubanduses pakutav maajaam tootenimega ST16 [1]. Ülejäänud pakutavad tooted jäävad valitule alla nii sideulatuselt, ekraani suuruselt kui ka akumahtuvuselt [2].



Sele 1.1.1. Yuneec ST16

Yuneec ST16 on 7-tollise puutekraaniga maajaam, mis töötab Android tarkvaral. Seadme mass 1,2 kg ja sellel puuduvad välised lisaseadmed. Tootja lubab nii juhtimis- kui ka videoühenduse sidekauguseks kuni 1,6 km. Videopilti edastatakse 5,8 GHz sagedusel WiFi lingi kaudu, juhtimise jaoks on jäetud sagedus 2,4 GHz.

Ekraanile kuvatav pilt on HD kvaliteediga video (720p), millele on kõrvale võimalik manada ka kaart ning lennu hetkeparameetrid. Seadmele on paigaldatud HDMI väljund, mis võimaldab kuvada pilti suuremale ekraanile või edastada pilti ka eemal viibivatele isikutele. Antud funktsiooniks vajalikku lisaseadet paraku tootja poolt kaasa ei tule ja vajaks süsteemi arendajapoolseid lisakulutusi. Maajaama põhivõimekusse kuulub videopildi salvestamine ja erinevate kaamera parameetrite, nagu valge tasakaal, säriaeg ning resolutsioon, muutmine.

Tabel 1.1.1. Yuneec ST16 tehnilised parameetrid

Parameeter	Väärtus
Sideulatus	Kuni 1,6 km
Mass	1,2 kg
Vee- ja tolmukindlus	Puudub
Tööaeg	Kuni 3 tundi
Hind	795€
Muu	Vajab valmistajapoolset vastuvõtjat, kaamerat ja autopilooti

Antud seadme suurimaks eeliseks on selle laialdane kasutus, mis teeb varuosade ja tehnilise toe kergesti kättesaadavaks. Samuti on tegemist odavamaga seadmega võrreldavate seas.

Suurim puudus, mis ka välistas seadme kasutamise, on seotud piirangutega ülejäänud tehnika suhtes. Yuneec ST16 ning ka teised antud tootja maajaamad nõuavad õhusõidukilt Yuneec-i autopilooti ja sideseadmeid, kuid see nõudmine oleks projekteeritava lennuki suhtes liigne kitsendus. Tehniliselt võimekuselt on antud seadme puuduseks vähene tööaeg ja puuduv niiskuskindlus.

1.2 peRISKop GCS

Professionaalse tasemega seadmena valiti võrdlusesse Ungari ettevõtte Periskop maajaam [3]. Antud toode ei ole loodud ühegi konkreetse süsteemiga koos töötama, vaid võimaldab ennast konfigurereida vastavalt tellija soovile [Lisa 1]. Maajaama pakutakse kahes variandis: ühe 8 tollise ekraaniga tahvelarvutiga, mis on jagatud videopildi ja telemeetria vahel, või 10 tollise videoekraani ja 8 tollise telemeetria ekraaniga variant. Periskop maajaama lähteülesandeks on olla sobilik väikestele UAV-dele ja selle poolest on sobilik meie eesmärgile.



Sele 1.2.1. peRISKop GCS

Periskop maajaama toodetakse kahes valikus - ühe või kahe ekraaniga. Mõlemale pakutakse HD lahutusega video võimekust. Mõlema versiooni keskmeks on 8 tollise ekraaniga Android või Windows tahvel. Lihtsamal versioonil on antud tahvel ainsaks ekraaniks. Kallimal versioonil on paigutatud antud tahvel väliseks ekraaniks ja põhikorpuse sisse on paigaldatud 10-tolline ekraan, mis on vaid video edastuseks. Selline lahendus pakub olulist kasutuslikku eelist, sest võimaldab korraga jälgida pilti ja kaarti. Olenemata versioonist on seadmel IPX5 kaitseaste (kaitstud igast suunast veejuga eest [4]). Samuti on võimalik seadmele lisada väline sidemoodul, mis võimaldab vajalikud sideseadmed kasutajast eemale viia.

Seadmele on ostes võimalik valida sideseadmeid. Valikute seas on nii analoog- kui ka digitaalside lahendusi. Põhilised pakutavad sidelahendused kasutavad kas 433 MHz, 2,4 GHz või 5,8 GHz sagedusi ja sideulatused võimaldavad enamus variantidega ühendust vähemalt 5 km kaugusele.

Tabel 1.2.1. peRISKop maajaama tehnilised parameetrid

Parameeter	Väärtus
Sideulatus	Kuni 5 km
Mass	2-2,5 kg
Vee- ja tolmukindlus	IPX5
Tööaeg	5-8 tundi
Hind	4500-8500€
Muu	Seadme komponendid on võimalik ise valida, väline sidemoodul

Võrreldes Yuneec'i maajaamaga on tegemist olulise taktikalise edasiminekuuga. Tehnilistest parameetritest on suurem osa paranenud: suurem sideulatus, tööaeg ja veekindlus. Kasutades digitaalühendusi on võimalik ka sidet krüptreerida. Samuti antud maajaam ei sea piiranguid lennukis kasutatavatele autopilootidele. Seadmega on võimalik ühendada lisaakusid ja päikesepatareisisid, et suurendada tööaega.

Põhiliseks puuduseks on seadme suur mass, mis paraku on üks olulisim võrreldav parameeter. Ka seadme odavamate variantide hind jääb vastuvõetava hinnaskaala kõrgemasse otsa. Nendel põhjustel ei osutunud seade loodavale süsteemile sobivaks.

2. PROJEKTEERITAVA SEADME FUNTSIONAALSUS

Turu-uuringu põhjal selgus, et hetkel süsteemile sobilikku toodet ei leidu ja seetõttu võeti eesmärgiks projekteerida nõuetele vastav seade ise. Maajaama esmase idee koostamisel võeti eeskuju ja määrati samad nõudmised nagu eelnevalt võrreldud seadmetega.

Projekteeritava maajaama eesmärk on olla põhiliseks juhtpuldiks loodavale õhusõidukile. Maajaamaga peab saama juhtida lennukit nii käsijuhtimisega kui ka anda automaatlennu käskluseid. Seadmega peab saama planeerida või esialgselt edastada muus seadmes loodud lennuplaane. Seade peab hõlmama kõiki tööks vajalikke komponente ühe korpuse sees, välja arvatud antennid, kuid väliste lisaseadmete lisamine peab olema võimalik.

Loodava õhusõiduki süsteemi eesmärk on olla luureplatvorm sõjalistel võistlustel ja harjutustel. Süsteem peab olema üksikvõitlejaga transporditav ja kasutatav. Sellest järelduvalt peab olema ka maajaam võimalikult kompaktne ja kerge (maksimaalselt 1 kg). Massi nõudest tulenevalt peab seadme üldine tugevus jääma sekundaarseks. Kuna seadet kasutatakse sõjalistel eesmärkidel, siis peab see olema kiiresti käivitatav ja akude tühjenemisest tingitud seisakud peavad olema minimaalsed.

Vastavalt kliendi soovile peab seade hõlmama vähemalt 7-tollist ekraani, vastu pidama vähemalt kaks maksimaalset õhusõiduki lendu ehk vähemalt 2 tundi ja võimaldama sideühendust vähemalt 2 km kaugusele. Arendusmeeskonna poolse sisendina said etteantud komponentideks Raspberry Pi arvuti, WiDV (WirelessDigitalVideo) digitaalside moodul ja Alfa AWUS051NH raadio. Akudena nähti ette Panasonic'u 18650 Li-Ion akuelementide kasutamist.

3. ELEKTROONIKA

Loodava maajaama elektroonika on seadme töös esmase tähtsusega. Põhiliseks seadme tööks vajalikud elektroonilised komponendid tulid ettevõttepoolse sisendina, kuid juhtimise süsteem tuli ise projekteerida. Antud peatükis kirjeldatakse seadmes kasutatavaid komponente, toitehaldamist, juhtimise süsteemile tarvilikke skeeme ja koode.

3.1 Ettevõttepoolsed komponendid

Ettevõttepoolse sisendina kasutati Raspberry Pi arvutit, WiDV sidemoodulit ja Alfa AWUS051NH raadiomodemeid.

Maajaamas kasutatakse Raspberry Pi 3 model B arvutit. Selle tingis ettevõttepoolse sisendina kasutatav WiDV, mis on projekteeritud töötama vaid Raspberry Pi arvutitel [5]. Raspberry Pi on kompaktnen 1,2 GHz taktsagedusega 64-bit neljatuumalisel ARM protsessoril põhinev arvuti, mis paikneb ühe trükkplaadi peal [6]. Lisaks ARM protsessorile on arvutil 1 GB muutmälu ja eraldiseisev graafika protsessor, mis on vajalik lennuki pardalt tuleva kõrglahutusega video vastuvõtmiseks ja kujutamiseks võimalikult väikese viitega. Seadmel on neli USB pesa, HDMI väljund ja 40 GPIO (ingl k *general input output* - üldotstarbeline sisend-väljund) viiku. Raspberry Pi töötab Linux operatsioonisüsteemil. Raspberry Pi 3 mudeli asemel kaaluti ka Raspberry Pi Zero mudelit, mis on oluliselt kompaktsem, kuid väiksema muutmälu (1 GB ja 512 MB), nõrgema protsessori (ühetuumaline 1 GHz ja neljatuumaline 1,2 GHz) ning vähemate USB pesadega (üks pesa ja neli pesa) [7]. Käesoleval juhul oli suurem seadme jõudlus olulisem kui mõningane kompaktsus ja seetõttu jäädigi Raspberry Pi 3 versiooni peale. Paraku ei piisanud ka suurema seadme kõikidest USB pesadest ja sellele lisati USB jagaja. USB jagajat toideti otse pingeregulaatori pealt ning selle külge ühendati seadme volunõudlikumad komponendid, et vältida Raspberry Pi sisse ehitatud pingeregulaatori läbipõlemist ülekoormuse tõttu.

WiDV ehk WirelessDigitalVideo on Raspberry Pi lisamoodul, mille eesmärk on väikese viitega kõrglahutusega video ja telemeetria edastamine üle ühe digitaalühenduse [5]. Seade toetab nii 720p (kuni 49 kaadrit sekundis) kui ka 1080p (kuni 30 kaadrit sekundis) lahutusega video edastust ja kasutab kas 2,4 GHz või 5,8 GHz WiFi raadiomodemeid infoedastuseks. WiDV'l on olulisi funktsioone, mis muudavad maajaama kasutaja tööd lihtsamaks või suurendavad seadme võimekust: võimaldab vastu võtta ja edastada jadaühendust teiste seadmetega, võimaldab video krüpteerimist, salvestab vastuvõetavat videot mälukaardile ja kuvab telemeetriainfot videopildile. Kui seadme külge on ühendatud vähemalt kaks raadiomodemit, WiDV suudab eri raadiote koostöös signaali- ja videopildi kvaliteeti oluliselt tõsta. Seadmele on võimalik lisada ka 4G mobiilside ühendus, kuid käesolevas töös seda ei käsitleta.

Loodav maajaam kasutab põhiliseks raadiosideks Alfa AWUS051NH modemit. Seade võimaldab kasutada 2,4 GHz või 5,8 GHz sagedusvahemikku ja kasutab IEEE 802.11/a/b/g/n protokollit ehk WiFi ühendust [8].

Modemi suurimaks väljundvõimsuseks on 28 dBm ja suurimaks vastuvõetav signaalitugevus -93 dBm. Katseliselt leiti, et kasutades kahte identset raadiot koos ostes kaasatulevate 5 dBi võimendusega dipool antennidega, on võimalik saavutada sideulatust lennukiga kuni 1,5 km kaugusele. Kui maa peal asuv antenn vahetati 10 dBi võimendusega suundantenni vastu, sideulatus kasvas kuni 2,5 km kaugusele.

3.2 Teensy arendusplaat

Lisaks ettevõtte poolt nõutavate komponentide, maajaama toimimiseks tuli valida veel arendusplaat, mis suudaks Raspberry Pi arvutile edastada kasutajapoolseid juhtimiskäskluseid. Selleks valiti Teensy 3.2 arendusplaat, millel on 32-bit ARM protsessor, 21 13-bitilist analoog sisendit, 34 digitaal sisend-väljund viiku ja USB pesa, mis on suuresti kõik maajaama tööks vajalikud [9]. Teensy arendusplaat vajab maajaamas vähe ruumi (suurusega 35 x 18 mm) ja viigud on standardse 2,54 mm sammuga, mis teeb ühenduvate sisendsignaalide pistikute leidmise ja juhtmistamise lihtsaks.

Käesoleva arendusplaadi tööeesmärk maajaamas on emuleerida USB kontrollerit Raspberry Pi arvutile ja seega edastada lennukile juhtimiskäsklusi. Teensy arendusplaati saab programmeerida C keeles või kasutades Arduino programmeerimistarkvara koostöös Teensyduino laiendiga [9]. Käesolevas töös kasutatakse valikutest teist ehk seadet programmeeritakse Arduino keskkonnas. Loodud kood toimib kahe funktsiooniga: esmalt käivitamisel deklareeritakse kasutatavad digitaalviigud sisenditena, seejärel loetakse pideva tsükliga sisse kolme analoog viiku ja 14 digitaalsisendit, mis on ühendatud nuppudega [lisa 2]. Kõikide sisendite lugemisel kasutatakse Arduino *Joystick* teeki, mis edastab loetava signaali USB-sse. Raspberry Pi ja Teensy esmasel ühendamisel tuli kõik signaalid konfigureerida õigete funktsioonide alla.

3.3 Toide ja koormus

Loodav maajaam töötab akutoitel ja selleks kasutatakse Li-Ion NCR18650B akuelemente nominaalpingega 3,6 V ning mahutavusega 3400 mAh [10]. Seadme mehaanika arendamisel planeeriti korpusesse erinevaid sisseehitatud aku konfiguratsioone nii nelja kui ka kolme elemendiga, kuid lõpuks loobuti mitte-eemaldatavast akust. Mitte-eemaldatava aku puuduseks sai suutmatus leida sobivas mõõdus akulaadijat, mis suudaks laadida akusid, kas piisava voolutugevusega (akude rööpühendusel kuni 5,1 A) või akuelemente balansseerides akude jadaühenduse korral. Valitav akulaadija pidi olema laadimisel suuteline kompenseerima akude samaaegset tühendamist seadme töötamise tõttu. Sobiva laadija mitte leidmisel otsustati kasutada eemaldatavat akut, mida laetakse eraldi süsteemiga. Selleks akuks kasutatakse juba süsteemi osana oleva lennuki akusid, mis kasutavad samu elemente. Kasutatav aku on kolme jadaühenduses elemendiga ettevõttes komplekteeritud aku nominaalpingega 10,8 V ja mahtuvusega 3400 mAh. Täislaetud aku pinge on kuni 12,6 V ja akust saab püsivat voolu kuni 6,8 A, tühja aku pinge on 7,5 V.

Esialgsete elektroonika kontseptuaalsete prototüüpide katsetamisel ei olnud teada, kui palju kogu elektroonika tarbib, oli vaid teada, et kõik elektroonika seadmed vajavad 5 V pinget töötamiseks. Seetõttu valiti esmaseks pingeregulaatoriks Turnigy 15A UBEC, mis võimaldab kuni 8 A püsivat voolutugevust 5 V juures [11]. Pärast esmaseid katsetusi mõõdeti üksikute komponentide maksimaalseid voolutarbeid, et valida sobivam pingeregulaator antud koormusele. Mõõtmise tulemused on tabelis 3.3.1.

Tabel 3.3.1. Komponentide maksimaalsed voolutarbed 5 V pingel

Seade	Voolutugevus [A]
Alfa raadio	1,05
Ekraan	0,6
Raspberry Pi 3	0,4
Teensy 3.2	0,03

Alfa raadio voolutarvet mõõdeti selle maksimaalvõimsusel, kui see edastas teisele raadiotele videopilti ja telemetriat. Selline olukord on tarbimiselt ekstreemne ja suure tõenäosusega maajaama töös ei esine. Algsetes maajaama versioonides oli korpuse sees üks Alfa raadio ja üks raadio oli võimalik korpuse väliselt ühendada. Hilisemates versioonides paigutati kaks Alfa raadiot korpusesse ja jäeti võimalus kolmanda ühendamiseks välise USB ühenduse kaudu. Pingeregulaatori koormuse arvutusel võeti arvesse kolme Alfa raadio, ühe ekraani, ühe Raspberry Pi ja ühe Teensy arendusplaadi maksimaalsed tarbimised ning arvutuslikult leiti koormuseks 4,18 A. Arvutuse järel lisati koormusele mõningane varutegur ja otsitavaks piirkoormuseks valiti 5 A.

Sobivaks seadmeks valiti Pololu D24V50F5 pingeregulaator. Valitud madaldav pingeregulaator tekitab pideva 5 V pinget ja on suuteline kuni 5 A voolutugevuseks [12]. Komponent töötab sisendpingel 6 – 38 V, mis on sobilik kasutatavate akude 7,5 – 12,6 V pingevahemikuga, sisse on ehitatud ka vale polaarsuse kaitse. Pololu pingeregulaatori teeb veel maajaamale sobivaks tema väike suurus (17,8 x 20,3 x 8,9 mm) ja väike mass (3,0 g).

Pärast maajaama komplekteerimist mõõdeti seadme reaalselt voolu tarbimist. Voolutugevust mõõdeti aku ja pingeregulaatori vahel akupingel 12,3 V. Ooterežiimil, kui ühendust lennukiga polnud saavutatud, oli voolutugevus 0,69 A, side loomisel ja lennukile lennuplaani saatmisel mõõdeti koormuseks 0,79 A. Võimsuste erinevus arvutusliku maksimumi (20,9 W) ja reaalse (9,7 W) koormuse vahel tuleneb Alfa raadiote väiksema koormatuse arvelt, võimsused arvutati valemi (3.1) põhjal.

$$P = I * U \quad (3.1)$$

kus P – võimsus, W,

I – voolutugevus, A,

U – pinge, V.

Tellija nõudmine oli, et maajaam suudaks akutoitel töötada vähemalt 2 tundi. Kasutatava aku mahutavus on 3,4 Ah [10]. Aku eluea pikendamise eesmärgil ei soovitata liitumakusid rohkem kui 80% tühjendada, seega kasutatavaks mahutavuseks jääb 2,72 Ah. Arvestades tarbimisega 0,79 A on arvutuslik maajaama tööaeg valemi (3.2) järgi kuni 3,4 tundi, seega on tellija nõudmine täidetud.

$$t = \frac{Q}{I} = \frac{2,72}{0,79} = 3,4 [h] \quad (3.2)$$

kus t – aeg, tundi,

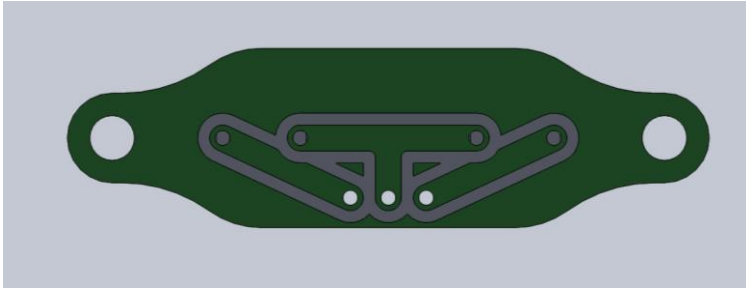
Q – aku mahutavus, Ah,

I – voolutugevus, A.

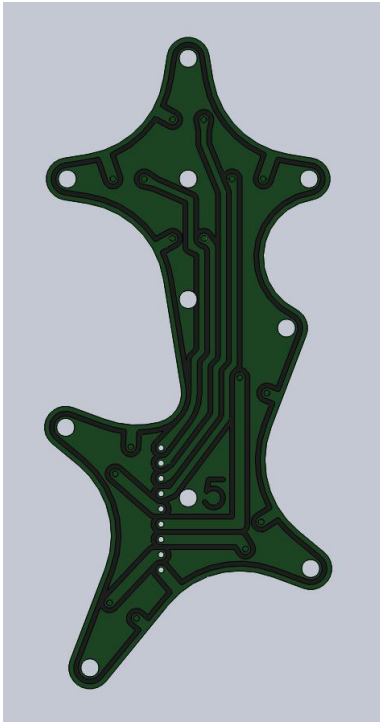
3.4 Skeemid

Maajaama juhtimisseadme tööks on vajalikud nuppude sisestused. Selle tarbeks tuli ise luua skeemiplaadid, kuhu külge lähevad lülitid ja laiendusplaat Teensy arendusplaadile, et oleks võimalik selle külge ühendada pistikuid, mis tulevad lülititest. Kõik loodavad plaadid valmistatakse freesides 1,5 mm paksusest ühepoolse vasekihiga trükkplaatidest. Põhiliseks kasutatavaks freesiks oli 0,8 mm sõrmfrees. Radade planeerimisel lähtuti esmalt Teensy viikude vahelisest kaugusest (samm 2,54 mm [9]) ja minimaalse freesi löikejoone pikkuse põhimõttest. Joonistel näha olevad number 5-ed on abistamaks CAM programmi tegemisel komponenti õiget pidi paigutada, valmis freesitud detailidel kujutis puudub.

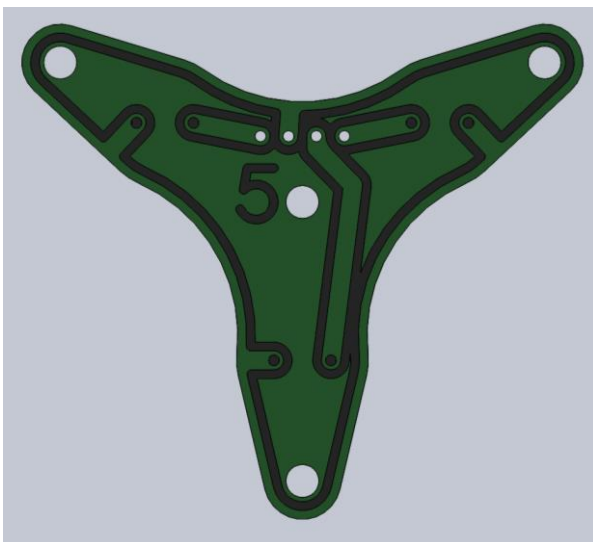
Juhtimissüsteemil on kokku 14 digitaalsisendit, millest 13 asetsevad erineva konfiguratsiooniga nuppude trükkplaatide ehk nupuplaatide küljes. Viimane digitaalsisend asub juhtkangi küljes ja ei vaja eraldi skeemi. Erinevaid nupuplaate on kolm: 8 lülitiga (sele 4.3.2), 3 lülitiga (sele 3.4.3) ja 2 lülitiga plaat (sele 3.4.1). Lülititeks valiti TE Connectivity FSM4JRT TACT lüliti selle väikese suuruse (6 x 6 mm) ja madala profiili (5,15 mm) tõttu. Väljundviikude sammuks valiti sarnaselt Teensy arendusplaadile 2,54 mm. Väljaviik tehti igale lülitile ja üks lisanduv massi juhtmele. Plaatide ühendamiseks korpuse külge tehti plaatidesse 3 mm läbimõõduga augud, kust lähevad hiljem M3 poldid läbi.



Sele 3.4.1. Trükkplaat kahele nupule

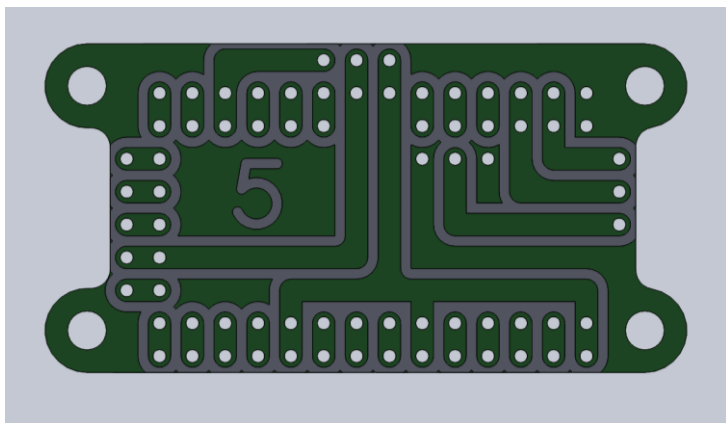


Sele 3.4.2. Trükkplaat 8-le nupule



Sele 3.4.3. Trükkplaat kolmele nupule

Teensy arendusplaat omab küll suurel hulgal viikuseid kuid kahjuks nende asetus ei võimalda lihtsat pistikute ühendamist nagu [lisa 3] näha võib. Seetõttu projekteeriti Teensy'le laiendusplaat (sele 3.4.4), mille külge saab ühendada 2,54 mm sammuga pistikuid, mis tulevad nupuplaatidelt omavahel korrastatult. Teensy arendusplaat joodetakse laiendusplaadi külge piikribade abil. Laiendusplaadil projekteeriti ühe nupuplaadi viigud kõrvuti, et iga plaadi ühendus oleks vaid ühe pistikuna. Antud paigutuse eesmärk oli maksimeerida kättesaadavate viikude arvu. Lisaks kasutust leidnud viikudele, üks analoogsisend ja kolm digitaalviiku jäeti vabaks aku pinge monitoorimise ja LED tule juhtimise tarbeks, millega lähemalt tutvutakse edasiarenduste peatükis.



Sele 3.4.4. Teensy laiendusplaat

4. MEHAANIKA

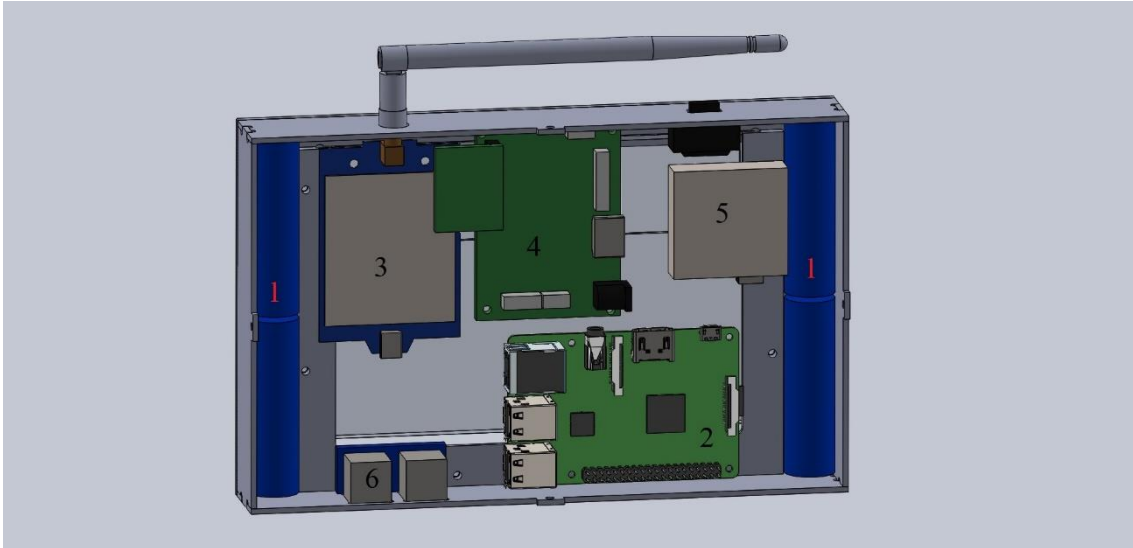
Antud peatükis kirjeldatakse seadme mehaanilist arengut: tutvustatakse komponente ja nende muutumist projekteerimise vältel. Peatükki alustatakse seadme algse kontseptsiooni tutvustamisest ja selle põhjal tehtud riskianalüüsiga. Seejärel peatutakse olulisemates arengu etappides, kus on sisse viidud suuremad muudatused. Viimasena kirjeldatakse töö kirjutamise seisuga kõige uuemat versiooni.

4.1 Algne kontseptsioon

Eelmises peatükis sai paika pandud nõudmised, millele loodav maajaam peab vastama. Kõikide tingimuste täitmist ei võetud esimeste versioonidega eesmärgiks. Esmases versioonis jäetakse kõrvale seadmesse integreeritud juhtimissüsteemid ja ühenduvus välise arvutiga. Juhtimine lahendatakse välist juhtkangi kasutades, mis ühendatakse läbi USB liidese. Seadme korpuse projekteerimisele eelnesid esimesed elektroonika kontseptuaalse prototüübi katsetused, et selguksid tarvilikud komponendid, millega peab arvestama korpuse dimensioneerimisel.

Esimese korpuse versiooni eesmärk oli seadme esmane visualiseerimine riskianalüüsi ja edasise projekteerimise tarvis. Seadme korpus projekteeriti võimalikult lihtne ja odav toota. Selleks valiti materjalid, mis olid juba ettevõttes kohapeal olemas ja lihtsasti töödeldavad: 6 mm ja 4 mm kasevineer ning 2 mm klaasfiiber plaat. Otsaseinte valmistamiseks valiti 6 mm vineer. Nende paksus sai valitud suurem, kui külgedel, et oleks võimalik freesides tekitada piisavaid süvendeid erinevate komponentide kinnitamiseks. Kõik süvendid tehti 3 mm sügavuseni. Eesmise otsplaadi keskele tekitati süvend ekraani lokeerimiseks koos nelja läbiva auguga ekraani kinnituse tarbeks. Ekraan kinnitatakse esipaneeli külge U-kujulise fikstuuriga. Fikstuur valmistatakse 4 mm vineerist, millel on poole sügavuseni freesitud süvis ekraani jaoks. Servad freesitakse tappliitega, väljalõiked tehakse antennile, USB jagajale ja voolulülitile. Servad liimitakse omavahel ja seejärel esiplaadi külge. Tagapaneel ühendub nelja poldiga servade külge, mis võimaldab lihtsat hilisemat ligipääsu sisemistele komponentidele.

Korpuse sisse paigutati võimalikult minimaalselt komponente, mille paigutust näeb seel 4.1.1. Esimeste elektroonika kontseptsiooni katsetuste ajal oli kasutusel ekraan, mille juhtelektroonika skeemiplaat ehk driver oli arvestatava suurusega ja selle ühenduspesade asukohad asusid paigutuselt ebamugavalt. See pani olulised piirangud komponentide sisemisele paigutusele. Ekraani driveri kõrvale paigutati üks Alfa raadio, mis paigutati viisil, et antenn väljuks seadme korpuse ülemisest osast. Teisele poole driverit paigutati pingeregulaator seadme toiteks. Korpuse alumisse poolde paigutati Raspberry Pi arvuti ja USB jagaja väliste seadmete ühendamiseks. Korpuse külgedele paigutati kokku neli Li-Ion akuelementi - kaks elementi mõlemasse serva, et säilitada raskuskeskme asukohta seadme keskel.



Sele 4.1.1. Esimese kavandi komponentide paigutus

Tabel 4.1.1. Sele 4.4.1 komponendid

Number	Komponent
1	Akud
2	Raspberry Pi 3
3	Alfa raadio
4	Ekraani juhtelektroonika
5	Turnigy 15A UBEC
6	USB jagaja

Vaatamata esimese versiooni lihtsusest otsustati seda realselt mitte valmistada, kuna oli teada, et elektroonika töötas katsetuste ajal vastavalt nõutule. Seetõttu ei peetud otstarbekaks teha süsteemile eraldi lihtsakoelist korpus, sest see poleks arenduse seisukohalt olulist infot enam juurde andnud. Antud versiooni põhjal tehti esimesed järeldused seadme puudustest, mis vajasisid valikuid edasisel projekteerimisel. Põhiliseks probleemiks osutus seadme sees olevate akude laadimine. Kuna seadmelt peab eeldama minimaalset seisaku aega, siis seadme sees peab olema laadimissüsteem, mis suudab laadida akusid ja toita seadet üheaegselt või akud peavad olema vahetatavad. Seadme hilisemas projekteerimises katsetatakse mõlemad variandid läbi.

4.2 Riskianalüüs

Seadme esmase visualiseeringu põhjal ja potentsiaalseid kasutusolukordi analüüsidest tehti seadmele riskianalüüs. Selleks tehti kõigepealt riskimaatriks (tabel 4.2.1).

Tabel 4.2.1. Riskimaatriks

	Ohtlikkus seadme tööle		
Tõenäosus	Väheohtlik	Ohtlik	Väga ohtlik
Ebatõenäoline	I	II	III
Võimalik	II	III	IV
Tõenäoline	III	IV	V

Riskid jaotati viite klassi: I – V kasvava ohtlikkuse järjekorras.

- I – risk on minimaalne ja ei vaja liigset ressursi projekteerimisel
- II – risk on vähene ja vajab mõningat tähelepanu projekteerimisel
- III – risk on keskmine ja vajab tähelepanu projekteerimisel
- IV – risk on suur ja vajab arvestatavat tähelepanu projekteerimisel
- V – risk on tõsine ja vajab olulist tähelepanu projekteerimisel

Tabelis 4.2.2 kirjeldatakse ohtlikuid olukordi ja need on jaotatud nelja põhikategooriasse, millele erinevad ohu stsenaariumid vastavad. Erinevatele stsenaariumitele määrati riskiklassid ja kirjeldati potentsiaalseid viise, kuidas nende ohtlikkust vähendada.

Tabel 4.2.2. Loodava seadme riskianalüüs

Ohutegur	Ohu iseloom	Riskiklass	Riski maandamine
Kukkumine	Kukkumine teravale objektile, korpuse purunemine	IV	Korpuse kriitilistes kohtades kasutada tugevamaid materjale
	Kukkumine korpuse nurgale, korpuse purunemine	V	Nurkadesse paksem materjal, tugevdused
	Kukkumine, sisemiste komponentide kinnituste purunemine	V	Kinnituste ühenduspinnad/liimpinnad suure pindalaga
Hooletu käsitlemine	Nuppude/kangide vajutus võõrkehade poolt	III	Nupud peita korpuse kontuuri sisse
	Antenni murdumine transpordil/käsitlemisel	IV	Eemaldatavad antennid, süvised antennide transpordiasendiks
	Ekraani kahjustamine transpordil/käsitlemisel	III	Ekraanikaitse kiled, täiendav ekraanikaitseplaat
Niiskus	Vee/kondensaadi sattumine elektroonikale kasutamisel/hoiustamisel niiskes keskkonnas	III	Dielektriliste määrete kasutamine, võimalike vee sisenemispunktide vähendamine
Tootmine	Hooletus seadme koostamisel/hooldamisel, võõrkehadest tingitud lühised elektriahelates	II	Keskkonnale avatud ühendused katta kaitsevahenditega mehaaniliste vigastuste eest

Analüüsist selgus kaks ohutegurit, mille tekke tõenäosust saab toote disainiga vähendada. Kõige ohtlikumad stsenaariumid on seotud kukkumistega. Kõikide kukkumiste riske saab maandada nende tõenäosuse vähendamise läbi. Kukkumise tõenäosust saab esmaselt vähendada seadmel rakmete kasutamisega. Rakmed lubaksid kasutajal vabastada käed seadme küljest ja sellega suurendaksid kasutusmugavust ning vähendaksid kukkumise võimalusi. Rakmetega väheneksid põhjused seadme maha asetamiseks ja võimalused seadme pillamiseks kasutamisel. Teine ohutegur, mis võib seadme töö käigus väheneda, on niiskuskahjustused elektroonikal. Kui seade on töös, siis korpuse sees olevad raadiod ja ekraan toodavad soojust, mis üldiselt on soovimatu kuid aitab niiskusest tekkinud kahjustusi vähendada. Antud kaitse töötab kuni korpuse sisse jõudnud niiskus on vähene. Kui seadmesse jõuab juba oluliselt vett, siis selle vastu soojendus ei aita. Lõplikult probleemi vastu aitab vaid korpuse veekindlaks tegemine, millega tegeldakse edasise arenduse käigus.

Riskianalüüs leitud ohtudega arvestatakse edasises projekteerimises vastavalt nende ohuklassidele.

4.3 Varased versioonid

Pärast esmast visualiseerimist ja riskianalüüsi otsustati projekteerida korpus, mis reaalselt valmistataks. Põhiline projekteerimise ressurss kulus korpuse, kui kõige suurema ja olulisema mehaanika komponendi peale. Pärast esmase kontseptsiooni loomist läbis korpus kokku seitse iteratsiooni, sealhulgas viimane variant. Nendest kirjeldatakse esmalt kolme, mille projekteerimisel tehti suurimad muudatused.

4.3.1 Plastik korpus v1

Esimene korpus planeeriti valmistada FDM (ingl. k *fused deposition modeling* – sulatatud sadestuse vormimine) 3D-printimise teel, sest see oli kiire ja kättesaadav prototüüpimise valmistusviis. See valik pani olulised piirangud seadme disainile. Antud tehnoloogia ei võimalda printida struktuure, mis pole printimise ajal alt poolt toetatud. Korpus tuli seetõttu projekteerida kahes pooles. Kogu korpus valmistati ABS plastikust, sest see oli kättesaadavam. Korpust üldistatult kirjeldades on see ristküliku kujuline tahvel, millel on avaused ekraani ja juhtimissüsteemi sisenditele. Keerulise struktuuri tõttu ei tehtud korpusele tugevusanalüüsi. Seinapaksuse valimisel lähtuti sarnase struktuuriga detaili printimise soovistest. Soovituslikult on minimaalne printitav seinapaksus 0,8 mm ja minimaalne struktuurse seina paksus 1,5 mm [13]. Tuginedes antud soovistele, seadme massi nõudest ja varasemale kogemusele valiti välise seina paksuseks 1,5 mm. Kaks korpuse poolt liidetakse omavahel nelja poldiga nurkadest.

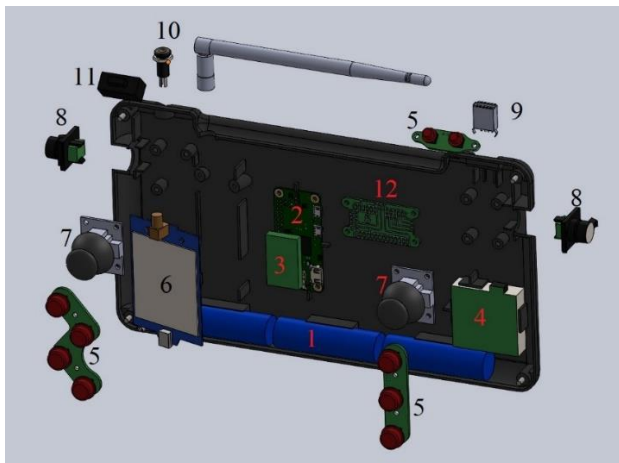


Sele 4.3.1. Plastik korpus v1.0

Sisemised komponendid kinnituvad, kas kahepoolse teibi või poldidega. Kahepoolse teibiga kinnitati kergemad ja väliste mõjutusteta komponendid näiteks Raspberry Pi arvuti, Teensy mikrokontroller ja pingeregulaator. Poldidega kinnitati komponendid, millele oli oodata väliseid jõude näiteks nuppude trükkplaadid ehk nupuplaadid, juhtkangid ja Alfa raadiomoodul. Kõik poldipesad on keermestatud plastiku enda sisse. Korpuses

on igale komponendile vastavalt tema kontuurile projekteeritud lihtsatud pesa, et neid paremini fikseerida. Antenn paigutati korpuse välispinnas paiknevasse süvendisse, kus see oleks transportides ohutult.

Seadme sees olevate komponentide paigutus on näidatud laotusjoonisena seel 4.3.2. Korpusesse on paigutatud kolm akuelementi koos laadimisvõimalusega. Antud versiooni paigutati ka esimest korda juhtumissüsteem korpuse sisse. Juhtumissüsteem hõlmas endas kahte 2-teljelist juhtkangi, kahte potentsiomeetrit ja kolme erinevat nupuplaati. Väliste seadmetega suhtlemiseks on koostus väline USB pesa ja 3,5 mm läbimõõduga audiopesa jadaühenduse jagamiseks.



Sele 4.3.2. Plastik korpus v1.0 sisu

Tabel 4.3.1. Sele 4.3.2 komponendid

Number	Komponent
1	Akud
2	Raspberry Pi Zero
3	WiDV moodul
4	Turnigy 15A UBEC
5	Nupuplaadid
6	Alfa raadio
7	Juhtkang
8	Potentsiomeeter
9	USB pesa
10	3,5 mm audiopesa
11	Toitelüliti
12	Teensy laiendusplaat

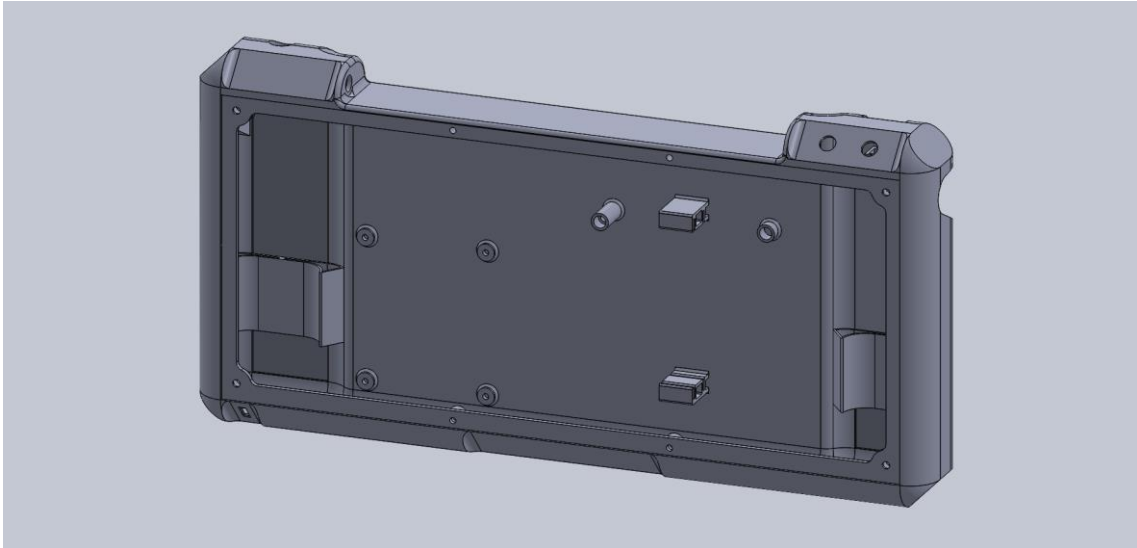
Peale seadme komponentide valmistamist selgus projekteerimises mõningaid puuduseid. Korpus projekteeriti liiga suur tavalistele FDM printeritele ja seetõttu prinditi mõlemad korpuse pooled kahes tükis ning seejärel liimiti need kokku. Paraku tõi see protsess endaga kaasa kerge korpuse moonutuse, mille tõttu korpuse otspinnad ei olnud üksteise suhtes risti. Samuti osutusid korpuse poolte servade jäikused eraldiseisvana ebapiisavaks, mis väljendus selles, et koostöös moonutusega, korpuse kahe poole pikema külje ühinemiskohas vajus liide jõu avaldamisel kokku. Projekteerimisel planeeriti poldid keerata otse plastikusse, kuid pärast paarikordset poltliite kasutamist, selle keermed purunesid ja polti ei saanud enam eemaldada. Antud printimise tehnoloogiast tulenevalt oli korpus prinditud kiu ristisuunas suhteliselt nõrk ja mõningase jõu avaldamisega purunesid poldipesade ja ülejäänud korpuse vahelised liitekohad. Purunenud kohad parandati tsüanoakrülaat liimiga, kuid seda ei saa lugeda piisavaks paranduseks. Probleemiks kujunes ka viis, kuidas juhtkangid korpusega ühendati. Kuna nende kinnituskohadest oli tagumise korpuse pinnani lühem distant kui eesmise pinnani ehk nõudis vähem materjali, mindi seda teed. Paraku see lähenemine tekitas probleemi, kus korpuse ülemist pinda vajutades see segas juhtkangi tööd selle korpust surudes. Seadme põhiliseks disainiliseks puuduseks on tasapinnaline tagakülg, mis ei lase seadet mugavalt käes hoida. Samuti pole korpusel kohti, kuhu saaks rakmeid kinnitada.

4.3.2 Plastik korpus v1.2

Eelnevalt kirjeldatud korpusel oli nii projekteerimis- kui ka disainivigu. Meetod mitme probleemi korraga lahendamiseks algas korpuse valmistamise tehnoloogia välja vahetamisega. FDM printimine vahetati laserpaagutamise (SLS, ingl k *selective laser sintering*) vastu, mis võimaldas oluliselt keerulisemaid struktuure valmistada. Uus korpus plaaniti teha ühes tükis koos eemaldatava esipaneeliga. Vaatamata erinevatele tehnoloogiatele on filament-prinditud ABS ja paagutatud nailon marginaalse erinevusega tõmbetugevuses, 44 MPa ja 45 MPa vastavalt [14] [15]. Eelmise korpuse versiooni materjali enda tugevuse ja jäikusega oldi suuresti rahul ja seetõttu jäeti uue versiooni korpuse seinapaksus ühtlaselt samaks ehk 1,5 mm.

Struktuuriselt jäi korpus suhteliselt sarnaseks võrreldes eelmise versiooniga (sele 4.3.3). Korpuse tagakülje keskele tehti 5 mm süvend, mis teeks mugavamaks seadme käes hoidmist ja nurkadesse jäeti tasapinnad, kuhu saaks paigaldada kinnitusi rakmetele. Peale eelmise versiooni kogemust plastikusse keermetamisega otsustati seekord kasutada vajalikes kohtades keermetatud hülsse, mis oleksid oluliselt vastupidavamad, võimaldades korduvat seadme koostamist. Varasemal versioonil oli antenn otse raadio küljes. Selline konfiguratsioon tegi komponentide sisemise paigutamise keeruliseks ja tekitas korpusesse olulise niiskuse sisenemise koha. Käesolevasse versiooni paigaldati kaks Alfa raadiot ja nende külge antennipikendused, mis võimaldasid antennid paigaldada korpuse ülemisse osasse vertikaalpindadele, kus niiskuse sisenemine oleks oluliselt väiksema tõenäosusega. Seadmesse lisati üks aku element juurde, tuues selle arvu neljale. Seadme juhtimise süsteem jäeti samaks võrreldes eelmise versiooniga.

Antud korpuse versiooni reaalset valmis ei tehtud.

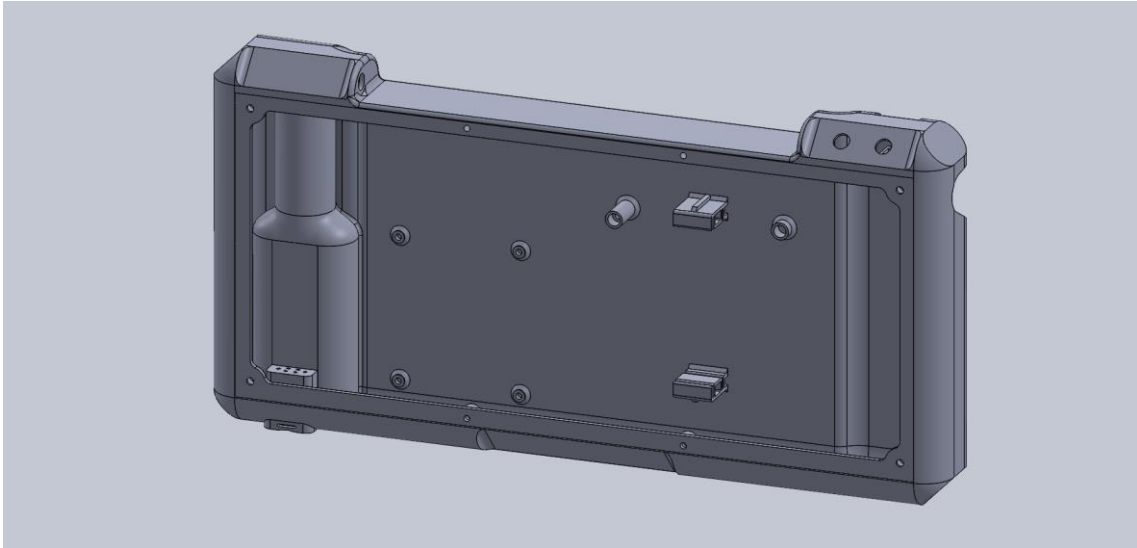


Sele 4.3.3. Plastik korpus v1.2

4.3.3 Plastik korpus v1.3

Eelnevatel versioonidel oli arvestatud mitte-eemaldatava akuga, mida vastavalt vajadusele laetakse korpuse sisese süsteemiga. Kuna pikaajalise otsimise ja katsetamise järel ei leitud sobivat süsteemi, mis suudaks piisava vooluga laadida akusid ja toita seadet üheaegselt, siis otsustati muuta antud lähenemist oluliselt. Mehitamata lennuk, mida hakatakse loodava maajaamaga juhtima, kasutab ettevõttes projekteeritud akusid. Need akud kasutavad samu Li-Ion elemente, mis antud seadmele said ettevõtte poolseks sisendiks ja on võimelised edukalt toitma maajaama nõutud aja vältel. Juba süsteemis (lennukis) kasutusel olevate akude kasutamine vähendab süsteemiga kaasa veetavate seadmete arvu ja võimaldab paindlikumat töötamist, olles tugiteenustest, näiteks vooluvõrgust akude laadimiseks, eemal.

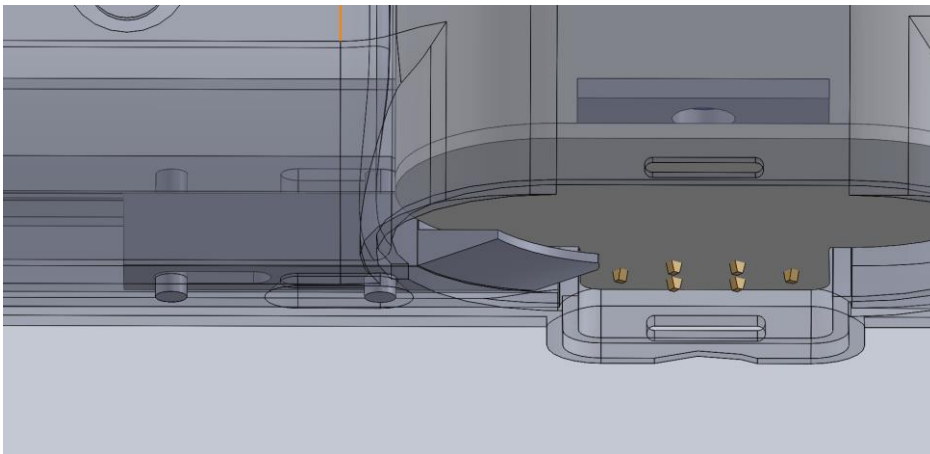
Korpuse sees oli kaks võimalikku asukohta, kuhu saaks antud aku paigutada koos ligikaudu 3 mm nihutamisruumiga: kahel pool korpuse servades, kus korpus ei olnud tagaküljest madalamaks tehtud, nagu selel 4.3.4 võib näha. Aku paigutamine korpusesse oli piiratud ja seetõttu tuli muud süsteemid välja valitud kohal ümber mõelda. Seadmesisese mahu piirangu tõttu pidi välja jätma varem kasutatud 3,5 mm audio pesa, mida kasutati jadaühenduse loomiseks välise arvutiga. Selle asemel mindi üle Bluetooth ühenduse peale, mille moodulit sai vabamalt korpuses paigutada. Samuti korrigeeriti juhtimise süsteemi: loobuti ühest potentsiomeetrist ja üks juhtkang asendati nelja nupuga. Kõik vajalikud nupud toodeti FDM printimisega.



Sele 4.3.4. Plastik korpus v1.3

Kuna aku projekteeriti seadmesse alt poolt sisestatav, siis lisati akule lukustusmehhanism, mis oleks pidanud hoidma akut korpuse sees ka tugeva mõjutuse korral. Seel 4.3.5 on näha lukustit, jooniselt on veel puudu mehhanismi juurde kuuluv vedru, mis hoiaks süsteemi suletuna ja väliskeskkonna eest kaitsev kaas. Reaalselt katsetades osutus lukusti ebavajalikuks, kuna projekteerimisel detailide igast küljest vahele jäetud 0,2 mm lõtk osutus piisavalt tihkeks ühenduseks, et lisamehhanism ei õigustanud ennast. Edaspidi lukustist loobuti. Aku eemaldamiseks pesast kasutatakse aku külge liimitud teibiriba, mis võimaldab mugavat aku eemaldamist.

Plastik korpused v1.4 ja v1.5 jäeti kirjeldamata, sest nendega tehtud muudatused ei omanud funktsionaalset ega esteetilist olulisust.



Sele 4.3.5. Aku lukusti

4.4 Plastik korpus v1.6

Antud lõputöö kirjutamise ajal oli käesolev maajaama variant viimane. Suurim probleem eelnevate variantide tootmisega on olnud korpuse tootmise kõrge hind – v1.3 korpuse omahind ettevõttele oli 178€. Simuleerides erinevate korpuse stiilide tootmishindu, leiti et kõige optimaalsem on antud korpust printida ilma tagaseinata ja see lehtmaterjalist hiljem juurde liimida. Selline tootmisviis langetas korpuse prinditava detaili hinda 107€ peale, kuid kogu korpuse hinnale lisandus juurde lehtmaterjali ja selle töötlemise hind.



Sele 4.4.1. Plastik korpus v1.6 komplekteeritult

Korpuse tagaseina asendamine andis võimaluse vähendada riskianalüüsis leitud teravale objektile kukkumise ohtlikkust. Selle võimaluse ära kasutamiseks võeti eesmärgiks valida lehtmaterjaliks võimalikult suure eritugevuse ja jäikusega materjal. Töödeldud lehtmaterjal liimitakse metakrülaat liimiga korpuse külge, liim jääb kuivades kõva ning ei kannata olulist deformeerumist. Materjali jäikus on oluline, et detaili kukkumisel oleksid deformeerumised minimaalsed ja seega tõenäosus liimi purunemiseks minimaalne. Antud lehtmaterjal liimitakse korpuse külge, sellest järelduvalt on oluline ka materjali liimitavus. Valikus oli alumiinium, klaaskiud ja süsinikkiud, kuna need olid kõige kättesaadavamad materjalid, mis sobisid antud ülesandeks.

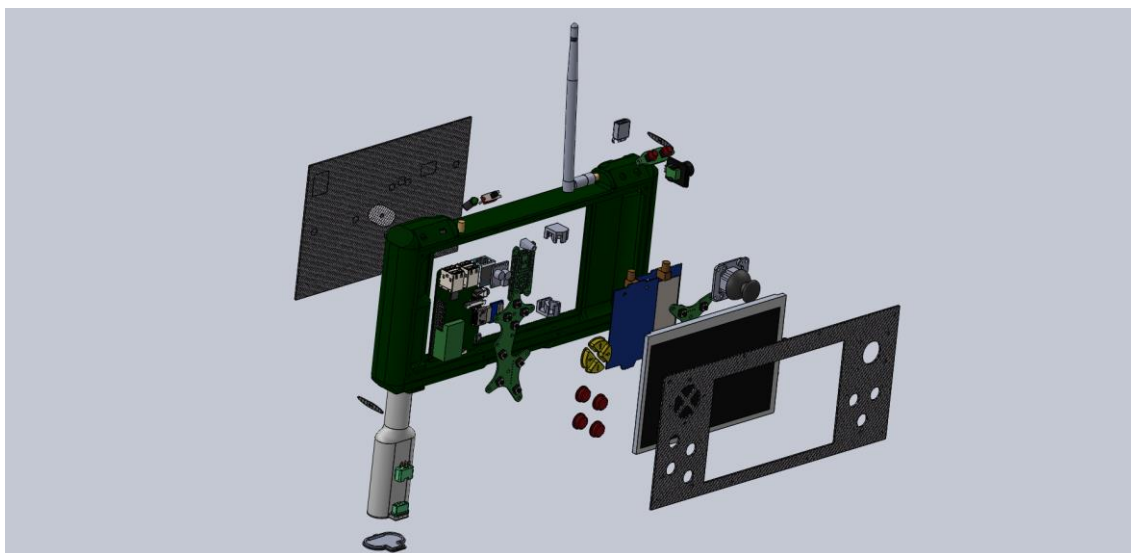
Tabel 4.4.1. Materjalide võrdlus [16]

Materjal	Eritugevus [kN*m/kg]	Suhteline jäikus süsinikku suhtes	Liimitavus
Alumiinium	222	0,4	Kehv
Klaaskiud	1307	0,25	Hea
Süsinikkiud	2457	1	Hea

Tabelis 4.4.1 kirjeldatud materjalide võrdluse põhjal valiti lehtmaterjaliks süsinikfiiber võrreldavatest oluliselt suurema eritugevuse ja jäikuse tõttu. Eri materjalide arvu vähendamiseks kasutatakse sama materjali ka korpuse esipaneeli valmistamiseks. Kasutades süsinikkiud plaate korpuse esi- ja tagapinnal, lisaks tootmise hinna langemisele muutus korpus ka väände oluliselt jäigemaks.

Korpusele projekteeriti rakmete kinnitamise valmidus juba esimeses versioonis, mis oli mõeldud laserpaagutamisega tootmiseks, kuid varasematel prototüüpidel seda ei realiseeritud. Kuna sellel versioonil võeti see eesmärgiks, siis otsiti selle jaoks lahendusi. Eelistatud viisiks jäi D-aasade kasutamine, mis needitaks korpuse nurkadesse. Riskianalüüsis leitud nõrga korpuse nurga ja kartuse, et järsul tõmbel aasast võib neetliide puruneda, lisati nurkadele süsinikkiust plaadid, mille eesmärk oleks koormuse hajutamine suuremale pinnale.

Eelnevates versioonides olid sisemiste komponentide kinnitused prinditud koos ülejäänud korpusega. Uue lähenemisega ei olnud enam võimalik ühe protsessiga toota korpust ja komponentide kinnitusi, sest uuel versioonil on tagasein asendatud liimitava paneeliga. Seetõttu tuli kinnitused eraldi protsessiga toota ja hiljem lisada. Lisatud kinnitusi oli kahte sorti: komponendid mis ei vajanud tagapaneeli pinnalt olulist tõstmist, nende jaoks liimiti paneelile vastava suurusega mutrid, ja raadiod, mis vajasisid erisugust paigutust, nendele otsustati toota vajalikud komponendid ABS plastikust freesimise teel. Komponendid, mille eemaldamist ette ei nähtud, ja kinnitusfiksuurid liimiti korpuse külge metakrülaat liimiga. Kinnitusfiksuuride projekteerimisel lähtuti liimi tugevusparameetritest, mille kohaselt on liimliide tugevam kui kinnituste materjali tugevus [17]. Kõigile kinnitustele ja komponentidele freesiti tagapaneelile vastavad süvised, et koostamisel paigutamise vigu vältida.



Sele 4.4.2. Laotusjoonis

Kuna kõige suuremad ohud antud seadmele tulenesid seadme kukkumisest, siis üritati nende tõenäosust vähendada suurendades korpuse pinna haarduvust. Selleks kaeti korpuse pind PlastiDip elastse värviga [18]. Antud toode andis korpuse pinnale soovitud tulemust: pind jäi kumjas ja nakkuvus käes hoides kasvas oluliselt. Lisaks sellele oli korpuse pind paremini kaitstud mehaaniliste kriimustuste ja muude kergemate vigastuste eest. Paraku kaitsekiht kulus nurkadest ja muudest kergesti kahjustuvatest kohtadest kiiresti ja kaotas kaubandusliku

välimuse. Kaitsekihi püsivuse parandamiseks katsetati nii korpuse pinna eelneva siledamaks lihvimise kui ka karestamisega. Kuigi karestamine aitas mõneti püsivusele kaasa, lõpptulemusena kiht ikkagi kahjustus lihtsasti. Seetõttu tuli kaitsekiht eemaldada ja katse ebaõnnestunuks lugeda.

Seadme projekteerimisel üritati tähelepanu pöörata ka niiskuskindlusele. Korpuse projekteerimise käigus vähendati selle sisse tehtavate aukude ehk vee sissepääsu kohtade arvu. Peale nuppude ja toitlüliti auke on korpuses ülejäänud avaused täidetud pistikute poolt, mis ei eelda seadme küljest eemaldamist või korpuse suhtes liikumist. Taolised pesad saab korpuse seest kinni katta ja seeläbi veekindlaks teha. Kõige suuremad ohud on avadega, millest tulevad nupud läbi, ja esipaneeli liitega. Esipaneeli ja korpuse ühenduspinnal saaks teha veekindlaks kasutades kummitihendeid, kuid selline lähenemine vajaks oluliselt tihedamaid poltliiteid kui hetkel kasutusel on, et vähendada kohti, kust korpuse deformeerides vesi saaks sisse imbuda. Nuppude veekindlaks tegemine eeldab, kas valmistootena müüdavaid veekindlate nuppude kasutamist või ise oma nuppudele tihendid luues. Mõlemad variandid vajavad seadme olulist ümberprojekteerimist seega antud lõputöö mahu sisse ei jõua.

Seadme esmasel proovikoostamisel selgus probleem paagutatud korpusega. Korpuse mõõtmed olid moonutatud võrreldes mudeliga: korpuse suurus oli pikemas teljes hinnanguliselt 2 mm pikem ja lühemas teljes ligikaudu 1 mm lühem kui ette nähtud. See tõi kaasa probleemi eraldi toodetud esi- ja tagapaneeli sobitamise ja korpuse külge. Varasemalt samalt tootjalt tellitud eelnev korpuse versioon oli samuti kergelt moonatud, kuid jäi aktsepteeritavasse suurusesse. Selle tekkinud probleemi tõttu tuli paneelide tootmisel käsitsi mudelitesse korrekture teha, et lõigatavad detailid sobiks korpusega.

Tellijal soov oli, et seade oleks võimalikult kompaktne ja kerge. Projekteeritava maajaamale määrati suuruse piiirang 500 x 309 mm ja massipiirang kuni 1 kg. Mõlemad tingimused said projekteerimise käigus täidetud. Reaalse maajaama suurus ilma antennideta on 300 x 150 x 35 mm ja täielikult komplekteeritud seadme mass on 811 g, millest aku mass on 156 g.

4.4.1 Mehaaniliste omaduste katsetamine

Korpuse projekteerimisel ei lähtunud tugevusanalüüsides, sest kombinatsioon keerukast konstruktsioonist, ostukomponentidest, erinevatest materjalidest ja liidetest ei annaks simuleerides piisavalt usaldusväärseid tulemusi. Seinapaksused ja muud struktuurielemendid leiti katsetamise teel ning korpuse tugevuse piisavuse tõestamiseks viidi läbi kukumiskatse. Seade komplekteeriti, lisati antennid ja aku ning veenduti seadme esimeses töö korrasolekus. Katse viidi läbi kukutades seade 1 m kõrguselt horisontaalasendis õhukese vaipkattega põrandale imiteerides võimalikku kukumist kõvemale pinnasele. Katse käigus tabas seade aku poolse alumise nurgaga põrandat ja selle tulemusena purunesid seadme sees kõikide komponentide fikstuuride liimliited. Pärast kukumist oli seadme korpus vigastusteta ja seade oli võimeline tööd jätkama. Katkenud liiteid analüüsides selgus, et liimitavad pinnad olid eelnevalt ebapiisavalt karestatud ja seetõttu liim ei olnud saanud kahte komponenti piisavalt omavahel liita. Teooria kinnitati järgmise katsega, kus võrreldi karestatud ja karestamata liimpindade ühendust. Karestamata detailid liimiti uuesti korpuse külge ja seejärel liide murti

käega. Seejärel karestati fikstuuride liimpinnad hoolsalt ja korrati katset – liidet ei suudetud murda ilma fikstuuere vigastamata.

Pärast seadme koostamist hinnati uuesti eelneva riskianalüüsi ohtusid, mis on välja toodud tabelis 4.4.2. Uues riskianalüüsis kasutati eelneva analüüsi riskimaatriksit (tabel 4.2.1). Seadme viimaseks versiooniks on vähendatud kõige suuremate ohtude riske märgatavalt. Tekitades võimaluse kasutada rakmeid ja mugavdades seadme käes hoidmist, vähendati oluliselt kukkumise tõenäosust. Rakendades kriitilistes kohtades tugevamaid materjale või tugevdusi, vähendati ka kukkumise mõju seadmele. Kasutades esipaneeli kinnitamiseks kõrge peaga polte (DIN 912) ja peites ülejäänud kriitilised nupud seadme kontuuridesse, vähendati suurema osa nuppude kogemata vajutamise tõenäosust, kuid kahjuks juhtkangi tahtmatu mõjutamise tõenäosus on jätkuvalt kõrge. Antennidele tekitati võimalus neid eemaldada või peita seadme kontuuride sisse, seeläbi nende kahjustumise tõenäosus on oluliselt vähenenud ja seadme kahjustamise ohtlikkus antennide lõhkumise tõttu on mõneti väiksem. Seadme ekraanile pannakse peale kaitsekile, mis aitab ekraanipeegeldusi vähendada, tõstes sellega ekraani vaadeldavust ja vähendab kergemate mehaaniliste vigastuste ohtu. Projekteerimisel võeti eesmärgiks vähendada potentsiaalseid kohti, kust niiskus saaks korpusesse pääseda. Paraku viimase versiooni ajaks on niiskus veel jätkuvalt ohuks seadme tööle.

Tabel 4.4.2. Seadme valmistamise järgne riskianalüüs

Ohutegur	Ohu iseloom	Riskiklass	Riski maandamine
Kukkumine	Kukkumine teravale objektile, korpuse purunemine	III	Korpuse otspinnad süsinikkuid plaatidest
	Kukkumine korpuse nurgale, korpuse purunemine	IV	Nurkadesse paigaldatud süsinikkiud tugevdused
	Kukkumine, sisemiste komponentide kinnituste purunemine	III	Kinnituste liimpinnad suure pindalaga
Hooletu käsitlemine	Nuppude/kangide vajutus võõrkehade poolt	III	Nupud peidetud korpuse kontuuri ja süviste sisse
	Antenni murdumine transpordil/käsitlemisel	II	Eemaldatavad antennid, süvised antennide transpordiasendiks
	Ekraani kahjustamine transpordil/käsitlemisel	III	Ekraanikaitse kile
Niiskus	Vee/kondensaadi sattumine elektroonikale kasutamisel/hoiustamisel niiskes keskkonnas	III	Võimalike vee sisenemispunktide vähendamine
Tootmine	Hooletus seadme koostamisel/hooldamisel, võõrkehade tingitud lühised elektriahelates	I	Ühendused ja trükkplaadid kaetud Plastikaitsekihiga

5. KULUD

Iga seadme projekteerimisel on oluliseks parameetriks selle hind ja eesmärgiks on enamasti toote odavamaks tegemine. Selline eesmärk võeti ka loodava maajaama projekteerimisel sihiks. Käesolevas peatükis lahatakse erinevate maajaama osiste hinna muutumist seadme arengu käigus.

5.1 Elektroonika kulud

Alates esimestest kontseptuaalsetest prototüüpidest kuni viimase versioonini, kulud maajaama elektroonika peale püsisid üsnagi samal tasemel. Projekteerimise käigus vahetati välja üksikuid komponente, kuid vahetused toimusid võrdeliste hindadega komponentide vahel. Sel põhjusel tuuakse välja vaid viimase maajaama versiooni elektroonika kulud. Tabelis 5.1.1 kategooria „Muu“ alla kuuluvad antennid, LED tuled ja Bluetooth moodul.

Tabel 5.1.1. Elektroonika kulud

Komponent	Hind
Alfa raadiod	51,40€
Ekraan	117,40€
Raspberry Pi 3	30,80€
Teensy 3.2	20,00€
Pololu pingeregulaator	14,95€
WiDV moodul	100,00€
Juhtmestus, ühendused ja lülitid	26,08€
Aku	26,00€
Muu	20,68€
Kokku	407,31€

5.2 Mehaanika kulud

Maajaama arengus toimusid põhilised hinnamuutused seadme mehaanika arengu käigus. Esimene valmis tehtud versioon, korpus v1, kujunes kõige odavamaks tema korpuse valmistamise tehnoloogia tõttu. FDM printitud korpuse printimine osutus soodsaimaks ja vastavalt projekteerimisele ei vajanud lisa elemente korpuse sulgemiseks ega hilisemat pinnatöötlust. Paraku kujunes loodud korpus ebasobivaks tema disaini vigade tõttu, mida on lähemalt lahatud peatükis 4.3.1.

Tabel 5.2.1. Plastik korpus v1

Komponent	Hind
Korpus v1	121,20€
3D printitud nupud	8,50€
Kinnitusvahendid	1,65€
Juhtkangid	23,90€
Kokku	155,25€

FDM printimise piirangute tõttu otsustati alates korpus v1.2 vahetada printimise tehnoloogia laserpaagutamise vastu. Tehnoloogiavahetus võimaldas projekteerida oluliselt keerulisemaid struktuure kuna piiranguid printimisel on vähem. Paraku osutus korpuse enda valmistamine märgatavalt kallimaks (121€ ja 183€) ja vajati hilisemat pinnatöötlust lihvimise ja värvimise näol. Samuti lisandus hinnale süsinikkiud plaadi hind, mida kasutati korpuse esipaneelina. Maskumuse tõusu aitas mõneti leevendada juhtimissüsteemi lihtsustamine.

Tabel 5.2.2. Plastik korpus v1.3

Komponent	Hind
Korpus v1.3	183,50€
3D prinditud nupud	12,50€
Juhtkangid	11,95€
Süsinikkiud plaat	20,00€
Kinnitusvahendid	11,44€
Muu	5,00€
Kokku	244,39€

Korpuse viimase versiooni v1.6 põhiline eesmärk oli langetada korpuse hinda. Paagutataval korpuse detailil eemaldati tagasein ja see asendati süsinikkiust lehtmaterjaliga. Seeläbi langes korpuse detaili tootmise hind 78€ võrra, kuid hinnale lisandus lehtmaterjali ja eraldi freesitavate komponentide hind. Kokkuvõttes langetati maajaama hinda võrreldes v1.3-ga ligi 50€ ja saavutati koormustele vastupidavam korpus.

Tabel 5.2.3. Plastik korpus v1.6

Komponent	Hind
Korpus 1.6	111,59€
3D prinditud nupud	12,50€
Juhtkangid	11,95€
Süsinikkiud plaat	32,85€
Kinnitusvahendid	17,71€
Muu	8,00€
Kokku	194,60€

5.3 Kokku

Ettevõtte seadme omahind kujuneb läbi kolme teguri: kulud elektroonikale, mehaanikale ja tootmisele. Seadme valmistamise ajakulu on hinnatud tabelis 5.3.1. Olenemata tööde iseloomude ja keerukuste erinevusest, antud kulude analüüsis määratakse seadme valmistamise tööjõukulu hinnaks 25 €/tunnis. Kokku osutub tööjõukuluks 300€. Maajaama viimase versiooni omahinnaks ettevõttele kujunes kokku 901,91€. Projekteerimisele kulunud töötunde omahinna sisse ei ole arvestatud.

Tabel 5.3.1. Ajakulu maajaama valmistamisele

Ülesanne	Ajakulu
Juhtmestuse ja pistikute loomine	3 tundi
Korpuse viimistlemine ja värvimine	4 tundi
Kinnituste ja paneelide valmistamine	2 tundi
Komplekteerimine	3 tundi
Kokku	12 tundi

Tabel 5.3.2. Maajaama hinna kujunemine

Komponent	Hind
Elektroonika	407,31€
Mehaanika	194,6€
Tööjõukulu	300€
Kokku	901,91€

6. EDASISED ARENDUSED

Käesoleva töö eesmärgiks oli luua nõuetele vastav maajaama prototüüp. Viimane versioon, mis töö kirjutamise ajaks valmistati oli v1.6, kuid antud versiooniga arendustöö veel ei lõppe. Edaspidisteks arendustöödeks on jäänud lisafunktsionaalsused või -komponendid, mis aitaksid lihtsustada kasutaja tööd või vähendada riskianalüüsis leitud ohtusid, kuid need pole seadme tööks hädavajalikud. Käesolevas peatükis arutatavad funktsioonid on enamasti veel ideede ja kavandite tasemel ehk tehniliste parameetriteni jõutud pole.

6.1 Mehaanika

Mehaanilistest funktsionaalsustest on kõige suurem puudus päikesesirmist ekraani ümber. Päikesepaistelise ilma korral muutub ekraan vaadeldamatuks, seda ka peegeldusvastase kaitsekilega. Kompaktse lahendusena saab päikesesirmi ühildada ekraani kaitseplaadiga. Maajaama transportides on kaitseplaat vastu esipaneeli, kattes ekraani täielikult. Seadet kasutama hakates tõstetakse kaitseplaat esipaneeli suhtes risti ja sätitakse päikesesirmi külgmised elemendid toetama kaitseplaadi püsti püsimist. Sellise lähenemisega tagatakse mitme funktsiooni täitmine minimaalsete komponentidega.

Riskianalüüsis olid kõige ohtlikumad stsenaariumid seotud maajaama kukumisega. Lihtne viis kukumisi ära hoida, on kasutada seadme küljes rakmeid. Rakmed planeeritakse esmases variandis ühe nööri, kaelapaela stiilis, mis läheb üle kasutaja õlgade ja seejärel kinnitub karabiinidega maajaama korpuse nurkades olevate D-aasade külge. Kui selline lähenemine osutub liiga ebastabiilseks, tuleb arendada keerulisem variant, mis seoks maajaama kogu ülakeha külge.

Korpuse projekteerimisel jäi lahendamata niiskuskindluse tagamine. Probleemi lahendamiseks saab kasutada ostutoodetena pakutavaid veekindlaid pistikuid ja nuppe. Arenduse käigus leitud ostetud veekindlad nupud osutusid varasemalt sobimatuks. Lahendusena tuleb veekindlad nupud projekteerida või jätkata otsinguid valmislahenduste osas.

Korpuse v1.6 juures katsetatud nakkuvale pinnakattele on vaja leida sobivam alternatiiv. Selleks võib kasutada liimitavaid kummikatteid.

6.2 Elektroonika

Maajaam töötab akutoitel, kuid töö kirjutamise seisuga polnud võimalust jälgida aku täituvuse seis. Kuigi tehniline võimekus on maajaamas funktsiooni täitmiseks olemas Teensy arendusplaadi ja kahevärvilise LED tule näol, siis seda pole veel rakendatud. Aku monitoorimiseks mõõdetakse Teensy analoogsisendi kaudu aku

pinget ja kasutatav pingevahemik jaotatakse viide ossa. Kasutajale antakse aku seisust teada erinevate LED tuledes valgustamiste ja vilgutamiste kombinatsioonidega, millest iga võimalus vastab ühele konkreetsele aku täituvuse tasemele. Näiteks roheline püsiv tuli tähistab aku maksimaalset täituvust ja pidevalt vilkuv punane tuli tähistab kriitiliselt madalat aku taset.

Laiendades aku monitoorimise funktsionaalsust edasi, saab luua akule kaitsemehhanismi, kus seade lülitatakse liiga tühja aku puhul automaatselt välja. Selle eesmärk oleks hoiduda aku kahjustumisest liiga suure tühjenemise tagajärjel. Seadmesse valitud Pololu pingeregulaatoril on eraldi „Enable“ viik, mis võimaldab kasutada nõ ooterežiimi, kus ülejäänud ahelat ei toideta ja pingeregulaator on minimaalse sisetarbimisega. Sellise funktsionaalsuse jaoks on vaja ühendada vaid üks Teensy digitaalväljund antud viiguga ja defineerida juurde kuues aku täituvuse tase, kus seade lülitatakse ooterežiimi.

Kokkuvõte

Antud bakalaureusetöö eesmärk oli projekteerida mehitamata õhusõiduki süsteemile kompaktne käes hoitava maajaama prototüüp. Töös uuritakse turul pakutavaid seadmeid, kirjeldatakse loodava maajaama riistvaralist arengut, seadme hinna kujunemist ja edasisi planeeritud arendustöid.

Maajaama olulisimaks osiseks on selle elektroonika. Loodava maajaama sideseadmed võeti üle ettevõtte poolse sisendina, kuid seadme toimimiseks tuli luua juhtimise süsteem ja leida sobiv viis seadme toitmiseks. Juhtimise süsteemi tarbeks loodi erinevaid trükkplaatide ja katsetati nende erinevate konfiguratsioonidega.

Kõige rohkem tähelepanu pöörati maajaama korpuse projekteerimisele. Korpuse arenduses töötati läbi kokku seitse erinevat versiooni, millest viiega tutvutakse lähemalt. Maajaama esmase visualiseerimise järel tehti seadmele riskianalüüs, millest edasisel projekteerimisel lähtuti. Korpuse prototüüpimisel katsetati kahte erinevat 3D printimise tehnoloogiat (FDM ja laserpaagutus) ja tutvuti nende eripärade ja puudustega.

Esimene valmis tehtud korpus toodeti FDM printimisega ABS plastikust. Selline korpus oli kiiresti komplekteeritav ja ei vajanud olulist järeltöötlust. Puuduseks kujunes korpuse nõrkus printitud filamendi ristisuunas, mille tõttu paljud liited ja keermed purunesid. Samuti tulenevalt FDM printimise tehnoloogilisest eripärast, sai korpuse otspinnad teha vaid tasapinnalised, mis ei võimaldanud seadet mugavalt käes hoida. Edasistes korpuse versioonides kasutati laserpaagutamist, mis kõrvaldas eelnevad puudused ja võimaldas projekteerida keerulisemaid sisestruktuure. Viimastes korpuse versioonides pöörati rohkem tähelepanu algele riskianalüüsile ja korpuse otspinnad ning nurgad tugevdati süsinikkiud plaatidega suurendamaks vastupidavust erinevatele koormusele.

Kokkuvõttes täideti kõik tellija poolsed nõudmised seadme funktsionaalsusele ja võimekusele. Maajaam sai nõutavast kompaktsem, kergem, suurema tööaja ning sideulatusega, samuti toote omahind ettevõttele kujunes oluliselt odavamaks turul pakutavate sarnaste parameetritega seadmetest. Vaatamata nõudmiste täitmisele, maajaama projekteerimine jätkub ka pärast käesoleva töö kirjutamist.

Edasises arendustöös tuleb seadmele valmistada rakmed ja päikesesirm ekraanile, mis suudaks seadme transportimisel pakkuda ka esmast kaitset mehaaniliste vigastuste eest. Seade oma viimases arenguastmes töötab akutoitel, kuid funktsioon aku täituvuse kuvamiseks veel puudub. Kasutades juba seadmes olevat Teensy arendusplaati, on edasistes plaanides valmis teha aku monitoorimise ja aku liigse tühjenemise kaitse funktsioonid.

Summary

The purpose of this thesis was to develop a prototype for a compact handheld ground station for an unmanned aerial vehicle. Topics discussed in the thesis are market research for similar devices, hardware development, price formation and further planned developments for the device.

The most important part of the ground station is its electronics. The communication systems were taken as a company input but for the device to work, control systems for the aerial vehicle were needed to be designed and the power distribution systems needed to be chosen.

Most of the development attention was given to the ground station's housing. The housing had a total of seven different versions during its development, five of them are discussed in detail. After the initial visualizing of the whole device, a risk analysis was performed. In the further development, the risk analysis was constantly referred to while making changes. In the development of the housing, there were two different 3D printing technologies tested (FDM – fused deposition modeling and selective laser sintering) and their properties and drawbacks were explored.

The first housing produced was made by FDM printing from ABS plastic. This kind of a housing was quick to assemble and did not require any significant surface treatment. The main drawback was the fragility of inner structures when there was any perpendicular force applied to the filament fibers. Due to the limitations of FDM printing, the main faces needed to be flat thus making any extended ground station usage uncomfortable. In the later development, the housing was produced by selective laser sintering, which didn't have the drawbacks of the previous technology and allowed for a more complex inner structure. In the last versions, there was increased attention given to the initial risk analysis and carbon fibre was used on the main faces and corners of the housing thus making it more resilient to any stress.

In the end result, all of the demands of functionality and performance by the client were met. The ground station was smaller, lighter, had a longer work time and communications range than requested. The end price for the company was substantially lower than similar devices on the market. Although the requirements were satisfied, the development of the ground station will continue after this thesis.

In the further development, there is a need for a harness and a screen shade, which could double as a screen protector while transporting the ground station. The ground station is battery operated but there is no functionality to display the battery level to the user. Using the Teensy development board, it is planned to develop systems for battery level monitoring and low voltage protection.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

1. Yuneec ST 16 edasimüüja. <https://www.droon.ee/product/yuneec-st16-personal-ground-station-eu/> (26.04.2017).
2. Yuneec ST 16 tootja koduleht. https://www.yuneec.com/en_GB/accessories/remote-controllers/st16/overview.html (26.04.2017).
3. peRISKop kodulehekülg. <http://www.horus.hu/products/ground-control-stations/> (28.04.2017).
4. IP klassifikatsioonid. <http://data.oomipood.ee/failid/IP%20klassifikatsioonid.pdf> (23.05.2017).
5. WiDV tootja leht. http://docs.wirelessdv.com/en/index.php/Main_Page (20.05.2017).
6. Raspberry Pi 3 model B tootja leht. <https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-3-model-b/> (20.05.2017).
7. Raspberry Pi Zero tootja leht. <https://www.raspberrypi.org/products/pi-zero/> (20.05.2017).
8. Alfa raadiote tootja leht. https://www.alfa.com.tw/products_show.php?pc=67&ps=241 (20.05.2017).
9. Teensy 3.2 tootja infoleht. <https://www.pjrc.com/teensy/teensy31.html> (17.05.2017).
10. Panasonic NCR18650 edasimüüja infoleht. <https://www.orbtronic.com/batteries-chargers/panasonic-3400mah-18650-li-ion-battery-cell-ncr18650b> (21.05.2017).
11. Turnigy 15A UBEC tootja leht. https://hobbyking.com/en_us/turnigy-8-15a-ubec-for-lipoly.html (22.05.2017).
12. Pololu pingeregulaatori tootja leht. <https://www.pololu.com/product/2851/specs> (12.05.2017).
13. Nõuanded FDM printimisel. <https://www.fictiv.com/hwg/fabricate/recommended-wall-thickness-for-3d-printing> (18.05.2017).
14. Laserpaagutatava plastiku tootja infoleht. <https://www.sculpteo.com/en/materials/plastic-material/> (19.05.2017).
15. FDM prinditava ABS plastiku infoleht. <http://www.primafilaments.com/product/primaselect-abs/> (19.05.2017).
16. Süsinikkiu omadused. <http://www.christinedemerchant.com/carboncharacteristics.html> (19.05.2017).
17. Metakrülaat liimi infoleht. <http://www.easycomposites.co.uk/#!/resin-gel-silicone-adhesive/structural-adhesives/vm100-black-methyl-methacrylate-adhesive.html> (19.05.2017).
18. Plastidip infoleht. http://www.plastidip.net.au/resources/webdav/pdf/PlastiDip_UV%20TechDataSheet%20Bc.pdf (25.05.2017)

LISAD

Lisa 1 E-kiri Periskop-ilt

Hello Kristjan,

Thanks for your kind enquiry.

The wearable control tray is manufactured in two major different versions. One with a single 8" tablet inside, the other with a 10" transfective video screen in the base and a fold-up 8" telemetry head. Both versions can carry either PC or Android type hw for the telemetry station.

Both versions would work for your setup, the main question is the GCS sw you're going to use, whether it's the Android based Tower (DroidPlanner), QGCS, etc. or UgCS, MissionPlanner, etc. for the PC.

The wearable total weight of these systems depends on whether they're the flat or the fold-up version, and the use of an external RF box. The ideal position for the operator is never the ideal place for your antennas, so we usually separate these modules for anything above visual LOS ranges. Because we don't ever extend antenna leads to avoid signal attenuation, we install all RF modules in a rugged external RF box, which you can mount on a tripod, pole, antenna tracker or even just your car roof with a single field cable linking it to the control tray. This way only low frequency analogue and digital signals should travel through any length of cable.

Even if we install all RF modules in the control tray for shorter ranges, the total weight of the controller never exceeds 2.5kg in the case of fold-up versions and 2kg with the flat types. This is a perfectly comfortable wear on a crossover type harness for hours on end, but it even works with a simple neckstrap. When using a cross type harness, the balance of the tray and the folding design of those tightly pulled hanging brackets also lets you fold up the controller on your breast flat during tactical situations, if we also install fully folding antennas on the unit. It will stay there out of your way.

All of our units are designed with practical portability in mind, so they all fit into rugged Peli enclosures, in this case a Peli 1400 type. Some clients ask for our dual field charger for the compartment underneath the tray, but you would probably want either the RF box and accessories mounted under it, or the tray with the built-in RF modules and ample space underneath for other system accessories. In all cases the total GCS package weight with either a dual field charger or the RF box as the lower deck will be under 6kg.

The minimum battery endurance of all our systems is five hours, but most of them can take at least eight hours worth of batteries without issues. We also manufacture compact non-stop field power pack systems with rugged foldable solar arrays and intelligent power management.

We mostly use Pixhawk with PX4 and QGCS at the moment, but our clients use at least a dozen different combinations including MicroPilot and DJI gear, too. Live video feed can be directly displayed on the separate 10" transfective screen in the case of fold-up units, but it can be overlaid in most current GCS sw packages through either direct IP or using UVC frame grabbers. If your live video feed needs to be extremely low latency for FPV flights, or it's for instant visual feedback, I recommend the fold-up versions with a separate video screen for obvious reasons.

We install dozens of different type RF subsystems in our mission controls from the simple RC/FPV grade hybrid analogue-digital bandplans up to the seriously pricey COFDM and MIMO type digital single links. For your particular purposes a unified RC/telemetry modem type TBS Crossfire or DragonLink3 would solve all controls, and either a traditional 5.8GHz analogue SD or a 2.4GHz HD video would take care of your video downlink. Secondary video downlink is easy with analogue SD video, just a second RX and a screen, but real encryption is only possible with 2.4GHz HD and high-end digital video links.

We can legally put CE markings on most of our stations, but not on the TX type RF modules, because they are mostly manufactured by other companies, and practically everything that works at any decent distance for UAVs is illegal in Europe. As the old American ham motto goes: ...if it's FCC legal, it barely works... :-)

The on-board setup mainly depends on your requirements, but we usually supply both ends of the RF links, matched, tuned and tested with their antennas, so it's plug&play at your end as much as possible. Normally with the above hybrid bandplan you would only need a TBS Crossfire or DragonLink3 RX/TX on-board module and a video TX. The Crossfire needs two antennas, the video TX just one, but as close as possible to the TX module. The rest of the electronic setup is up to you, but we can help with most issues you may bump into during installation.

The price of these systems always depends on the technical content and the production numbers, but the simplest flat type hybrid RF controller trays are around 4500 Euros, fold-ups at about 5100 and HD video versions at 7500-8500. Larger production numbers can push the costs down seriously, so even five units can come at around 10% cheaper.

Please, let me know if you decide to work with us on your GCS, because I will send you our initial project questionnaire/checklist, which would guide our first steps through this process. I've also attached a few images of our latest full HD video fold-up station, which we've just delivered to a customer around the middle of March. It has a nice range of 4-5km in open areas, but we can also supply a booster up to 10km easy.

Take care,
Geza

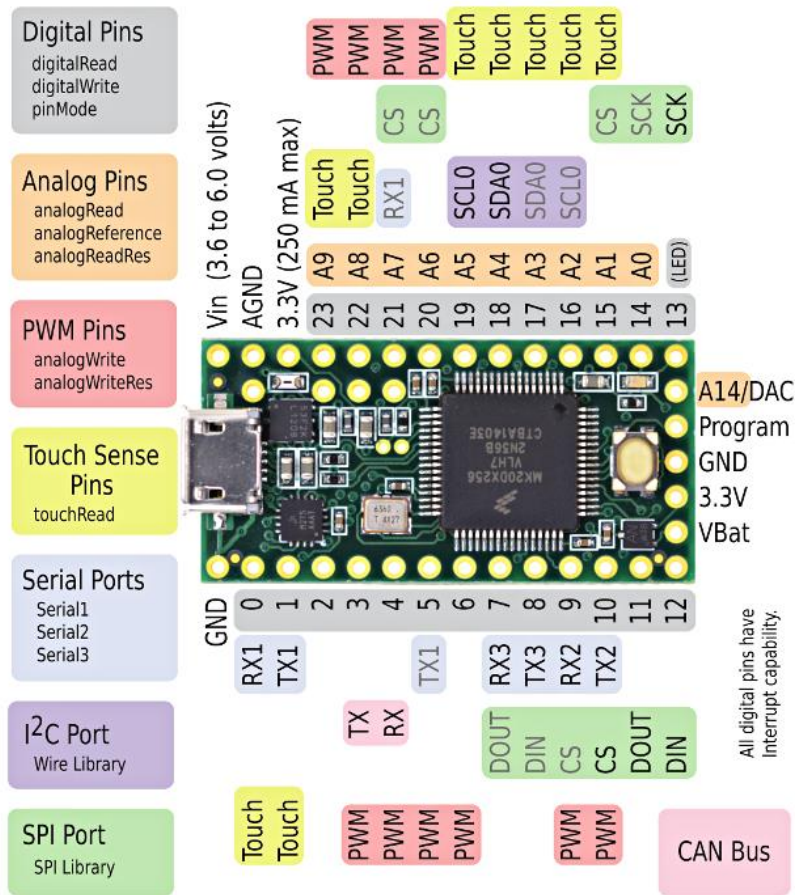
Geza Nemes
Floyd & Harris IT Ltd.
Ulloi ut 149.
1098 Budapest
Hungary
+36209341371
www.periskop.hu

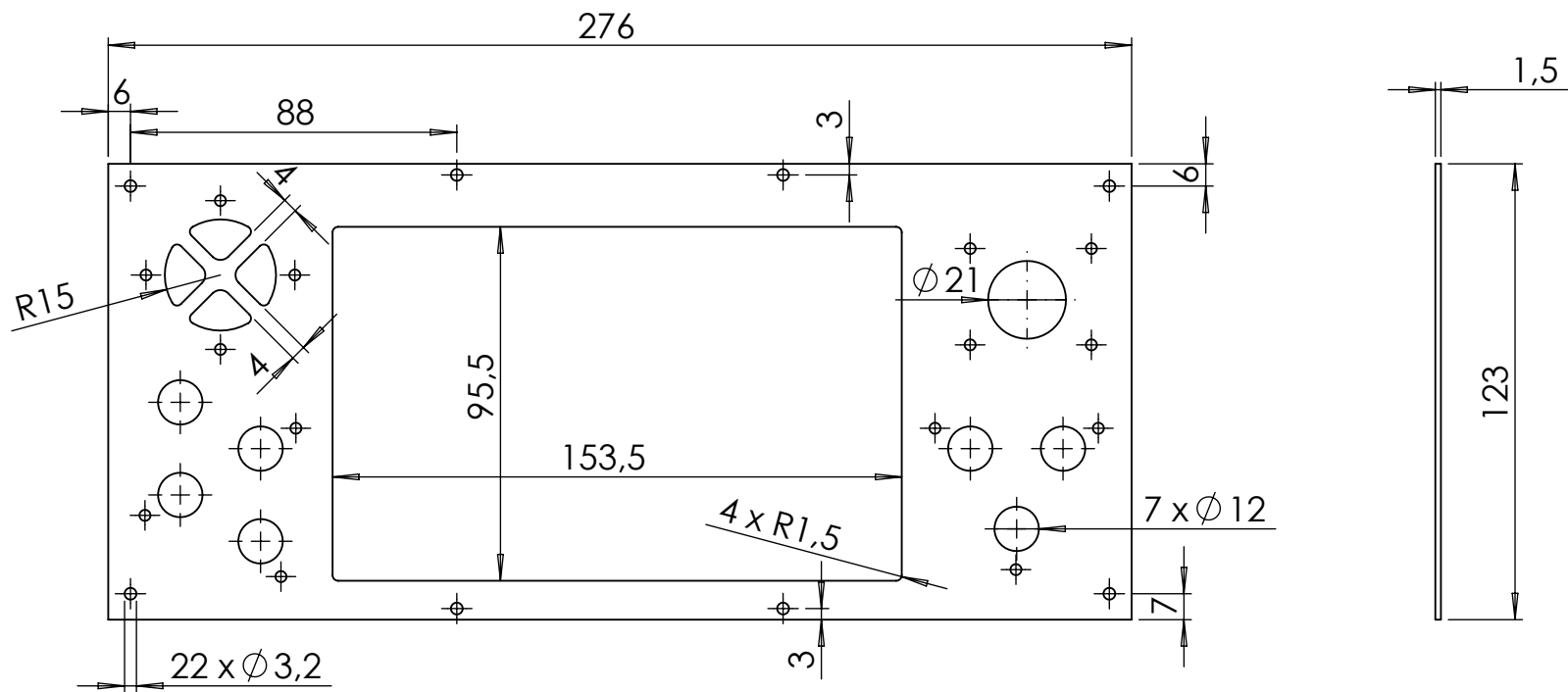
Lisa 2 Teensy kood

```
void setup() {
    pinMode(0, INPUT_PULLUP);
    pinMode(1, INPUT_PULLUP);
    pinMode(2, INPUT_PULLUP);
    pinMode(3, INPUT_PULLUP);
    pinMode(4, INPUT_PULLUP);
    pinMode(5, INPUT_PULLUP);
    pinMode(6, INPUT_PULLUP);
    pinMode(7, INPUT_PULLUP);
    pinMode(9, INPUT_PULLUP);
    pinMode(10, INPUT_PULLUP);
    pinMode(11, INPUT_PULLUP);
    pinMode(16, INPUT_PULLUP);
    pinMode(22, INPUT_PULLUP);
    pinMode(23, INPUT_PULLUP);
}

void loop() {
    // read analog inputs and set X-Y position
    Joystick.X(analogRead(3));
    Joystick.Y(analogRead(4));
    Joystick.sliderLeft(analogRead(1));
    // read the digital inputs and set the buttons
    Joystick.button(1, !digitalRead(0));
    Joystick.button(2, !digitalRead(1));
    Joystick.button(3, !digitalRead(2));
    Joystick.button(4, !digitalRead(3));
    Joystick.button(5, !digitalRead(4));
    Joystick.button(6, !digitalRead(5));
    Joystick.button(7, !digitalRead(6));
    Joystick.button(8, !digitalRead(7));
    Joystick.button(9, !digitalRead(9));
    Joystick.button(10, !digitalRead(10));
    Joystick.button(11, !digitalRead(11));
    Joystick.button(12, !digitalRead(16));
    Joystick.button(13, !digitalRead(22));
    Joystick.button(14, !digitalRead(23));
    // a brief delay, so this runs 20 times per second
    delay(50)
}
```

Lisa 3 Teensy 3.2 arendusplaat [9]

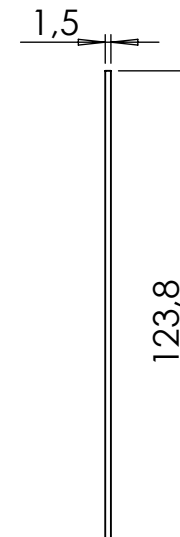
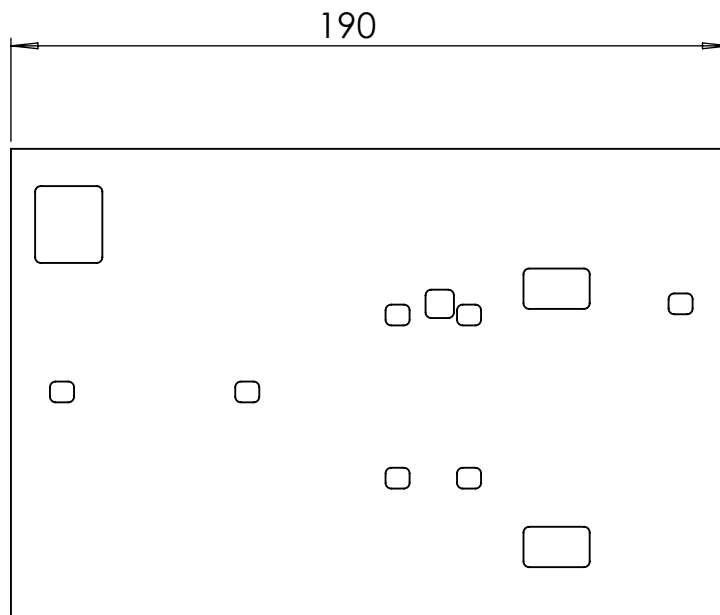




Märkimata raadiused 3 mm

Võib kasutada lõikelehena

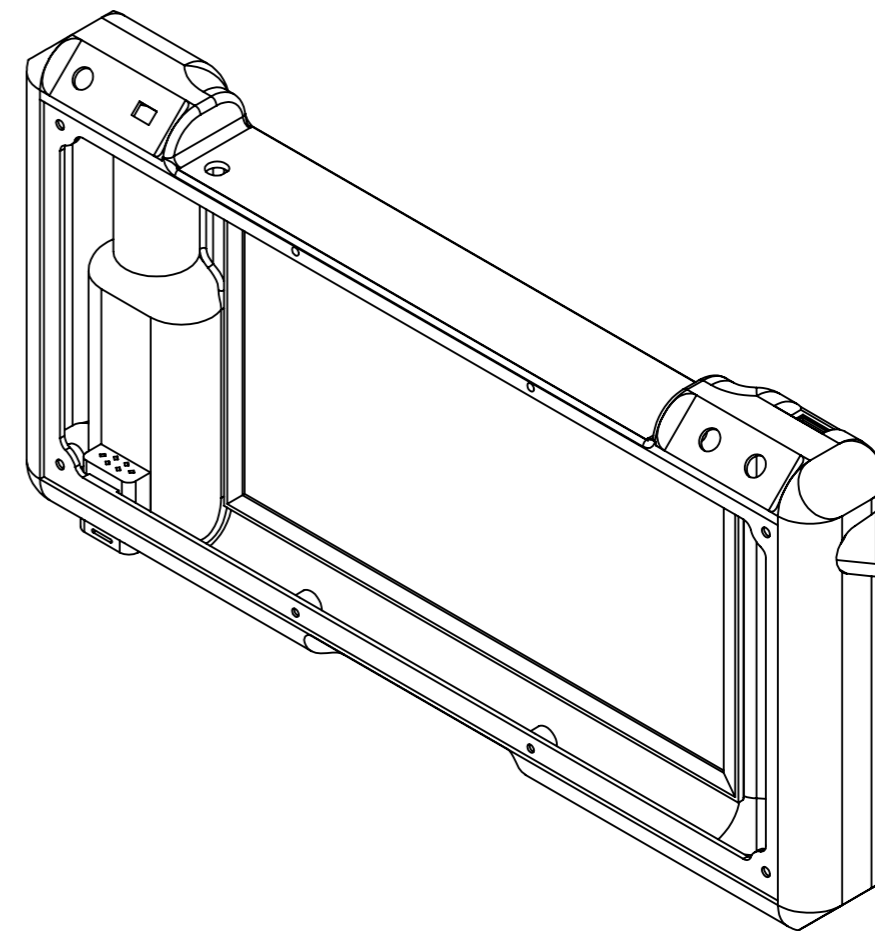
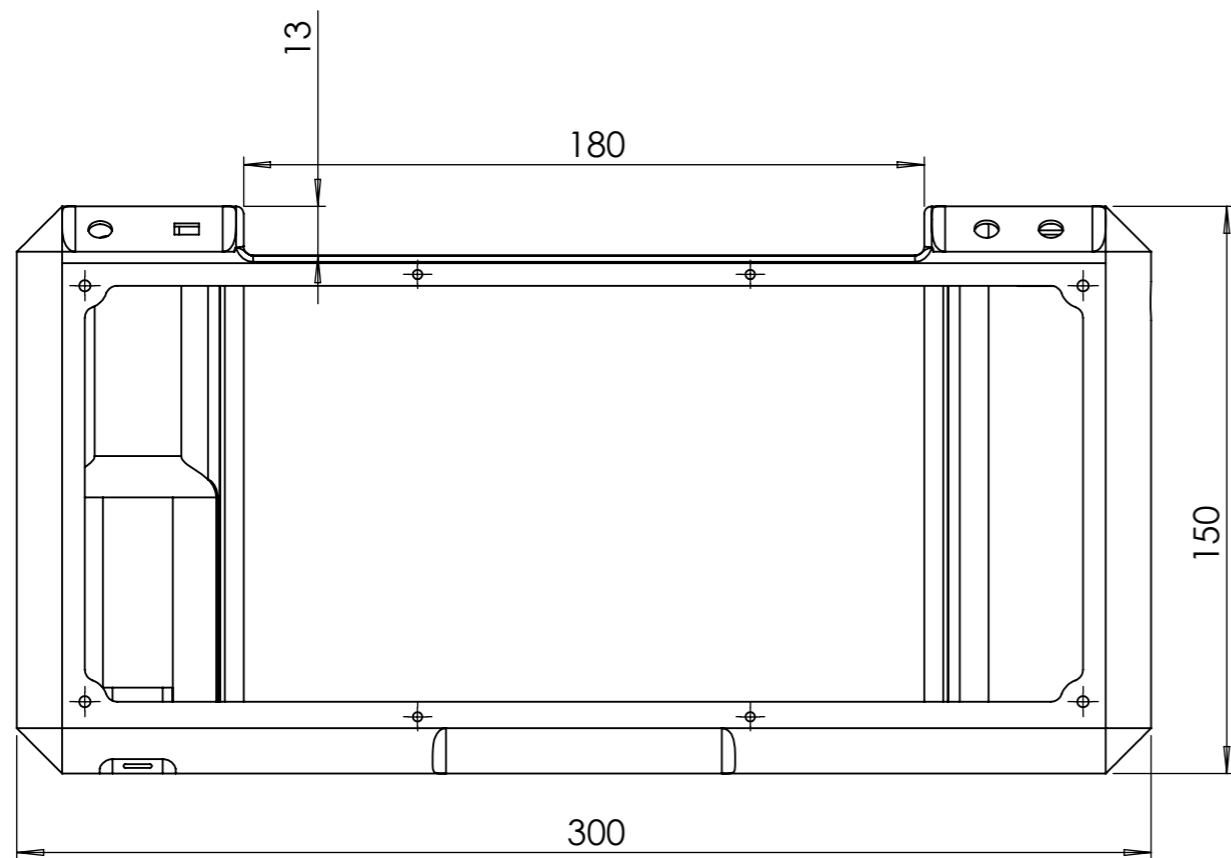
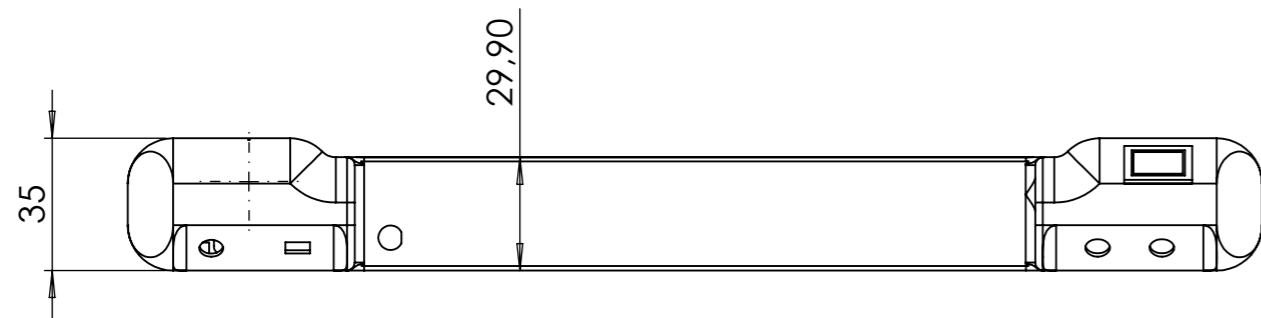
TEOSTAS:	Kristjan Möller	Esipaneel	
KONTROLLIS:	Martin Tigasson		
KINNITAS:			
OÜ ARL TechSystems		MATERJAL:	Süsinikkiud
WEIGHT: 52,6 g		SCALE:1:2	SHEET 1 OF 1



Märkimata raadiused 1,5 mm

Võib kasutada lõikelehena

TEOSTAS:		Kristjan Möller	<h1>Tagapaneel</h1>
KONTROLLIS:		Martin Tigasson	
KINNITAS:			
OÜ ARL TechSystems		MATERJAL:	Süsinikkiud
WEIGHT: 69,2 g		SCALE:1:2	SHEET 1 OF 1



TEOSTAS: Kristjan Möller		Plastik korpus v1.6
KONTROLLIS:		
KINNITAS:		
OÜ ARL TechSystems		MATERJAL: PA 2200 Nailon
WEIGHT:	SCALE:1:2	SHEET 1 OF 1

