



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL

INSENERITEADUSKOND

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

## Allveedrooni ülekandepoi elektroonika ja süsteemid

Communication buoy electronics and systems for submarine drone  
BAKALAUREUSETÖÖ

Üliõpilane: Tõnis Erbsen  
/nimi/

Üliõpilaskood: 179336EAAB

Juhendaja: Martin Jaanus, vanemlektor  
/nimi, amet/

Tallinn, 2020

(Tiitellehe pöördel)

## AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

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

“.....” ..... 201.....

Autor: .....

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

“.....” ..... 201.....

Juhendaja: .....

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

“.....” .....201... .

Kaitsmiskomisjoni esimees .....

/ nimi ja allkiri /

# LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE

*Autor:* Tõnis Erbsen

*Lõputöö liik:* Bakalaureusetöö

*Töö pealkiri:* Allveedrooni ülekandepoi elektroonika ja süsteemid

*Kuupäev:* 19.05.2020

*47 lk (lõputöö lehekülgede arv koos lisadega)*

*Ülikool:* Tallinna Tehnikaülikool

*Teaduskond:* Inseneriteaduskond

*Instituut:* Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

*Töö juhendaja(d):* Vanemlektor Martin Jaanus

*Töö konsultant (konsultandid):*

*Sisu kirjeldus:*

Töö eesmärgiks oli disainida ja luua allveedroonile abistav veepealne saatja, et võimaldada automatsiooni. Saatja, ehk ülekandepoi ülesannete hulka kuuluvad, kommunikatsioon, navigatsioon, ja sidekaabli optimeerimine. Samuti on ülekandepoil võimekus turva meetmeteks ning nii iseseisvaks liikumiseks kui kaugjuhtimiseks.

Töö valmis koostöös ettevõttega Unsinkable Robotics OÜ

*Märksõnad:* Bakalaureusetöö, Robotika, ROV, Automatiseerimine, Kommunikatsioon, Poi, Navigatsioon,

## ABSTRACT

*Author:* Tõnis Erbsen

*Type of the work:* Bachelor Thesis

*Title:* communication buoy electronics and systems for submarine drone

*Date:* 19.05.2020

*47 pages (the number of thesis pages  
including appendices)*

*University:* Tallinn University of Technology

*School:* School of Engineering

*Department:* Department of Electrical Power Engineering and Mechatronics

*Supervisor(s) of the thesis:* Martin Jaanus

*Consultant(s):*

*Abstract:*

Goal of this work was to design and create a companion for an underwater drone to enable automation. Companion in a form of a communication buoy is capable of aiding in communication, navigation, and optimisation of the cable connection. It also has capability for security measures and both independent and remote operated movement.

This work was made with the support of company named Unsinkable Robotics OÜ

*Keywords:* Robotics, Drone, ROV, automation, communication, buoy, navigation, bachelor's degree

# LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Lõputöö teema:	<b>Allveedrooni ülekandepoi elektroonika ja süsteemid</b>
Lõputöö teema inglise keeles:	<b>Communication buoy electronics and systems for submarine drone</b>
Üliõpilane:	<b>Tõnis Erbsen 179336EAAB</b>
Eriala:	<b>Mehhatroonika</b>
Lõputöö liik:	<b>bakalaureusetöö</b>
Lõputöö juhendaja:	<b>Martin Jaanus</b>
Lõputöö ülesande kehtivusaeg:	<b>01.03.2020 – 31.08.2020</b>
Lõputöö esitamise tähtaeg:	<b>20.05.2020</b>

---

Üliõpilane (allkiri)

---

Juhendaja (allkiri)

---

Õppekava juht (allkiri)

## **1. Teema põhjendus**

Tehnoloogia ja robotika on arenemas ja laienemas et täita ülesandeid järjest ekstreemsemates tingimustes, seal hulgas näiteks vee all. Kuna vee all konventsionaalsed elektromagnetsignaalid ei levi ja navigeerimine on raskendatud on vaja luua vahelüli vee all tegutseva roboti või ROV-i ja välismaailma vahel.

## **2. Töö eesmärk**

Töö eesmärgiks on luua allveedroonile sobilik vee peal ujuv side- ja tugimajakas.

## **3. Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:**

- 1) Millised on allveerobotikat piiravad ja takistavad tegurid.
- 2) Kuidas saaks ühendus veepinnaga aidata allveeroboteid oma eesmärke saavutada.
- 3) Kommunikatsioonmajaka disainimine ja prototüübi ehituse kirjeldus.

## **4. Lähteandmed**

Antud projekt on algatatud koostöös allveerobotika idufirma Unsincabel Robotics OÜ-ga mis omakorda teeb koostööd merendus ja laevandus ettevõtete ning elukutseliste tuukritega. Põhinen oma töös neilt pärinevale kogemusele ja vajadusele ning antud valdkonda puudutavale kirjandusele.

## **5. Uurimismeetodid**

Tulemuseni jõutakse läbi disaini modelleerimise ja katsetamise. Selleks kasutatakse 3D- CAD ja arvutustarkvara ning ligipääsu nii isiklikele kui ka Tallinna Tehnikaülikoolile kuuluvatele töökodadele.

## **6. Graafiline osa**

Elektriskeemid ja konstruktsiooni joonised.

## **7. Töö struktuur**

EESSÕNA

LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU

## SISSEJUHATUS

### 1.Masinlikud lahendused

- 1.1 Unsinkable Robotics
- 1.2 Ülekandepoi ülesanded
- 1.3 Iseseisev sonaritöö

### 2.Pool ja pooli mootor

- 2.1 Pooli mootori leidmine
- 2.2 Pöörlemine
- 2.3 Poolist tulenev täpsus
- 2.4 Sonari põhine positsioneerimine

### 3.Aku ja elektrisüsteemid

- 3.1 Elektroonika
- 3.2 Aku ja töö aeg

### 4.Füüsiline disain

- 4.1 Karp elektroonika jaoks
- 4.2 Ujuk
- 4.3 Liikumine ja manööverdamine
- 4.4 Kaitseraam

## KOKKUVÕTE

## SUMMARY

## KASUTATUD KIRJANDUS

## KOKKUVÕTE

## KASUTATUD KIRJANDUS

## LISAD

## 8. Kasutatud kirjanduse allikad

[1] Blue Robotics Inc, <https://bluerobotics.com/>, 2020.

[2] SOLitude Lake Management, „Woodlake Crossing - 3D,“  
<https://www.solitudelakemanagement.com/>, 2020.

[3] Mption Dynamics, <https://www.motiondynamics.com.au/worm-drive-motor-12v-70w-45-65-rpm-6-35nm-torque.html>, 2020.

[4] Moflon Technology, „Slip Rings - Standard In Stock & Custom Solutions - MOFLON,“  
<https://www.moflon.com/slip-ring/>, 2020.

## **9. Lõputöö konsultandid**

Unsinkable Robotics arendusmeeskond.

## **10. Töö etapid ja ajakava**

20.01.2020	Probleemi uurimine ja ideede kogumine.
18.02.2020	Prototüübi esimese disaini kooskõlastamine.
03.03.2020	Lõputöö vormistamine kooli jaoks ja juhendaja leidmine.
16.03.2020	Disaini viimistlemine ja tükkide tellimine.
06.04.2020	Prototüübi ehitusprotsessi algus.
20.04.2020	Ehitusprotsesi lõpp. Katsetamise ja analüüsi algus.
27.04.2020	Lõputöö kirjaliku osa koostamine.
11.05.2020	Lõputöö esimese vormi esitamine juhendajale. Paranduste sisse viimine.
20.05.2020	Esitan lõputöö lõplikku vormi.



# SISUKORD

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE.....	3
ABSTRACT.....	4
LÕPUTÖÖ ÜLESANNE .....	5
EESSÕNA.....	11
LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU.....	12
SISSEJUHATUS .....	13
1. Masinlikud lahendused .....	15
1.1 Unsinkable Robotics.....	15
1.2 Ülekandepoi ülesanded .....	16
1.3 Iseseisev sonaritöö.....	17
2. Pool ja pooli mootor.....	19
2.1 Pooli mootori leidmine .....	19
2.1.1 Arvutus pooli mootori leidmiseks .....	20
2.2 Pöörlemine.....	24
2.3 Poolist tulenev täpsus.....	25
2.3.1 Ühenduskaabli vajalik pikkus .....	25
2.3.2 Allveedrooni asukoha täpsus .....	26
2.4 Sonari põhine positsioneerimine .....	27
3. Aku ja elektrisüsteemid.....	29
3.1 Elektroonika .....	29
3.2 Aku ja töö aeg .....	30
3.2.1 Akudest üldisemalt.....	31
3.2.2 Akud signaalmajaka jaoks .....	31
4. Füüsiline disain .....	34

4.1 Karp elektroonika jaoks .....	34
4.2 Ujuk .....	35
4.3 Liikumine ja manööverdamine .....	37
4.4 Kaitseraam .....	37
KOKKUVÕTE .....	39
SUMMARY .....	41
KASUTATUD KIRJANDUS .....	43

## EESSÕNA

Käesoleva lõputöö teema ja ülesanne sündis koostööst Unsinkable Robotics OÜ meeskonnaga selgest vajadusest ja huvist allveerobotika vastu. Prototüübi ehitusele eelnes põhjalik teoreetiline analüüs parima lahenduse välja selgitamiseks

Sooviksin ühtlasi tänada koostöö eest Unsincable Robotics meeskonda, kuhu selle töö sooritamise jooksul kuulusid Ats Kaldmaa, Marek Salurand, Natali Bergman, Kristo Toots, Marek Salurand, Harri Puskar ja Unsinkable Robotics OÜ CEO Timmu Tollimägi.

Samuti sooviksin tänada Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituuti, mis eraldas meile ruumi oma töökojas.

Sooviksin tänada Tallinna Tehnikaülikooli Robotiklubi ja selle liikmeid toetava suhtumise ja nõuannete eest.

Sooviksin tänada oma lõputöö juhendajat Martin Jaanust temapoolse panuse eest.

## LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU

<i>AUV</i>	iseseisev allveesõiduk ehk „ <i>Autonomous Underwater Vehicle</i> “
<i>ROV</i>	kaugjuhtimisega sõiduk ehk „ <i>Remote Operated Vehicle</i> “
<i>Tether</i>	Allveedrooni ühendav kaabelühendus
<i>Thruster</i>	Tõukur ehk elektrimootoriga sõukruvi
UR	Unsinkable Robotics OÜ

## SISSEJUHATUS

Väidetavalt on algamas vesiviljeluse ajastu, mis tähendab kalafarme, vetikakasvandusi, tootmist, kontrolli, puhastamist ja jälgimist. Kõik, mis asub vee piirist all pool, on siiani olnud inimestele äärmiselt ebasõbralik keskkond. Tuukrid, kes tänapäeval pakuvad oma teenuseid, suunduvad vee alla, riskides iga kord oma eluga, et sooritada lihtsaid ja masinlikult korduvaid ülesandeid. Firmadele, kes neid palkavad, on tuukrid üsna kulukas tööjõud. Kombinatsioonis robotika arenguga tekib mõte, et äkki on võimalik rakendada roboteid ja moodsa tehnoloogia arengut ka kõikide praeguste ja tulevaste veealuste probleemidega tegelemiseks. Esimesed droonid, mis on võimelised vee all liikuma, on turul kättesaadavad, kuid esialgu ei ole need kuigi võimekad. Paremal juhul on neid võimalik kasulikult rakendada tuukreid abistava kaugjuhitava kaamerana, kuid mitte iseseisva lahenduse või robot-töölisena. Sellise autonoomsuseni jõudmine vajab pikaajalist arendust ja sellega on asunud tegelema mitmed ettevõtted. Seal hulgas noor eesti idufirma nimega Unsinkable Robotiks OÜ.

Kuna esimesed vee all liikuvad ROV-id on juba turul ja ennast tõestanud, siis käesolevas etapis tuleks järgmisena suurendada allveedrooni autonoomsust, võimaldades tal liikuda ilma inimesest saatjata oma määratud tööpiirkonnas. Samas ei saa droon täielikult kaotada ühendust. Kuna vee all levivad elektromagnetlained äärmiselt halvasti, on üks lihtsamaid viise iseseisva roboti ja tema käsundja vahelise side hoidmiseks kasutada pikka kaablit. Kaabli otsas drooni ujutamine on ka võrdlemisi populaarne lahendus. Autonoomsuse seisukohast on suurema potentsiaaliga lahendusvõimalus hoida ühendust veepealse maailmaga ja teostada kaugjuhtimist mistahes kaugusest. Sellisel juhul peab sidekaabel ulatuma veepinnale, et ühenduda antenniga varustatud poiga abil. Kutsun antud seadet oma töös edaspidi signaalmajakaks või ülekandepoiiks. Selline seade võimaldaks kasutada ka juba eksisteerivaid ja pealpool veepiiri pidevas kasutuses olevaid standardseid lahendusi, nagu 4G või isegi 5G suhtlusvõrk ja GNSS navigatsioon. GNSS navigatsioon võimaldab ühtlasi määrata umbkaudsed koordinaadid, mis võivad allveedroonil ülesande täitmisel kasuks tulla ning aitavad seda vajadusel leida. Selline majakas ei oleks tõenäoliselt korvpallist suurem, kuid selle poolt pakutav tugi piirduks vaid side vahendamisega. On plaanis antud majaka võimekust laiendada ja leida viise, kuidas veel on võimalik sellel allveedroonile kasulikku abi pakkuda.

Kasulikku abi on võimalik pakkuda mitmel viisil, kuid enamikel juhtudel on vajalik ka poi osaline või täielik autonoomsus ja liikumisvõime. Ühtlasi on vaja hallata *tether*it ehk kaablit, mis loob ühenduse ülekandepoi ja allveedrooni vahel. Lisaks on kasulik isegi umbmäärase allveedrooni asukoha teadmine ülekandepoi suhtes ja võimekus määrata oma asukohta ülejäänud maailma

suhtes. Kokkuvõttes on vaja luua veepealne robot või *ROV*, mis teeks koostööd oma veealuse kaaslasega, mitte ei oleks ainult antenn.

## 1. Masinlikud lahendused

Vaatamata globaliseeruvale ühiskonnale, rändamise lihtsusele ja inimeste avastuste ulatustele on vesi ja meri jäänud uurimata ja keeruliseks keskkonnaks. Samas on rajatised meres ja vees kasvamas suuremaks ja püsivamaks, kuid mitte haavamatuks või igikestvaks. Kahjuks kõik rajatised ja alused meres lagunevad ja kuluvad ajapikku ning vajavad hooldust või vähemalt jälgimist, et vältida ootamatuid õnnetusi. Ometigi on vesi jäänud meile küllaltki märkimisväärseks takistuseks. Sogases vees on nähtavus piiratud ja tuukrid annavad endast parima, kuid vee all millegi kontrollimine, parandamine või isegi lihtsalt puhastamine on tihtipeale lihtsakoeline, kuid füüsiliselt ohtlik, raske, üksluine, korduv ja ebainimlik töö. Me vaieldamatult vajame veealusesse keskkonda käsi ja silmi, ning kõiki ohte ja tegureid arvestades oleks eriti eelistatud, kui need ei peaks oleme inimeste käed ja silmad.

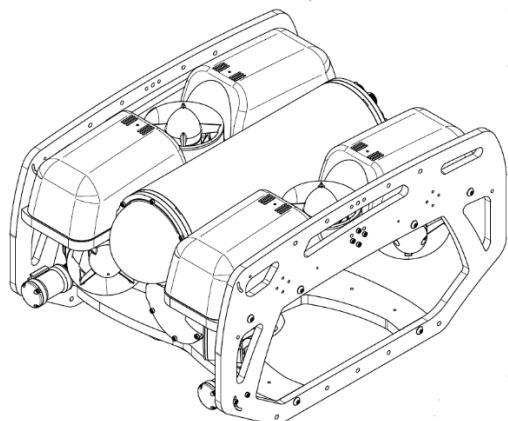
Nagu ka sissejuhatuse juba välja toodud, on üks potentsiaalne lahendus allveedroonide kasutamine. Esialgu koosneb enamik allveedroone liikuva kere ja kaamera kombinatsioonist. Eksisteerib ka esimesi tööriistadega varustatud mudeleid, kuid neil ei ole reaalselt kasulikku rakendust, kuna tihtipeale on endiselt lihtsam saata seda tööd tegema tuuker, kui pusida selle kallal, kasutades drooni piiratud võimekust. Seda enam, et enamik selliseid droone on piloodiga ühendatud kaabli abil, mis tähendab, et operaator ei saa olla droonist kaugel eemal. Ta peab niikuinii drooniga veekogu äärde või peale kaasa rändama ja seal püsima, kuni drooni töö lõpetab.

### 1.1 Unsinkable Robotics

Antud kontekstis oleks kohatu mitte tutvustada ettevõtet, millega koostöös see projekt sündis. Unsinkable Robotics OÜ on allveerobotikaga tegelev idufirma, mis tegeleb allveedroonide automatiseerimise ja sellega seonduvate teenuste pakkumisega, alustas vastavaid katsetusi just monotoonsetest ülesannetest.

Tuukritel on meres erinevaid ülesandeid, kuid laevade ja kaide kontrolli teostamine on neist üks kõige stabiilsemaid ja lihtsamaid. Sisuliselt tuleb tuukril või tema käsutuses oleval droonil sukelduda ja ujuda kaameraga mööda kai serva või laeva külge skanneri põhimõttel üles-alla iga triibu lõpus natuke edasi liikudes. Sellise töö käigus tuleb leida defekte ja vigastusi ning need jäädvustada. Kai üles filmimise võiks aga automatiseerida ja jätta täielikult drooni hooleks. Seda enam, kui on teada drooni koordinaadid, on arvuti jaoks palju lihtsam drooni poolt tehtud piltidest ja mõõtmistest näiteks 3D mudelit koostada. Ideaalis võiks siis kasutada tehisintellekti, et sellelt mudelilt vigu leida,

kuid kuni tehisintellekt areneb, peaks mudel ka inimese jaoks vigade ja kahjustuste leidmise lihtsamaks tegema.



Joonis 1.1 näidispilt allveedroonist. Bluerov2 [1]

Kai ja sadama kontroll on hea näide sellest, kuidas automatiseeritus võiks lihtsustada maailma. Samas on igati loogiline, et allveerobotika ei peatus seal. Kasvõi puhtalt selle pärast, et kaid ei ole ainsad, mis kontrollimist vajavad. Lisaks juba enne märgitud laevadele võisid automatiseeritud kontrollist kasu lõigata ka kalakasvatuste kalavõrgud või vesiviljeluse farmid. Samuti on iga vette rajatava ehitise jaoks kasulik teada ja tunda vastavat olukorda ja sügavusi.

UR arendus on alles algamas ning tegelikult ei ole ühtegi põhjust, miks peatuda ainult ülevaatuses või kontrolliga. Kui viia tehnoloogiat sügavustesse, võib leida AUV tüüpi masinatele tööd ka puhastus või parandustööde vallas, ning sealt automatiseeritud konstruktsioon ja ehitus on sealt ainult mõne sammu kaugusel.

## 1.2 Ülekandepoi ülesanded

Siiani on kõige kindlam ja lihtsam viis allveedroone kasutada kaabli otsas, mis tähendab, et igal ajahetkel peab piloot asuma droonist kaabli ulatuses ja kõik sihtpunktid, mis asuvad kaldast kaugemal kui kaabli pikkus, vajavad paatide ja laevade kasutamist. See on operaatorile ebamugav ja potentsiaalselt kulukas. Ent kui tuua droonile sidepunkt vee peale ja suhelda siis piloodiga õhu kaudu, võiks piloot asuda interneti ühenduse korral maailma mistahes punktis. Lisaks saaks droon ühenduda mõne serveriga ja saata kõik, mis ta näeb ja mõõdab, otse sinna. Samuti lihtsustaks see drooni automatiseerimist ja annaks ka ühenduspunktina ka allveedrooni umbkaudse koordinaadi pinnapealse maailma suhtes.

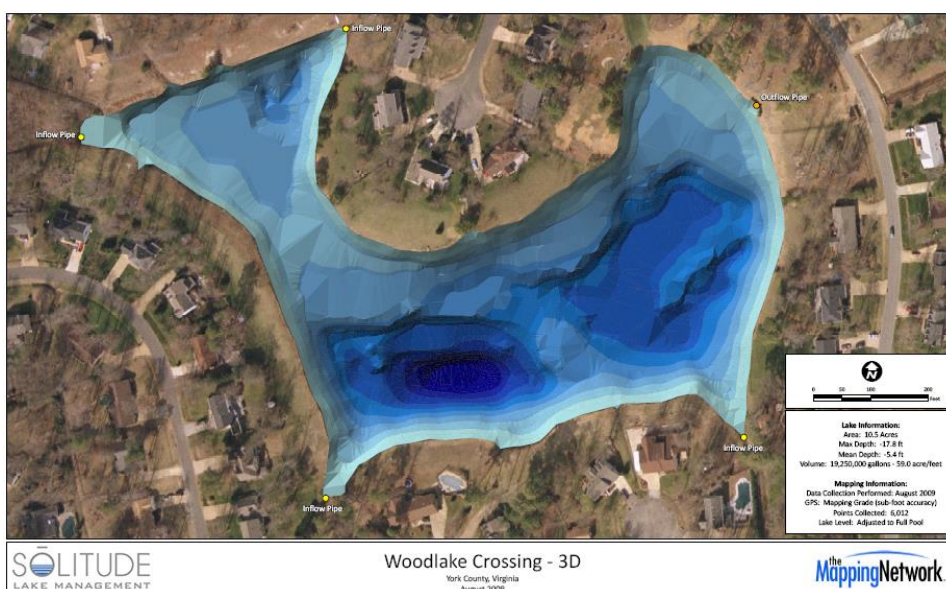


Samuti saab poi ja drooni vahelist ühendust kasutada rikete korral. Kuna drooni ja poid ühendab kaabel, peaks drooni rikke korral olema võimalik seda drooni pinnale vinnata ja päästa. Kaldalt juhitud droonide puhul tundub see enesest mõistetavalt, aga avameres või lahes ulpima jäänud või takerdunud droone on keeruline leida. Kui neid ei leita, ei ole tegemist lihtsalt kadunud tööriista ja luhtunud ettevõtmisega, vaid on ka raske diagnoosida rikke põhjust ja leida lahendusi, et neid edaspidi vältida. Seega on kaablit reguleeriv element ülekandepoi kriitiline osa.

### 1.3 Iseseisev sonaritöö

Kui poi on võimeline ise pinna peal oma asukohta leidma ja vee pinnal liikuma, siis võib ta ka iseseisvalt kasulik element olla. Madalate veekogude kaardistamine on GPS koordinaatide järgi ja ise sõitva poi abil küllaltki lihtne. Kanalite, jõgede või järvede põhjade kaardistamine võib vette rajatavate ehitiste jaoks samuti kasulik teenus olla. Kuna kõnealune sidemajaks peab niikuinii iseseisvalt navigeerida suutma, vajab ta selle eesmärgi jaoks veel vaid sonarit, mida allveedroonid niikuinii juba katsetavad.

See ei ole tegelikult kuigi uus mõte. Järvede ja jõgede mõõtmisi on juba aastakümneid paatidelt sonariga tehtud ning viimasel ajal on näha aina rohkem autonoomseid veepealseid sõidukeid, millest mõned on ka just sellist ülesannet lahendada proovinud. Sonariga mõõdetud hüdrograafilisi kaarte on võimalik juba praegu osta ja tellida.

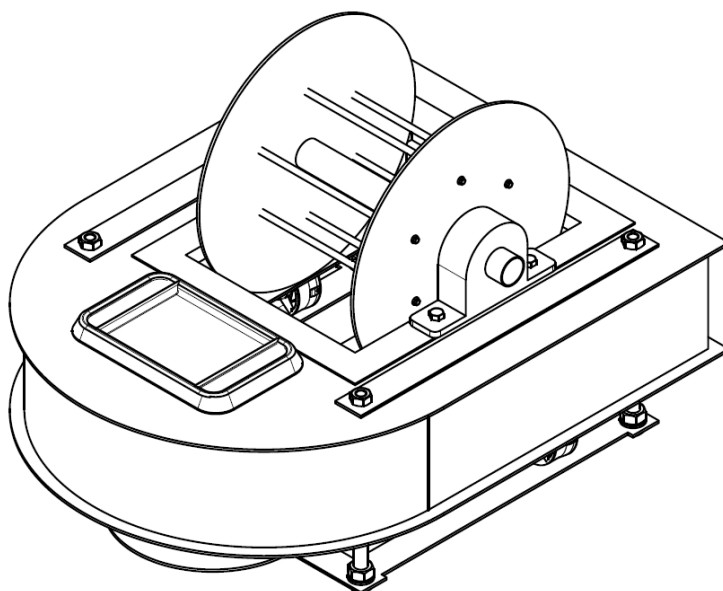


Joonis 1.2 „Woodlake Crossing järve hüdrograafiline kaart“ [2]

Ülal on toodud ameerika ettevõtte SOLitude Lake Managementi näidiskaart, mis on mõeldud nende idee ja teenuse müümiseks. Kaardilt on näha järve sügavuse andmeid, mida on sonariga küllaltki lihtne mõõta. Seega peaks olema vähemal teoreetiliselt võimalik saavutada sarnast tulemust ka signaalmajaka prototüübiga.

## 2. Pool ja pooli mootor

Lisaks kommunikatsiooni vahendamisele on teine signaalimajaka tähtsam ülesanne kerida kokku ja lahti drooni ühendust hoidvat kaablit. Kui *tether'i* pikkus on optimaalselt reguleeritud väheneb oluliselt võimalus, et see takerdub vees olevate takistuste taha, või et sellesse tekivad sõlmed. Ühtlasi tagab kaabli pikkuse optimeerimine, et poi asukoht pinnal vastab palju täpsemalt vee all asuva drooni asukohale. Kaabliga allveedroonidel on veel üks märkimata eelis kaablivabade allveedroonide ees. Kui vee all peaks drooniga midagi juhtuma, siis kaablivabad droonid kipuvad vee ebasõbralikku keskkonda kadunuks jääma. Kaabliga drooni annab aga kaablit trossina rakendades välja tõmmata ja parandada. Kui sidemajakale on juba otsustatud kinnitada *tether'i* kerimiseks mõeldud pool, siis võiks seda saada sarnaselt rakendada.



Joonis 2.1 Ülekandepoi

### 2.1 Pooli mootori leidmine

Et ROV-i kaablit pidi välja tõmmata peab selleks olema kinnituspunkt ja jõud, mida selle rakendada. Kinnituspunkti pakub poi ujuv kere. Jõud tuleb *tether'i* pooli keeravast mootorist. Antud otstarbeks on seega mõttekas rakendada tiguülekandega mootorit ja arvutada välja, kui palju jõudu täpselt rakedada tuleks ja kui palju tuleks jätta varuks.

Konsulteerisin antud küsimuses Unsinkable Robotics OÜ CEO Timmu Tollimäega ning jõudsimme järeldusele, et pooli mootor peab olema piisavalt suure väändemomendiga, et AUV-i ka õhus tõsta. See tagab piisava jõu ka olukorras, kui allvee robot peaks vee alla kinni jääma. Siin viitan asjaolule,

et droon kaalub tänu oma ujukitele ja vee tihedusele vee all oluliselt vähem kui vee peal. Samuti ei tohiks isegi vee peal pooli küljest rippuv droon pooli või selle mootorit lõhkuda.

### 2.1.1 Arvutus pooli mootori leidmiseks

**Üldvalemid ja konstandid:**

$$\text{gravitatsioon: } G = 9.81 \text{ m/s}^2$$

$$\text{Inerts: } I = m * r^2 \tag{2.1}$$

$$\text{Pöördemoment: } M = F * r + I \tag{2.2}$$

$$\text{Jõud: } F = m * a \tag{2.3}$$

#### Allveedroon

Allveedroonist on antud hetkel arvutustes vajalik vaid tema kaal. Toon võrdluseks välja ka allveedrooni kaalu vees

$$m_{\text{Droon}} = 11 \text{ kg}$$

$$m_{\text{DroonVees}} = 0.2 \text{ kg}$$

**Tether:** ehk poi ja drooni vaheline kaabel

*Tether*'i pikkus ( $L_{\text{Tether}}$ ) on muudetav 50 m ja 100 m versiooni vahel.

$$L_{\text{Tether}_{50}} = 50 \text{ m}$$

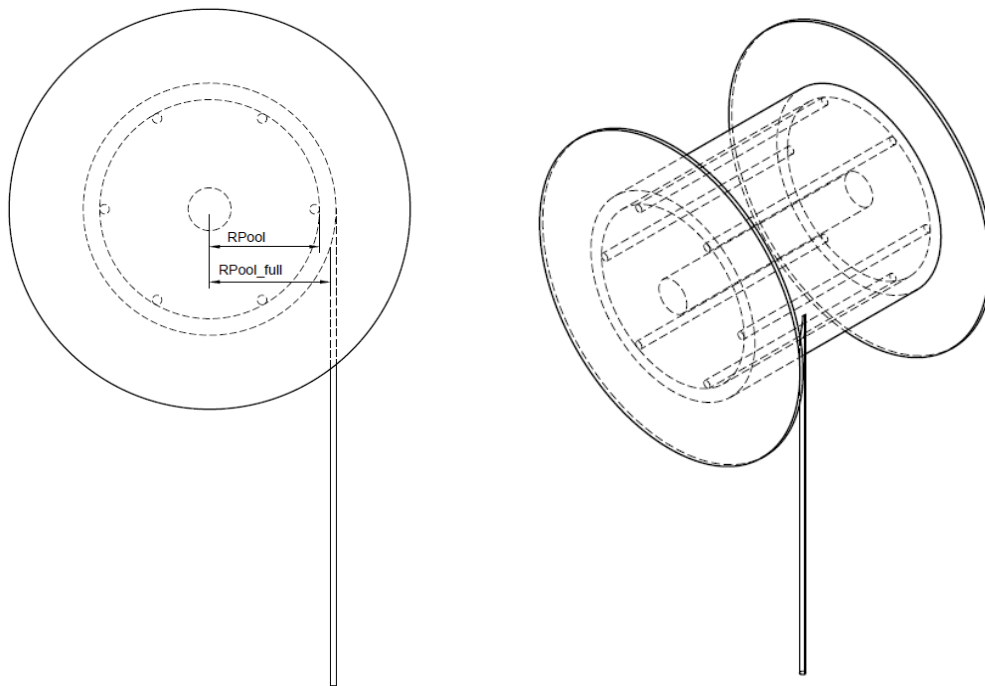
$$L_{\text{Tether}_{100}} = 100 \text{ m}$$

Kaabli diameeter ehk  $D_{\text{Tether}} = 7.6 \text{ mm} = 0,0076 \text{ m}$

Kaabli mass meetri kohta ehk  $m_{\text{Tether}} = 0.046 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$

**Pool:**

*Tether*'i minimaalne kerimisraadius on 10 cm. Selle järgi otsustasin, et koos 10% varuga võiks pool, mille peale *tetherit* kerida, olla raadiusega 11 cm ehk diameetriga 22 cm. Pooli servade vahele jääv ala, kuhu *tether*'it kerida saab on 30 cm



Pilt 2.2 Pooli joonised

$$D_{Pool} = 0.22 \text{ m} \rightarrow R_{Pool} = 0.11 \text{ m}$$

$$l_{pool} = 0.3 \text{ m}$$

$$m_{Pool} = 0.6 \text{ kg}$$

Täiskeritud pooli raadius põhineb programmis, MATLAB, simuleeritud mudelit. MATLAB mudeli koodi on võimalik leida lisas. Simuleerimisel on eeldatud *tether'i* ideaalset jaotust poolil. Seega on tegemist minimaalse raadiusega.

$$R_{Pool_{full_{50}}} = 0.1176 \text{ m} = 11,76 \text{ cm}$$

$$R_{Pool_{full_{100}}} = 0.1328 \text{ m} = 13,28 \text{ cm}$$

Olemas olevate andmetega on võimalik leida pooli inertsomendid koos ja ilma kaablita.

Inertsomendi leidmine, vastavalt valemile 2.1, olukorras, kus kaabel on poolilt maha keritud:

$$I_1 = \frac{1}{2} * R_{Pool}^2 * m_{Pool} = 0.0036 \text{ Nm}$$

Inertsomendi, kui kogu kaabel on keritud pooli peale:

$$I_{2_{50}} = \frac{1}{2} * R_{Pool_{full_{50}}}^2 * (m_{Pool} + m_{Tether} * L_{Tether}) = 0.0201 \text{ Nm}$$

$$I_{2_{100}} = \frac{1}{2} * R_{Pool_{full_{100}}}^2 * (m_{Pool} + m_{Tether} * L_{Tether}) = 0.0459 \text{ Nm}$$

### Pooli mõjutavad jõud

Pooli mõjutava jõu juures tuleb arvestada, et kui kiirenduse all arvestada ainult raskuskiirendusega, vastab leitud jõud staatilisele olekule. Et võimaldada liikumist, tuleks lisada kiirendus, millega pool pöörlema hakkab. Oletame, et selleks kiirenduseks on  $a = 2 \frac{m}{s^2}$ . Jõua arvutamiseks on valem 2.3.

$$F_2 = m_{Droon} * (G + a) = 107.91 \text{ N}$$

$$F_{150} = m_{Theder} * L_{theder} + m_{Droon} * (G + a) = 157.4073 \text{ N}$$

$$F_{1100} = m_{Theder} * L_{theder} + m_{Droon} * (G + a) = 184.236 \text{ N}$$

### Pöördemomendid

Pöördemomente arvutatakse vastavalt valemile 2.2.

Lahti keritult:

$$M_{150} = I_1 + F_{150} * R_{Pool} = 17.282 \text{ Nm}$$

$$M_{1100} = I_1 + F_{1100} * R_{Pool} = 20.270 \text{ Nm}$$

Kokku keritult:

$$M_{250} = I_2 + F_2 * R_{Pool_{full_{50}}} = 15.300 \text{ Nm}$$

$$M_{2100} = I_2 + F_2 * R_{Pool_{full_{100}}} = 17.298 \text{ Nm}$$

Maksimumkoormus ei peaks võrduma mootori maksimumvõimsusega. Et garanteerida mootori toimetulekut vajaliku olukorraga, võib jätta leitud maksimaalse momendi tulemusele varuteguri, näiteks 10%.

Lahti keritult:

$$M_{150_v} = M_{150} * 1.1 = 19.010 \text{ Nm}$$

$$M_{1100_v} = M_{1100} * 1.1 = 22.297 \text{ Nm}$$

Kokku keritult:

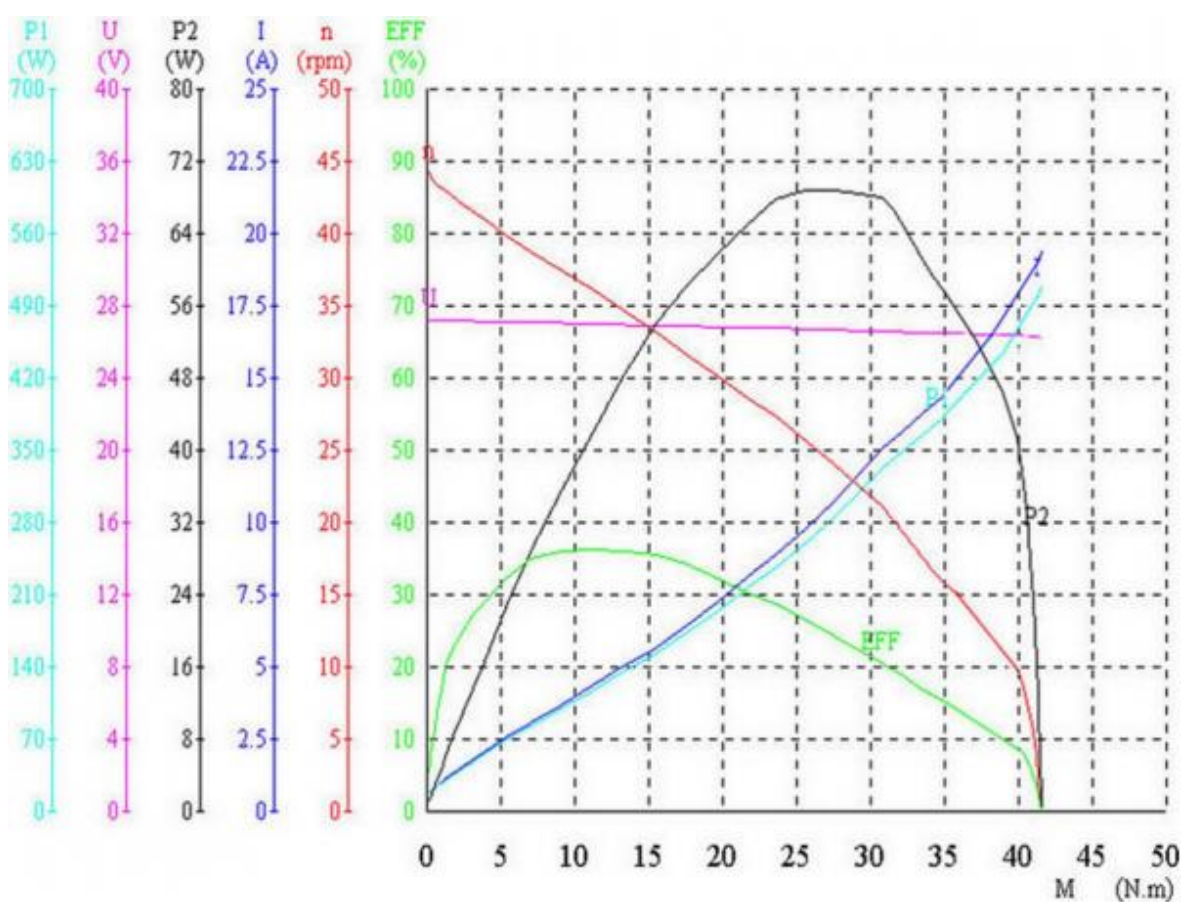
$$M_{250_v} = M_{250} * 1.1 = 16.827 \text{ Nm}$$

$$M_{2100_v} = M_{2100} * 1.1 = 19.028 \text{ Nm}$$

## Mootor

Antud tulemuste põhjal valisin välja tiguülekanedega 70W DC mootri, mille maksimumkoormuseks on märgitud 35 Nm ja nimikiiruseks 45 pööret minutis. Maksimumkoormuse alla mõtlen ma siin kohal *stalling torque*'i

Valisin selle mootori toetudes tootja (Motion Dynamics) lehel pakutavatele andmetele. Neist kõige lihtsam on välja tuua all olev graafik.



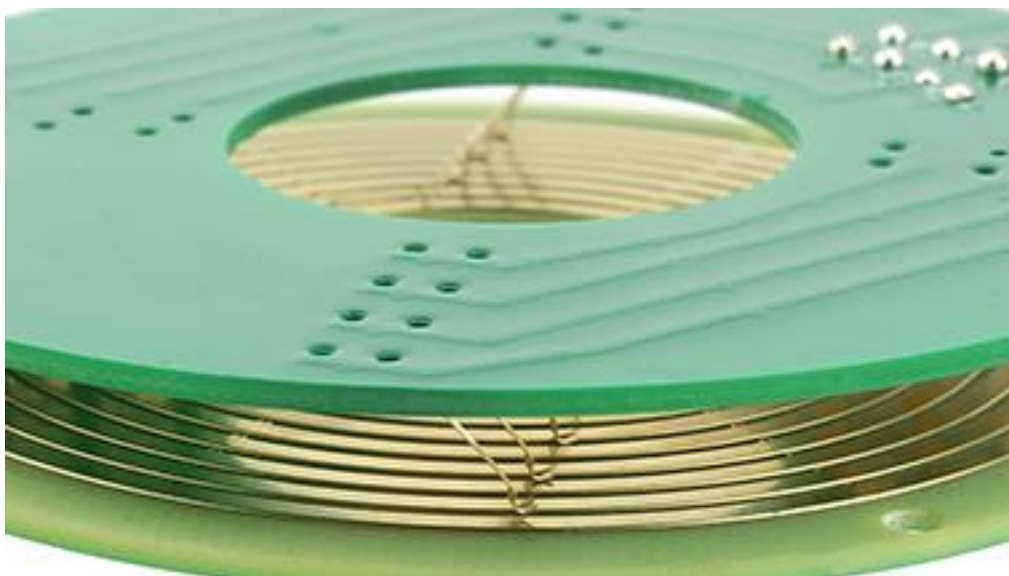
Joonis 2.3 Mootori tegurite graafik, sõltuvana pöördemomendist [3]

Motion Dynamics graafikult on näha, et parim kasutegur jääb vahemikku 5-15 nM ja maksimumkoormusel, mis antud juhul on ligi 20 Nm, on volutarve umbes 7.5 A, mis on antud otstarbel küllaltki sobilik.

## 2.2 Pöörlemine

Poolile keritava kaabli abil ühenduse loomis võib takistada pöörlemine. Kui pool kerib ennast lahti ja kokku tagasi, teeb ta 100 m *tether'i* korral ühest ekstreemumist teise jõudmiseks rohkem kui 130 pööret. See raskendab oluliselt selle pooli külge juhtme kinnitamist, sest kui kinnituse pooli poolne ots pöörleb ja teine ots on paigal, tekib märkimisväärne vääne, mis vähegi pikemajalise kasutuse korral tõenäoliselt hävitab kaabli ühenduse või hakkab takistab see pooli pöörlemist. Kuid kõik need on välditavad, kasutades spetsiaalset vastavat vahelüli. *Slip ring* võimaldab luua kontakti ka pöörleva objektiga.

*Slip ringi* tööpõhimõte on lihtne ja sarnaneb küllaltki suures osas alalisvoolumootori kommutaatorile. Ühel poolel on rõnga- või ringikujuline kontaktpind ja teisel poolel on tavaliselt harjakesed või kontaktid, mis tekitavad elektrilise ühenduse selle pinnaga. Pöörlemise korral hakkab üks neist liikuma, kuid harjakeste libisemine ümaral kontaktpinnal võimaldab ühel poolel pöörelda ilma elektrilist ühendust katkestamata, luues mingis mõttes justkui elektrilise siduri.



Joonis 2.4 Slipring näidis. [4]

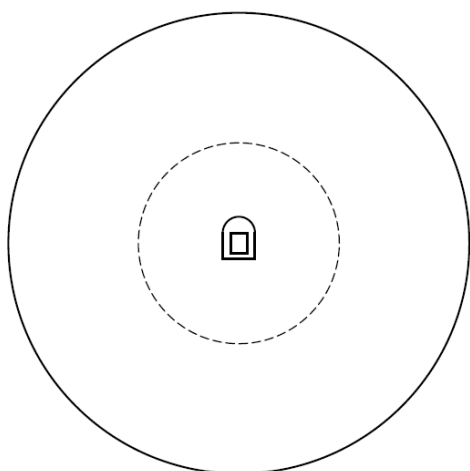
Probleem selliste kontaktidega on nende hind. Kuna pöörlemine on muudetud libisemiseks ja libisemisel tekkiv hõõrdejõud kulutab kontaktpinda. Samuti on vaja vältida rõngaste ja harjakeste roostetamist ning selle juures tagada väike takistus. Et seda tagada kasutatakse *slipring*-ides tihti peale kulla sulameid, mis teevad need väga kalliks. Juba vaid paari kontaktiga tööstuslik *slipring* võib maksta sadu eurosid.



## 2.3 Poolist tulenev täpsus

Kuna pool poi küljes reguleerib maksimaalset vahemaad allveedrooni ja poi vahel, ja see vahemaa on teada, siis drooni sügavuse ja lahti keritud *tether*'i pikkuse järgi on võimalik oluliselt vähendada piirkonda, kus droon poi suhtes asetseda saab. Mida paremini on teada drooni asukoht poi suhtes, seda paremini on võimalik poi GPS asukoha põhjal määrata drooni asukohta.

Kui kasutada lihtsalt ulpivat poid, on kogu vajalik *tether* vees lahtiselt ulpimas, mis annab küll droonile suurepärase liikumisvabaduse, kuid väga kehva täpsuse. Me saame endiselt arvestada, et droon peab asuma poist *tetheri* pikkuse raadiusega poolkera piires. Kui droon määrab oma sügavuse, väheneb võimalike asukohtade dimensioon ühe võrra, kuid endiselt jääb võimalikuks asukohaks küllaltki suur ring.

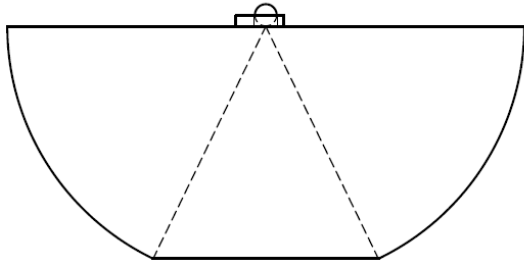


Joonis 2.5 Võrdlus täpsusest pealt vaates

Ent kui piiratata välja keritava *tetheri* pikkust, hakkab droon poid endaga kaasa vedama (või vastupidi), tagades palju täpsema koordinaadi.

### 2.3.1 Ühenduskaabli vajalik pikkus

Olgu lahti keritud *tether*'i pikkuseks drooni sügavuse mõõte + laskumiskonstant.



Joonis 2.6 Täpsuse võrdlus külgvaates

Laskumiskonstant on vajalik, et droon sukeldumisel ei peaks võitlema poi ujuvusega. Konstandi suurus ei tohiks kindlasti olla väiksem kui näiteks 5 Drooni sügavuse mõõte määramatust, et vältida lihtsalt mõõtmisveast tulenevaid käivitusi. Kuid kuna selgub, et drooni sügavuse mõõtmise resolutsioon on 2mm ja antud kombinatsioon droonist ja poist peab suutma taluda mõningast lainetust, siis antud juhul tundub ainult 1 cm laskumiskonstanti niikuinii liiga väikse hulganä.

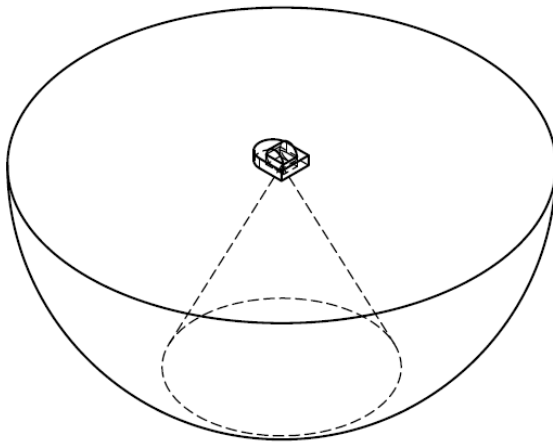
Teine viis sellest mõelda on drooni kiirenduse kaudu. Droon võiks saada maksimumkiirendusega sukelduda vähemalt ühe sekundi, enne kui poolilt välja keritud *tether* otsa saab.

Väidetavalt on droonil, millega me signaalajakat katsetama asume, tippkiiruseks ligikaudu 1,5 m/s. Seega selle valemi järgi peaks jätma talle laskumisruumi 1.5 m.

Reaalsus on kahjuks karmim ja tuleb lisaks eelnevale välja tuua, et pooli ringi ajava mootori maksimumkiirus antud koormuse juures ei pruugi ületada 40 pööret minutis. See tähendab, et pool ei pruugi olla võimeline kerima välja rohkem kui 0.46 m *tether*'it sekundis. Kuna *Tether*'i pikkus piirab drooni liikumist, on see ühtlasi uus maksimaalne sukeldumiskiirus. Seega võtan järgnevates arvutustes laskumiskonstandiks kerge varuga 0.5 m.

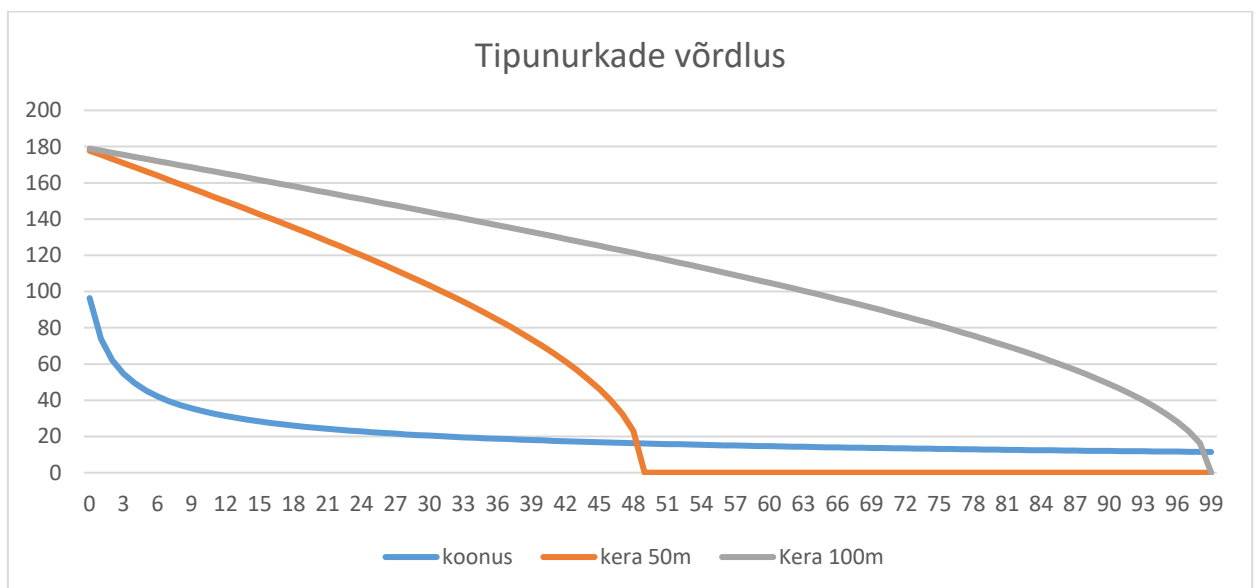
### 2.3.2 Allveedrooni asukoha täpsus

Kui *tether*'i pikkus on sõltuvalt drooni sügavusest, väheneb drooni võimalik asukoht poi all asuva poolkera horisontaalsest ristlõikest, drooni alla jääva koonuse horisontaalseks ristlõikeks. Sellise koonuse vertikaalse ristlõike tipunurk on oma korda otseselt seotud valitud laskumiskonstandiga. Mida väiksem on laskumiskonstant, seda väiksem on koonuse tipunurk ja seda täpsemini on võimalik leida drooni asukoht. Kuid mida väiksem on laskumiskonstant, seda aeglasem on drooni maksimaalne sukeldumiskiirus.



Joonis 2.7 Allveedrooni potentsiaalse asukoha ruumiline võrdlus

Antud mudeli järgi saame leida täpsuse erinevust reguleeritud ja reguleerimata *tether'i* pikkuse korral. Lihtne viis seda illustreerida on all toodud graafiku abil, kus on välja toodud tipunurga erinevus reguleeritud *tether'i*, 50 m pikkuse lahtise kaabli ja 100 m lahtise kaabli korral.

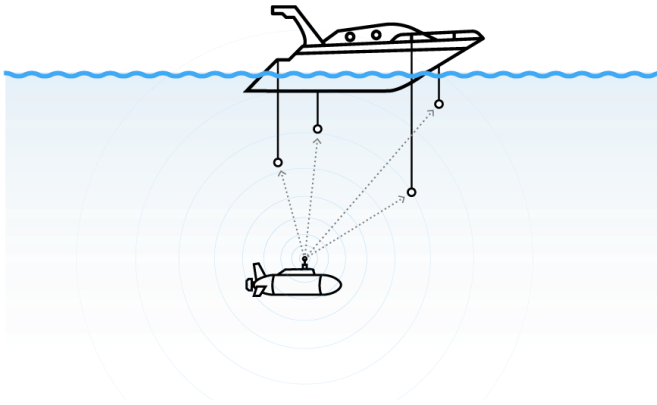


Joonis 2.8 Tipunurga võrdlus graafikul, sõltuvalt sügavusest

## 2.4 Sonari põhine positsioneerimine

Kui oleks võimalik sarnaselt võrrelda vahemaad veel vähemalt 2 punktiga, saaksime määrata droonile küllaltki täpse koordinaadi.

Sellise distantsti leidmise jaoks on juba eksisteerivaid lahendusi. Ma leian, et kõige paljulubavam neist on sonari signaalidel põhinev veealune GPS süsteem, mis kuulab droonilt pärinevat signaali ning signaali saatmise ja lugemise vahele jääva aja järgi määrab vahemaa.



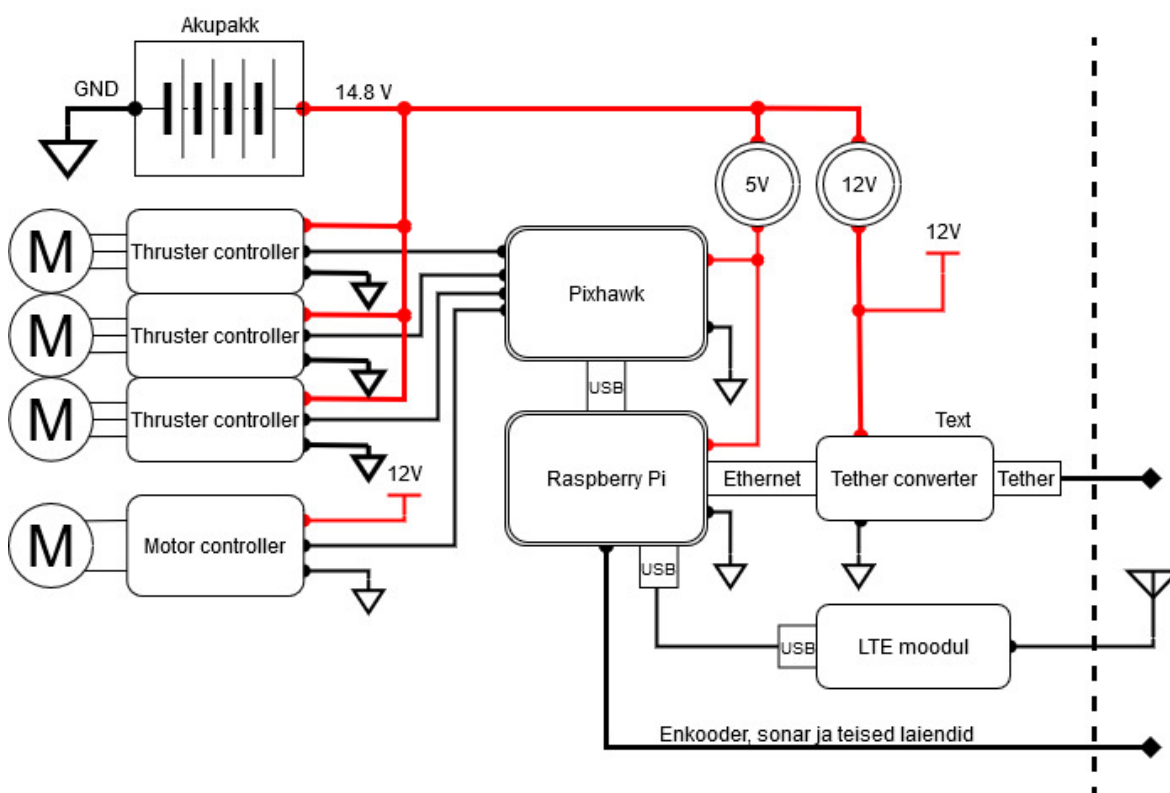
Joonis 2.9 Blue Robotics veealuse GPS süsteemi näide [1]

Sellise sonari tehnoloogial põhineva koordinaadi leidmise süsteemi edukaks rakendamiseks tuleks viia võrdluspunktid üksteisest võimalikult kaugemale. Nagu ülal toodud pildil näha, on seda suure laevaga üsna lihtne saavutada, kuid käesolev kommunikatsioonmajakas üksi on liiga väike, et sellist süsteemi edukalt rakendada. Seega jääb sellise lahenduse kasutamine mõne järgmise prototüübi ülesandeks.

### 3. Aku ja elektrisüsteemid

Majaka elektroonika jaguneb piltlikult kolmeks osaks. Esiteks ülekandepoi juhtelektroonika ja suhtlussüsteemid, mis on vajalikud autonoomsuse loomisel. Teiseks jõuelektroonika, kuhu all kuuluvad mootorid, driver'id, mis vajavad eraldi tähelepanu peamiselt oma suure voolu tarbimise tõttu. Kolmandaks aku ja seda toetavad süsteemid, mis tuleb kohandada ülejäänud elementide elektroonika lahendusele ja signaalmajaka ülesandele vastavaks.

#### 3.1 Elektroonika



Joonis 3.1 Elektroonika skeem

Prototüüp lahendusena ei ole konkreetsel sidemajakal spetsiaalset protsessorit, vaid kesksed arvutused ja side võimekust teostab *Raspberry Pi 4* standardmoodul. Kui kunagi algavad iseseisva kaardistamise katsetused, on võimalik ka sonari liides ühendada *Raspberry Pi* külge.

Lisaks sonarile on võimalik sinna ühendada ka muid kasulikke rakendusi, näiteks kaamerat või signaaltulesid, mis aitaksid vastavalt kaasa kas kaugjuhtimisele või teeksid poi vees oluliselt paremini märgatavaks.

Mootorite ja *thruster'ite* kontrollimiseks on *Raspberry Pi* külge liidestatud droonide kontrolleriks mõeldud *Pixhawk*-süsteem, mille ülesandeks on genereerida vastavalt *Raspberry Pi*-lt saadud korraldustele mootoreid reguleerivad PWM signaalid ja GPS telemetria.

*Tether converter* on element, mis tõlgendab *tether'ist* tuleva allveedrooni signaali ümber Etherneti kaabli formaadiks, et *Raspberry Pi* saaks seda töödelda.

Ja lõpuks LTE moodul, mis võimaldab luua ühenduse maismaaga ja leida GPS koordinaati, mille põhjal navigeerida. 4G liides koosneb põhimõtteliselt kahest osast. Esimene osa on protsessor, mis vajab kaitset ja mis on paigutatud veekindlasse karpis. Teine osa on antennid, mis tuleks viia võimalikult jämeda varjestatud juhtme vahendusel võimalikult kõrgele, et parandada signaali.

3 *thruster'it* ja pooli mootor vajavad kõik isiklikke *driver'eid*. *Thruster'id* on oma sisendpinge osas küllaltki paindlikud, töötades vahemikus 12-24 V, võimsus tõuseb koos pingega kasvuga. Neile rakendub kõrgeim pinge, mida akupakk on võimeline välja andma. Maksimaalsel kiirusel on *thruster'i* voolutarve on 20 A. Pooli mootor vajab 12 V sisendit ja selle voolu tarve on 7.5 A nimikoormuse juures.

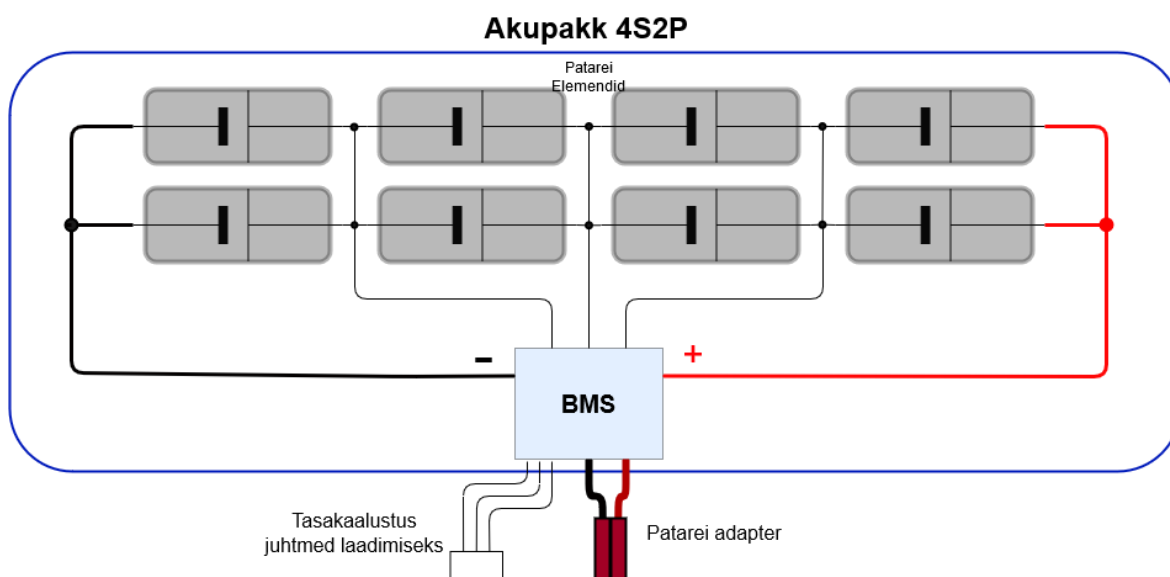
Ülal toodud elementide andmete põhjal tarbivad kõik signaalimajaka juhtelektroonika elemendid kas 5 V, 12 V või *thruster'ite* puhul erandina reguleerimata aku pinget. See tähendab, et lisaks elektroonika elementidele endale on vaja ka pingeid reguleerivaid elemente. Selleks on rakendatud kahte reguleeritavat „*step-down*“ *converter'it*, vastavalt 5 V ja 12 V saavutamiseks.

## 3.2 Aku ja töö aeg

Algselt oli plaanis koos UR tiimiga luua standardosadest täpselt vajaliku suuruse ja kujuga patarei-pakk. Patareipaki disainimisel oli oluliseks abiks Kristo Toots, kes tegeles ka allveedroonile vastavate akupakkide disainiga. Kuid äkitselt tabanud koroonakriisi tõttu saabusid selleks ettevõtmiseks vajalikud tööriistad liiga hilja ja et vältida aku puudumist, viidi disaini parandusi, mis võimaldaksid kasutada standardseid liitiumakusid hobi poest. Toon siia kirjelduses välja mõlemad süsteemid.

### 3.2.1 Akudest üldisemalt

Moodsad liitiumakud on väga modullaarsed ning neid on võimalik valida poest või akupakiks kokku komplekteerida vastavalt pingele ja voolu vajadustele. Iga jadamisi (*series*) element tõstab pinget ja iga paralleelne (*parallel*) element tõstab nii maksimaalset voolu kui mahtuvust. Tavaliselt on aku elementide nimipinge 3,7 V. Vastavalt sellele on ka üsna selge tähistus. Näiteks tähistus „4S2P“ aku tähendab näiteks 8 elementist koosnevat akupakki, mis omab jadamisi elementidest tulenevat pinget 14,8 V ja 2 korda rohkem voolu ja mahtuvust kui üksik aku element



Joonis 3.2 Akupaki komponendid skeemil

Kuna akude maksimaalse voolu piir on erinev, rakendatakse mõnikord *constant discharge* või „C“ ehk maksimaalse pidevoolu kordajat. See näitab mitu korda suurem on maksimaalne pidevool mahtuvusest. Näiteks 8000 mAh (8 Ah) aku juurde märgitud „12C“ kordaja tähistaks  $8 * 12 = 96 A$  väärilist maksimaalvoolu.

### 3.2.2 Akud signaalmajaka jaoks

Kuna ükski element ei vaja rohkem kui 12 V pinget, siis tõenäoliselt saab prototüübis olema kasutusel 4S aku, ehk nelja jadamisi elemendi või *cell'iga* aku. Paralleelsete elementide arvu määrab kas maksimaalne vajalik vool või vajalik mahtuvus.

Uurisin kõikide signaalmajaka aju elementide andmelehti ja jõudsin järeldusele, et signaalmajaka aju tarbib tippkoormusel ligikaudu 2,5 A

*Thruster'id* ja mootorid see eest nõuavad oluliselt rohkem ampreid. Tõenäoliselt ei ole kunagi kõik mootorid korraga töös. Signaalmajaka põhja all asuvatest thruster'itest ei tohiks korraga kunagi töötada rohkem kui kaks ja pooli keerav mootor tarbib oma koormuse juures umbkaudu 7.5 A

See tähendab, et ka täiskiiruse juures ei tarbi mootorid kokku kunagi kokku rohkem kui 47,5 A ja kogu signaalmajakas kunagi kokku rohkem kui 50 A. Esimesel arvutusel tundub see üllatavalt suure numbrina. Näiteks, kui akud peaksid kogu töö aja andma välja 50 A, tähendaks see 740 W koormust. Samas on tõenäoline, et vähemalt poi toetamise režiimis on signaalmajaka peamiseks ülesandeks pinnal ulpida ja sidet hoida, mis sadama või rahuliku vee tingimustes ei tohiks thruster'eid eriti koormata. Enamiku ajast tarbib signaalmajaks tõenäoliselt umbes 10 A voolu või vähem. Võtan töö aja ja vajaliku aku mahtuvuse arvutamisel aluseks just selle viimase hüpoteetilise numbri.

Üks lisa palvetest UR meeskonnalt oli, et signaalmajaka aku võiks kesta kauem kui allveedrooni aku. Antud hetkel kestab nende käes testimisel oleva allveedrooni aku tootja andmete kohaselt ligi 2 tundi. Tegelikuses on drooni aktiivse kasutuse aeg natuke üle tunni, enne kui akut vahetada tuleb. Seega, signaalmajaka kestvus võiks vähemalt esimeste katsetuste jaoks olla 2 tundi ja hiljem kohandatus spetsiaalse patareipakiga 4 tundi.

### **Ostetud aku**

Kuna CoVid-19 puhangu keskel ei olnud poed avatud ja kõik kulleri ja pakiteenused olid tugevalt üle koormatud, siis langetati otsus leppida olemas olevate vahenditega. Sidemajaks võeti kasutusele kombinatsiooni kahest 4S 8000 mAh lipo akust, mida kasutatakse ka allveedrooni toitmiseks. See tähendab, et kui sidemajaks tarbib keskmiselt 10 A, siis selle akuga on maksimaalne töö aeg 96 minutit ehk 1 tund ja 36 minutit. Mõlemad nendest akudest peaksid tootja poolt pakutavate andmete korral suutma välja anda kuni 96 A vooli ilma riketeta. See on ligi kaks korda rohkem kui tarvis. Kuna allveedroon kasutab sarnast akut, siis signaalmajakas kahe sellise aku kasutamine tagaks ka loodetavasti töö ajale seatud nõuded.

### **Akupakk**

Ise spetsiaalselt selleks otstarbeks akupakki planeerides oli plaanis kasutada standardseid 3120 mAh Liitium-ioon elemente. Kuna nende cell'ide puhul märgitud maksimumvooluks 30 A, peab akus tipukoormuse ajal piisava voolu saavutamiseks olema tegemist vähemalt 2P akuga. 4S2P aku annaks ainult 6,24 Ah, ehk kestvuse 37 min, mis ei ole piisav. Seda enam, et kui akupakkide loomise



võimalus tekib, on UR-i tiimil plaanis ka allveedroonile luua uus 4S5P aku, mis kestaks ligi kaks korda kauem.



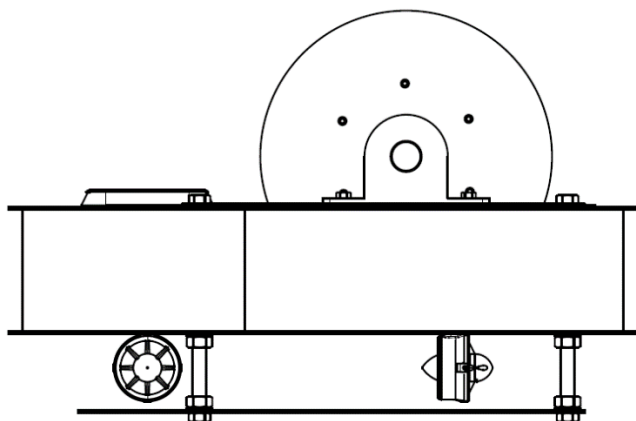
Joonis 3.3 Pilt loodud akupakist

Praegu kestab allveedrooni aku natuke üle tunni. Ise koostatud akupakk peaks kestma natuke üle kahe tunni. Seega võiks signaalmajaka akupakk kesta ligi 4 tundi. Kui keskmine vool oleks endisel 10 A, siis vajaks see vähemalt 40 000 mAh akut. 4S formaadis tähendaks see vähemalt 13P akut.

Mainin ka ära, et enne kui neid akupakke kasutada saab, vajavad need ka BMS-i (battery management system) ehk patarei haldussüsteemi liidest. Neid tõenäoliselt ise leiutama ei pea. BMS liidesed on saadaval mitmetes interneti poodides ja neid on võimalik endale koju või töökotta tellida.

## 4. Füüsiline disain

Kõik sidemajaka elemendid vajavad alust, kinnitust ja kindlustamist, mida peab pakkuma poi kere. Peale teiste elementide toestamise ja koos hoidmise peab kere ka ühtlasi tagama, et kõik vajalikud osad oleksid asuksid veepiirist kõrgemal ja et vesi ei tungiks elektroonika juurde.



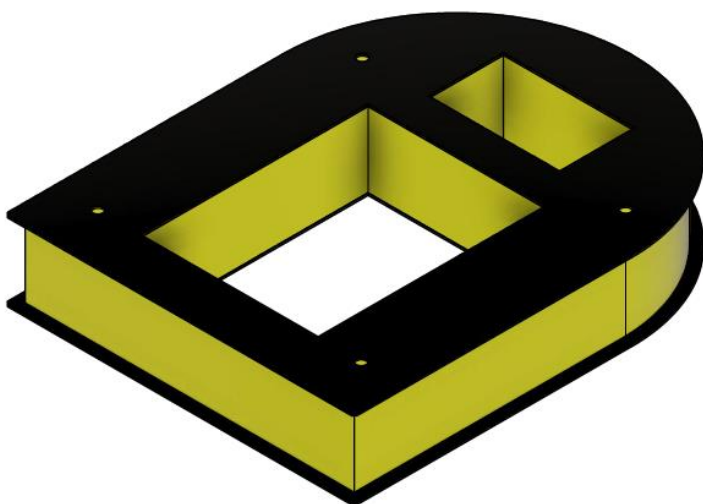
Joonis 4.1 Ülekandepoi külgvaates

### 4.1 Karp elektroonika jaoks

Elektroonika paigutus ja veekindlus on rakendatud läbi nende koondamise ühte punkti. Et hoida kokku ruumi ja vähendada keerukust, on kõik elektroonikaelemendid, mis ei pea asuma konkreetsel positsioonil, paigutatud ühte veekindlasse karp. Kogu vajalik kaabeldus tuleb tuua sisse läbi karbi seinte veekindlate läbiviikude abil. Läbiviikude disain põhineb allveedrooni vastavate läbiviikude alusel ning 3D printitakse prototüübi loomisel vajalikul arvul ja vähendatud kujul. Samuti tuleb tagada karbi kaane veekindlus. Valitud karbil on klamber, mis tõmbab kaane jõuga karbi külge ja lukustab selle. Kaane tihendamiseks saab kasutada pehmest silikoonist või epoksiidliimist valatud võru kaane serva peal, mis kaane peale surumisel tekkiva jõu tulemusel tekkival deformatsioonil täidab kõik võimalikud pilud. Vee all, rõhu erinevuse tõttu, sellist rakendust kasutada ei saaks, kuid poi puhul tuleb vee peal muret tunda peamiselt lainetuse ja pritsmete pärast, mis ei tekita olulist rõhuerinevust. Seega on see piisavalt veekindel lahendus.

## 4.2 Ujuk

Ujuk on plaanis luua veekindlatest EPS plaatidest. Kuna EPS on kergesti murenev materjal tuleks vältida selle pörutamist või kriipimist. Ideaalist võiks kogu EPS-i ümbritseda kaitsva kõvast materjalist kattega. See teeks aga konstruktsiooni veelgi raskemaks. Minimalistlikum ja lihtsam lahendus on panna kahele poole EPS plaatidest ujukit plaat, mille servad ulatuvad EPS servadest üle. Sedasi väheneb võimalus, et kokkupõrkel EPS viga saab, kuna esimeseks kokkupuute pinnaks enamike objektidega saab olema plaat või selle serv, mitte EPS. Kõnealusel plaadid tuleks omakorda kinnitada näiteks keermestatud latiga, surudes EPS-i tugevalt plaatide vahele. Kui kinnitada igast nurgast, saab ka tagada, et plaadid üksteise suhtes ei liiguks. Tulemus peaks olema kergesti valmistatav ja vastupidav.



Joonis 4.2 Ujuk ja kaitsvad plaadid

Selline EPS-ist ujuk peab suutma hoida ulpimas lisaks oma raskusele võimalikku pooli kerimise poolt tekitavat koormust. Selle arvutuse jaoks arvestan, et pooli mootori maksimaalne moment on 35 Nm ja rippe minimaalne kaugus teljest on 0.11 m. Seega, maksimaalne koormus, mida pool signaalpoile rakendada suudab on  $F_{pool} = \frac{35 Nm}{0.11 m} = 318,18(18) N$  alla suunatud jõudu

Antud hetkel ei ole teada kahjuks poi elementide täpset massi. Esialgsete arvestuste järgi ei tohiks signaalmajaka elemendid kaaluda rohkem kui 15 kg

Tootja lehelt on võimalik välja lugeda vahtplasti andmed:

$$\text{EPS-i ruumala } V_{koguplast} = 0.54 m^3$$

Paki kaal  $m_{koguplast} = 11.8 \text{ kg}$

Seega on tihedus :  $\rho_{plast} = \frac{m_{koguPlast}}{V_{koguplast}} = 22 \text{ kg/m}^3$

Modelleerisin 3D mudeli programmiga Autodesk inventor (educational). Sobiliku kujuga ujuki ruumala oli umbkaudu  $56592727 \text{ mm}^3$ . Teisendatult kuupmeetritesse  $V_{ujuk} = 0.056592727 \text{ m}^3$ .

Ujuki mass on seega  $m_{ujuk} = \rho_{plast} * V_{ujuk} = 1.245 \text{ kg}$

Signaalmajaka kaal ei ole hetkel täpselt teada, nii et arvutusel tuleks võtta mõningane varu. Leian, et on turvaline eeldada, et signaalmaja süsteemid, raamid, mootorid, elektroonika, kinnitused ja akud, ehk kõik elemendid peale ujuki, ei kaalu kokku rohkem kui  $m_{poi} = 15 \text{ kg}$

Sellest järeldades saab eeldada, et signaalmajakat vette kiskuv maksimaalne jõud on:

$$F_{alla} = (m_{poi} + m_{ujuk}) * G + F_{pool} = 477.5456 \text{ N}$$

See jõud on võrdeline välja surutud veehulgaga. Eeldusel, et vee väljasurumisel tekkiv jõud on  $F_{üless} = V_{vesi} * \rho_{vesi} * G$  kus  $V_{vesi}$ , on väljasurutud vee ruumala, G on gravitatsioonikonstant ehk umbes  $G=9.81$  ja vee tihedus on teatavasti 4 kraadi juures  $\rho_{vesi} = 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ . Samuti on teada, et kui tegemist on ulpiva esemega, mis upu täielikult, on alla suunatud raskusjõud võrdne üles suruva jõuga.

Seega on väljasurutud vee ruumala  $V_{vesi} = \frac{F_{alla}}{\rho_{vesi} * G} = 0.04787 \text{ m}^3$ . Kuna see arv on väiksem kui ujuki ruumala, saame kindlalt öelda, et poi ei upu ka maksimumkoormuse juures. Ujukist vajub maksimumkoormuse juures vee alla  $\frac{V_{vesi}}{V_{ujuk}} * 100\% = 86.02\%$ .

Kuna ujuk koosneb umbes 2.5 cm paksustest plaatidest, saab ujuvust vajadusel reguleerida, kohandades ujuki ruumala ehk lisades või eemaldades EPS-i kihte. Sedasi on võimalik lisada poile tehnikat ja raskust või veelgi vähendada kaalu ja ruumala. Näiteks iseseisval sonariga kaardistamise operatsioonil ei ole ülekandepoil vaja ei pooli, pooli mootorit ega laagerdust, mille eemaldamine vähendaks kogumassi ligi 10 kg.

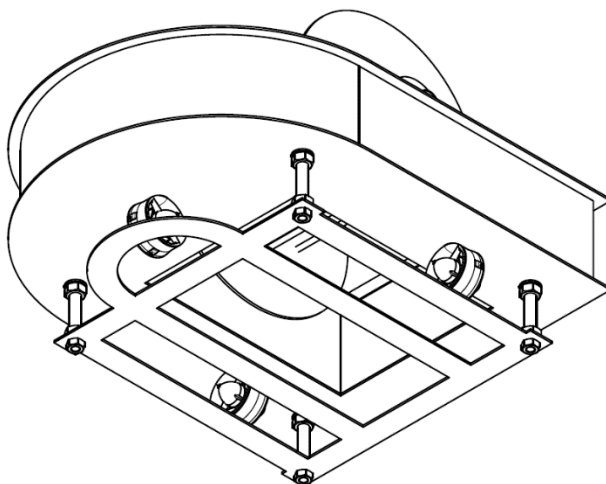
### 4.3 Liikumine ja manööverdamine

Ülekandepoi põhja alla saab manööverdamiseks olema 3 *BlueROV T200 thruster'it*, mis on tööstuslik kombinatsioon elektrimootorist ja sõukruvist, et tagada liikumis- ja manööverdusvõime. Tegemist on sama tehnoloogiaga, mida kasutatakse allveedroonidel. *Thruster'id* on vee- ja rõhukindlad. Kuna need töötavad ka vesijahutusel ja on libestatud neid ümbritseva vee poolt, ei ole nende käivitamine vee peal soovitatud. Antud disaini puhul aga ei tohiks see asetuse tõttu olla probleemiks. Kaks *thruster'it* saavad olema suunatud sõidu suunas ja üks ette, sõidu suunaga risti, et saavutada võimekus muuta kohapeal suunda. *Thruster'id* on võimelised pöörlema võrdselt mõlemas suunas, suurendades nii veelgi manööverdusvõimet.



Joonis 4.3 T200 thruster [1]

### 4.4 Kaitseraam



Joonis 4.4 Ülekandepoi vaatega alt

Signaalmajaka alla on kinnitatud metallist raam. Sellel on mitmeid ülesandeid. Esiteks peab see toimima kui kinnitus ballasti jaoks, kui sellel lisamine osutub vajalikuks. Ballast parandaks signaalmajaka stabiilsust lainetuses, vähendades kõrvalekaldeid horisontaal-asendist. Teiseks toimib see justkui juhina, millest ülevalt rippuv *tether* läbi jookseb. See takistab *tether'il* näiteks *thruster'i* taha takerdumast. Ühtlasi ei lase see poolil tõmmata drooni vastu ülekandepoi põhja, tagades vaba vee liikumise läbi *thruster'ite*.

Kolmandaks peaks see kaitsma mootoreid pörutuste ja takerdumiste eest ning võiks ühtlasi vähendada võimalust, et vetikad või praht mootoreid ummistavad. Vetikate ja prahi vastu aitaks veelgi servadele võrgu kinnitamine, aga sel juhul võivad need hoopis võrku ummistama ja kogu poid takistama hakata, mis ei ole kuigi palju parem lahendus.

## KOKKUVÕTE

Lõputöö käigus disainisin allveedroonile selle ülesandeid silmas pidades ülekandepoi, mis ka üksiku kaaslasena suudaks abistada veealuseid protseduure. Algselt pidi poi peamiseks ülesandeks olema lihtsalt veepealse ja veealuse maailma vahel side hoidmine ja vahendamine. Sellest on abi, kui on vaja viia droon kaist või kaldast eemale või rakendada seda pikemaajalisel lihtsakoelisel ülesandel või kaugjuhtimisel. Poi on ühtlasi allveedrooni asukohta ja tööpiirkonna määraja. Tänu ülekandepoi külge kinnitatud ühenduskaabli pooli rakendustele on võimalik tagada ühenduskaabli optimaalne pikkus ja on võimalik GPS kontrollipunti alusel parandada drooni umbkaudse koordinaadi täpsust. Lisaks abistamisele on poi võimeline ka päästma uppunud drooni rikete või õnnetuste korral, vinnates selle vee põhjast pinna lähedale ja enda põhja alla.

Võrreldes algselt püstitatud probleemi ja sellega seotud plaanidega, on lõpuks valminud disain oluliselt võimekam ja keerulisem. Aja möödudes lisandus hulgaliselt ideid ja võimalikke rakendusi. Sealhulgas võimalus rakendada ülekandepoid mitte ainult toetava konstruktsiooni, vaid ka iseseisva lahendusena. Kõige selgem ja tõenäoliselt ka kõige kasulik näide oleks kombineerida isesõitev poi sonariga ja kasutada seda madalate veekogude kaardistamiseks. Lisaks muutsime plaane poi suuruse ja võimsuse suhtes. Võimsus kasvas, et kompenseerida allveedrooni potentsiaalseid vigu, ja poi füüsiline suurus kasvas, et hoida uut ja võimsamat disaini uppumast ka ekstreemsete koormuste korral. Algse plaani kohaselt oleks pidanud mai alguseks valmima ka esimene prototüüp, kuid CoVid-19 pandeemia tõttu ei olnud see kahjuks võimalik. Samas on lootust, et enne sügist on signaalmajaka prototüüp valmis, kontrollitud ja sooritab oma esimesi proovisõite allveedrooni saatjana.

Kõigele sellele vaatamata on disainil veel täiendust või viimistlemist vajavaid kohti. Näiteks võiks oluliselt parandada elektroonikat sisaldava karbi ja selle elementide jahutust, et vältida protsessorite ja muundurite ülekuumenemist ja rikkeid. Arvestades, et signaalmajakas peaks paiknema kogu oma töö aja mere vees, tuleks leida võimalus soojust vette ära juhtida. Samuti aitaks allveedrooni ülesandeid ja operatsioone paremini läbi viia automatiseeritud võimekus kinnitada ja vabastada allveedrooni signaalmajaka põhja küljest. Kindlamalt ülekandepoi külge kinnitatud allveedroon võimaldaks sellel aidata sidemajakat liikumisel töö piirkonda ja tagasi ning vähendaks potentsiaalselt ühenduskaabli kulumist. Lõpuks tuleks ülekandepoi tähistada meresõitjatele arusaadavalt. Sukeldumisoperatsioonidele on omad tähistused, poid, lipud ja valgussignaalid, et vältida ohtlikke olukordi. Selline märgistus aga vajaks poi veepealses osas märkimisväärseid lisakinnitusi ja valgussignaalide puhul ka elektroonika laiendust, et tagada piisav nähtavus ja üksteisemõistmine.

Kuigi kõnealne projekt oli oluliselt mitmetahulisem ja mahukam, kui algselt eeldatud, ning kõige tipuks CoVid-19 viirusepuhangust pidurdatud, võib lõpptulemusega rahule jääda. Mul on veendumus, et prototüüp saab valmimisel hakkama kõigi ülesannetega, milleks ta loodi ja järgnevad laiendused ja ülesanded on vaid kerge kohanduse kaugusel. Sellel disainil on vaieldamatult loetud puuduseid ja lahendust ootavaid probleeme, kuid oma põhilise ülesande täitmist ei tohiks need hetkel takistada. Seda enam, nende paranduste sisseviimisel on signaalmajaka kandevõime kergesti muudetav ja konstruktsioon võimaldab lisakinnitusi ja kohandamist.



## SUMMARY

During my work I designed a communication buoy that can, even as a single companion, help an underwater drone in its procedures. Originally this buoy was supposed to be just a floating point of communication to connect with the world. That is helpful, when the drone must work at some distance from land, or it can be used to on simpler tasks and missions both by a remote control or by potential automation. This buoy is also a location and workplace definer for underwater drone. Thanks to the attached motorised spool, it can optimise the length of the *tether* or cable connection, between the buoy and the underwater drone. With optimized *tether*, depth measurement from the drone and GPS coordinates from the buoy, an approximate location of the submerged drone can be calculated. The motorised spool also possesses enough power to rescue the drone in case of accidents, by reeling it up against its belly. This can save a drone that has suffered water damage, run out of battery or got stuck in the seaweeds.

Compared to the original hypothesis, of what was going to be needed or going to get built, the final finished design is a lot more complex and also a lot more capable. As time passed, some new ideas were added to it and new functions combined. As a result of that, the buoy is now capable of not only assisting a submerged drone, but it can potentially be used as an independent solution. Best example of this use would be the combination of the independent buoy and a sonar to achieve mapping capability perfect for shallow water, lakes and rivers. The changes also modified the size and power of the communication buoy. The power was added to enable the rescue function and the size of the buoy was increased to keep a new and powerful form from sinking even if this new power tries to pull it under water. By the original plan the design would have become a prototype by the beginning of May, but as a result of the CoVid-19 pandemic, it had to be postponed. There is nevertheless hope to have the prototype finished, checked and tested on its first mission as surface companion for an underwater drone before the autumn

Despite all the already completed design work there are still elements that can be added. For an example the electronic could be combined with a heatsink that can be cooled by the surrounding water. Another idea, that was not added, was an automated mechanical connection, that would let the submerged drone attach itself to the underside of the communication buoy for the purpose of travel. This would reduce the wear and tear of the cable connecting them and made the travel potentially faster, by combining their thruster power. But last and most practically, the buoy should be marked with understandable signals for the sailors to avoid dangers to the buoy and the drone. This would probably implement big colourful surfaces and light signals that need to be added to the top of the buoy, making it much more noticeable.

Even though this project was a more time consuming and grand than originally planned and hindered by a pandemic, it can be considered a success. It is believable that on the completion of the prototype, it will not only prove itself in its tasks, but be easily modifiable for the next ones. The fore-mentioned unsolved elements should also not hinder the buoyancy of its work. We will inevitably find out.

## KASUTATUD KIRJANDUS

- [1] Blue Robotics Inc, <https://bluerobotics.com/>, 2020.
- [2] SOLitude Lake Management, „Woodlake Crossing - 3D,“  
<https://www.solitudelakemanagement.com/>, 2020.
- [3] Mption Dynamics, <https://www.motiondynamics.com.au/worm-drive-motor-12v-70w-45-65-rpm-6-35nm-torque.html>, 2020.
- [4] Moflon Technology, „Slip Rings - Standard In Stock & Custom Solutions - MOFLON,“  
<https://www.moflon.com/slip-ring/>, 2020.

**LISAD**

## Lisa 1 MATLAB simulatsiooni kood

```
G = 9.81; % m/s^2 gravitatsiooni konstant

%Droon
mDroon_air=11; %kg drooni mass õhus
mDroon_wet=0.2; %kg Drooni mass vees

%Tether
DTether1=7.6/1000; % (m)theder-i cord diameeter
%ATheder=(DTtheder1/2)^2*pi; %Theder ristlõike pindala
mTether0=0.046; % kg/m Theder-i kaal
LTether=100; %m theder-i pikkus
mTheder1=mTether0*LTether; %kg (4,6kg) Thederi full mass

%pool
DpoolSise=0.22; %m pooli sise diameeter (min 75 mm)
%DPoolV4li=0.44; %m pooli v4lisdiameeter
Kerila=0.3; %m (pooli kerila laius)= Kodara pikkus
P55ret = Kerila/DTether1; % (39.5) pooli kerilal kõrvuti olevate
keerdude arv
m_pool0= 0.6; % (kg)umbkaudne pooli konstruktsiooni kaal
m_Pool1=mTheder1+m_pool0; %pooli mass koos thederiga
a = 2; %m/s^2 kiirendus millega pool p55rlema hakkab

%% Kerimine
i=LTether ; j=0;
RPool=DpoolSise/2;
while (i>=0)
    RPool=DpoolSise/2+j*(DTether1);
    l=P55ret*(2*pi*RPool);
    i=i-1;
    j=j+1;
end
j; %mitu kihti tetherit on üksteise peal
RPool; %keritud pooli raadius
%Inerts: I=m*r^2;
I2=(1/2)*(RPool^2)*(mTheder1+m_pool0); %(Nm) kui theder on pooli
peale keeratud
I1=(1/2)*(DpoolSise/2)^2*(m_pool0); % (Nm) kui theder on maha
keeratud
%J6ud: m*a ehk mass korda kiirendus;
F1=(mDroon_air+mTheder1)*(G+a);%(N)
F2= (mDroon_air * (G+a));%(N)
%P88rdemoment: M=F*r+I;
M1_1 =((DpoolSise/2)*F1+I1)*1.1; % (Nm) õhus. lahtikeritult
M1_2 = (RPool*F2+I2)*1.1; % (Nm) õhus. kokku keritult
M2_0 =((DpoolSise/2)*(mDroon_wet+mTheder1)*G+I2); % (Nm) vees.
lahtikeritult
M2_1 = (RPool*(mDroon_wet)*G+I1);%(Nm) vees. kokku keritult
%% ringide arv
Ringi=(P55ret*j)+(i/(2*pi*RPool));
```

Lisa 2 Ülekandepoi vähendatud üldjoonis

