



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL  
INSENERITEADUSKOND  
Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

## **AUTONOOMSE ROBOTLAEVA TÄPNE POSITSIONEERIMINE**

### **ACCURATE POSITIONING OF AN AUTONOMOUS DRONE SHIP**

BAKALAUREUSETÖÖ

Üliõpilane: Kris Gregor Laarmann

Üliõpilaskood 179246 EAAB

Juhendaja: Heigo Mölder, insener

Indrek Roasto, vanemlektor

Tallinn 2021

*(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.

“.....” ..... 202.....

Autor: .....

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

“.....” ..... 202.....

Juhendaja: .....

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

“.....” .....202... .

Kaitsmiskomisjoni esimees .....

/ nimi ja allkiri /

# **Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks<sup>1</sup>**

Mina, Kris Gregor Laarmann

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose Autonoomse robotlaeva täpne positsioneerimine,

mille juhendaja on Heigo Mölder,

1.1 reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil, sh Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

1.2 üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.

2. Olen teadlik, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

---

\_\_\_\_\_ (kuupäev)

---

<sup>1</sup> Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal vastavalt üliõpilase taotlusele lõputööle juurdepääsupiirangu kehtestamiseks, mis on allkirjastatud teaduskonna dekaani poolt, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil. Kui lõputöö on loonud kaks või enam isikut oma ühise loomingu tegevusega ning lõputöö kaas- või ühisautor(id) ei ole andnud lõputööd kaitsvale üliõpilasele kindlaksmääratud tähtajaks nõusolekut lõputöö reprodutseerimiseks ja avalikustamiseks vastavalt lihtlitsentsi punktidele 1.1. ja 1.2, siis lihtlitsents nimetatud tähtaja jooksul ei kehti.

## LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE

*Autor:* Kris Gregor Laarmann

*Lõputöö liik:* Bakalaureusetöö

*Töö pealkiri:* Autonoomse robotlaeva täpne positsioneerimine

*Kuupäev:*  
18.05.2021

58 lk (*lõputöö lehekülgede arv koos lisadega*)

*Ülikool:* Tallinna Tehnikaülikool

*Teaduskond:* Inseneriteaduskond

*Instituut:* Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

*Töö juhendaja(d):* insener Heigo Mölder, vanemlektor Indrek Roasto

*Töö konsultant (konsultandid):* -

*Sisu kirjeldus:*

Üha enam pööratakse autonoomsete juhtsüsteemide poole transpordivaldkonnas, eriti merenduses. Autonoomsete süsteemide tähtsaks osaks on erinevad andurid, mis saavad keskkonnast infot ning vastavalt sisenditele teeb süsteem otsuseid.

Antud töö sihiks oli uurida erinevaid täpseid positsioneerimissüsteeme ning välja valida ja rakendada selline süsteem TalTechis arendatavale autonoomsele robotlaevale NYMO. Süsteemi valimisel lähtuti enim lähteülesandes paika pandud tööpiirkonna suurusest ning positsioneerimistäpsusest.

Eesmärgi täitmiseks uuriti erinevaid täpseid positsioneerimistehnoloogiad, nende tööpõhimõtteid ja omadusi, samuti ka saadaolevaid süsteeme. Samuti tehti tehnoloogiate võrdlus koos turuanalüüsiga ja sooritati katseid võrdluse põhjal valitud tehnoloogiaga.

*Märksõnad:* positsioneerimine, navigatsioon, GNSS, GPS, NYMO, droon, RTK, robotlaev, autonoomne

## ABSTRACT

<i>Author:</i> Kris Gregor Laarmann	<i>Type of the work:</i> Bachelor thesis
<i>Title:</i> Accurate positioning of an autonomous drone ship	
<i>Date:</i> 18.05.2021	<i>58 pages (the number of thesis pages including appendices)</i>
<i>University:</i> Tallinn University of Technology	
<i>School:</i> School of Engineering	
<i>Department:</i> Department of Electrical Power Engineering and Mechatronics	
<i>Supervisor(s) of the thesis:</i> Engineer Heigo Mõlder, Senior Lecturer Indrek Roasto	
<i>Consultant(s):</i> -	
<i>Abstract:</i> <p>Autonomous control systems have become more sought after in the transport industry, especially in maritime transport. An important part of these systems are the sensors that gather information from the environment from which the system bases its decisions on.</p> <p>The goal for this paper was to research different accurate positioning technologies, choose and implement a system of this kind to the autonomous dronship NYMO which is developed in TalTech. The most important criteria for choosing the system were the range of the system and the positioning accuracy all of which were set in the terms of reference.</p> <p>To reach this goal research was done on different accurate positioning technologies, their working principles, their properties and also available systems. Later on a comparison of technologies was made with market analysis and also different tests were performed with the technology that was chosen based on the comparison.</p>	
<i>Keywords:</i> positioning, navigation, GNSS, GPS, NYMO, drone, RTK, robotic vessel, autonomus	

# LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Lõputöö teema: **Autonoomse robotlaeva täpne  
positsioneerimine**

Lõputöö teema inglise keeles: **Accurate positioning of an autonomous drone  
ship**

Üliõpilane: **Kris Gregor Laarmann, 179246EAAB**

Eriala: **Elektroenergeetika ja mehhatroonika,  
mehhatroonika peaeriala**

Lõputöö liik: **bakalaureusetöö**

Lõputöö juhendaja: **Heigo Mölder**

Lõputöö kaasjuhendaja: **Indrek Roasto**  
(ettevõtte, amet ja kontakt) **Taltech, vanemlektor, indrek.roasto@taltech.e**

Lõputöö ülesande  
kehtivusaeg: **01.2024**

Lõputöö esitamise tähtaeg: **18.05.21**

---

Üliõpilane (allkiri)

---

Juhendaja (allkiri)

---

Õppekava juht (allkiri)

---

Kaasjuhendaja (allkiri)

## **1. Teema põhjendus**

TalTech-is arendatava autonoomse robotlaeva NYMOga tehakse pidevalt arendustööd ning lootus on, et tulevikus hakkab robotlaev korjama meres prügi, esialgu Tallinna Vanasadamas. Selle ülesande jaoks aga ei ole robotlaeval paiknev GPS piisavalt täpne, mistõttu on teatud ülesannete tegemine keerukas nagu näiteks parkimine spetsiifilises kohas, kitsastes oludes võimatu. Selle parandamiseks tuleks välja valida ning implementeerida uus täpsem positsioneerimissüsteem, mis võimaldaks robotlaeval sadamas hõlpsalt tööd teha ja teda näiteks laadimisdokki parkida.

## **2. Töö eesmärk**

Töö eesmärgiks on robotlaevale NYMO välja valida ning rakendada täpse positsioneerimise tehnoloogia nii riist- kui tarkvaraline pool, mis leiaks pidevalt kasutatud robotlaeva juhtimisel, parkimisel ja laadimisel Tallinna vanasadamas.

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

1. Millised on erinevad võimalused robotlaeva täpseks juhtimiseks? Bluetooth saatjad/vastuvõtjad, UWB saatjad/vastuvõtjad, DGPS, RTK GPS või midagi muud?
2. Millised lahendused on tehtud varasemalt, mis sobiksid kokku laeval oleva autopiloodiga Pixhawk?
3. Millise täpsuseni on võimalik robotlaeva juhtimine viia ja millise hinnaga?

## **4. Lähteandmed**

Uurida tuleb hetkel laevale installeeritud GPS-i andmelehte, autopiloodi Pixhawk ühilduvust nii riist- kui tarkvaraliselt ja Pixhawki erinevaid võimalusi. Samuti lähtutakse ülesande püstitusest ehk mida täpselt on vaja saavutada ning varasemalt proovitud lahendustest. Samuti on lähteandmeteks NYMO tehnilised andmed ja joonised.

## **5. Uurimismeetodid**

Töö teoreetiline osa toetub kirjanduse analüüsile ning kasutades erinevaid tüüpi allikaid nagu aruanded, teadusartiklid. Praktiline osa toetub suurelt mõõtmistele ning katsetele, mida ka kogu aeg analüüsitakse, et andmed oleks kooskõlas lõppülesandes tahetuga.

## **6. Graafiline osa**

Olulisemad joonised, tabelid ning skeemid on peamiselt töö põhiosas

## **7. Töö struktuur**

Lõputöö ülesanne

Sisukord

Eessõna

Mõistete, lühendite ja sümbolite loetelu

Sissejuhatus

1. Ülevaade täpse positioneerimise võimalustest

2. Tehnoloogia valik

2.1 Erinevate tehnoloogiate võrdlus

3. Väljavalitud tehnoloogia

3.1 Väljavalitud tehnoloogia põhimõtted

3.2 Valitud tehnoloogia muud kasutusvaldkonnad

4. Tarkvara ülevaade väljavalitud tehnoloogia jaoks

5. Uue süsteemi paigaldus ning katsetused

Kokkuvõte

Kasutatud kirjandus

Lisad



## **8. Kasutatud kirjanduse allikad**

Erinevad tootekirjeldused, andmelehed, aruanded, eelnevalt loodud lahenduste kirjeldused ning katsed, teadustööd, teadusartiklid.

1. RTK GPS and hardware setup.

[https://docs.px4.io/master/en/gps\\_compass/rtk\\_gps.html](https://docs.px4.io/master/en/gps_compass/rtk_gps.html)

2. Comparative Study on GNSS Positioning Systems for Autonomous Vessels in the Arctic Region.

<http://ceur-ws.org/Vol-2626/paper12.pdf>

3. Location and Positioning Systems: Performance and comparison.

[https://www.researchgate.net/publication/317072811\\_Location\\_and\\_Positioning\\_Systems\\_Performance\\_and\\_comparison](https://www.researchgate.net/publication/317072811_Location_and_Positioning_Systems_Performance_and_comparison)

4. GPS/Compass hardware for Ardupilot.

<https://ardupilot.org/copter/docs/common-positioning-landing-page.html>

## **9. Lõputöö konsultandid**

Heigo Mölder, PhD

Indrek Roasto, PhD

## **10. Töö etapid ja ajakava**

Kirjanduse läbitöötamine ning teoreetilise osa kirjutamine (10.märts)

Katsetused ning mõõtmised (20.märts)

Analüüsi ja kokkuvõtte koostamine (10.aprill)

Töö esimene versioon valmis (22.aprill)

Juhendajale läbilugemiseks saatmine (22.aprill)

Paranduste sisseviimine (1.mai)

Juhendajale teiseks läbilugemiseks saatmine (8.mai)

Töö lõplik versioon valmis (16.mai)

# SISUKORD

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE.....	4
ABSTRACT .....	5
LÕPUTÖÖ ÜLESANNE .....	6
EESSÕNA.....	12
Lühendite ja tähiste loetelu.....	13
SISSEJUHATUS.....	14
1. NYMO POSITSIONEERIMINE .....	16
1.1 Uue süsteemi valikukriteeriumid.....	17
2. ÜLEVAADE KASUTUSEL OLEVATEST TÄPSE POSITSIONEERIMISE VÕIMALUSTEST .....	18
2.1 Satelliitsüsteemid .....	18
2.1.1 Täpsust mõjutavad tegurid .....	19
2.1.2 Diferentsiaal GNSS ehk DGNSS .....	21
2.1.3 Reaalaja kinemaatiline positsioneerimine ehk RTK .....	22
2.2 Raadio-sagedustel põhinevad positsioneerimise tehnoloogiad .....	23
2.2.1 Ülilairibatehnoloogia ehk UWB.....	23
2.2.2 Raadiosagedustuvastus ehk RFID .....	25
2.2.1 Bluetooth.....	26
2.3 Positsioneerimine kasutades heli .....	27
2.3.1 Ultraheliga positsioneerimine .....	27
3. POSITSIONEERIMISSÜSTEEMI VALIK .....	28
3.1 Erinevate tehnoloogiate võrdlus ning süsteemi valik .....	28
4. RTK TEHNOLOOGIA RAKENDAMINE AUTONOOMSE ROBOTLAEVA POSITSIONEERIMISEKS.....	32
4.1 Riistvara sobitamine laevale .....	32
4.1.1 Liikuvjaam .....	32
4.1.2 Baasjaam .....	33
4.2 Tarkvara ühildumine .....	34
5. KATSETUSED JA MÕÕTMISTULEMUSED.....	35
5.1 Staatiline katse metoodika .....	35

5.2 Dünaamiline katse metoodika .....	38
5.3 Andmetöötlus.....	39
5.4 Tulemused.....	43
KOKKUVÕTE.....	47
SUMMARY .....	49
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU .....	51
LISAD.....	56

## **EESSÕNA**

Käesoleva lõputöö teema sõnastati Heigo Mölderil ning Indrek Roasto algatusel tulenevalt NYMO robotlaeva arendusest.

Võtmesõnad: robotlaev, autonoomne, positsioneerimine, bakalaureusetöö.

## Lühendite ja tähiste loetelu

GNSS – *Global Navigation Satellite System*, Ülemaailmne satelliitnavigatsioonisüsteem

GPS – *Global Positioning System*, USA kaitseministeeriumi väljatöötatud ülemaailmne navigatsioonisüsteem

GLONASS - *ГЛОБАЛЬНАЯ НАВИГАЦИОННАЯ СПУТНИКОВАЯ СИСТЕМА*, Venemaa Föderatsiooni kaitseministeeriumi väljatöötatud ülemaailmne navigatsioonisüsteem

DGNSS – *Differential Global Navigation Satellite System*, Diferentsiaalne ülemaailmne satelliitnavigatsioonisüsteem

RTK - *Real Time Kinematic*, Reaalaja kinemaatiline mõõtmismeetod

UWB – *Ultra Wideband*, Ülilairibatehnoloogia

WLAN – *Wireless Local Area Network*, Juhtmevaba kohtvõrk

TOA – *Time-of-Arrival*, Kohalejõudmisaja positsioneerimismeetod

RFID – *Radio-frequency identification*, Raadiosagedustuvastus

SBAS – *Satellite-based Augmentation System*, Kosmoses paiknev tugisüsteem

GBAS - *Ground-based Augmentation System*, Maal paiknev tugisüsteem

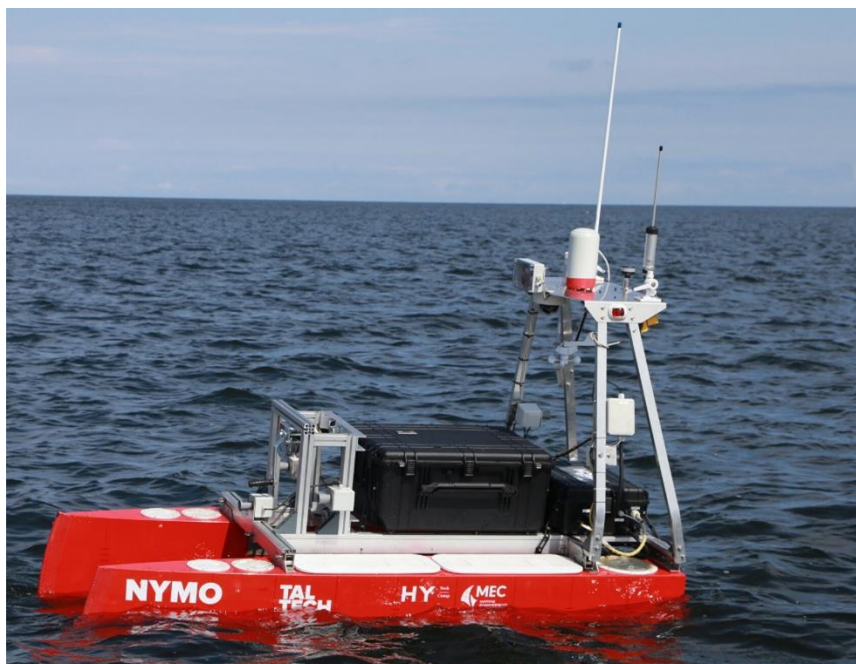
ABAS - *Air-based Augmentation System*, Õhus paiknev tugisüsteem

DCM – *Direction Cosine Matrix*, Suuna koosinus maatriks

## SISSEJUHATUS

Järjest rohkem on hakatud katsetama autonoomsete süsteemide võimalusi erinevates transpordiga seotud rakendusvaldkondades, näiteks laevanduses. Nende süsteemidega nähakse erinevaid võimalusi vähendada kulusid ning tõsta efektiivsust. Keskmisel laevatranspordil veol moodustavad personalikulud ligi 30% transpordi-kuludest. Samuti pakuvad autonoomsed süsteemid inimvigade vältimist. Ennustatakse, et autonoomsete laevade turg kasvab 10 aastaga 134,9 mld dollarit ehk umbes 4,4% igal aastal vahemikus 2020 kuni 2030, mille põhjuseks on just kasvav nõudlus kauba transpordi järele ning kulude vähendamine transpordil [1].

TalTechis arendatav robotlaev NYMO on hea näide autonoomsest alusest (Joonis 0.1). Seda arendavad elektroenergeetika ja mehhatroonika instituudi teadlased koos ettevõtetega MEC Insenerilahendused OÜ ja HY Tech Comp OÜ. NYMO suudab täita kasutaja poolt eelmääratud marsruute ning sooritada ülesandeid sõltuvalt missioonist nagu näiteks väikemahulise kauba transport või merepõhja uurimine. Laeval paiknevad seadmed - andurid, autopiloot, GPS ja muud, on need, mis aitavad teha otsuseid vastavalt ümbritsevas keskkonnas toimuvale ilma inimese sekkumiseta. NYMO kasutab liitiumakusid ning sõidab täielikult elektri jõul.



Joonis 0.1 Autonoomne robotlaev NYMO [2]

Robotlaeva NYMO väga laia kasutusvaldkonna ning modulaarsuse tõttu on võimalik hakata lähitulevikus koristama prügi või õli- ja naftalekkeid meres. Esialgu plaanitakse seda teha Tallinna Vanasadamas, kuhu paigaldatakse ka projekteerimisel olev ujuv laadimisdock. Selle jaoks, et laev oleks võimeline navigeerimaa Tallinna Vanasadama kitsaskohtades ning parkima laadimisdocki, on vaja täpset positsioneerimissüsteemi. Antud hetkel on laeval peal süsteem, mille täpsus on madal ning sellest ei piisa tuleviku rakenduste jaoks.

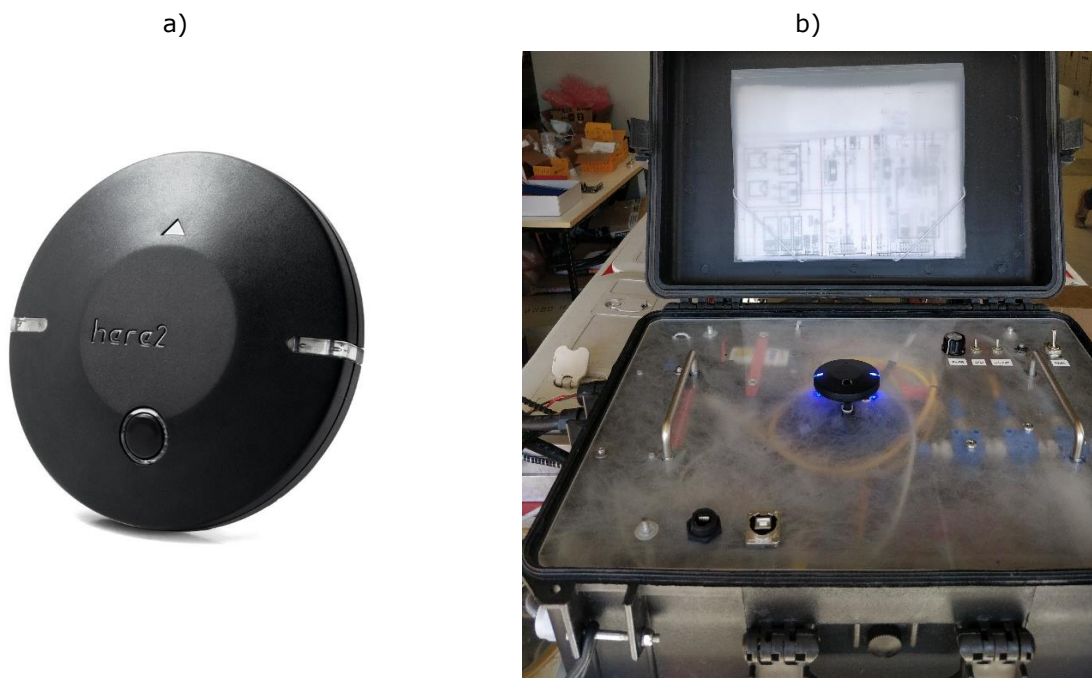
Sellest probleemist tuleneb käesoleva lõputöö eesmärk, milleks on välja valida ning rakendada uus täpsem ning sobiv positsioneerimissüsteem, mis võimaldab robotlaeval Tallinna Vanasadamas hõlpsalt tööd teha ning näiteks laadimisdocki parkida.

Töö on jaotatud viieks osaks, kus uuritakse taustinfot ja võimalikke tehnoloogiaid, tehakse turuanalüüs, tutvustatakse valitud süsteemi ning viiakse läbi katsed. Töö käigus uuritakse erinevad positsioneerimistehnoloogiaid ja -süsteeme varem tehtud teadusuuringute põhjal ning teiste droonide või robotlaevade lahenduste põhjal. Katsetuste tegemiseks kasutati TalTechi peamaja ees olevat autoparklat.

Lõputöös kasutati andmetöötlusteks Microsoft Excelit ning andmete kuvamiseks Google Earth Pro-d. NYMOga ühenduse saamiseks ning katsete sooritamiseks kasutati programmi MissionPlanner ja U-Center.

# 1. NYMO POSITSIONEERIMINE

Autonoomset robotlaeva NYMO sõidukontrolleriks on hetkel Hex Pixhawk Cube/2.1, millel kasutatakse autopilooti Ardupilot. Sellel kontrolleril on olemas IMU (*Inertial Measurement Unit*) andurid ning baromeeter. Pixhawki külge on ühendatud positsioneerimiseks HEX Here 2 GPS (Joonis 1.1 a). HEX Here 2 GPS on GPS süsteem (maksimumusega 104 EUR), mis on disainitud kasutamiseks Pixhawk kontrolleriga ning mõeldud väiksematele projektidele nagu näiteks droonidele. Sellel on integreeritud kolme teljeline güroskoop, kiirendusandur ning kompass. Horisontaalne positsioneerimistäpsus on 2,5 meetrit [3] ning navigatsiooniantmete värskendussagedus on kuni 10 Hz kasutades U-blox M8N moodulit. Joonisel 1.1 b on näha GPS paigutust NYMO juhtelektroonika kohvris.



Joonis 1.1 a) HEX Here 2 GPS [4] b) GPS asetus NYMO-I (keskel)



## 1.1 Uue süsteemi valikukriteeriumid

Sobiva positsioneerimissüsteemi leidmiseks sätestatakse kriteeriumid, mille abil tehakse positsioneerimissüsteemi valik. Kriteeriumid tulenevad hetkelisest probleemist ja lähteülesandest - lähitulevikus valmiva NYMO laadimisdokki parkimiseks ei ole praegune positsioneerimistäpsus sobilik. Samuti on NYMO-le planeeritava prügi- ja naftakoristaja jaoks vaja suuremat täpsust navigeerimiseks kitsamates kohtades just Tallinna Vanasadamas. Tähtsaks kriteeriumiks on ka valitava süsteemi tööpiirkond (Joonis 1.2), mis peaks ära katma Tallinna Vanasadama ~28 hektari suuruse ala. Kõige laiem koht kaldast kaldani on 420 meetrit.

Valikukriteeriumid:

1. sobivus Pixhawk kontrolleri või Jetson Nano arvutiga;
2. ühilduvus autopiloodiga;
3. süsteemi horisontaal positsioneerimistäpsus peab olema alla 50 cm;
4. süsteem peab suutma katta Tallinna Vanasadama tööpiirkonna (ca 28ha);
5. süsteemi hind ei ületa 1000 eurot.



Joonis 1.2 Punasega märgitud tööpiirkond Tallinna Vanasadamas

## 2. ÜLEVAADE KASUTUSEL OLEVATEST TÄPSE POSITSIONEERIMISE VÕIMALUSTEST

Järgneva peatüki puhul tehakse ülevaade erinevatest saadaval ning kasutusel olevatest täpse positsioneerimise võimalustest, kus tutvustatakse lühidalt nende tehnoloogiaid, omadusi ning tööpõhimõtet.

### 2.1 Satelliitsüsteemid

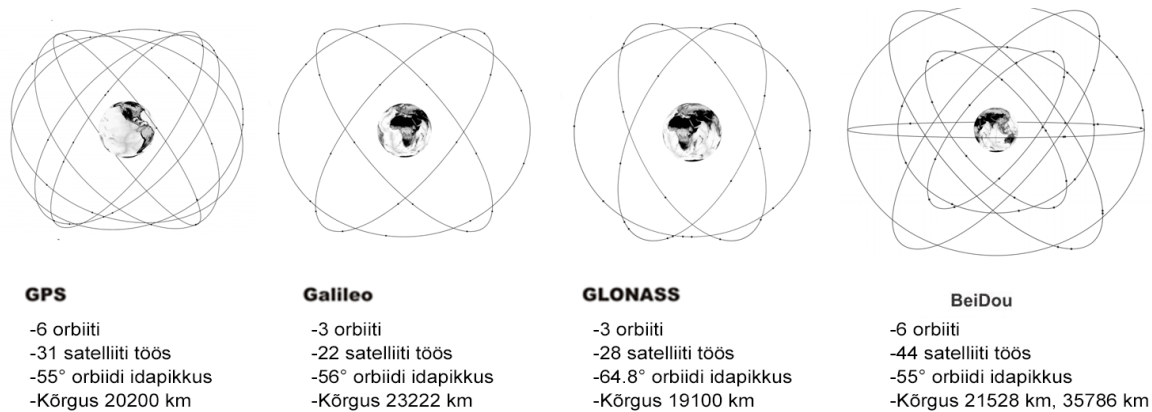
Satelliitsüsteemidest rääkides võetakse lähtepunktiks GNSS (*Global Navigation Satellite System*) ehk ülemaailmne satelliitnavigatsioonisüsteem ning see on ühine nimetaja kõikidele süsteemidele (GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou jne), mis on seotud kosmoses olevate teatud tüüpi satelliidi-grupiga, mis annavad positsioneerimis- ja ajaandmeid GNSS-vastuvõtjale.

GNSS satelliidid mõõdavad pseudokaugusi mõõtes raadiosignaali rändamisaega (ik *time of flight*) vastuvõtjast satelliidini kasutades vähemalt kolme satelliiti (nelja, et arvutada ka kõrgus) ning seejärel saadakse arvutuste tulemusena teada vastuvõtja koordinaadid. Sõna „pseudokaugus“ kasutatakse, et eristada seda reaalsest kauguse väärtusest, sest pseudokaugus on signaali rändamisajast arvatud vastuvõtja ja satelliidi vaheline kaugus [5] [6] [7].

GNSS-i hulgas olevad suurimad süsteemid on järgnevad [8] [9] [10]:

- Ameerika Ühendriikide NavStar GPS (ametlik nimetus) – 31 satelliiti töös 17.05.21 seisuga;
- Venemaa Föderatsiooni GLONASS – 23 satelliiti töös 17.05.21 seisuga;
- Euroopa Liidu Galileo – 22 satelliiti töös 17.05.21 seisuga;
- Hiina BeiDou (Compass) – 44 satelliiti töös 17.05.21 seisuga.

Joonisel 2.1 on kirjeldatud erinevaid GNSS süsteeme, kus on välja toodud nende konstellatsioon, info orbiitide kohta ning kui suur arv satelliite neil kasutusel on.



Joonis 2.1. GNSS süsteemide konstellatsioon [8] [9] [10] [11]

### 2.1.1 Täpsust mõjutavad tegurid

GNSS täpsus pole ideaalne ning sellel võib tihti esineda ebatäpsusi vahemaade arvutamisel satelliitide ning vastuvõtjate vahel. Pseudokauguste arvutamiseks kasutatakse erinevatelt satelliitidelt tulevat signaali kohale jõudmise aega ning isegi väikseim ebatäpsus nagu näiteks 10 nanosekundit võib tekitada pseudokauguses vea  $\pm 3$  m [7].

Ionosfäärist (48-965 km maapinnast) [12] tulenev viivitus on põhjustatud elektriliselt laetud ionide tõttu. GNSS signaal, läbides ionosfääri, puutub kokku nende ionidega ning seeläbi signaali kiirus aeglustub ja põhjustab vea. Ionosfääri viivitus võib varieeruda ning see põhineb suuresti päikese aktiivsusest, aastaajast, kellaajast ning asukohast, mistõttu on raskendatud viivituse võimalik ennetamine.

Samuti võib viga tulla troposfäärist (8-14,5 km maapinnast) [12] kui GNSS signaal seda läbib. Troposfääri puhul põhjustab vigu temperatuuri, õhurõhu või õhuniiskuse muutused.

Sõltumata satelliitide ülitäpsete aatomkellade kasutusest, tihti nanosekundi täpsusega, võivad tekkida kella triivimise fenomeni tõttu väikesed ebatäpsused, mis mõjutavad positsiooni arvutusi. Kella triivimine on olukord, kui kaks kella on omavahel nihkes ning lähevad järjest rohkem sünkroonist välja kui neile ei tehta korrekture. GNSS puhul tekivad kellavead satelliidi kella ja vastuvõtja kella vahel [13].

Vastuvõtja müra tuleneb satelliidi vastuvõtja riist- ja tarkvarast, selle sobivusest keskkonnaga. Müra suurus on seotud vastuvõtja kvaliteediga ehk kõrgema kvaliteediga

GNSS vastuvõtjatel on vähem müra ning seega on mürast tingitud asukoha määramise viga väiksem [5].

Signaalide mitmeteelisus (ik *multipath*) on olukord, kus jõuavad vastuvõtja antennini peale otse signaalide ka üks või mitu peegeldunud signaali. Esimest tüüpi signaalid, mis jõuavad antennini, on peegeldunud satelliidi pinnalt. Teist tüüpi signaalid, on peegeldunud antenni ümbritsevast keskkonnast. Neist esimeste signaalide poolt tekitatud mõju on väga väike, mistõttu jäetakse need enamasti vaatluse alt välja [13].

Satelliidi orbiidi viga on erinevus arvatava satelliidi asukoha ja reaalse asukoha vahel. Pseudokauguste arvutustes on satelliidi asukoha teadmine oluline ja orbiidi viga lisab ebatäpsust. Selle jaoks on maapealne juhtimissüsteem, mis jälgib satelliitide orbiite ja nende muutusi ning satelliidi orbiidi muutusel saadetakse parandid satelliidile ning seejärel uuenevad efemeriidid [5].

Tabelis 2.1 on toodud erinevate GNSS veallikate väärtused kokku, et saada ülevaade.

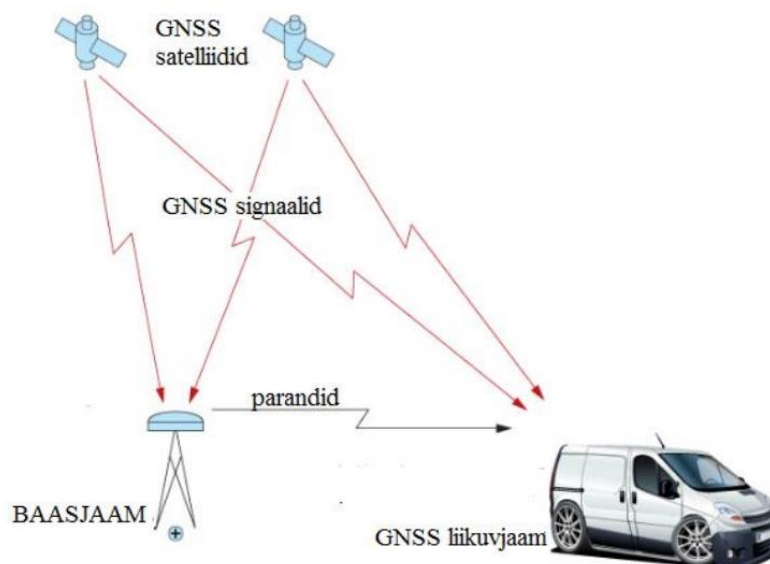
Tabel 2.1. GNSS süsteemi veallikad ning nende mõju täpsusele [5] [11]

<b>Veallikas</b>	<b>Mõju täpsusele, m</b>
Ionosfääri viga	$\pm 5$
Troposfääri viga	$\pm 0,5$
Satelliitkella vead	$\pm 2$
Vastuvõtja müra	$\pm 0,3$
Mitmeteelisus	$\pm 1$
Satelliidi orbiidi viga	$\pm 2,5$

## 2.1.2 Diferentsiaal GNSS ehk DGNS

DGNSS-i (*Differential GNSS*) kasutatakse, et parandada tavalise GNSS-i asukoha täpsust. Süsteemis on põhiliselt kaks elementi – baasjaam ning liikuvjaam. Baasjaam on staatiline ning võtab vastu GNSS signaale, mida kasutatakse pseudokauguste arvutamises satelliitideni ning tehakse kindlaks kauguseparandid. Baasjaam annab saadud kauguseparandid edasi liikuvjaamale, mida liikuvjaam rakendab enda asukohale, et täpsust parandada (Joonis 2.2). DGNSS on integreeritud mitmesse parandussüsteemi, mis jagunevad kolmeks süsteemi paiknemise alusel – kosmoses paiknev tugisüsteem SBAS (*Satellite-based Augmentation System*), maa peal paiknev tugisüsteem GBAS (*Ground-based Augmentation System*), õhus paiknev tugisüsteem ABAS (*Air-based Augmentation System*).

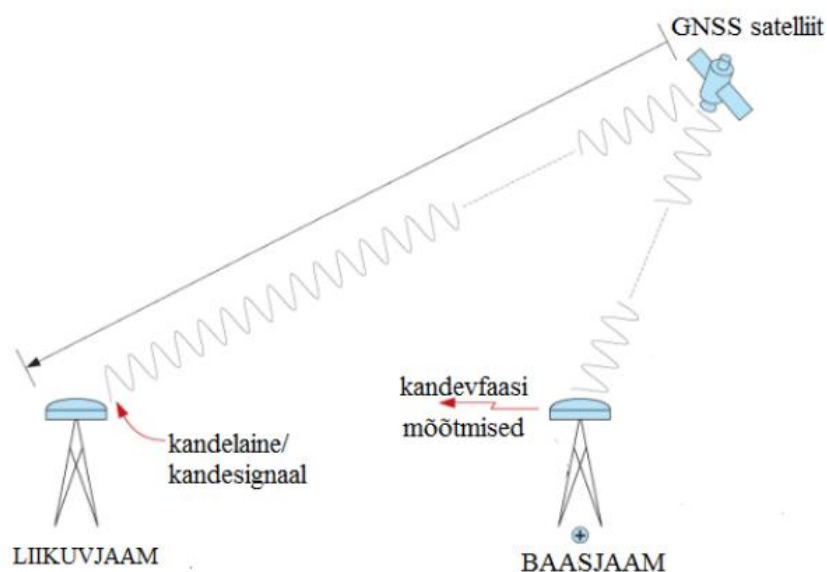
DGNSS signaalide jaoks eraldi väikeseid vastuvõtjaid ei ole, vaid keskendutakse rohkem ülalmainitud tugisüsteemide signaalide kättesaamisele nagu näiteks SBAS. Tänu DGNSS-ile on saavutatav asukoha määramise täpsus erinevaid süsteeme kasutades 1 cm – 2 m, kus suurim täpsus tuleb GBAS süsteemidest ning vähim täpsus SBAS süsteemidest [5] [8] [14].



Joonis 2.2. DGNSS tööpõhimõte [5]

### 2.1.3 Reaalaja kinemaatiline positsioneerimine ehk RTK

RTK (*Real-Time Kinematic*) GPS süsteemi kasutatakse samamoodi nagu eelnevalt mainitud DGPS-i, et parandada tavalise GPS-i asukoha täpsust. RTK süsteemis on kasutusel liikuv- ja baasjaam sarnaselt DGPS-le. Staatiline baasjaam võtab vastu GNSS signaale ning seejärel kasutatakse koodi ja faasi vahede võrdlus-meetodit (ik *carrier-base ranging*). Koodi võrdlusel saadakse kätte ajaline viivitus, mis on baasjaama ja satelliidi vahel. Teades seda viivitust saab viia parandatud GPS signaali asukoha täpsuse 0,5 meetri peale. Sellest suurema täpsuse saamiseks saab liikuvjaam GNSS kandja tsükleid (ik *carrier cycles*) satelliidilt, et arvutada kaugust satelliidist. GNSS satelliit saadab nii baasjaamale kui ka liikuvjaamale kandelained (ik *carrier waves*) ning selle tõttu saadab ka baasjaam parandeid liikuvjaamale, mida kasutatakse reaalajas või järeltöötuses, mis suurendab asukoha täpsust sentimeetritasemeni [5] [15]. Joonisel 2.3 on välja toodud RTK tööpõhimõtte visuaalselt.



Joonis 2.3. RTK GPS tööpõhimõtte [5]

Üks tuntumaid RTK GNSS süsteeme Pixhawk kontrolleri jaoks on Hex-i poolt välja töötatud Here RTK komplektid nagu näiteks hetkel uusim HEX Here 3 (maksumusega 515 EUR), millel on võimekus töötada tava GNSS vormis ning RTK vormis ostes juurde baasjaama (Joonis 2.4). Kasutades RTK GPS-i, on vaja tekitada andmevahetuse suhtlus liikuvjaama ning baasjaama vahel, et edastada positsioneerimisandmeid.



Joonis 2.4. HEX Here 3 RTK & Here+ Base süsteem baasjaama (vasakul), liikuvjaama (mõlemal keskel) ning baasjaama antenniga (paremal) [16]

## 2.2 Raadio-sagedustel põhinevad positsioneerimise tehnoloogiad

Satelliitsüsteemidest järgmine populaarne positsioneerimistehnoloogia on raadio kasutamine. Raadio-sagedustel põhinevat positsioneerimist kasutatakse tänapäeval üha enam siseruumi tingimustes, näiteks erinevates laohoonetes või tootmises [17].

### 2.2.1 Ülilairibatehnoloogia ehk UWB

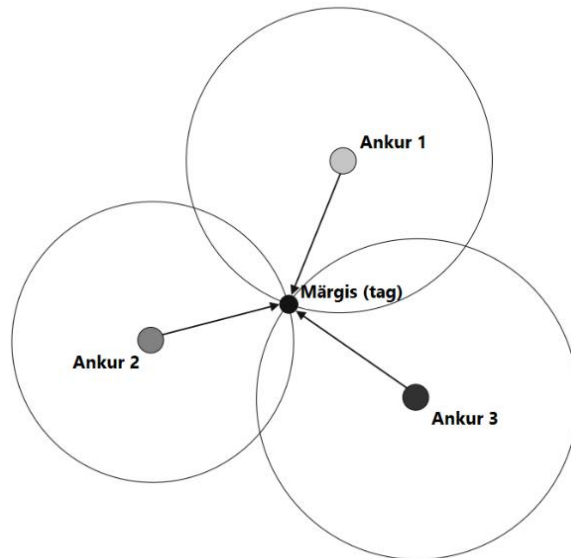
UWB (*Ultra-wideband*) ehk ülilairibatehnoloogias kasutatakse elektromagnetiliste lainete edastamist lühikeste impulssidena ( $>1$  ns) laias sagedusribas ( $>500$  MHz). Nende omaduste tõttu on võimalik välja filtreerida peegulduvad signaalid, mis ei kuulu originaal signaali hulka ehk minimeeritakse mitmeteelise poolt tekitatud probleeme. UWB edastab signaale mitmes sagedusribas (3,1 kuni 10,6 GHz) samaaegselt.

UWB positsioneerimise rakendamisel kasutatakse mitut statsionaarset majakat, mille asukoht on täpselt teada ning vähemalt ühte märgist (ik *tag*) mille asukohta on vaja teada (Joonis 2.5).

Positsiooni leidmiseks kasutades parameetriteks signaali tugevust, signaali kohalejõudmisaega, signaali suunda majaka/ankru ja märgise vahel on neli erinevat

moodust -TOA, TDOA, AOA ja hübriid. Moodus valitakse vastavalt olukorrale ja keskkonnale [17] [18]. Üks selline süsteem on nt Pozyx-i poolt välja töötatud, mille korral on vaja vähemalt nelja majakat ning neil igaühel peab olema eraldi toide. Täpsus Pozyx süsteemi (Joonis 2.6) korral on 10 cm kuid positsioneerimise jaoks kaugus peab jääma märgisest alla 100 meetri. Pozyx-i poolt välja töötatud komplektis on ühe märgise maksumus 135 EUR ja majakal ka 135 EUR.

s



Joonis 2.5 TOA (*Time-of-Arrival*) meetodi kasutamine UWB-ga positsioneerimisel



Joonis 2.6 Pozyx-i poolt pakutava UWB süsteemi majakas [19]



## 2.2.2 Raadiosagedustuvastus ehk RFID

RFID (*Radio-frequency identification*) ehk raadiosagedustuvastus on tehnoloogia, mis kasutab raadio laineid andmete hoiustamiseks ja vahetamiseks märgise (ik *tag*) ja lugeja vahel. RFID lugejad loevad andmeid, mis antakse edasi RFID märgistelt. RFID tehnoloogiat kasutatakse palju asjade tuvastamisel (personali, inventuuri, loomade jne) selle odavama hinna tõttu, kuid samuti kasutatakse seda tehnoloogiat positsioneerimisel ära märgistatud alal.

RFID tehnoloogia jagatakse kaheks alam-kategooriaks – aktiivne ja passiivne. Passiivse RFID puhul on tegemist passiivse märgisega, mis käitub vastuvõtjana ning moduleerib ja peegeldab signaale tagasi vaid siis kui see on piisavalt lähedal (1-2 m) lugejale. Passiivne märgis ei vaja energiaallikat töötamiseks. Aktiivse RFID puhul on märgis ka saatja rollis ning energiaallika olemasolu tõttu edastab märgis perioodiliselt signaale enda kohta või mingit muud infot lugejatele. Kuna märgis on saatja rollis suureneb sellega ka kaugus, millega saavad lugeja ja märgis suhelda paarilt meetrit kuni 100 meetrini [17].

Sellise tehnoloogiaga süsteeme, mis oleksid otseselt ühilduvad NYMO-I oleva kontrolleriaga ei ole hetkel saadaval. Näide süsteemist on USA-s baseeruva ettevõtte GAO RFID toode (Joonis 2.7), mille 433 MHz majakas suudab tuvastada märgiseid maksimaalselt 100 meetri kauguselt. Ühe majaka hind on 1460 eurot ja märgise hind 32 eurot.



Joonis 2.7 RFID lugeja tootjalt GAO RFID [20]

### 2.2.1 Bluetooth

Bluetoothi kasutatakse enamasti andmete edastamiseks lühikese vahemaa peale (10-100 m, kasutades Bluetooth 2.0) töötades sagedusribal 2,4 GHz kiirusega 1-3 Mbit/s. See on määratud kui IEEE standardina 802.15.1. Põhiliseks eesmärgiks on andmevahetus ja ühenduvus ilma otsenähtavuseta keskkonnas ning selle odavuse ja paljude rakendusvaldkondade tõttu leidub seda tänapäeval enamuses telefonides ja sülearvutites.

Apple on välja töötanud protokollid iBeacon, mis kasutab BLE (Bluetooth Low Energy) seadmeid teiste seadmete läheduse tuvastamiseks. Lihtsaimal tasandil kasutatakse seda eelmainitud läheduse tuvastuse eesmärgil, kus tavaliselt saadakse kaugus nutitelefoni märgise või majakani. Positsioneerimise jaoks on vaja mitut majakat või märgist kindlates punktides ning nutitelefoni või seadmes arvutatakse mitme läheduse mõõtetulemusena asukoht märgiste või majakate suhtes [17].

Näide ühest tootest on Accent Systems-i Bluetooth majakas (Joonis 2.8), millega saaks teha potentsiaalse töötava süsteemi. Hetkel ei ole loodud Pixhawk kontrolleri jaoks sobivaid Bluetooth positsioneerimissüsteeme ning seetõttu peaks lahenduse looma kasutades Jetson Nano arvutit, mis on NYMOI. Ostes 10 majakat korraga, on hind ühel majakal 18,8 eurot.



Joonis 2.8 Accent Systems-i pakutav Bluetooth majakas [21]

## 2.3 Positsioneerimine kasutades heli

Positsioneerimine heliga piirdub tänapäeval enamasti ultraheliga, sest see on heli, mida inimkõrv ei kuule ning seega ei ole häiriv. Heliga positsioneerimist kasutatakse enamjaolt siseruumides, sest väljas olles on suurimaks probleemiks mitmeteelisuus ning erinevad teised helid, mis võivad keskkonnast tulla.

### 2.3.1 Ultraheliga positsioneerimine

Ultraheli positsioneerimissüsteemid kasutavad helisagedusi, mis ei ole inimkõrvale kuulda (keskmiselt 40 KHz). Ultraheli positsioneerimise puhul mõõdetakse signaali rändamisaega saatjalt vastuvõtjale ning seeläbi arvutuste käigus saadakse teada positsioon. Seda laadi positsioneerimist kasutatakse tihti laboritingimustes või näiteks haiglates selle süsteemi vähese keerukuse, kuid suure täpsuse tõttu (paar cm) [17]. Paljudel droonidel ning projektidel kasutatakse Marvelmind-I poolt pakutavat süsteemi, mille ühe välistingimuste majaka hind on 129 eurot ning modem arvutiga ühendamiseks maksab 129 eurot (Joonis 2.9)



Joonis 2.9 Marvelmind-i poolt pakutav ultraheli positsioneerimissüsteem nelja majakaga ja ühe modemiga [22]

### 3. POSITSIONEERIMISSÜSTEEMI VALIK

Sobiva positsioneerimissüsteemi leidmiseks tehakse eelkõige turuanalüüs pakutavatest tehnoloogiatest ning nende võimalustest. Selle kaudu saab valida kõige optimaalsema ning sobilikuma süsteemi, mida paigaldada NYMO peale. Selleks lähtutakse uue süsteemi valikukriteeriumitest, mida mainiti esmalt alapeatükis 1.1.

Uue positsioneerimissüsteemi valikukriteeriumiteks on:

1. sobivus Pixhawk kontrolleri või Jetson Nano arvutiga;
2. ühilduvus autopiloodiga;
3. süsteemi horisontaal positsioneerimistäpsus peab olema alla 50 cm;
4. süsteem peab suutma katta Tallinna Vanasadama tööpiirkonna (ca 28 ha);
5. süsteemi hind ei ületa 1000 eurot.

#### 3.1 Erinevate tehnoloogiate võrdlus ning süsteemi valik

Erinevad positsioneerimistehnoloogiad koondati ühte tabelisse (**LISA 1**), kus on olemas vajalikud parameetrid tehnoloogia valikuks. Täpsus, tööpiirkond, eelised ja puudused toodi välja iga tehnoloogia kohta eraldi ning info nende kohta saadi uurides erinevaid süsteeme. Mitte satelliit-positsioneerimissüsteemide uurimisel lähtuti esmalt tarkvara ühilduvus võimalustest Pixhawiga ning selle kohta on Ardupiloti lehel välja toodud tabel, kus on kirjas sobivad süsteemid (Joonis 3.1). Satelliitsüsteemide uurimisel peab samuti lähtuma ühilduvusest Pixhawki tarkvaraga. Erinevad süsteemid kasutavad erinevaid tarkvaraliideseid ning kõik süsteemid ei pruugi sobida. Seega kontrollitakse süsteemide andmelehti leidmaks sobivust Ardupilotiga. Selle jaoks on Ardupiloti lehel välja toodud sobivad GPS tarkvaraliideste tüübid (Joonis 3.2)

Väärtused	
Väärtus	Tähendus
0	None
1	Pozyx
2	Marvelmind
3	Nooploop
10	SITL

Joonis 3.1 Ardupilotiga sobivad majakaga (ik *beacon*) positsioneerimissüsteemid [23]

Väärtus	Tähendus		
0	None	11	GSOFF
1	AUTO	13	ERB
2	uBlox	14	MAV
3	MTK	15	NOVA
4	MTK19	16	HemisphereNMEA
5	NMEA	17	uBlox- Likuv baasjaam-Baas
6	SiRF	18	uBlox- Likuv baasjaam-Õõiduk
7	HIL	19	MSP
8	SwiftNav	20	AllyStar
9	UAVCAN	21	ExternalAHRS
10	SBF		

Joonis 3.2 Ardupilotile sobivad satelliitsüsteemide tarkvaraliidesed [24]

Järgmisena toodi iga positsioneerimistehnoloogia kohta välja reaalne näide süsteemist, mida uuriti (**LISA 1**). Tehnoloogiate süsteemide näited valiti tabelisse kooskõlas süsteemi kriteeriumitega ning mitme sobiva süsteemi puhul valiti odavaim.

Lähtuvalt positsioneerimissüsteemi kõikidele kriteeriumitele (täpsus, tööpiirkond) kvalifitseeruvad RTK GPS ja ultraheli tehnoloogiad. Teised tehnoloogiad ei suuda saavutada piisavat tööpiirkonda või täpsust.

Ultraheli ja RTK GPS vahelises võrdluses on RTK sobivam, kuna selle tööpiirkond on mitu korda suurem ning ei ole vaja paigaldada majakaid. Puuduseks märgitud suuremat ajakulu ei nähta probleemina, kui suudetakse saavutada vajaminev täpsus.

Tehti võrdlus erinevate RTK GPS süsteemide vahel (Tabel 3.1), et välja valida sobivaim süsteem NYMOle. Süsteemide otsing toimub keskendudes sobivusele Pixhawkiga ning algselt sätestatud valikukriteeriumitele.

Tabeli 3.1 süsteemide võrdlusest on näha, et hinna suurenemisel muutub ka süsteemi täpsus paremaks, kuid seda vähesel määral. Hinna suurenemisel paraneb süsteemide vastupidavus välitingimustele ning väheneb süsteemide baasjaama täpse positsiooni saamise ajakulu. Seega on sobivaim antud rakenduseks süsteem Hex Here 3+ & Here+

Base, mis on tabelis soodsaim hinna poolest. Hex Here 3 süsteem on lihtsasti ühilduv nii Pixhawk'i kui ka juhtimisprogrammiga Mission Planner. Alternatiiv oleks SimpleRTK2B kui tekib probleeme tarnega või saadavusega.

Tabel 3.1 RTK GPS süsteemide võrdlus (valitud variant rohelisega)

Süsteemi nimetus	Pakutav täpsus tootja poolt, cm	Rakenduslik täpsus (avatud maastik), cm	Tööpiirkond, km	Tootja poolt nõutavad lisad	Kogu maksumus, €
Piksi Multi	1 [25]	4,3 [26]	-	Antennid baasile ja liikuvjaamale	1470
SimpleRTK2B	1-3 [27]	1,7-3,8 [28]	20	Antennid baasile ja liikuvjaamale	542
Holybro H-RTK F9P	1 [29]	2 [30]	20	-	916
Emlid Reach M+	0,5-0,7 [31]	-	10	-	1050
Emlid Reach M2	0,4-0,7 [31]	-	60	-	2200
CUAV C-RTK 9P	1 [32]	2 [33]	20	-	1400
Hex Here 3+ & Here+ Base	2,5 [34]	-	10	-	515
Hex Here+ V2 RTK & Here+ Base	2,5 [34]	-	10	-	600

Käesoleva töö käigus ei ostetud HEX Here 3 komplekti, kuna HEX RTK positsioneerimissüsteemi vanem variant – HEX Here+ V1, oli juba olemas. HEX Here+ V1 on väga sarnane tabelis välja toodud HEX Here+ V2 komplektiga. Nimelt on mõlemal süsteemil sama GPS moodul U-Blox M8P ning tootja lubab mõlema puhul sama täpsust – 2,5 cm. Erinevus nende süsteemi vahel seisneb andmeside protokollide kasutuses. HEX Here+ V2 kasutab UAVCAN-i, mis on spetsiaalselt loodud CAN töötamiseks HEX

omavaheliste toodetega. Vanem süsteem HEX Here+ V1 kasutab andmeside protokoll  
I2C. Ühilduvus Pixhawk kontrolloriga on mõlemal sama. HEX Here+ V1 ei ole välja  
toodud RTK GPS süsteemide võrdluses, sest seda enam ei toodeta.

## **4. RTK TEHNOLOOGIA RAKENDAMINE AUTONOOMSE ROBOTLAEVA POSITSIONEERIMISEKS**

Uueks Nymo positsioneerimise tehnoloogiaks valiti RTK GPS ning katsetamiseks saadi süsteem HEX Here+ V1.

### **4.1 Riistvara sobitamine laevale**

RTK GNSS-i seadme Hex Here+ V1 paigaldamine NYMOle toimus vastavalt tootja lehel saadud juhendi [35] järgi. Et aga esmalt soovitab tootja kontrollida ning vajadusel uuendada liikuvjaamal ning baasjaamal püsivara, siis tutvustakse ühendamist arvutiga.

#### **4.1.1 Liikuvjaam**

Liikuvjaama ühendamisel arvutiga püsivara uuendamiseks peab esmalt liikuvjaama korpuse eemaldama ning siis kinnitama kaasaantud USB juhtme. Peale arvuti peab liikuvjaam olema ühendatud ka Pixhawk'i kontrolleri USB1 pesasse toite saamiseks (Joonis 4.1). Peale tarkvara uuendust ühendatakse liikuvjaam arvutist ja kontrolleriist lahti ning pannakse korpus kokku tagasi. Enne katse algust tehakse ühendus liikuvjaama ja kontrolleri vahel, mis on vajalik seadme tööks ning andmevahetuseks.

Liikuvjaama kasutusel eeldatakse, et selle paigutus on võimalikult kõrgel ning häiringutest eemal, mis on ka soovitus muude GNSS süsteemide puhul. NYMO-l on liikuvjaam paigutatud veekindlasse kohvrise (Joonis 1.1 b) kuna tootja ei ole andnud liikuvjaamale IP-kaitseastet, kus on koos ka palju muud NYMO juhtelektroonikat, mis peavad olema samuti kaitstud välise ilma ja vee eest.





Joonis 4.1 Liikuvjaam (vasakul) ning Pixhawk kontrolleri (paremal) ühendatud arvutiga püsivara uuendamiseks [35]

#### 4.1.2 Baasjaam

HEX Here+ V1 baasjaama püsivara uuendamiseks ühendatakse see kaasaantud USB kaabli abil arvutiga (Joonis 4.2) ning peale uuendamist võib arvutist lahti ühendada. Enne katse algust ühendatakse see uuesti arvutiga ning keeratakse külge pikendusega antenn.



Joonis 4.2 Baasjaam ühendatud arvutiga püsivara uuendamiseks

Baasjaama paigutus ei ole oluline, vaid oluline on baasjaama antenni paigutus, mis peab olema sarnaselt liikuvjaamale võimalikult kõrgel ning eemal võimalikest häiringu allikatest. Samuti on oluline, et antenn oleks võimalikult lagedas kohas ning stabiilselt fikseeritud ühte kohta, näiteks statiivi külge, mida tehti ka käesolevas töös.

## **4.2 Tarkvara ühildumine**

Hex Here+ V1 on disainitud kokku sobima Pixhawk kontrolloriga ning seega ei teki tarkvaraga ühilduvus probleeme, kui jälgitakse juhendit [35].

Tahtes hakata HEX Here+ V1 süsteemi kasutada, tuleb esmalt kontrollida/uuendada püsivara. Selle jaoks installitakse arvutile draiverid, mille allalaadimise lehekülje saab manuaalist. Samuti on vaja allalaadida tasuta programm U-Center, mille kaudu saab kontrollida liikuvjaama ja baasjaama püsivara või seda uuendada.

MissionPlanneri kaudu käib baasjaama asukoha määrdistus, millest räägitakse lähemalt järgmises peatükis.

Antud süsteemi saamisel prooviti esmalt seda tööle saada ilma püsivara uuendamiseta, kuid sellises olekus ei edastanud baasjaam andmeid liikuvjaamale. Seega, kontrolliti ära püsivara versioon ning vastavalt uuendati püsivara süsteemi pärast mida süsteem töötas korrektselt.

## 5. KATSETUSED JA MÕÖTMISTULEMUSED

### 5.1 Staatiline katse metoodika

TalTechi parklasse tehti katse jaoks testpunkt, mille koordinaadid võeti Maa-ameti kaardirakendusest. Katse asukoha valimisel arvestati sarnaste tingimustega mida võib leida Tallinna Vanasadamas, kus on hõre hoonestus ning paar kõrgemat hoonet. Koht, mis välja valiti asub autoparkla keskkohast allpool parkimiskohtade ristumispunktil

(

Joonis 5.1).

Antud katse sooritati nii Here 2 GPS ja uue Here+ RTK GPS-ga samas testpunktis. Mõõtmist teostatakse nii, et korraga oli üks süsteem ettemääratud testpunktis 30 minutit, peale mida toimus süsteemi vahetus ning korrati katset teise süsteemiga. Katse käigus oli NYMO samas valmisolekus nagu oleks ta vees – elektroonika-kohver suletud, kõik avad kinnikeeratud.



Joonis 5.1 Töödeldud kuvatõmmis Maa-ameti kaardirakendusest koos märgitud RTK baasjaama ning NYMO GPS-i asukohaga

Esmalt teostati RTK süsteemiga mõõtmine, kuid enne katse algust pidi RTK süsteemi baasjaama antenni fikseerima (Joonis 5.2) ning teostama koordinaatide mõõdistamise. Baasjaam fikseeriti statiivile ning samuti lisati statiivile alla ka raskus, et statiiv õrna tuulega ei hakkaks kõikumama ega nihkuma.



Joonis 5.2 RTK baasjaama antenni paiknemine parkimiskohtade ristumispunktis statiivil ning NYMO musta kasti sees oleva GPS paiknemine parkimiskohtade ristumispunktis enne katsetusi

RTK baasjaama koordinaatide pikaajaline mõõdistamine annab RTK süsteemile täpsuse sentimeetrites. Mida kauem teostada baasjaama koordinaatide mõõdistust, seda suurem on ka täpsus. Antud katses toimus baasjaama koordinaatide mõõdistus 60 minutit, kuid soovitatakse parima täpsuse jaoks baasjaamal mõõdistada kolm kuni neli tundi. RTK baasjaama mõõdistuse täpne protsess on kirjas manuaalis ning selle järgi tehti viidi ka katse läbi. MissionPlanneris näitab aktiivselt mõõdistusprotsessi RTK seadmete vaheleht (Joonis 5.3), kus on programmi alumisel poole näha satelliitühenduste arvu (rohelist tulbad), nende satelliitühenduse signaali tugevust ning samuti eelnevaid salvestatud baasjaama positsioone ja muud.

Tulemusena näitas MissionPlanner, et RTK süsteemi baasjaama positsioneerimistäpsuseks saavutati 70 sentimeetrit.



Joonis 5.3 Kuvatõmmis MissionPlanneri RTK seadmete vahelehest

Kui baasjaama moodsus lõpetati, logiti MissionPlannerisse sisse, et saada ühendus NYMO-ga ning pandi katseag käima. Ühenduse loomisel MissionPlanneriga hakkab programm automaatselt logima laeva olekut ning kõike sellega toimuvat sealhulgas ka katses uuritavaid positsiooniandmeid. Katseaja lõppedes logiti välja MissionPlannerist ning andmete salvestamine logisse katkes.

Kui katse sai RTK süsteemiga tehtud, ühendati see lahti arvutist ning NYMO elektroonika lülitati välja, peale mida ühendati elektroonika kohvris Pixhawk kontrolleri küljest lahti RTK süsteemi liikuvjaam ning ühendati kontrolleri olemasolev HEX Here 2 GPS. Seejärel lülitati NYMO elektroonika sisse, suleti elektroonika kohver ning veenduti, et laev on katse jaoks valmis.

Samamoodi nagu RTK süsteemi puhul, logiti MissionPlannerisse sisse ning pandi katseag käima. Katselõpus logiti välja MissionPlannerist ning andmete salvestus katkes.



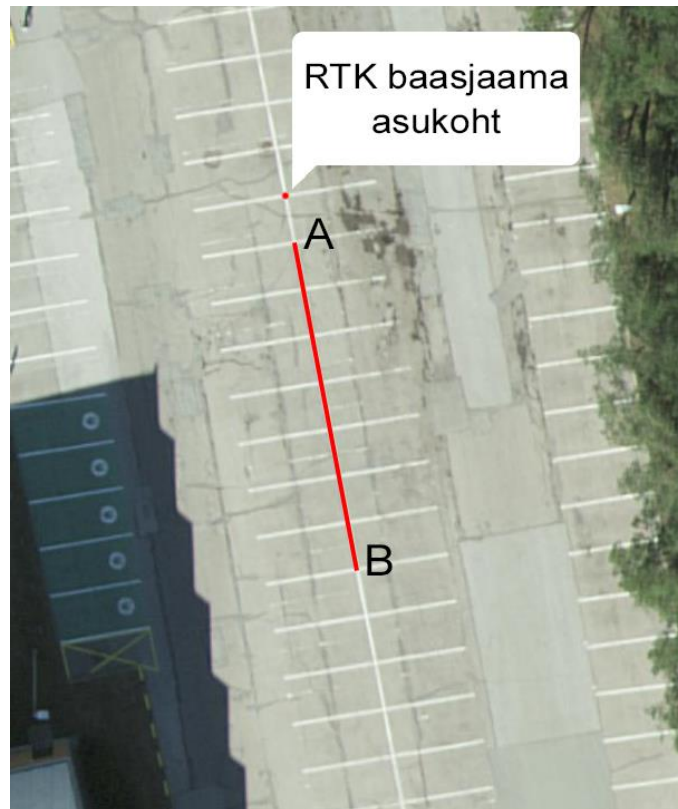
## 5.2 Dünaamiline katse metoodika

TalTechiparklasse tehti katse jaoks liikumistrajektoor (Joonis 5.4), mida mööda liiguti NYMOga. Katse asukohaks valiti sama koht, mis staatilisel katsel, kuna RTK baasjaamal oli eelnevast katsest asukoht salvestatud ning baasjaama koordinaatide määrdistust polnud mõtet uuesti teha.

Antud katse sooritati mõlema süsteemiga (Here 2 GPS ja Here+ RTK GPS) samal marsruudil. Esmalt liiguti punktist A punkti B (Joonis 5.4), joondati kohe GPS parkimiskohtade ristumispaigaga, oodati korraks ning siis pöörati ümber punktis B. Peale ümber pööramist oodati 5-10 sekundit ning siis liiguti tagasi punkti A. Laeva ümberpööramise liikumist ei arvestatud täpsuse arvutustel. Laeva liikumine teostati käsitsi, tõmmates ning juhtides laevakäru õigel trajektoorigil.

Liikumistrajektoori otspunktide koordinaadid saadi Maa-ameti kaardirakendusest:

- Punkti A asukoht - B: 59,395692 L: 24,672308
- Punkti B asukoht - B: 59,395531 L: 24,672366



Joonis 5.4 Dünaamilise ehk liikuvkatse trajektoor autoparklas

## 5.3 Andmetöötlus

Andmete töötlemiseks kasutati faile, mida MissionPlanner genereeris peale katse lõppu, milleks on tlog-formaadis telemeetria logi andmed. Need salvestati ümber csv-formaati, et saaks andmeid töödelda Microsoft Excelis. Saadud telemeetria logi failis kasutatakse asukoha andmeid, mis on pärit kahelt andmeallikalt: *global\_position\_int* ning *ahrs3*. Esimene andmeallikas *global\_position\_int* on filtreeritud globaalne asukoht, mis tähendab, et on kombineeritud GPS andmed ning IMU andurite andmed saamaks võimalikult täpset positsiooni [36].

Teine andmeallikas *ahrs3* on kolmas *ahrs* filter ehk allikas, mille andmeid filtreeritakse kolm korda erinevate kogutud andmete põhjal [37]. Andmeallikas *ahrs* kirjeldab DCM-i (*Direction Cosine Matrix*) olekut ehk suuna koosinuse maatriksi olekut, mis on teisisõnu algoritm kus töödeldakse positsiooniandmeid, kasutades güroskoobi, IMU andurite ja GPS andmeid.

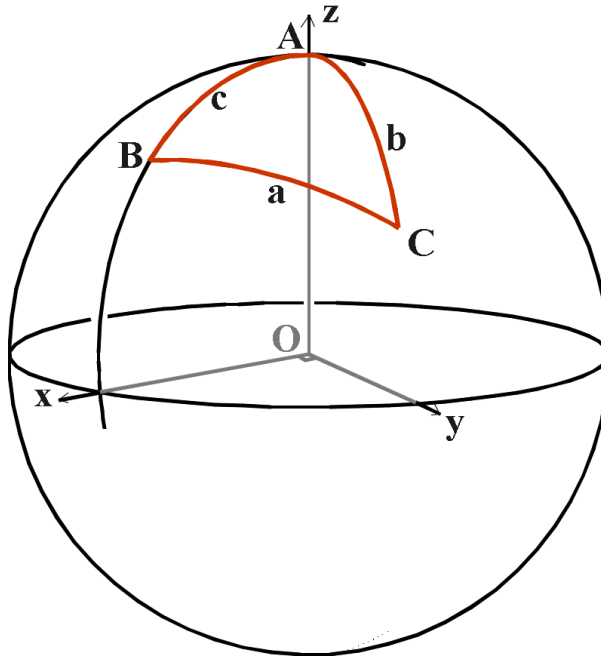
Saamaks aru erinevusest Here 2 GPS ja uue Here+ RTK GPS positsiooniandmetes ning et saada võrdlemismomendi, tehakse staatilise katse puhul analüüs meetodil, kus leitakse saadud positsiooniandmete kaugus 0 punktist ehk Maa-Ameti kaardirakendusest võetud asukohast. Kuna saadud GPS positsiooniandmed mõlemat süsteemilt (Here 2 GPS ja Here+ RTK GPS) on geodeetilised pikkus ja laius (ik *longitude* ja *latitude*), siis et leida kauguseid 0 kohast, kasutati koordinaatide vaheliste kauguste leidmiseks sfäärilist koosinuselause (ik *Spherical law of cosines*). Sfääriline koosinuslause võtab arvesse maa kumeruse ning selle kaudu arvutatakse kahe geodeetilise koordinaadi vahe [38].

Sfäärilise koosinuslause valem:

$$\cos c = \cos a * \cos b + \sin a * \sin b * \cos C \quad (5.1)$$

Kus  $c$  - ühe külje pikkus või nurk radiaanides,  
 $a$  - teise külje pikkus või nurk radiaanides,  
 $b$  - kolmanda külje pikkus või nurk radiaanides,  
 $C$  - külje  $c$  vastasnurk.

Lisatud on Joonis 5.5 valemi paremaks aru saamiseks. Joonisel on kujutatud kera ning sinna on märgitud peale mõõda pinda kulgev kolmnurk. Suured tähed  $A$ ,  $B$  ja  $C$  on nurgad ning väikesed tähed  $a$ ,  $b$  ja  $c$  on küljed, mida ka valemis kirjeldatakse.



Joonis 5.5 Kera mudel millel on kujutatud pinnal olevat kolmnurka [39]

Sfäärilise koosinuslause valemist saab tuletada arvutusvalemi, mida kasutati andmetöötlustel (valem 5.2). Et leida tõelist vahemaad tuleb juurde üks lisategur  $R$ , ilma milleta saaks valemi abil vaid nurkkauguse kahe punkti vahel [40].

$$d = \arccos(\cos\varphi_1 * \cos\varphi_2 * (\lambda_2 - \lambda_1) + \sin\varphi_1 * \sin\varphi_2) * R \quad (5.2)$$

- Kus  $d$  - kahe punkti vaheline kaugus, m,
- $\varphi_1$  - esimese punkti laiuskraad, rad,
- $\varphi_2$  - teise punkti laiuskraad, rad,
- $\lambda_1$  - esimese punkti pikkuskraad, rad,
- $\lambda_2$  - teise punkti pikkuskraad, rad,
- $R$  - Maa raadius, m.

Antud valem sisestakse Microsoft Excelisse ning kohendatakse programmi süntaksile sobivaks, kus  $Lat1$  tähistab laiuskraadi ning  $Lon1$  pikkuskraadi. Samuti tehakse muudetakse kraadid ümber korrutades kraade pii-ga ning jagades 180 kraadiga:

$$=ACOS(COS(Lat1*PI()/180) * COS(Lat2*PI()/180) + SIN(Lat1*PI()/180) * SIN(Lat2*PI()/180)*COS(Lon2*PI()/180-Lon1*PI()/180)* 6371*1000$$



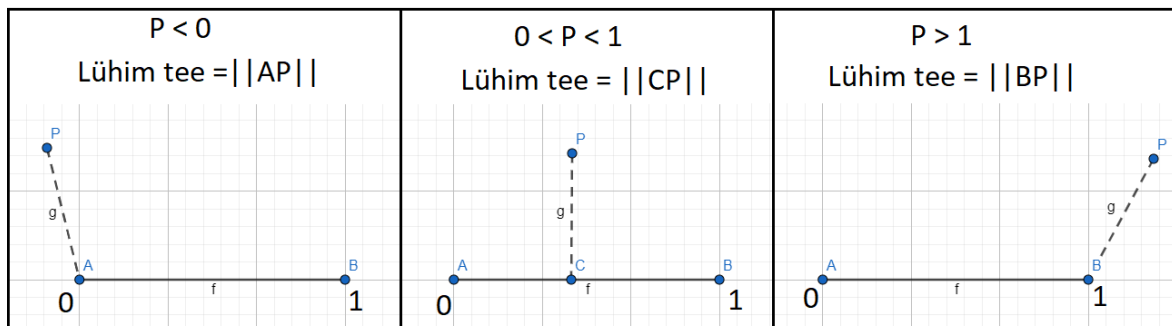
Kasutades valemit 5.2 saadi kätte staatilise katse jooksul iga mõõdetud punkti kaugus 0-st ehk GPS süsteemi asukohast. Andmete graafiliseks kuvamiseks leiti iga minuti keskmine kaugus 0-kohast nii *ahrs3* kui *global\_position\_int* andmete põhjal.

Dünaamilise katse käigus ei saa kasutada sama andmetöötlusmeetodit nagu tehti staatilise katse jaoks, kus arvutati iga punkti kaugus 0-st. Dünaamilise katse puhul on tegu sirgjoonelise lõiguga, mida mööda liiguti ning salvestati positsiooniandmeid, seega leitakse iga mõõdetud punkti kõige lähim vahemaa A-B lõiguni.

Teooria selgitamiseks kategoriseeriti esmalt vahemad:

1. vahemaa punktist P punktini A ehk väljaspool lõiku A-B;
2. vahemaa punktist A punktini B;
3. vahemaa punktist P punktini B ehk väljaspool lõiku A-B.

Joonisel 5.6 on erinevad positsioonipunktide asetsemise kohad välja toodud koos lühima teega punktist lõiguni.



Joonis 5.6 Positsioonipunktide asetsemine lõigu A-B suhtes

Kuna see arvutus töötab vaid ristkoordinaatistikus ehk  $x,y$  punktidega ning positsiooniandmetes pikkus- ja laiuskraadides on arvestatud Maa kumerus sisse siis peame muutma katse käigus saadud positsiooniandmete formaati. Kasutades valemis pikkus- ja laiuskraade tekivad vead sisse vahemaade arvutusel ning seetõttu muudetakse katse käigus saadud positsiooniandmete formaati sobivaks. Siin kasutati ära maakera meridiaanide ja paralleelide omadust, kus paralleelide puhul on üks kraad võrdne 111 kilomeetriga. Meridiaanide puhul vaheldub ühe kraadi vahemaa 111 kilomeetrist ekvaatoril kuni nullini poolustel [41].

Esmalt üritati leida kui palju on üks pikkuskraad võrdne meetrites. Valemil 5.3 on kujutatud ühe pikkuskraadi sõltuvust laiuskraadist, mille kaudu avaldatakse ka valem katse asukoha pikkuskraadi väärtus meetrites.

$$1^\circ = \cos\varphi * 111.321 \quad (5.3)$$

Kus  $\varphi$  – laiuskraad, °,  
 $111,321$  – ühe laiuskraadi pikkus ekvaatoril, km.

Valemist 5.3 avaldatakse meile sobiv arvutus:

$$d = \cos\varphi * 111.321 \quad (5.4)$$

Kus  $d$  – ühele pikkuskraadile vastav vahemaa,  
 $\varphi$  – laiuskraad, rad.

Järgmisena arvutati ühele pikkuskraadile vastav vahemaa A ja B punkti laiuskraadidel ning võeti keskmine, mida kasutada arvutustes. Tulemuseks saadi, et ühele pikkuskraadile vastab 56,67433839 kilomeetrit. Kasutades saadud väärtust korrutati katse jooksul kogutud laius- ja pikkuskraadid läbi, et saada need kätte meetrites.

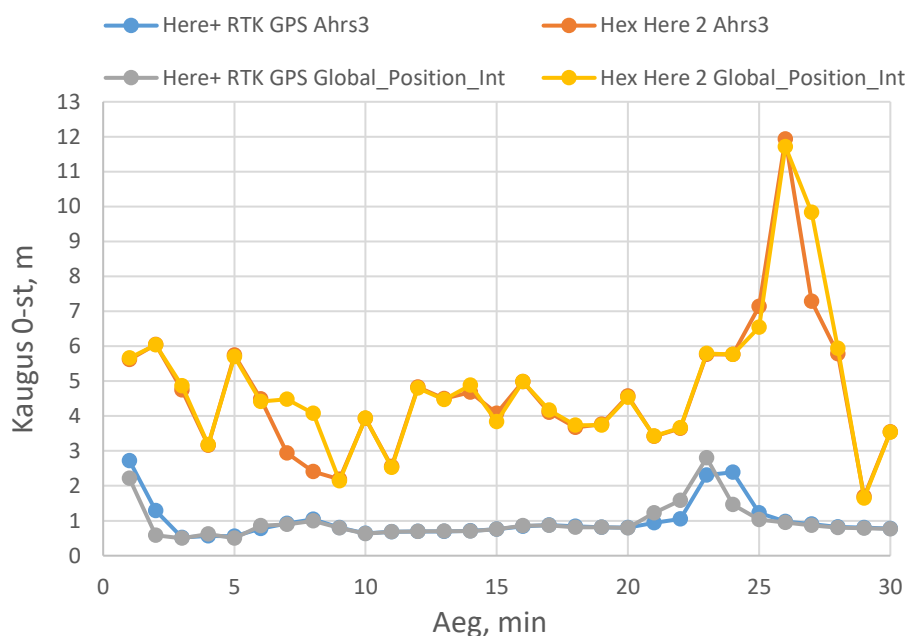
Selle jaoks, et leida punktide kaugused lõigust, otsiti programm Matlabi jaoks [42], mida muudeti natuke ümber andmetele sobivaks (**LISA 2**). Algne programm on loodud kauguste leidmiseks punktist lõiguni perpendikulaarselt või lõigu otspunktideni.

Esmalt defineeriti lähteandmed, mis töö puhul olid A ja B punktide asukoad. Programmikoodi lisati rida *load*, mis võtab positsiooniandmed spetsiaalselt loodud tekstifailist ning salvestab Matlabi vahemällu maatriksina. Peale algandmete lähtestamist tehti *while* tsükkel, kus sooritatakse arvutused iga punkti kohta nii palju kui andmepunkte on tekstifailis

## 5.4 Tulemused

Tulemuste võrdluseks tehti graafikud, kus on näha positsiooniandmete erinevust ehk kaugust õigest punktist ehk nullpunktist. Mõlema katse puhul pandi positsiooniandmed ka kaardile, nägemiseks erinevust visuaalselt, mille jaoks kasutati Google Earth Pro-d.

Esmalt tehti analüüs staatilise katse andmetega, kus pandi nii *ahrs3* kui ka *global\_position\_int* kogutud andmed eraldi joontena graafikule näitamaks positsiooniandmete muutumist katse vältel.

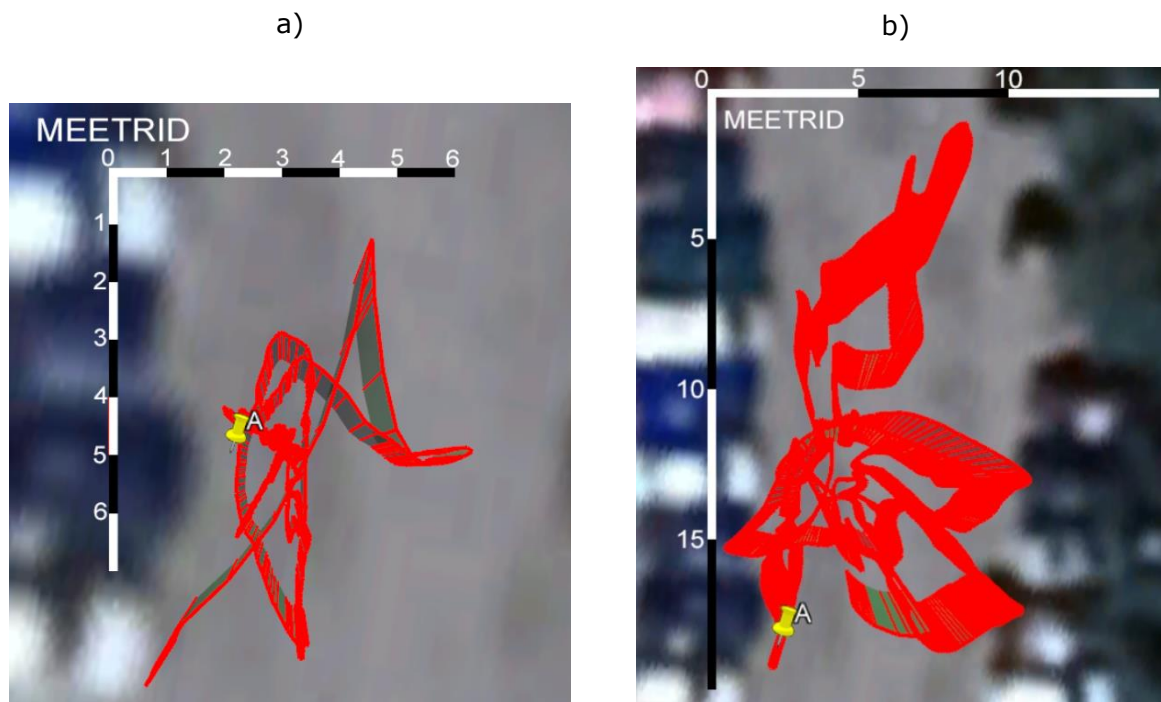


Joonis 5.7 Staatilise katse positsiooniandmete kaugus nullkohast

Jooniselt 5.7 on näha, et katse jooksul Here+ RTK GPS keskmine kaugus jääb natukene alla meetri nullkohast ning vahepeal on ka erinevad hüpped sees. Terve katse arvutuslik keskmine kaugus 0-st on 0,729 meetrit, kuid RTK baasjaama mõõdistuse tulemusena andis süsteem märku, et saavutati 0,7 meetrine keskmine täpsus.

Here 2 GPS-i andmed kõikusid palju võrreldes RTK andmetega, kuid Here 2 GPS saavutas 30 minutise staatilise katse jooksul keskmiseks kauguseks 4,414 meetrit.

Staatilise katse tulemus seega näitab, et on kuue kordne vahe Here 2 GPS ja Here+ RTK GPS süsteemil. Allpool toodud joonisel 5.8 on näha ka andmete kõikumist ümber null punkti.



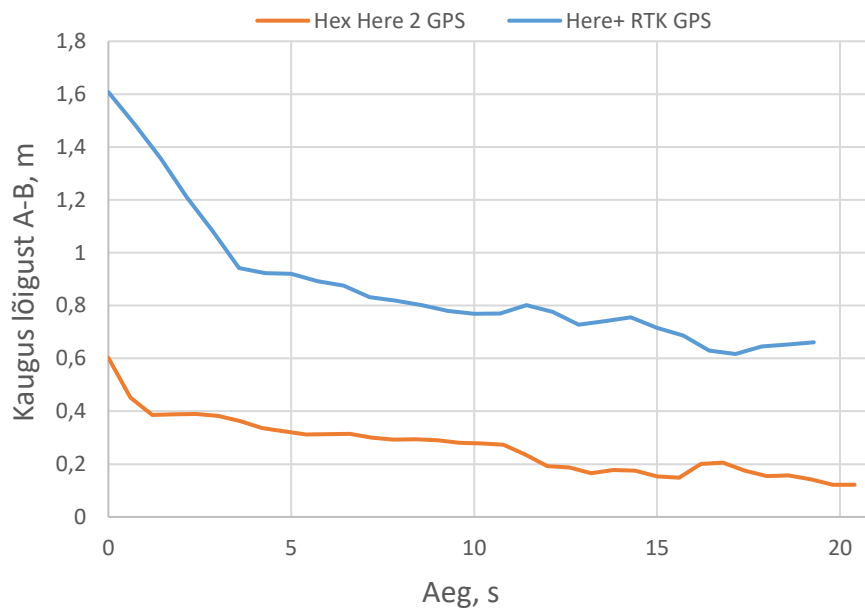
Joonis 5.8 a) Staatilise katse jooksul kogutud Here+ RTK GPS positsiooniandmed b) Staatilise katse jooksul kogutud Here 2 GPS positsiooniandmed

Joonisel 5.8 on kujutatud ka positsiooniandmete kõikumist 30 minuti jooksul, kus on kõik andmepunktid peale märgitud. Punkt A ehk 0 punkt on ka märgitud joonisele, mis on õige NYMO asukoht. Jooniselt 5.9 b on hästi näha kuidas Here 2 GPS-i andmed varieeruvad suuresti rohkem kui seda on RTK süsteemi puhul (Joonis 5.9 a).

Dünaamilise ehk liikuvkatse puhul vaadeldi kahte olukorda – liikumine A-st B-sse ja liikumine B-st A-sse. Andmete analüüsiks tehti mõlema olukorra kohta eraldi graafikud. Graafikul toodud jooned on seekord *ahrs3* ja *global\_position\_int* kombineerituna. Mõlemal korral paistab välja, et Here+ RTK GPS positsiooniandmed on kaugemal lõigust kui Here 2 GPS andmed (Joonis 5.9 ja 5.10). Graafikutel toodud aeg sekundites on aeg, mis läks ühest punktist teise liikudes NYMOga.



Joonis 5.9 Süsteemide positsioonandmete kaugus õigest trajektoorist liikudes A-st B-sse



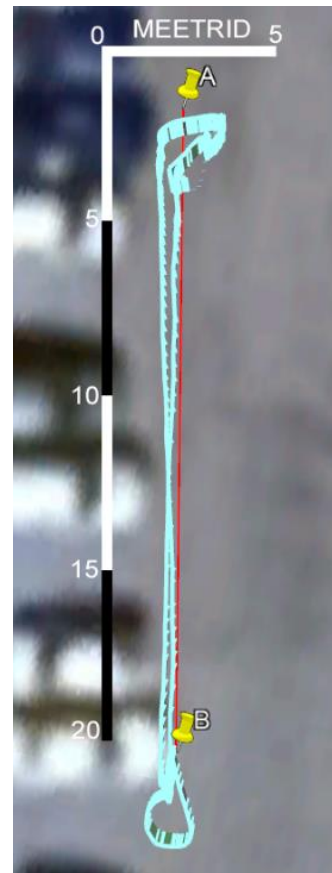
Joonis 5.10 Süsteemide positsioonandmete kaugus õigest trajektoorist liikudes B-st A-sse

Antud katse vältel mõlemas olukorras oli Here+ RTK GPS-i kaugus lõigust keskmiselt 1,083 meetrit ning Hex Here 2 GPS-il 0,365 meetrit.

a)



b)



Joonis 5.11 a) Here+ RTK GPS liikumistrajektor b) Hex Here 2 GPS liikumistrajektor

Katsete tulemuste kokkuvõttena näitas Here+ RTK GPS väga head tulemust just staatilises katses (0,729 m vs 4,414 m), kuid dünaamilises katses jäi alla Here 2 GPS-ile (1,083 m vs 0,365 m).

Kõige tõenäolisemalt on probleem baasjaama väheses mõõdistus ajas. Kui oleks ühe koha peal mõõdistanud nt neli tundi, mis on tootja poolne soovitus sentimeetrise täpsuse saavutamiseks, siis oleks tulemus märgatavalt parem. Tulevikus on vaja teha veel katseid, et näha kindlamat tulemust RTK süsteemi puhul nii meres kui ka Tallinna Vanasadamas.

## KOKKUVÕTE

Antud bakalaureusetöö eesmärgiks oli välja valida ja rakendada uus täpsem positsioneerimissüsteem robotlaev NYMO-le, mis võimaldaks laeval Tallinna Vanasadamas hõlpsalt tööd teha ning näiteks laadimisdokki parkida.

Esmalt pandi paika lähteülesanne, kus toodi välja täpsed kriteeriumid, mis on uue süsteemi puhul olulised. Kriteeriumitest olid kõige tähtsamad ning otsustavamad vajaliku tööpiirkonna suurus ning horisontaalne positsioneerimistäpsus, sest taustinfot uurides tuli välja, et need on erinevate tehnoloogiate vahel kõige suuremad erisused. Järgmisena tutvustati erinevaid meetodeid täpseks positsioneerimiseks eri tehnoloogiate näol, mis põhiliselt jagunesid kolmeks: satelliitsüsteemid, raadio sagedustel põhinevad süsteemid ning helil põhinevad süsteemid. Iga tehnoloogia juures seletati lahti tööpõhimõtte ja nende saavutatavad täpsused.

Kolmandas peatükis koguti kokku eelnevast taustainfo uuringust saadud andmed ning tehti turuanalüüs ning võrdlus, kus toodi ka iga tehnoloogia jaoks näitena välja spetsiifiline süsteem. Samuti uuriti erinevaid reaalseid süsteeme, et iga positsioneerimis tehnoloogia kohta saaks tuua välja hinna-, täpsus- ja tööpiirkonna vahemiku. Võrdlusesse lisati iga tehnoloogia eelised ja puudused, mis on seotud tehnoloogia rakendamisega NYMO-le ning toodi välja ka märkused teatud tehnoloogiatele. Turuanalüüsi tulemusena leiti, et parimad tehnoloogiad on RTK GPS ja ultraheliga positsioneerimine. Nende kahe vahelise võrdlusena valiti siiski RTK GPS majakate puuduse tõttu. RTK GPS vastab kõigile kriteeriumitele.

RTK GPS süsteemidele tehti ka omaette turuanalüüs, et leida mõistlikku hinna ja täpsuse suhet ning teada saada, kui palju hind täpsust mõjutab nendel süsteemidel. Autor leidis, et süsteem HEX Here 3 RTK GPS on sobiv NYMO-le, mille puhul on horisontaalne positsioneerimistäpsus võrreldes praeguse süsteemiga 100 korda parem tootja andmete järgi (2,5 m vs 0,025 m).

Hetkeseisuga valitud RTK süsteemi ei ostetud, vaid NYMO meeskonna liikmelt saadi sama süsteemi varasem iteratsioon - HEX Here+ RTK, millega sooritati katseid. Vanem mudel kasutab sama GPS moodulit ning lubab sama suurt täpsust. Seda varasemas RTK võrdluses ei esinenud, kuna seda enam ei toodeta.

Järgmises peatükis kirjeldati ühilduvust saadud süsteemi ning NYMO vahel ning mis eelnevalt väljavalitud süsteemi ühilduvusest ei erine. Tutvustati ka programmi nimega U-Center, mille abil saab uuendada ning kontrollida seadme püsivara, mida ka tehti. Samuti on võimalik programmist jälgida seadme tööd reaalselt.

Viimases peatükis tutvustati tehtavaid katseid ning selgitati kuidas töödeldi katseandmeid. Katsed sooritati TalTechi peamaja ees autoparklas staatilise ja dünaamilise katse näol. Katsete tulemusena selgus, et keskmiselt on saadud RTK süsteem parem praegusest süsteemist staatilises olekus kuus korda, kuid nõrgem dünaamilisel mõõtmisel. Madala täpsuse põhjuseks dünaamilisel katsel võis tuleneda baasjaama algsest vähesest mõõdistusest. Tulevikus on vaja veel teha katsed realselt vees ning Tallinna Vanasadamas. Katsed seal jäid praegu ära kuna NYMO mootorid olid rivist väljas.

Lõputöö tulemusena saavutati algul paika pandud eesmärgid, saadi vastused lõputöö ülesandes sätestatud küsimustele ning saadi teadmine, milline tehnoloogia ning süsteem hankida antud rakenduses. Autor näeb, et tulevikus saab positsioneerimissüsteemi asukohta parendada, näiteks viia GPS liikuvjaam laeva mastile, kus ta oleks veekindlas korpuses ning pikendatud juhtmega ühendatud Pixhawk kontrollieriga.



## SUMMARY

The goal for this Bachelor's thesis was to choose and implement a new more accurate positioning system onto the robotship NYMO, that what would enable the ship to fulfill tasks and for an example park itself in the charging dock in Tallinn's Old City Harbour.

Firstly, terms of reference were set, where specific criteria was written down that is important for the new system. The most important and decisive criteria was the required positioning range and horizontal positioning accuracy, due to the fact that when researching the subject, these two revealed to be the heaviest points of indifference between different technologies. Later on the author introduced different methods of accurate positioning for different technologies, that divided into three groups: satellite systems, systems based on radio frequencies and systems using sound. With all technologies the working principle was explained and the accuracy they had was mentioned.

In the third chapter, the information that was gathered during researching was used to make a comparison of technologies with market analysis where a specific system was brought up for every technology as an example. Different real systems were analyzed to get information about each technology's accuracy, price and range. Advantages and disadvantages were added to the comparison, that were related to NYMO. The best two technologies that stood out were RTK GPS and Ultrasound. Between these two, RTK GPS was chosen in the end due to not having beacons like Ultrasound does. RTK GPS was in line with the requirements set.

For the RTK GPS systems a separate market analysis was made, to find a reasonable price to accuracy ratio and to know how much does the price affect the accuracy of these systems. The author found that the HEX Here 3 GPS is a good choice for NYMO, for which the horizontal positioning accuracy is 100 times more accurate than the current installed GPS according to the manufacturer (2,5 m vs 0,025 m).

The chosen RTK system wasn't bought yet, but a NYMO team member had the previous version of the system – HEX Here+ RTK, which was used to carry out testing. The previous model uses the same GPS module and promises to have the same amount of accuracy. This system was not included in the market analysis of RTK systems due to it not being in production anymore.

In the next chapter compatibility of the system and NYMO was discussed, compatibility of the chosen system and system that was received do not differ. The U-Center program was introduced that can help with checking and updating the firmware on the system, which was done.

Tests were carried out in the last chapter and it was explained how the results were used for analyzing. The tests were carried out in front of TalTech's main building in the car parking lot, which involved a static and a dynamic test. The results of the tests suggested the RTK system is better in static mode with a six time difference, but it suffered in dynamic testing. The reason for low performance compared to the old system is thought to be the lack of accuracy that was gained during the short initial surveying time for the base station. In the future tests are need to be made in water and in Tallinn's Old City Harbour. The tests were not made as of this moment due to NYMO's engines malfunctioning.

The goals that were set in the beginning of the thesis were fulfilled, answers were found for the questions set in the thesis' task and knowledge was gained, which technology is best suited for this application. The author sees that in the future, the positioning system's mobile station location can be improved by moving it to the mast, where it would be put in a separate waterproof container and connected to the controller via a extended cord.

## KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

[1] Robotics and Automation News, *Autonomous ships ahoy!*, 2021. [Võrgumaterjal].  
Saadaval: <https://roboticsandautomationnews.com/2020/01/18/autonomous-ships-ahoy/28706/>. [Kasutatud 14.05.2021]

[2] Mindchip, „Gallery,” 2021. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://mindchip.ee/gallery/>.  
[Kasutatud 14.05.2021]

[3] U-blox, „NEO-M8 Data sheet,” 2021. [Võrgumaterjal]. Saadaval: [https://www.u-blox.com/sites/default/files/NEO-M8-FW3\\_DataSheet\\_UBX-15031086.pdf](https://www.u-blox.com/sites/default/files/NEO-M8-FW3_DataSheet_UBX-15031086.pdf). [Kasutatud 15.04.2021]

[4] GetFPV.com, „Here2 GNSS GPS Module,” 2021. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.getfpv.com/here2-gnss-gps-module.html>. [Kasutatud 07.03.2021]

[5] Margarita Svežova, „VÕRGU RTK MÕÕTESEERIAATE TÄPSUS,” [Magistritöö],  
Metsandus- ja maaehitusinstituut, Eesti Maaülikool, Tartu, Eesti, 2018. [Võrgumaterjal].  
Saadaval: <https://dspace.emu.ee/xmlui/handle/10492/4298>. [Kasutatud 29.01.2021]

[6] IVANET, „GNSS alaste mõistete selgitused,” 2018. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://www.ivaleon.ee/ivanet/moisted/>. [Kasutatud 29.01.2021]

[7] UAV Navigation, „Global Navigation Satellite System (GNSS),” 2020.  
[Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.uavnavigation.com/support/kb/general/general-system-info/global-navigation-satellite-system-gnss>. [Kasutatud 02.02.2021]

[8] NOAA, „GPS: The Global Positioning System,” 2021. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.gps.gov>. [Kasutatud 01.02.2021]

[9] IAC PNT, „Information and Analysis Center for Positioning, Navigation and Timing,”  
2021. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.glonass-iac.ru/en/index.php>.  
[Kasutatud 01.02.2021]

- [10] GSA, „Galileo,“ 2021. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.gsa.europa.eu/european-gnss/galileo/galileo-european-global-satellite-based-navigation-system>. [Kasutatud 01.02.2021]
- [11] Tyler Reid, „Orbital Diversity for Global Navigation Satellite Systems,“ [Doktoridissertatsioon], Aeronautika ja Astronautika Instituut, Stanfordini Ülikool 2017. [Võrgumaterjal]. Saadaval: [https://www.researchgate.net/publication/323245224\\_Orbital\\_Diversity\\_for\\_Global\\_Navigation\\_Satellite\\_Systems](https://www.researchgate.net/publication/323245224_Orbital_Diversity_for_Global_Navigation_Satellite_Systems). [Kasutatud 17.02.2021]
- [12] Holly Zell, „Earth's Atmospheric Layers,“ 2017. [Võrgumaterjal]. Saadaval: [https://www.nasa.gov/mission\\_pages/sunearth/science/atmosphere-layers2.html](https://www.nasa.gov/mission_pages/sunearth/science/atmosphere-layers2.html). [Kasutatud 02.02.2021]
- [13] *Globaalne asukohamääramine: satelliitmõõtmise näidisülesanded*, 2013. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.digar.ee/arhiiv/et/raamatud/22173>. [Kasutatud 20.02.2021]
- [14] Racelogic, „How does DGPS (Differential GPS) work?,“ 2018. [Võrgumaterjal]. Saadaval: [https://racelogic.support/01VBOX\\_Automotive/01General\\_Information/Knowledge\\_Base/How\\_Does\\_DGPS\\_\(Differential\\_GPS\)\\_Work%3F](https://racelogic.support/01VBOX_Automotive/01General_Information/Knowledge_Base/How_Does_DGPS_(Differential_GPS)_Work%3F). [Kasutatud 04.02.2021]
- [15] Racelogic, „How does RTK (Real Time Kinematic) work?,“ 2018. [Võrgumaterjal]. Saadaval: [https://racelogic.support/01VBOX\\_Automotive/01General\\_Information/Knowledge\\_Base/How\\_does\\_RTK\\_\(Real\\_Time\\_Kinetic\)\\_Work%3F](https://racelogic.support/01VBOX_Automotive/01General_Information/Knowledge_Base/How_does_RTK_(Real_Time_Kinetic)_Work%3F). [Kasutatud 04.02.2021]
- [16] Dronivo, „Here 3 / Here+ (M8P) RTK Combo,“ 2021. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.dronivo.de/Hex-ProficNC-Here-3-Here-M8P-RTK-Combo>. [Kasutatud 07.03.2021]
- [17] Luka Batistić, Mladen Tomic, „Overview of indoor positioning system technologies,“ in *Proceedings of the International Convention MIPRO2018*, Horvaatia, 2018. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8400090>. [Kasutatud 21.02.2021]

[18] Fazeelat Mazhar, Muhammad Gufran Khan, Benny Sällberg, „Precise Indoor Positioning Using UWB: A Review of Methods, Algorithms and Implementations,” 2017. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11277-017-4734-x>. [Kasutatud 21.02.2021]

[19] Pozyx, „Creator Anchor,” 2021. [Võrgumaterjal]. Saadaval: [https://store.pozyx.io/product/creator-anchor-69?\\_ga=2.164462268.2036428541.1615717194-1242222492.1613027820](https://store.pozyx.io/product/creator-anchor-69?_ga=2.164462268.2036428541.1615717194-1242222492.1613027820). [Kasutatud 15.03.2021]

[20] GAO RFID, „433 MHz Active RFID Badge Reader Counting Entries & Exits,” 2021. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://gaorfid.com/product/433-mhz-active-rfid-badge-reader-counting-entries-exits/>. [Kasutatud 21.03.2021]

[21] Accent Robotics, „iBKS Plus,” 2021. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://accent-systems.com/product/ibks-plus/?v=a57b8491d1d8>. [Kasutatud 16.03.2021]

[22] Marvelmind Robotics, „Starter Set HW v4.9-NIA,” 2021. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://marvelmind.com/product/starter-set-hw-v4-9-nia/>. [Kasutatud 16.03.2021]

[23] Ardupilot, „Complete Parameter List - BCN Parameters,” 2021. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://ardupilot.org/copter/docs/parameters.html#bcn-type>. [Kasutatud 30.03.2021]

[24] Ardupilot, „Complete Parameter List - GPS Parameters,” 2021. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://ardupilot.org/copter/docs/parameters.html#gps-parameters>. [Kasutatud 30.03.2021]

[25] Swift Navigation, „Piksi Multi Product Summary,” 2021. [Võrgumaterjal]. Saadaval: [https://www.swiftnav.com/sites/default/files/piksi\\_multi\\_product\\_summary.pdf](https://www.swiftnav.com/sites/default/files/piksi_multi_product_summary.pdf). [Kasutatud 15.04.2021]

[26] Demoz Gebre-Egziabher, „Evaluation of Low-Cost, Centimeter-Level Accuracy OEM GNSS Receivers,” 2018. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.dot.state.mn.us/research/reports/2018/201810.pdf>. [Kasutatud 06.04.2021]

- [27] ArduSimple, „SimpleRTK2B,” 2021. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.ardusimple.com/simplertk2b/>. [Kasutatud 15.04.2021]
- [28] ArduSimple, „Testing simpleRTK2B accuracy in RTK base-rover configuration,” 2018. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.ardusimple.com/testing-simplertk2b-accuracy-in-rtk-base-rover-configuration/>. [Kasutatud 06.04.2021]
- [30] Tridge, „Big GPS Round Up,” 2018. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://discuss.ardupilot.org/t/big-gps-round-up/67755>. [Kasutatud 06.04.2021]
- [29] Holybro, „H-RTK F9P GNSS Series,” 2021. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://www.holybro.com/product/h-rtk-f9p/>. [Kasutatud 15.04.2021]
- [31] Emlid, „RTK GNSS modules for UAV mapping,” 2021. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://emlid.com/reach/>. [Kasutatud 15.04.2021]
- [32] Cuav, „C-RTK 9P RTK Receiver,” 2021. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://doc.cuav.net/gps/c-rtk/en/c-rtk-9p.html>. [Kasutatud 15.04.2021]
- [33] A123456, „CUAV C-RTK 9P Test,” 2019. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://discuss.ardupilot.org/t/cuav-c-rtk-9p-test/46927>. [Kasutatud 06.04.2021]
- [34] U-blox, „NEO-M8P Data Sheet,” 2021. [Võrgumaterjal]. Saadaval: [https://www.u-blox.com/sites/default/files/NEO-M8P\\_DataSheet\\_%28UBX-15016656%29.pdf](https://www.u-blox.com/sites/default/files/NEO-M8P_DataSheet_%28UBX-15016656%29.pdf). [Kasutatud 16.04.2021]
- [35] CubePilot, „Here+ V2 User Manual,” 2019. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://docs.cubepilot.org/user-guides/here+/here+v2-user-manual>. [Kasutatud 01.05.2021]
- [36] Mavlink, „MAVLINK Common Message Set,” 2021. [Võrgumaterjal]. Saadaval: [https://mavlink.io/en/messages/common.html#GLOBAL\\_POSITION\\_INT](https://mavlink.io/en/messages/common.html#GLOBAL_POSITION_INT). [Kasutatud 11.05.2021]
- [37] Mavlink, „Dialect: ArduPilotMega,” 2021. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://mavlink.io/en/messages/ardupilotmega.html>. [Kasutatud 12.05.2021]

[38] Stony Brook University, „History of Mathematics: Spherical Trigonometry and Navigation,“ 2006. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://www.math.stonybrook.edu/~tony/archive/hon101s08/spher-trig.html>. [Kasutatud 15.05.2021]

[39] Fiona Vincent, „Positional Astronomy: Spherical Trigonometry,“ 2003. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://star-www.st-and.ac.uk/~fv/webnotes/chapter2.htm>. [Kasutatud 15.05.2021]

[40] Stephen Hartke, „Spherical Law of Cosines, “ 2015. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://www.math.ucdenver.edu/~hartkes/teaching/2011m896/SphericalLawOfCosines.pdf>. [Kasutatud 15.05.2021]

[42] Peter Seibold, „Perpendiculars to line segments,“ 2020. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://se.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/84767-perpendiculars-to-line-segments>. [Kasutatud 16.05.2021]

[41] Matt Rosenberg, „The Distance Between Degrees of Latitude and Longitude,“ 2020. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.thoughtco.com/degree-of-latitude-and-longitude-distance-4070616>. [Kasutatud 16.05.2021]

**LISAD**



## LISA 1 Positsioneerimistehnoloogiate võrdlus

Tabel 3.0 Positsioneerimistehnoloogiate võrdlus (valitud variant rohelisega)

Näide süsteemist	Tehnoloogia	Võimalik täpsus, m	Tööpiirkond	Süsteemide hinnavahe, €	Eelised	Puudused	Märkused
Here 3 RTK	RTK GPS	0,004-0,5	10-50 km	510-2200-...	Hea täpsus suures tööpiirkonnas	Suurem ajakulu algse täpsuse saamiseks - ca 10-30 min	Baasjaam peab olema kasutuse vältel liikumatu ning ühendatud juhtimistarkvaraga
U-blox Neo M8P	DGPS, SBAS, GPS	0,5-3	Ülemaailmne	30-...	Kompaktsus, lihtsus, ülemaailmne levi	Madalam täpsus	-
Pozyx Creator	UWB	0,02-0,3	20-100 m	135 (majakas)-...	Suur täpsus	Palju seadmeid, pakutava tööpiirkonna tõttu ei ole võimalik vajalik ala katta	-
GAO 433MHz Active RFID reader	RFID	0.5-1	5-100 m	33 (majakas)-...	Kompaktsed majakad	Keeruline ühildumine kontrollieriga, pakutava tööpiirkonna tõttu ei ole võimalik vajalik ala katta	Peab siduma peaarvutiga Jetson Nano
Marvelmind HW	Ultraheli	0,02	10-400 m	1352-...	Täpsus, kompaktsed majakad	Palju seadmeid	-
Accent Systems IKBS	Bluetooth	1-3	5-100 m	23 (majakas)-...	Saab suhelda nutiseadmetega	Nutitelefon käitub märgisena, pakutava tööpiirkonna tõttu ei ole võimalik vajalik ala katta	Peab siduma peaarvutiga Jetson Nano

## LISA 2 Matlabi programm punkti ja joone vahelise kauguse leidmiseks

```
clear
format long g
sP=[6592921.812,1398286.732] %Punkt A
eP=[6592903.941,1398290.02] %Punkt B

load RTK_mavlink_A_B.txt
i=1;
while i < 42
    P=RTK_mavlink_A_B(i,:)
    [size1sP,size2sP]=size(sP);
    P = repmat(P, [size1sP 1]);
    vec = eP-sP;
    u = sum(vec.*(P-sP), 2)./sum(vec.*vec, 2);
    u(isnan(u))=0;%u=0/0=NaN, lines with zero length -> only one point
    fP = sP+[u u].*vec; %fP on punkti ja lõigu ristumiskoht(x,y)
    outside=zeros(size1sP,1);
    outside(u<0)=1;%väljaspool alguspunkti, fP kasutab kauguse leidmiseks
    algpunkti
    outside(u>1)=2;%Outside of ending point, fP takes ending point
    fP(u < 0, :) = sP(u < 0, :);%Outside of starting point, take starting
    point
    fP(u > 1, :) = eP(u > 1, :);%Outside of end point, take end point
    %Distances P to foot points
    D(i)=sqrt((P(:,1)-fP(:,1)).^2+(P(:,2)-fP(:,2)).^2);
    i=i+1;
end
D=D'
```