



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOO  
INSENERITEADUSKOND  
Elektroenergeetika ja  
mehhatroonika instituut

# **AUTONOOMSE ROBOTLAEVA LAADIMISJAAMA PROTOTÜÜP**

## **AUTONOMOUS ROBOTIC SHIP CHARGING STATION PROTOTYPE**

BAKALAUREUSETÖÖ

Üliõpilane: Henri Nurmela

Üliõpilaskood: 193417 EAAB

Juhendaja: Heigo Mölder, teadur

## **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.

"18" mai 2023

Autor: Henri Nurmela

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö esitatud nõuetele

"18" mai 2023

Juhendaja: Heigo Mõlder

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

".....".....2023

Kaitsmiskomisjoni esimees .....

/ nimi ja allkiri /

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

Mina Henri Nurmela

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

mille juhendaja on Heigo Mõlder,

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.

18.05.2023

---

<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 loomingulise 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:* Henri Nurmela

*Lõputöö liik:* Bakalaureusetöö

*Töö pealkiri:* Autonoomse robotlaeva laadimisjaama prototüüp

*Kuupäev:* 18.05.2023

57 lk (*lõputöö lehekülgede arv koos lisadega*)

*Ülikool:* Tallinna Tehnikaülikool

*Teaduskond:* Inseneriteaduskond

*Instituut:* Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

*Töö juhendaja(d):* Heigo Mölder, teadur

*Töö konsultant (konsultandid):*

*Sisu kirjeldus:*

Töö eesmärgiks oli projekteerida sobilik elektri- ja elektroonikalahendus nõuetele vastava juhtmevaba laadija valimisega ning elektroonikakilbi komplekteerimine ja katsetamine. Töö käigus analüüsiti valmisolevaid lahendusi, erinevaid juhtmevabu laadimissüsteeme ja robotlaeva liikumist Tallinna Sadamas. Põhiline rõhk töös on MindChip loodud laadimisjaama mehaanilisele disainile koostada elektroonikakilp autori poolt valitud komponentidest. Koostatud lahendust katsetati laboritingimustes ning Tallinna Sadamas.

*Märksõnad:* elektrikilp, elektroonikakilp, robotlaev, laadimisjaam, juhtmevaba laadimine, sadam, automaatne laadimine, elektrisüsteem, autonoomsus.

## ABSTRACT

<i>Author:</i> Henri Nurmela	<i>Type of the work:</i> Bachelor Thesis
<i>Title:</i> Autonomous robotic ship charging station prototype	
<i>Date:</i> 18.05.2023	<i>57 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> Heigo Mõlder, researcher	
<i>Consultant(s):</i>	
<i>Abstract:</i> <p>The aim of this work was to design a suitable electrical and electronic solution by selecting a wireless charger that meets the requirements, as well as assembling and testing an electronic control panel. During the work, existing solutions, different wireless charging systems, and the movement of the MC2500 robotic ship at the Port of Tallinn were analysed. The main focus of this work was to create the electrical design for the charging stations mechanical design by MindChip by using components selected by the author and assembling the electronic control panel. The developed solution was tested in laboratory conditions and in the Port of Tallinn.</p>	
<i>Keywords:</i> electrical panel, electronics panel, robotic ship, charging station, wireless charging, port, automatic charging, electrical system, autonomy.	

# LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Lõputöö teema: **Autonoomse robotlaeva laadimissüsteemi prototüüp**

Lõputöö teema inglise keeles: **Autonomous robotic ship charging station prototype**

Üliõpilane: **Henri Nurmela, 193417EAAB**

Eriala: **Elektroenergeetika ja mehhatroonika**

Lõputöö liik: **bakalaureusetöö/magistritöö**

Lõputöö juhendaja: **Heigo Mölder**

Lõputöö kaasjuhendaja:

(ettevõtte, amet ja kontakt)

Lõputöö ülesande kehtivusaeg: **kehtivusaja annab juhendaja**

2022/2023      2022/2023 Kevad

Lõputöö esitamise tähtaeg: **18.05.2023**

Henri Nurmela

Heigo Mölder

Reeli Kuhi-Thalfeldt

---

Üliõpilane (allkiri)

Juhendaja (allkiri)

Õppekava juht (allkiri)

## **1. Teema põhjendus**

Tallinna Sadamas on kriitiline veetase, mistõttu vajab sadama ala veesügavus pidevat monitoorimist. Tallinna Tehnikaülikooli spin-off ettevõtte MindChip OÜ on ehitamas lahendust, kus autonoomne robotlaev NYMO käib pidevalt Tallinna Sadama alala veesügavust monitoorimist. Selleks, et seda täisautonoomselt teha on vajadus robotlaeva automaatselt laadida.

Antud lõputöö raames uuritakse erinevaid robotlaeva automaatseid laadimis võimalusi, analüüsitakse valmiva laadimisseadme toimimist, kaardistatakse tekkivad puudused ja pakutakse välja lahendused nende puuduste likvideerimiseks.

## **2. Töö eesmärk**

Töö eesmärgiks on analüüsida juhtmevaba laadimisjaama projekteerimisel tehtavaid/tehtud valikuid. Kaardistatakse tekkivad/tekkinud puudused ja pakutakse välja tehnilised lahendused nende puuduste likvideerimiseks. Valitakse välja vajaliku sensorika komponendid, komplekteeritakse laadimiskilp ja luuakse protsessikirjeldus tarkvara loomiseks.

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

Kuidas valida seadmele ehk NYMO robotlaevale sobilik juhtmevaba laadija?

Milline näeb välja NYMO robotlaeva energiatarbimine enda ülesannete täitmisel?

Milliseid valikuid teha laadimisjaama projekteerimisel ja ehitamisel?

Millised puudused, probleemid tekivad valminud laadimisjaamal?

## **4. Lähteandmed**

Enda lõputöö koostamisel plaanin kasutada MindChip OÜ tehtavate katsetuste andmeid ja erinevate juhtmevabade laadija tootjate poolt väljastatud informatsiooni.

## **5. Uurimismeetodid**

Töö tulemusteni plaanin jõuda kasutades saadud andmete analüüsil Excelis, andmete põhjal mudeli loomisel ning täiendavatel katsetel ja vaatlustel robotlaeva ja laadimisjaamaga.

## **6. Graafiline osa**

Juhtmevaba ja juhtmega laadimise graafikud, energiakasutusel põhinev graafik laeva töötamisest merel, mis oleksid põhiosas.

Samuti tootjate andmelehed, mis oleksid lisades.

## **7. Töö struktuur**

1. Sissejuhatus:
  - a. Probleemi tutvustus
  - b. Ülevaade olemast olevast robotlaevast
  - c. Laadimisjaama vajadus
2. Varasemad lahendused maailmas
  - a. Ülevaade olemasolevatest lahendustest
  - b. Erinevate lahenduste võrdlus
3. Ülevaade turul pakutavatest juhtmevabadest laadijatest
4. Energiatarbe arvutused
  - a. Sadama alas suurus ja sõidutrajektoor
  - b. Aku tühjenemise karakteristikud
5. Tehnilised nõuded laadimisjaama projekteerimiseks
  - a. Laadimisjaama mehaaniline disain
  - b. Laadimisjaama elektroonika
  - c. Laadimisjaama tarkvara
6. Laadimisjaama ehitus ja katsed
  - a. Katsed laboris
  - b. Katsed sadamas
  - c. Järeldused
7. Laadimisprotsessi optimeerimine
8. Tootearendus soovitusel – ideed edasiarenduseks
9. Kokkuvõte

## **8. Kasutatud kirjanduse allikad**

Töö koostamiseks on kasutada allikatena teadusartiklid ja raamatud laadimissüsteemide kohta, MindChip OÜ katsetuste aruanded,

## **9. Lõputöö konsultandid**

Tanel Jalakas – robotlaeva elektroonika ja elektri pool

Mart Enok – robotlaeva mehaaniline pool

Indrek Roasto – robotlaeva tarkvara arhitekt



## **10. Töö etapid ja ajakava**

Loetelu töö etappidest, mille taga sulgudes tähtaeg. Mõned näited töö etappidest: Kirjanduse läbitöötamine (01.12.2022)

Lähteandmete kogumine (01.01.2023)

Teoreetilise osa kirjutamine (01.02.2023)

Arvutuste/mõõtmiste/modelleerimise teostamine (01.03.2023)

Uuringu tulemuste kirjeldamine (26.03.2023)

Järelduste kirjutamine (02.04.2023)

Kokkuvõtte koostamine (02.04.2023)

Töö esimene versioon valmis (05.04.2023)

Juhendajale läbilugemiseks saatmine (06.04.2023)

Paranduste sisseviimine (13.04.2023)

Juhendajale teiseks läbilugemiseks saatmine (27.04.2023)

Töö lõplik versioon valmis (11.05.2023)

Lõputöö esitamise tähtaeg (18.05.2023)

# SISUKORD

Lõputöö lühikokkuvõte .....	4
Abstract .....	5
Lõputöö ülesanne .....	6
Eessõna .....	12
Lühendite ja tähiste loetelu.....	13
Sissejuhatus .....	14
1  Mis maailmas selles vallas on varem tehtud .....	16
1.1  Ettevõtte Wärtsilä juhtmevaba laadimislahendused .....	16
1.2  Oasis Marine laevade boi laadimissüsteem .....	17
1.3  Maersk Stillstorm boi laadimissüsteem.....	18
1.4  Erinevate lahenduste võrdlus .....	19
2  Ülevaade turul pakutavatest juhtmevabadest laadijatest .....	20
2.1  Delta MOOV <sup>AIR</sup> .....	21
2.2  WiBotic ökosüsteem .....	22
2.3  Wiferion etaLINK.....	23
2.4  Valiku tegemine.....	23
3  Energiatarbe arvutused .....	24
3.1  Sadama alas suurus ja sõidutrajektor .....	24
4  Tehnilised nõuded laadimisjaama projekteerimiseks.....	27
4.1  Laadimisjaama mehaaniline disain .....	27
4.2  Laadimisjaama elektroonika .....	29
4.2.1  GNSS valik.....	32

4.2.2	Juhtkontrolleri valik.....	33
4.2.3	Ruuteri valik.....	34
4.2.4	Pumba valik .....	35
4.2.5	Sensorika valik .....	36
4.2.6	Toitesüsteemi valik .....	39
4.3	Laadimisjaama tarkvara.....	42
5	Laadimisjaama ehitus ja katsed.....	44
5.1	Katsed laboris.....	44
5.2	Katsed sadamas .....	46
5.3	Tuleviku arendustööd .....	48
	Kokkuvõte.....	50
	Kasutatud kirjanduse loetelu .....	51

## **EESSÕNA**

Lõputöö teema sai valitud, kuna aine Tooteloome projekt (ainekood ATV0091) raames alustatud juhtmevaba laadija katsetamine oli minu jaoks huvi pakkuv ning jätkasin ka peale aine lõpetamist projekti kallal töötamist. Katsetatud laadija koos autori koostatud elektroonikakilbiga jõudsid ka MC2500 laadimisjaamale, mis on kasutusele võetud ja toimiv lahendus. Arendustöö toimus peamiselt Tallinna Tehnikaülikooli laborites ja MindChip töökojas ning Tallinna Sadamas. Soovin tänada oma lõputöö juhendajat Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituudi teadurit Heigo Mölderit ning MindChip meeskonda, kes aitasid nõu ja jõuga leida lahendus, mis on töökindel ning nõuetele vastav.

## Lühendite ja tähiste loetelu

BDS - *BeiDou Navigation Satellite System* (eesti k BeiDou Navigatsioonsatelliitide süsteem)

DGPS - *Differential GPS* (eesti k diferentsiaal GPS)

GLONASS - *Global Navigation Satellite System* (eesti k globaalne satelliit-navigatsiooni-süsteem)

GNSS - *Global Navigation Satellite System* (eesti k globaalne satelliit-navigatsioonisüsteem)

GPIO - *general purpose input/output* (eesti k mitmeotstarbeline sisend/väljund)

GPS - *Global Positioning System* (eesti k globaalne positioneerimise süsteem)

IO - *Input/Output* (eesti k sisend-väljund)

IPxx - *Ingress protection rating* (eesti k sisenemiste kaitse)

MCU - *Microcontroller unit* (eesti k mikrokontroller üksus)

MQTT - *Message Queue Telemetry Transport*

PC - *Personal Computer* (eesti k personaalarvuti)

PSU - *Power Supply Unit* (eesti k toiteplokk)

RAM - *Random Access Memory* (eesti k operatiivmälu)

RTCM - *Radio Technical Commission for Maritime Services*

RTK - *Real Time Kinematic* (eesti k reaal-ajas kinemaatiline)

SBC - *Single-Board Computer* (eesti k monoplaatarvuti)

SIM - *Subscriber Identification Module* (eesti k abonendi tuvastusmoodul)

SONAR - *Sound Navigation And Ranging* (eesti k helilokatsioon ja -kaugusmõõtmine)

USB - *Universal Serial Bus* (eesti k universaalne jadasiin)

## SISSEJUHATUS

Tallinna Sadamal on probleem, mis väljendub selles, et nad ei ole teadlikud, kui suur on reisilaevade all olev veesügavus. Selle probleemiga kaasneb oht, et kui suurem reisi- või kruisilaev saabub sadamasse, siis võib selle sõukruvi pinnasesse kinni jääda või hullemal juhul ka selle lõhkuda, mille tõttu peab Tallinna Sadam maksma kinni laeva remondi. Selle probleemi lahendamiseks on Tallinna Sadam teinud koostööd Tallinna Tehnikaülikooli spin-off ettevõttega MindChip OÜ, kes on saanud projektiks ehitada valmis autonoomne robotlaev, mis suudab iseseisvalt Tallinna Sadama merepõhja sügavust kaardistada ja ohtude korral sellest enneaegselt teada anda, et need likvideerida ning vältida kõrgehinnalisi kahjustusi suurematele laevadele.

Sama probleem on ka teistes ligi 500 Euroopa sadamas, kus madala, 6,4...13,7 m, veetaseme tõttu võivad reisi- ja kruisilaevad ennast kahjustada. Nt Rotterdami sadamas kui ühes suurima liiklusega sadamas Euroopas on veetaseme tõttu laevade süvise piirang ligi 16,5 m. Lisaks Tallinna ja Rotterdami sadamale on madala süviseega veel Antwerp (Belgia), Marseille (Prantsusmaa), Gdansk (Poola), Felixstowe (Inglismaa), Kopenhaagen (Taani), Göteborg (Rootsi), Genoa (Itaalia), Barcelona (Hispaania) sadamad. [1]

Autonoomne robotlaev MC2500 ehk NYMO on 2,5 m pikk, 1,1 m lai ning kuni 2,7 m kõrge katamaraan tüüpi laev, mille tippkiirus on  $11,0 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  ja töökiirus  $5,6 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ . Robotlaev on olnud MindChip OÜ arenduses aastast 2018 ning hiljuti on jõutud projekti sellise faasi, kus robotlaev on võimeline iseseisvalt merepõhja sügavust kaardistama. Robotlaev on varustatud mitmete andurite ja sensoritega, et tagada ohutus nii laeva kui ka seda ümbritseva keskkonna jaoks. Lisaks anduritele on sellel maailmaga suhtlemiseks 5G, 4G, 433 MHz, WIFI, AIS sagedustel ühendused. Toiteks on kasutusel kaks 48 V akut ning mõlemas kambris 48 V elektrimootorid. [2]

Hetkel aga robotlaeva laadimiseks on vajalik operaatoripoolne tegutsemine, mistõttu järgmise sammuna võttis MindChip ette projekti, et disainida ja toota automaatne juhtmevaba laadimisjaam, millega on võimalik tagada robotlaevale täiendav iseseisvus, et säästa aega ja raha operaatori sekkumise arvelt. Näiteks Muuga sadama ala 700 ha ja 6 km jagu kaidega kulutab aastas ligi 100 000 € aastas, et inimtööjõudu kasutades kaardistada merepõhja sügavust, kasutades robotlaeva on võimalik see kulu mitmekordselt alla tuua ja samal ajal teha kaardistamist puhkepäevadeta. [1]

Selle lõputöö autorile anti ülesandeks MindChip OÜ poolt disainitud mehaanilisele lahendusele juurde projekteerida ning kokku panna sobilik elektri- ja elektroonikalahendus nõuetele vastava juhtmevaba laadija valimise ning elektroonikakilbi komplekteerimise ja katsetamise näol.

# **1 MIS MAAILMAS SELLES VALLAS ON VAREM TEHTUD**

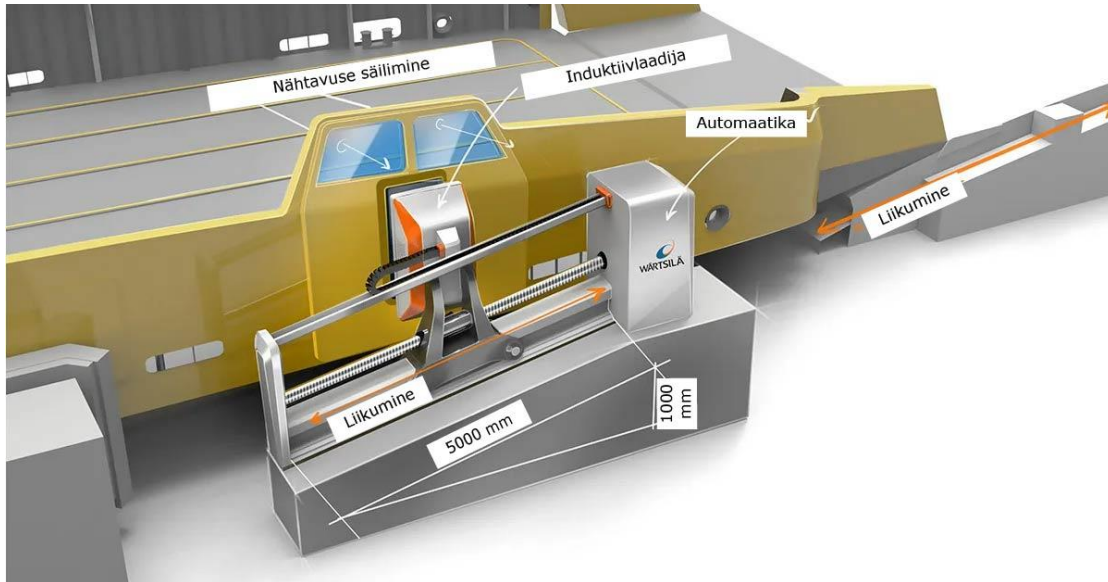
Tulenevalt sellest, et MC2500 on unikaalse disainiga, ei ole selle jaoks sobivaid laadimisdokke veel kommertslahendustena loodud. Põhilised erisused on selle mõõtmed, mille osas on MC2500 väga väikest mõõtu, ning aku pinge, mis võrreldes nt elektriliste praamidega on kordades madalam. [3]

## **1.1 Ettevõtte Wärtsilä juhtmevaba laadimislahendused**

Üks juhtivaid ettevõtteid praamide laadimisel on Soomes paiknev Wärtsilä, mille tootevalikus on nii manuaalseid laadijaid kui ka automaatseid laadimissüsteeme. Manuaalse laadimissüsteemi puhul ühendab operaator kaiäärse laadija laevaga, seda kasutatakse peamiselt praamide puhul, millel ei ole kaldas seismise aeg lühike. Automatiseeritud laadimissüsteemi maksimeerib laadimise jaoks mõeldud aega, mille puhul algab juhtmevaba laadimine kohe peale seda, kui täiselektriline või hübriidsüsteemiga laev kai äärde jõuab. [4]

Wärtsilä loodud 2,5 MW juhtmevaba laadimissüsteem (Joonis 1.1) on disainitud asendama traditsioonilist kaabliühendust, mis on mõeldud eelkõige täiselektrilistele praamidele, mille puhul algab laadimine kohe peale seda, kui laev on dokitud. Selle tulemusel on võimalik laadimist läbi viia pikema aja vältel ehk sadamas oleva laadija võimsus saab olla väiksem. Kasutades seda süsteemi koos automaadtdokkimise ja vaakumsildamisega on dokkimine kiirem, turvalisem ja efektiivsem. Selleks, et optimeerida laadimist on laadimissüsteem ehitatud koos lainekompenseerimise süsteemiga, mis hoiab laadimismähised paremini kohakuti ja kontaktis. Laadimissüsteemi võimsus 2,5 MW ja sisendpinge 690 V AC tähendab ligi 2,5 kA voolu kolmes faasis, mida on võimalik tõsta kasutades suurema pindalaga mähiseid. [4]





Joonis 1.1 Wärtsilä juhtmevaba laadimissüsteem [4]

## 1.2 Oasis Marine laevade boi laadimissüsteem

Oasis Marine (Šotimaa) 2 MW (standardlahendus 960 V DC) boi laadimissüsteem (Joonis 1.2) on mõeldud tuuleparkide lähedusse laadimisvõimalusi lisamiseks laevadele, et pakkuda laadimist tuuleparkide tehnikute laevadele või sadama alalt väljas seisvatele laevadele alternatiivset meetodit fossiilkütusele laevasüsteemide käimas hoidmiseks ooteajal. Laadimisboi on mõõtmetelt 3,7 m diameetriga ja seisab 4 kaabliga 7,6 m vees, tarkvaraliselt on kolmepoolne side boi, laeva ja tuuliku vahel ning 6 m pika laadimiskaabel. [5] [6]



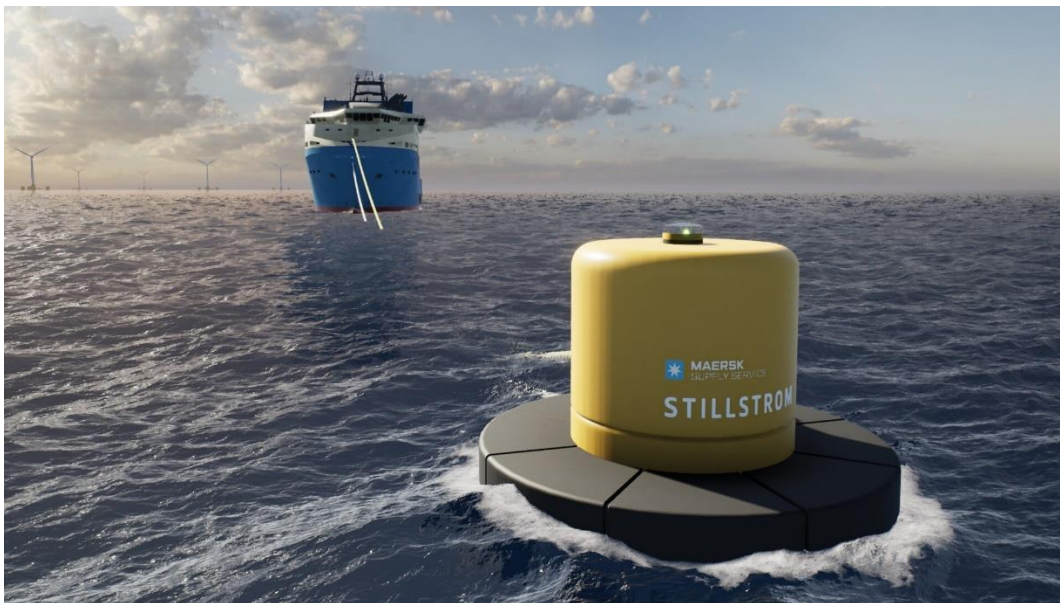
Joonis 1.2 Oasis Marine Mara laadimisboi ühendatud laeva laadimiseks [7]

### 1.3 Maersk Stillstorm boi laadimissüsteem

Maersk (Taani) on loonud tütarettevõttes Stillstorm laadimisboi (Joonis 1.3), mille kohta viiakse läbi uuring Aberdeeni sadamas ja katsetatakse Taani energiaettevõtte Ørsted tuulefarmis aastal 2023. Alates aasta 2022 augustist kuni aasta 2022 lõpuni viiakse Aberdeeni sadamas pioneerprojekti raames läbi teostatavuse uuring taastuenergiaal põhineval avamere laadimise sõlmpunktil. Projekti käigus analüüsitakse hüvesid, kasutusvaldkondi, vajadusi, ökonoomiat ja huvigrupi kaasatust. Aberdeen kui Ühendkuningriigi üks töörohkemaid sadamaid, üle 6000 laeva iga aasta, on enda „Green Port“ strateegia raames arendanud ja uurinud erinevaid emissioonide vähendamise võimalusi, mille hulgas on kaiäärsete elektrifitseerimine, alternatiivkütuste kasutus ja jätkusuutliku jäätmete haldamine. [8] [9] [10]

Aastal 2023 on plaanis Stillstormil paigaldada Ørsted, maailma juhtiv avamere tuule ettevõtte, tuuleparki boid, millega tuua roheelektrit avamere tuuleparkide hoolduslaevadele, teistele väikestele aku- või hübriid-elektrilistele merelaevadele või suurtele laevadele, et saaksid ooteajal mootorid väljas hoida. Selle abil on võimalik fossiilkütuste asendamisega roheelektriga eemaldada peaaegu kogu saaste kuniks boi on töötav. Ettevõtete hinnangul võib avamere boi süsteemi kasutades viie aastaga vähendada CO<sub>2</sub> heitmeid 5,5 miljoni tonni võrra, vältides samuti NO<sub>x</sub> ja So<sub>x</sub> osakesi. [11]

Laadimislahenduste kohta elektrilisi ja mehaanilisi andmeid Stillstorm avaldanud ei ole.



Joonis 1.3 Stillstorm laadimisboi süsteem [9]



Joonis 1.4 Stillstormi kavandatav lahendus Aberdeeni sadamasse [10]

## 1.4 Erinevate lahenduste võrdlus

Hetkel olemasolevatest lahendustest ei ole Wärtsilä, Oasis Marine ega Stillstorm laadimislahendused sobilikud MC2500 laadimiseks ilma modifikatsioonideta. Wärtsilä laadimislahenduse puhul on küll tegemist juhtmevaba lahendusega, kuid väljaantav võimsus on kolmefaasiline vahelduvvool pingel 690 V, kui MC2500 kasutab 48 V alalisvoolu. Samuti on see lahendus mõõtmelt liiga suur, mis teeks paigutamise sadamasse keeruliseks ja robotlaevale sobiliku mähise lisamine teeks laeva liiga raskeks. Oasis Marine laadimislahendus on sobivam, kuna kasutab alalisvoolu, mis standardlahenduse puhul 960 V on mitte sobiv, kuid lisades toitemuunduri või ettevõttega koostöös muuta toiteahelat, on võimalik pinge sobivaks teha. Teine asi, mis vajaks ümberehitust oleks ühenduse süsteem, sest hetkel olemasolev kaabli lahendus vajab operaatori osalust, mis vähendaks jaama automaatsust. Parema lahendusena oleks boi süsteem täielikult ümber ehitada kasutades selles töös välja toodud komponentidest laadimisjaama. Stillstormi laadimislahenduse puhul on Aberdeeni kavandatava lahendus (Joonis 1.4) mehaaniliselt sobivam, kuna laadimisplatvormi külge on laadimisjaama lihtsam integreerida kui boi lahenduse külge. Kuna elektrilise poole pealt Stillstorm informatsiooni avaldanud ei ole, siis ei saa sobivust hinnata, kuid kuna nende plaan on pakkuda lahendust erinevas mõõtkes laevadele, siis suure tõenäosusega on standard lahendus liiga võimas MC2500 laadimiseks.

## 2 ÜLEVAADE TURUL PAKUTAVATEST JUHTMEVABADEST LAADIJATEST

Teades, et MC2500 kasutab 48 V akusid, peab ka juhtmevaba laadimissüsteem võimaldama 48 V laadimist vähemalt 13 A vooluga, et MC2500 saaks enda ülesandeid täita kulutamata liialt aega laadimise peale ehk laadimine võtaks aega alla 6 tunni. Kuna laadimisjaam on mõeldud niiskesse keskkonda nii ilma kui ka veekogu mõttes, peab samuti leidma laadimissüsteemi, mis oleks vee- ning tolmukindel, et tagada seadme töökindlus välistes tingimustes. Laadimissüsteemi vastuvõttevähis peab olema ka piisavalt kompaktne, et mahist oleks võimalik robotlaevale optimaalselt paigutada.

Kasutades valemit 2.1 saab leida aja, mis kulub iga laadijaga aku laadimiseks 0% pealt 100% peale, kasutades näidisarvutuses Delta MOOV<sup>AIR</sup> võimsust.

$$t = \frac{E}{P} \quad (2.1)$$

$$t = \frac{3840 \text{ Wh}}{1000 \text{ W}} \approx 4 \text{ h}$$

Tabel 2.1 Sobilikud juhtmevabad laadijad MC2500 laadimiseks

Tootja	Mudel	Võimsus <i>P / W</i>	Väljund- pinge (nominaal) <i>U / V</i>	Maksimaalne vool <i>I / A</i>	Laadimisaeg <i>t / h</i>	Tolmu- ja veekindlus
Delta	MOOV <sup>AIR</sup>	1000	24 ... 60 (48)	20,8	4	IP65 IP40
WiBotic [12]	TR-302 TC-200 RC-100-WP	300	8,0 ... 58,4	30	13	IP20 IP20 IP67
	OC-301	300	8,0 ... 58,4	30	13	IP20
	OC-262-WP	300	8,0 ... 58,4	12	13	IP67
Wiferion	etaLINK 3000	3000	15 ... 60	60	1,5	IP65 IP68
	etaLINK 12000	12000	30 ... 60	200	0,3	IP65 IP68

## 2.1 Delta MOOV<sup>AIR</sup>

Delta MOOV<sup>AIR</sup> (Joonis 2.1) on Delta Electronics Inc. poolt välja töötatud juhtmevaba laadimissüsteem peamiselt autonoomsete laotranspordirobotite, elektriliste tõstukite, tarbesõidukite ja põllumajandussõidukite laadimiseks. Laadija on võimsusega 1 kW ning suureks eeliseks on 24 V ja 48 V võimekus, seega on seda võimalik kasutada erinevate pingetega seadmete puhul, mis kasutavad liitium-ioon või pliiakusid. Võimsustegur 100% koormuse juures üle 0,95 ning efektiivsus 92...93% tähendab, et kadudeks minev võimsushulk on suhteliselt väike. Peamisele karpile (saatja poolel) ja seadme 160 mm läbimõõduga laadimismähistele on omastatud tolmu- ja veekindlus tasemel IP65 tähendab, et seadmed on täielikult kindlustatud tolmuosakeste vastu ning tihendatud nõrkade veejuga vastu kõikidest suundadest. Parda laadimiskarbile on omastatud reiting IP40 ehk üle 1 mm suuruste tolmuosakeste vastu, veekindlus puudub. Jahutamiseks kasutab peamine karp loomulikku konvektsiooni ja muu elektroonika kontaktjahutust. [13] [14] [15]

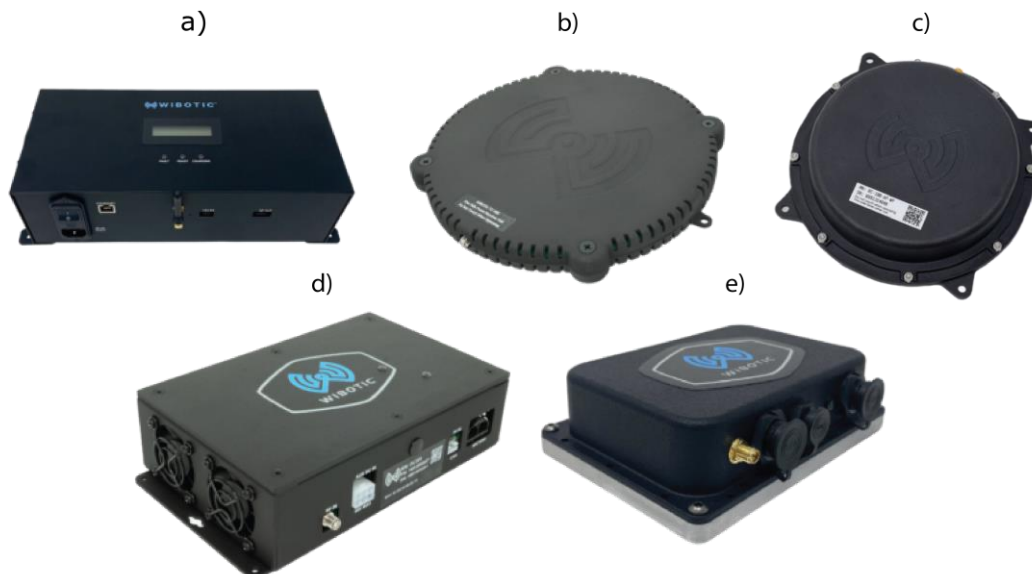


Joonis 2.1 Delta MOOV<sup>AIR</sup> 1kW juhtmevaba laadija [14]

## 2.2 WiBotic ökosüsteem

WiBotic laadimissüsteem on Ameerikas tegutseva ettevõtte poolt loodud juhtmevaba laadijate süsteem, milles saab vastavalt vajadusele valida sobilikud komponendid laadimissaatja kontrollerkarbi, parda kontrollerkarbi ja laadimismähiste näol, mis teeb nendest väga multifunktsionaalse süsteemi. MC2500 laadimiseks sobivad WiBotic tootevalikust:

- **TR-302** – 300 W laadimissaatja, mis on mõeldud suurte tarbesõidukite ja robotite laadimiseks, paigaldatuna kas seinale või põrandale. (Joonis 2.2a)
- **TC-200-ST** – 200 mm diameetriga saatjamähis. (Joonis 2.2b)
- **RC-100-WP** – 100 mm diameetriga vastuvõtjamähis, millele on täiendava tihendi abil omistatud IP67 reiting, mis tähendab täielikku tolmukindlust ja võimekust olla lühiajaliselt vees. (Joonis 2.2c)
- **OC-301** – 300 W ja 30 A pardalaadija, mis on mõeldud robotitele, suurtele kommerts-droonidele ja muudele suurte akudega seadmetele. Seadmele on omastatud IP20 reiting ehk tolmukindlus üle 12,5 mm osakeste vastu ja puuduv veekindlus. (Joonis 2.2d)
- **OC-262-WP** – 300 W ja 12A pardalaadija, mis on mõeldud keskkonda, kus ei saa kasutada aktiivset jahutust ventilaatorite abil, mistõttu on alumiiniumkorpus disainitud soojust eemale juhtima, samuti on laadijale omastatud IP67 reiting. (Joonis 2.2)



Joonis 2.2 WiBotic pakutavad sobilikud juhtmevaba laadimissüsteemi komponendid:

a) TR-302, b) TC-200-ST, c) RC-100-WP, d) OC-301, e) OC-262-WP

## 2.3 Wiferion etaLINK

Wiferion etaLINK (Joonis 2.3) on Saksamaa ettevõtte Wiferion GmbH poolt välja töötatud induktiivlaadijad tööstuslikele sõidukitele. Laadimissüsteemi on saadaval nii 3000 W kui ka 12000 W konfiguratsioonis, efektiivsusega 93% ja 92% vastavalt, mõlema süsteemi mähistele on omastatud IP65 ja IP68 tolmu- ja veekindlus ning on võimelised laadima pingega 30...60 V akusid, laadimissüsteem on optimeeritud liitiumi põhiste akudele. Lisaks on võimalik mõlemat süsteemi kasutada ühe või kahe lisa paralleelse sama tüüpi laadijaga, et suurendada ülekantavat võimsust. Mõõtude poolest on saatja mähis 355 mm x 420 mm ning vastuvõttev mähis 320 mm x 368 mm. [16] [17]



Joonis 2.3 Wiferion etaLINK 3000 juhtmevaba laadija [17]

## 2.4 Valiku tegemine

Arvestades etteantud tingimusi laadimissüsteemile osutus valituks Delta MOOV<sup>AIR</sup>, sest WiBotic laadimissüsteemid ei ole piisavalt võimsa ülekandega, mis suurendab laadimiseks vajaminevat ajakulu üle kolme korra ning Wiferioni pardalaadimismähis on liialt suur, et MC2500 peale ära mahutada.

### 3 ENERGIATARBE ARVUTUSED

#### 3.1 Sadama alas suurus ja sõidutrajektoor

Maa-ameti geoportaali X-GIS 2.0 andmetel on seiratava ala suurus Tallinna Vanasadamas umbes 31 ha ehk 310 000 m<sup>2</sup> ning Tallinna Sadama andmetel suurim sügavus 11 m. MC2500 robotlaevale on paigaldatud DeepVision HM680D SONAR, mille kiire nurk on 30°, parema ülekatvuse saavutamiseks otsustas autor arvutustest kasutada 25° nurka. Nende andmete ning valemi 3.1 ja valemi 3.2 põhjal saab leida skaneerimise ala läbimõõdu ja pindala kõige sügavamas punktis ning veepõhja ebatasasuse tõttu leida ka vahesuurused 3 m, 6 m ja 9 m sügavustel. [18] [19] [20]

$$d = 2 \cdot h \cdot \sin \frac{\alpha}{2} \quad (3.1)$$

$$S = \pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 \quad (3.2)$$

Kus:  $d$  - skaneeritava ala diameeter, m,

$h$  - sügavus, m,

$\alpha$  - kiire nurk, °.

$$l = 2 \cdot 11 \text{ m} \cdot \sin \frac{25^\circ}{2} = 4,76 \text{ m}$$

$$S = \pi \cdot \left(\frac{4,76 \text{ m}}{2}\right)^2 = 17,81 \text{ m}^2$$

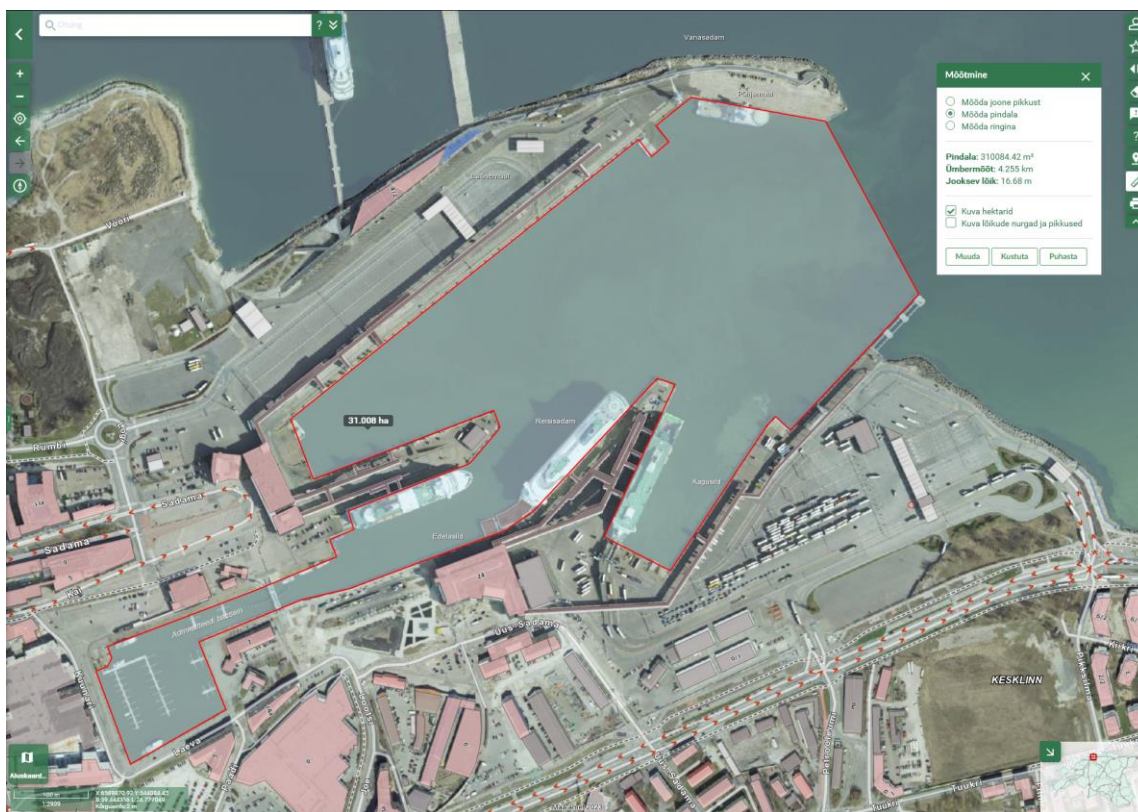
Tabel 3.1 Merepõhja sügavus ja vastav SONARi skaneerimise diameeter

Merepõhja sügavus $h / \text{m}$	Skaneeritav ala laius $d / \text{m}$	Skaneeritava ala pindala $S / \text{m}^2$
3	1,30	1,32
6	2,60	5,30
9	3,90	11,92
11	4,76	17,81

Garmin Navionics sügavuskaardi põhjal saab Vanasadama ala jagada kaheks: madalama keskmise veesügavusega alla 9 m ala, mille hulka jääb Jahisadam ja suue sellesse, ning



sügavama maksimaalse veesügavusega ligi 13 m ala, mille hulka jääb Reisisadama Edela- ning Kagusild. Maa-ameti kaardirakendusest saab teada, et madalama ala pindala on 28672 m<sup>2</sup> ning Reisisadama ala 281412 m<sup>2</sup> (Joonis 3.1). [21] [18]



Joonis 3.1 Tallinna Vanasadama seireala veebirakenduses X-GIS 2.0 [18]

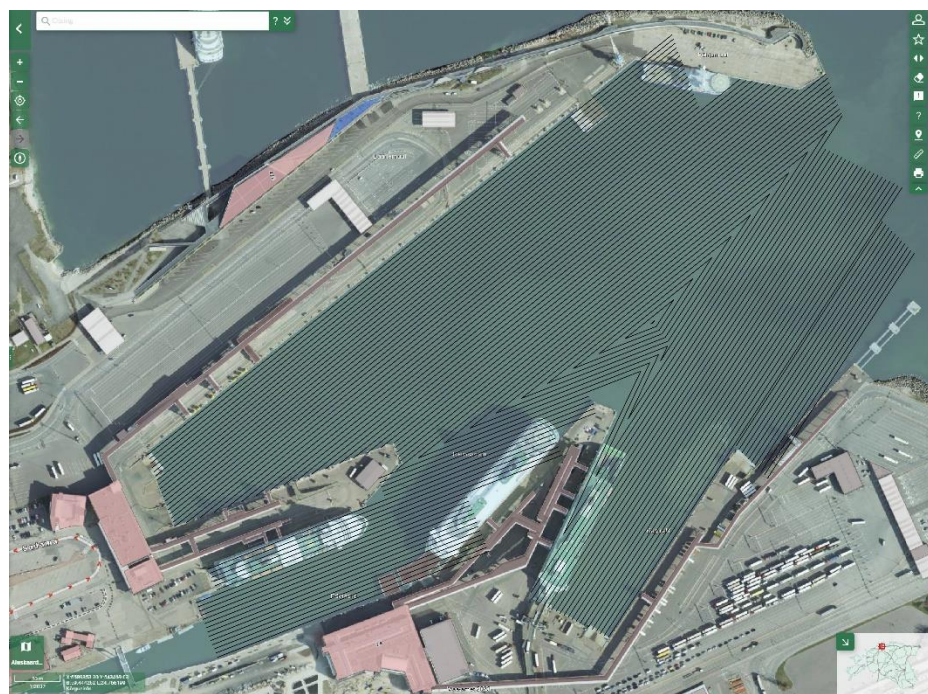
Määrates kaardile vastavalt Tabel 3.1 leitud vahemaa tagant liikumise tiheduse, tuleb välja, et madalas vees liigub robotlaev umbes 5,5 km ja sügavas vees umbes 60 km (Joonis 3.2). Täiskiirusel 11 km·h<sup>-1</sup> kuluks MC2500 terve ala läbimiseks üle 6 tunni ning töökiirusel 5,6 km·h<sup>-1</sup> kuluks üle 12 tunni. Mõlemad aga ei näita reaalselt olukorda, kuna ei arvesta laeva ümber pööramisega ega muutuvate olukordadega sadamas, samuti peab laev naasema laadimisjaama, mis võtab ka mingi osa ajast ja aku energiast.

Kiirusel 5,6 km/h ehk 1,5 m/s on MC2500 maksimaalne võimsustarve ligi 1000 W, mis vastavalt valemile 2.1 tähendab, et MC2500 on võimeline vähemalt 4 tundi sellise kiirusega merepõhja kaardistama enne, kui peab naasema laadimiseks. Kui terve ala läbimiseks kulub 12 tundi ja laetud akuga saab MC2500 sõita 4 tundi, siis peab laev vähemalt 3 korda käima ennast laadimas, et terve ala ära katta. Tühja aku laadimiseks kulub umbes 4 tundi, seega MC2500i ühe kaardistamise missiooni pikkus on umbes 32 tundi. [22]

a)



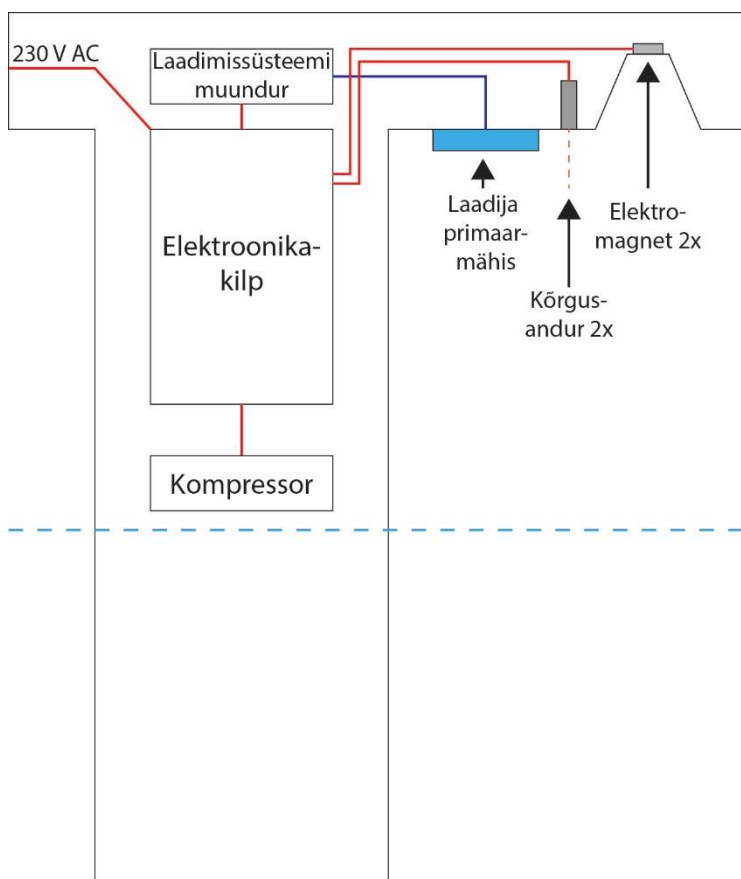
b)



Joonis 3.2 Robotlaeva liikumise tiheduse trajektoor, a) madalas vees, b) sügavas vees

## 4 TEHNILISED NÕUDED LAADIMISJAAMA PROJEKTEERIMISEKS

Joonis 4.1 on näha laadimisjaama eskiis, millel on kujutatud elektroonikakilpi, mille komponendid on kirjeldatud 4.2 ja koostamine 5.1, laadija peamist karpi ja laadija peamist mähist (Joonis 2.1) ja kõrgusandurit (4.2.5) laadimisjaama kõrguse määramiseks dokkimisel, elektromagnetit (4.2.5) laeva fikseerimiseks laadimise ajal ja kompressorit (4.2.4) laadimisjaama tõstmiseks veest kõrgemale.

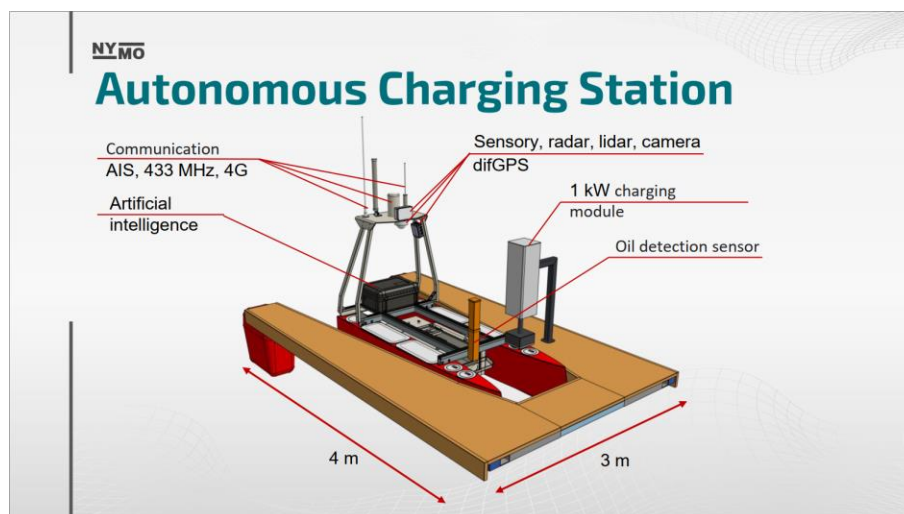


Joonis 4.1 Juhtmevaba laadimisjaama eskiis

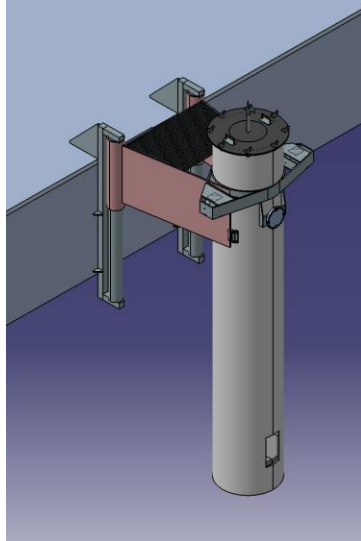
### 4.1 Laadimisjaama mehaaniline disain

Laadimisjaama mehaanilist disaini projekteerides on mitmeid aspekte, mida tuleb silmas pidada, nagu näiteks vastupidavus mere- ja ilmastikutingimustele, mass ning suurus. Mehaanilise disaini esimene versioon kujutas endast U-kujulist dokki, kuhu sisse MC2500 robotlaev ennast pargiks ning ühel platvormil paikneks alla poole liikuv saatja mähis (Joonis 4.2).

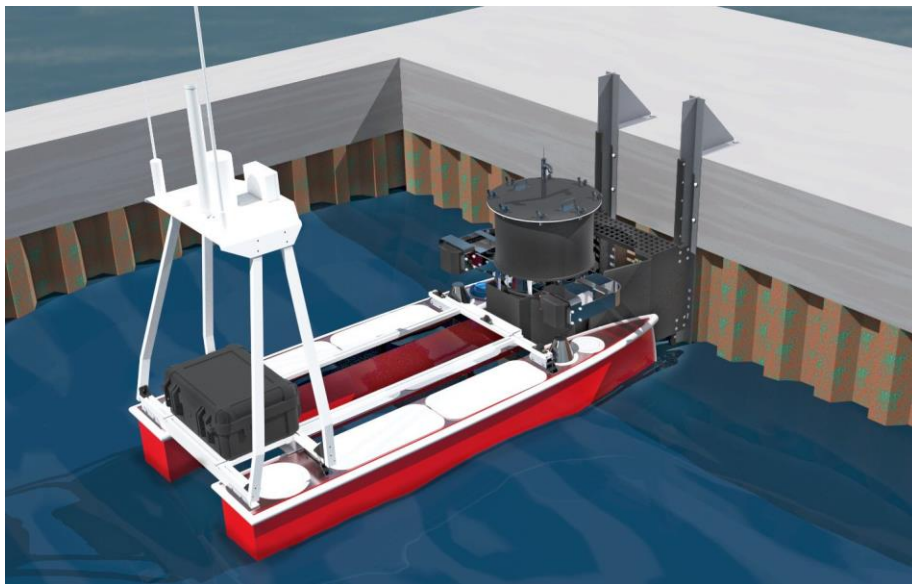
Eesmärgiga teha dokk kergemaks ning lihtsustada võimekust lisada teiste sadamate ja tuulikute külge, otsustas MindChip hoopis disaini kasuks, mis kujutab endast pikka toru (Joonis 4.3), milles on erinevad kambrid ja vahetasemed mehaaniliste ja elektrooniliste komponentide jaoks ning kinnitub lineaarrööbastega kai külge (Joonis 4.4). Toru kõige alumine ja suurem osa on metallist raskuste jaoks, mis hoiavad kogu laadimisdokki stabiilsena ja püstisena lainete suhtes. Keskmine kamber on mõeldud õhukambriks, mida ülemises kambris olev õhukompressor täiendab või tühjendab, vastavalt kas on vaja dokki tõsta või langetada. Ülemises kambris on tasandid elektroonika jaoks, millest alumises on õhukompressor ning ülemises elektroonika kilp. Väliselt on toru kahele poolele lisatud platvormid, kuhu operaator saab peale seista, kui on vaja hooldada, ning platvormide külge on integreeritud elektromagnetid laeva paigal hoidmiseks laadimise ajaks ning laadimissüsteemi saatja pool.



Joonis 4.2 Laadimisdokki esimene kavand [23]



Joonis 4.3 Laadimisdokki CAD mudel tarkvaras CATIA



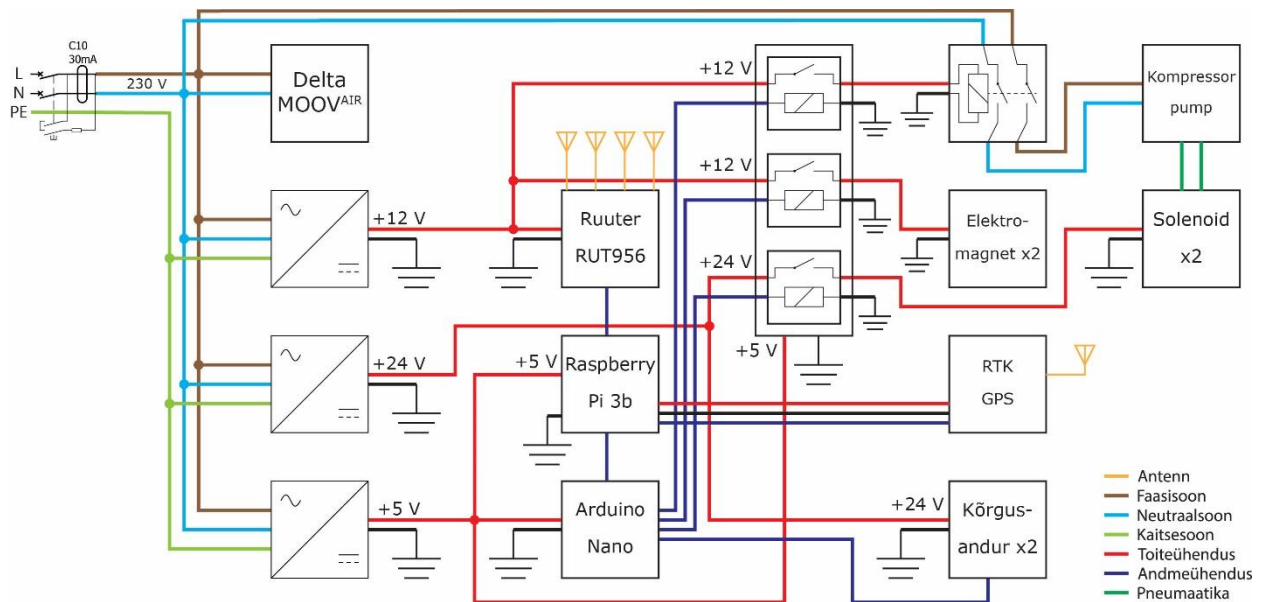
Joonis 4.4 Kuvatõmmis laadimisjaama animatsioonist

## 4.2 Laadimisjaama elektroonika

Mehaanilisele osale lisaks kaasneb ka laadimisdokile elektroonika valimine ja paigutamine. Elektroonikakilbi sisse on vaja mahutada toiteahel, juhtimisahel ning elektroonika. Toiteahela jaoks on vajalik valida välja sobivad kaitselülitid ning toiteplokid elektroonika toitmiseks ja juhtimiseks. Elektroonika poole pealt on kilbis vaja mahutada Here+ RTK GPS majakas ja antennid täpseks positsioneerimiseks, Raspberry Pi 3 Model B+ andmete töötlemiseks ning

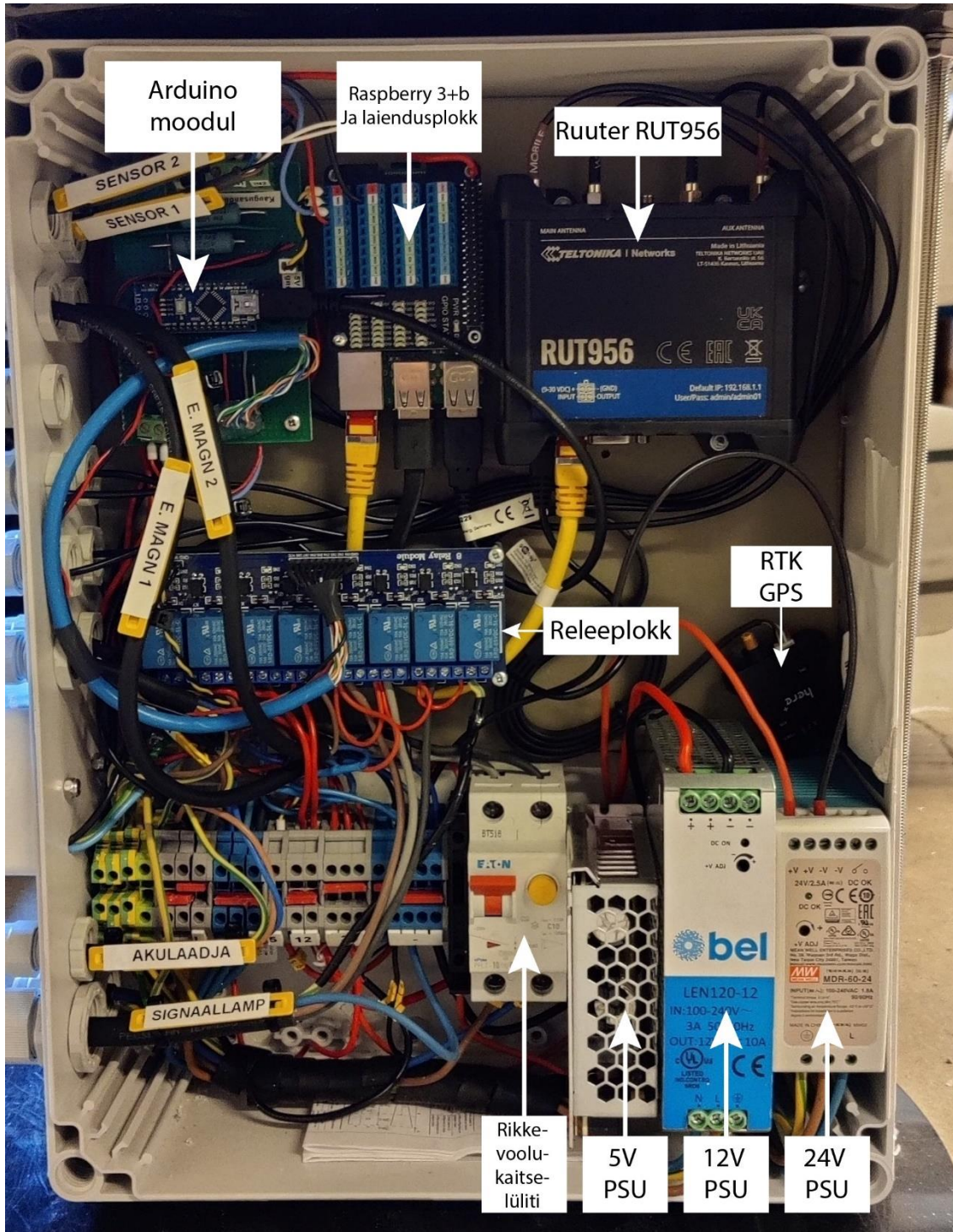
Arduino Nano releede juhtimiseks, Teltonika RUT956 4G ruuter ja antennid andmete edastamiseks ja vastuvõtmiseks andmeserveri vahel ning releed toite juhtimiseks kompressorile, elektromagnetitele ja solenoididele (Joonis 4.6).

Joonis 4.5 on näha elektroonikakilbi ühenduste skeemi, kus on näha, et kilp saab toiteks ühefaasilise 230 V vahelduvvoolu, mis läbi rikkevoolukaitselüliti läheb 5 V, 12 V ja 24 V toiteplokkide ning Delta MOOV<sup>AIR</sup> juhtmevaba laadimissüsteemi toiteks. 5 V toiteplokk läheb Arduino Nano, Raspberry Pi 3 B+ ning releeploki toiteks. 12 V toiteplokk läheb RUT956 ruuteri ja läbi releede kompressorpumba rele ja elektromagnetite lülitamiseks. 24 V toiteplokk annab toidet kõrgusanduritele ning pneumaatika solenoididele, mille abil laadimisjaama töstetakse ja langetatakse.



Joonis 4.5 Elektroonikakilbi skeemi joonis

Joonis 4.6 on näha elektroonikakilbi koostatud versiooni koos valitud komponentidega.



Joonis 4.6 Elektroonikakilbi viimane versioon

### 4.2.1 GNSS valik

Komponentide valimisel oli esimeseks määravaks faktoriks GNSS valik, mille abil on võimalik kolme-dimensioonilises ruumis määrata laadimisjaama asukohta. Valides GNSS süsteemi on esmalt tähtis valida kas kasutada iseseisvat GNSS, DGPS või RTK GPS süsteemi.

**Global Navigation Satellite System** ehk GNSS on Ameerika Ühendriikide (GPS – ingl k *Global Positioning System*), Euroopa Liidu (Galileo), Venemaa (GLONASS – ingl k *Global Navigation Satellite System*, vene k *Глобальная навигационная спутниковая система*) ja Hiina (BDS – ingl k *BeiDou Navigation Satellite System*) poolt loodud ülemaailmne satelliitnavigatsiooni süsteem, mis tagab 95% ajast maakerel vähemalt 1,82 m täpsuse. GNSS on samuti aluseks edasiarenenud DGPS ja RTK GPS süsteemidele. [24] [25]

**Differential GPS** ehk DGPS on GNSS süsteemi baasil töötav positsioneerimissüsteem, mille puhul on lisatud maapinnale lokaalsed täpse asukohaga majakad, mis suurendavad positsioneerimise täpsust kuni 40 sentimeetrini. Põhimõtte seisneb selles, et lokaalsed majakad arvutavad vahe võrreldes enda täpse teadaoleva asukohaga ja vähemtäpse asukohaga satelliitide suhtes, mille abil saavad liikuvad GPS andurid enda asukohta parandada. [26]

**Real Time Kinematic GPS** ehk RTK GPS on edasiarendus DGPS'ist, mis kasutab ühte maapinnal olevat majakat ning lisaks RTCM (ingl k *Radio Technical Commission for Maritime Services*) protokolliga signaali. RTCM protokollis signaal on üle võrgu või pikamaaraadiolt tulev signaal, sisaldab täiendavat informatsiooni GNSS signaalide ning ionosfääri ja troposfääri kohta, mille abil saab täiendavate arvutustega viia positsioneerimise täpsuse mõne sentimeetrini. [26] [27]

Tulenevalt sellest, et MC500 robotlaev kasutab autopiloodi jaoks PixHawk kontrolleri otsustati Here+ RTK GPS (Joonis 4.7) süsteemi jaoks, mis on mõeldud sobima PixHawk kontrolleri ja on populaarne valik kasutuseks. Laadimisjaama elektroonikakilpi lisati Here+ majakamoodul, mis ühendati juhtkontrolleriga.





Joonis 4.7 Here+ RTK GPS süsteem [28]

#### 4.2.2 Juhtkontrolleri valik

Kuna Here+ RTK GPS vajab kontrollimiseks tarkvara nimega *QGroundControl*, mis toetab Windows, Linux, OS X, Android või iOS operatsioonisüsteeme, peab valima seadme, mis kasutaks eelnimetatud operatsioonisüsteemi. Kuna on vajalik ka kõrge jõudlus saab välistada mobiilsed operatsioonisüsteemid Android ja iOS, OS X süsteemil jooksvad masinad on liialt suured ning Windows on liialt ressursimahukas operatsioonisüsteem eesmärgi täitmiseks, jääb valikuks Linux operatsioonisüsteem.

Teine määraja juhtkontrolleri valimisel on mõõtmed. Kuna laadimisjaama torukonstruktsiooni paigaldatava kilbikorpuses olev ruum on piiratud, peavad ka kontrolleri mõõtmed olema väikesed. Ühe valikuna on mini PC (*ingl k mini Personal Computer*) tüübi arvutid, nt Intel NUC, mis on väga võimekad, kuid on üldjuhul suure korpusega, mis on mõeldud neis olevate protsessorite jahutuskomponendina, mis samuti tähendab, et korpust ei saa arvutilt eemaldada ilma, et tekiks puudujääke protsessori jahutamisel. Teine valik on SBC'd, (monoplaatarvuti, *ingl k Single-Board Computer*) nt Raspberry Pi tootevalik, mis on odavamad ja kompaktsemad, kui mini PC'd, ning on suutlikud ennast passiivselt jahutama. Kolmas valik on MCU'd (mikrokontroller üksus, *ingl k microcontroller unit*) nagu näiteks Arduino tooted, mis on veel odavamad, passiivse jahutusega, kuid jõudluse poolest väga nõrgad. Igale tootegrupile leidis autor ühe valiku, mille andmete võrdlus on nähtav Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Juhtkontrollerite võrdlus

Parameeter	Intel NUC Board NUC7i3DNBE [29]	Arduino GIGA R1 WiFi [30]	Raspberry Pi 3 Model B+ [31]
Operatsioonisüsteem	Windows / Linux	Arduino IDE	Linux
Mõõtmed (K x L x S) / mm	25,7 x 101,6 x 101,6 [32]	11,5 x 101,6 x 53,3 [33]	16 x 85 x 56 [34]
Protsessor	Intel® Core™ i3-7100U	STM32H747XI	Broadcom BCM2837B0
Operatiivmälu	4 GB	2 MB Flash, 1 MB RAM	1 GB
Hind €	198,62	68,70	47,80 [35]

Võttes arvesse etteantud tingimusi osutus autori poolt sobivaks kandidaadiks Raspberry Pi 3 Model B+ (Joonis 4.8) SBC, millel on neljatuumaline ja 1,4 GHz 64-bitine Broadcom BCM2837B0 protsessor, 1 GB RAM (operatiivmälu, ingl k *Random Access Memory*), 40-pesaline GPIO (mitmeotstarbeline sisend/väljund, ingl k *general purpose input/output*), neli USB (universaalne jadasiin, ingl k *Universal Serial Bus*) 2.0 porti ning 300 Mb/s kiirusega Etherneti pesa. Valikul aitas samuti kaasa asjaolu, et Mindchip OÜ varudes oli Raspberry Pi 3 B+ koheselt võtta ning varasem kogemus sellega on olnud probleemivaba.



Joonis 4.8 Raspberry Pi 3 Model B+ [31]

### 4.2.3 Ruuteri valik

Kuna laadimisjaam on mõeldud olema iseseisev platvorm, peab laadimisjaama elektroonika hulgas olema ka ruuter, mille abil üle võrgu edastada andmeid laadimisjaama seisundist ning edastada käsklusi juhtelektroonikale. Valituks osutus Teltonika RUT956 (Joonis 4.9) tööstuslik 4G, 3G ja 2G topelt-SIM (abonendi tuvastusmoodul, ingl k *Subscriber Identification Module*)

ruuter, millel on automaatne tõrkeümlülitus. MindChip OÜ on varasemalt seda ruuterit kasutanud, kuna sellel on võimekus IO (sisend-väljund, ingl k *Input/Output*) kaugelt lülitada, mille programmeerimist veel ei ole lõplikult lahendatud. Valikule aitas kaasa asjaolu, et ruuter oli YEInternational poes koheselt saadaval ning MindChip varasem kogemus sama ruuteriga on olnud probleemivaba.



Joonis 4.9 Teltonika RUT956 ruuter

#### 4.2.4 Pumba valik

Kompressorpumba valimisel on tähtsateks parameetriteks väljaantav õhurõhk, õhuhulk ning mõõtmed. Võttes arvesse, et laadimisjaama õhukambri ruumala on  $0,110 \text{ m}^3$  ning terve laadimisjaama mass 250 kg, tuleb leida kompressor, mis suudab tekitada piisavalt rõhku ja õhuhulka, et laadimisjaam veest välja tõsta.

Teoreetiliste mõõtmiste ja arvutuste põhjal on sobivaks kompressorpumbaks ONROAD HD 12 V (Joonis 4.10a). See on 12 voldil töötav kompressor, mis on mõeldud autole rehvide pumpamiseks. Selle parameetriteks on tööõhk 150 PSI ehk 1,034 MPa ning õhuhulk  $55 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ . [36]

Kui laadimisjaam komplekteeriti, selgus et toitesüsteem jääb pumba jaoks nõrgaks, täpsemalt ei anna 12 V toiteplokk välja piisavalt voolu mootori käivitamiseks. Piisvalt võimsa toiteploki soetamine ja paigaldamine on keeruline tingituna sellest, et elektroonikakilbis puudus ruum suurema toiteploki hoiustamiseks. Seetõttu otsustati minna 12-voldise alalisvoolu kompressorpumba pealt 230-voldil vahelduvvoolul toimiva pumba kasuks. Välja valiti Metabo Basic 160-6 W OF (Joonis 4.10b), mille tehnilised parameetrid on õhurõhk 8 bar ehk 0,8 MPa ja õhuhulk  $65 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ , valiku tegemisel mängis rolli ka asjaolu, et see kompressor oli Eesti

poes koheselt saadaval. Võrreldes ONROAD kompressoriga on ka Metabo võimeline pikaajaliselt töötama, et hoida rõhku paagis ilma üle kuumenemata. [37]



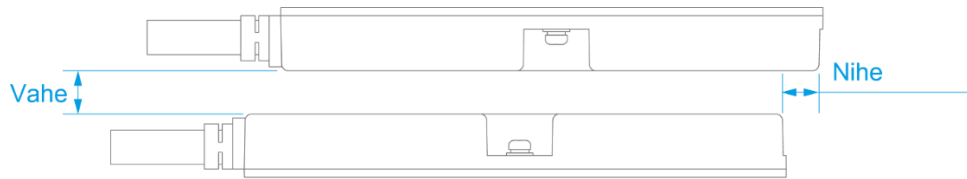
Joonis 4.10 Kompressorid, a) ONROAD HD 12 V, b) Metabo Basic 160-6 W OF

Tabel 4.2 Õhukompressorite võrdlus

Parameeter	ONROAD HD 12 V	Metabo Basic 160-6 W OF
Pinge $U / V$	12 V DC	230 V AC
Vool $I / A$	-	3,91
Õhurõhk $p / MPa$	1,034	0,8
Õhuhulk $Q / L \cdot \text{min}^{-1}$	55	65
Õhupaagi ruumala $V / L$	Puudub	6

#### 4.2.5 Sensorika valik

Robotlaeva lokaalseks positsioneerimiseks on vaja laadimisjaamale lisada andurid, millega saab mõõta laeva kaugust ja sirgust ning laadimisjaama kõrgust laeva suhtes dokkimise ajal, ning elektromagnetid, millega hoida laeva laadimise ajal paigal, et vähendada laadimismähiste liikumist üksteise suhtes nii piki kui ka risti suunas. See on tähtis, sest vastavalt Delta MOOV<sup>AIR</sup> juhendile väheneb laadimisvõimsus alla 1 kW juba üle 5 mm nihke või vahe juures (Joonis 4.11 ja Tabel 4.3). Samuti on vaja releesid, millega juhtida kompressori lülitamist, pneumaatika solenoidide toidet ja elektromagneteid.



Joonis 4.11 Laadimismähiste nihete abijoonis [14]

Tabel 4.3 Laadimismähiste lubatud nihked 1 kW võimsuse edastamiseks [5]

Õhuvahe $h$ / mm	Max. nihe 1000 W jaoks $n$ / mm
0 ... 6	20
8	18
10	17
12	16
14	15
16	10
20	5

**Laadimisjaama kõrguse määramiseks** on vajalik andurit, mis oleks suure mõõtmisvahemikuga, tolmu- ja veekindel ning laia töötemperatuuri vahemikuga. Sobiva komponendina valis autor ja MindChip kinnitas ultrahelianduri Schneider Electric Telemecanique XX918A3C2M12. Etteantud tingimuste täitmiseks on anduril 51...508 mm mõõtevahemik, IP67 tolmu- ja veekindlus, mis tagab kaitse täielikult tolmu vastu ja ajutise vette kastmise eest, ja töökindluse temperatuurivahemikus  $-20...65$  °C, et oleks võimalik laadimisjaama kasutada ka varatalvel esimeste külmakraadidega ja suvel kütva päikese käes. [38] [15]



Joonis 4.12 Telemecanique XX918A3C2M12 ultraheliandur

**Elektromagnetite** valimisel otsustas autor võtta kõige suurema jõuga kompaktsed elektromagnetid, milleks osutus LukuExpert pakutav UKSEMAGNET HEAD 50kg 12VDC/24VDC SEINALE PAIGALDATAV (12V/100mA või 24V/50mA). Elektromagnet mõõtmetega 80 x 80 x 40 mm sobib hästi, et integreerida laadimisjaama ja robotlaeva kohati saamiseks mõeldud koonusdetaili tippu ning on poes koheselt saadav. [39]



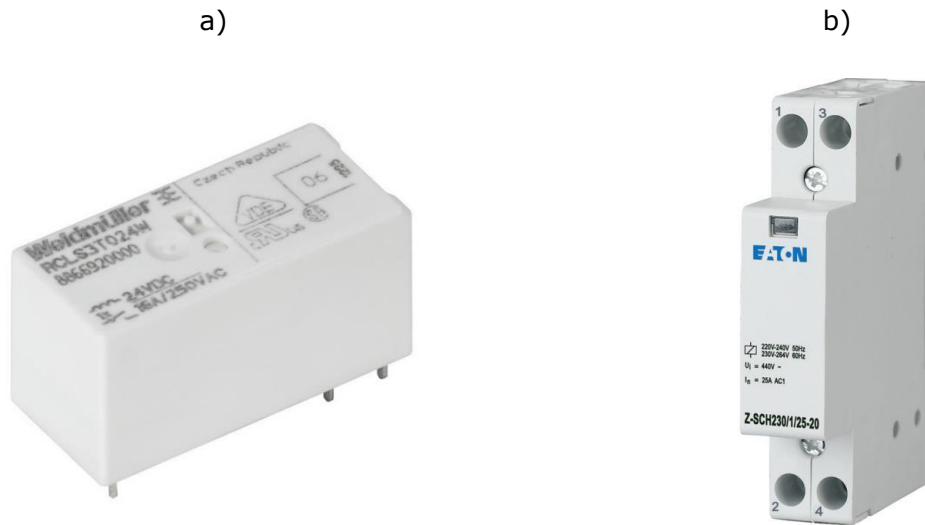
Joonis 4.13 UKSEMAGNET HEAD 50kg 12VDC/24VDC [39]

**Elektroonikakilbis** kompressori, elektromagnetite ja solenoidide toite lülitamiseks on vaja leida releed. MindChip laos oli võtta 8 Relay Module (Joonis 4.14), mis koosnes kaheksast SRD-05VDC-SL-C releedest, mille parameetrid olid 5 V, 12 V ja 24 V lülituste jaoks sobivad.



Joonis 4.14 Releemoodul 8 Relay Module koos SRD-05VDC-SL-C releedega

Kompressoripumba jaoks valis autor MindChip laost Weidmüller RCL314012W releemooduli (Joonis 4.15a), mis on küll mõeldud 250 V AC ja 16 A jaoks, kuid MindChipi insenerid pidasid seda ettenähtud kasutuseks sobivaks. Peale kompressori probleemide avastust ja vahetust tekkis vajadus kõrgema reitinguga rele vastu, mille jaoks autor valis ning MindChip kinnitas EATON Z-SCH230/1/25-20 (Joonis 4.15b) rele, mis on võrreldes Weidmülleri releega 9 A kõrgema voolureitinguga.



Joonis 4.15 Releed, a) Weidmüller RCL314012W [40] , b) EATON Z-SCH230/1/25-20 [41]

#### 4.2.6 Toitesüsteemi valik

Selle jaoks, et leida, milliseid toiteplokkide on vaja elektroonikakilpi lisada, et toita ära kõik komponendid, tuleb leida iga komponendi jaoks vajalik pingeline ja vool ning need vastavalt kokku liita (Tabel 4.4).

Tabel 4.4 Elektroonikakilbi komponentide pinged ja voolud.

Komponent	Pinge $U / V$	Voolutarve $I / A$	Voolutarve kokku $I_{\Sigma} / A$
Arduino Nano	5	0,20 [42]	3,27
Raspberry Pi 3 B+		2,50 [31]	
Releemoodul		0,57 [43]	
Elektromagnetid	12	0,10 [39]	>0,68
Ruuter Teltonika RUT956		0,58 [44]	
Kompressor ONROAD HD 12 V		-	
Kaugusandurid Telemecanique XX918A3C2M12	24	0,40 [38]	0,73
Solenoidid SMC VT307-5DO1-02F-Q		0,33 [45]	
Kompressor-pump Metabo Basic 160-6 W O	230	3,91 [37]	16,91
Laadimissüsteem Delta MOOV <sup>AIR</sup>		13 [14]	

**Viie voldi** toiteplokki valides tuleb arvesse võtta, et 5 V nõudvad komponendid on Arduino Nano (0,2 A), Raspberry Pi 3 (2,5 A) ning releemoodul. Releemoodulil võtab üks rele 5 V juures 0,0714 A ehk 8 rele puhul on voolu vaja  $0,0714 \text{ A} \cdot 8 = 0,5712 \text{ A}$ . Kokku peab 5 V toiteplokk andma välja vähemalt  $0,20 + 2,5 + 0,57 = 3,27 \text{ A}$ . Selle jaoks, et jääks ka varu juhuks kui kilpi lisada veel 5 V seadmeid otsustas autor 5 V / 7 A toiteploki kasuks. Sobivaks toiteploki leiti MEAN WELL LRS-35-5 (Joonis 4.16), mis on saadaval nii YEInternational, Oomipoes kui ka Mouser Electronics poodides (Tabel 4.5). Autor otsustas toiteploki võtta YEInternational poest, sest seal oli toode madalama hinnaga kui Oomipoes ja sai kiiremini kätte kui Mouser Electronics poest.

Tabel 4.5 5 V toiteploki võrdlus

Tootja ja mudel	Vool $I / \text{A}$	DIN liistu võimalus	Hind €	Saadavus
MEAN WELL LRS-35-5	7	Ei	12,73 [46]	YEInternational
MEAN WELL LRS-35-5	7	Ei	19,0 [47]	Oomipood Järve
MEAN WELL LRS-35-5	7	Ei	13,68 [48]	Mouser Electronics



Joonis 4.16 MEAN WELL LRS-35-5 toiteplokk

**Kaheteist voldi** toiteploki valimisel tuleb arvestada elektromagnetite (0,10 A), RUT956 ruuteri (0,58 A) ja ONROAD HD 12 V kompressorpumba voolutarbega. Kuna ONROAD pumba kohta ei ole voolutarve kohta informatsiooni antud, valis autor 10 amprilise toiteallika kasuks. Võttes arvesse ka võimalust DIN liistule kinnitada, et elektroonikakilpi lisatavale DIN liistule oleks mugavam kinnitada, suurust, et elektroonikakilpi mahuks, hinda ja saadavust valiti välja Mouser Electronics poes müüdav BEL Power Solutions LEN120-12 (Joonis 4.17a) 12 V / 10 A



toiteplokk. Võrreldes Mean Well poolt toodetud EDR-120-12 ja RD-125A toiteplokkidega on LEN120-12 ligi 15€ kallim, ent see tasub ennast ära, sest on madalam ja kitsam (Tabel 4.6), mistõttu on parem elektroonikakilpi lisada.

Tulenevalt probleemist, et katsetamise käigus ilmnes, et 10 A ei piisa ONROAD kompressori kasutamiseks, otsustas autor teise 25 A toiteploki kasuks. Kuna Eesti poodides ei olnud nii suure vooluga toiteploki saada, otsiti Mouser Electronics kataloogist sobivat. Testimiseks kokku pandud kilbis oli ka vähe ruumi, mistõttu peab leitav toiteplokk olema kompaktne. Valikusse jäid XP Power SMP350PS12 ja MEAN WELL SPV-300-12 (Tabel 4.6) ning autor valis ja MindChip kinnitas XP Power SMP350PS12 (Joonis 4.17b) kasuks, sest see on igas mõttes väiksem.

Tabel 4.6 12 V toiteplokkide võrdlus

Tootja ja mudel	Vool $I / A$	Mõõtmed ( $K \times L \times S$ ) / mm	DIN liistu võimalus	Hind €	Saadavus
Bel Power Solutions LEN120-12	10	125 x 36 x 100	Jah	50,15 [49]	Mouser Electronics
MEAN WELL EDR-120-12	10	125,5 x 40 x 113,5	Jah	34,95 [50]	Mouser Electronics
MEAN WELL RD-125A	10	197 x 38 x 98	Ei	35,36 [51]	YEInternational
XP Power SMP350PS12	25	177,8 x 91,4 x 43,5	Ei	130,60 [52]	Mouser Electronics
MEAN WELL SPV-300-12	25	215 x 115 x 50	Ei	92,22 [53]	Mouser Electronics

a)



b)



Joonis 4.17 12 V toiteplokid: a) Bel Power LEN120-12 toiteplokk [54] b) XP Power SMP350PS12 [52]

**Kahekümne nelja voldi** toiteploki valimisel tuleb arvestada kaugusandurite (0,40 A) ja mehaanika eest vastutavate poolt valitud solenoidide SMC VT307-5DO1-02F-Q (0,33 A) voolutarbega. Selleks, et vajadusel saaks lisada veel 24 V komponente otsustas autor vähemalt 2,5 A toiteploki kasuks. Valimisel peab samuti arvestama elektroonikakilbis oleva ruumiga ning DIN-liistu võimalusega, et toiteplokk korrektselt kilpi paigaldada. Sõelale jäi Mean Well MDR-60-24 (Joonis 4.18), mis on saadaval YEInternational, Oomipood ja Mouser Electronics poodides. Komponent võeti YEInternational poest, kuna seal oli kõige soodsam hind.

Tabel 4.7 24 V toiteplokkide võrdlus

Tootja ja mudel	Vool I / A	Mõõtmed (K x L x S) / mm	DIN liistu võimalus	Hind €	Saadavus
Mean Well MDR-60-24	2,5	90 x 40 x 100	Jah	23,67 [55]	YEInternational
Mean Well MDR-60-24	2,5	90 x 40 x 100 [56]	Jah	27,03	Mouser Electronics
Mean Well MDR-60-24	2,5	90 x 40 x 100	Jah	32,0 [57]	Oomipood Järve



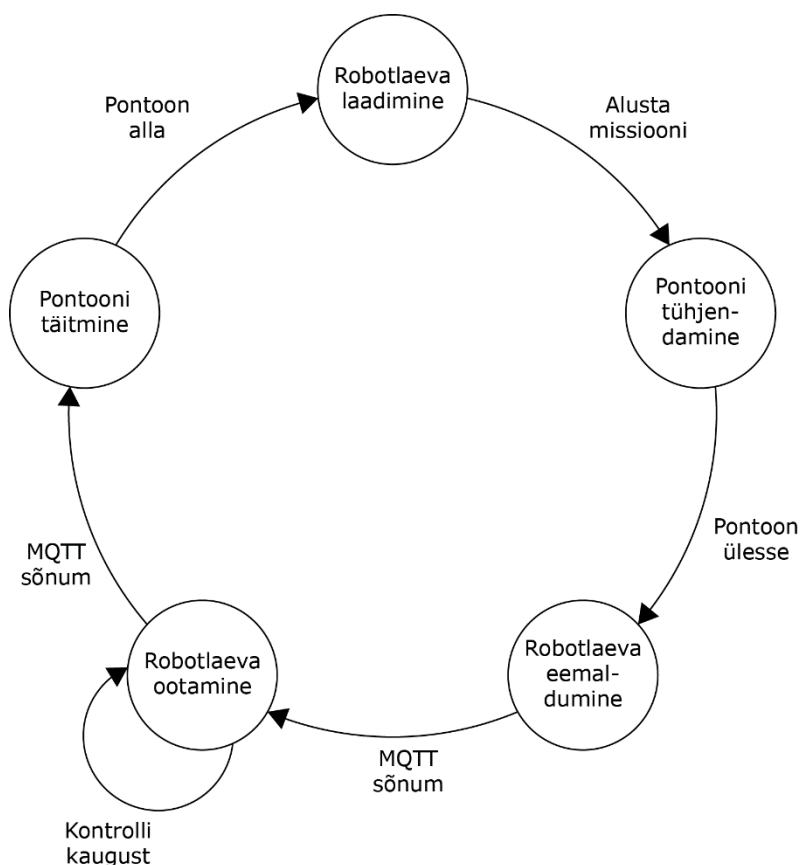
Joonis 4.18 MEAN WELL MDR-60-24 toiteplokk [56]

### 4.3 Laadimisjaama tarkvara

Tarkvaraliselt seisneb laadimisjaama süsteem (Joonis 4.19) selliselt, et läbi RTK GPS'i ja ruuteri saab laadimisjaama juhtkontroller informatsiooni MC2500 asukohta kohta. Kui

robotlaev on laadimisjaamale lähenemas, edastatakse jaamala MQTT sõnum, mille põhjal laadimisjaama pontoon täitub õhuga ja tõuseb veest kõrgemale. Robotlaev sõidab laadimisjaama alla, lülitatakse sisse elektromagnet ning kõrgusanduri tagasiside põhjal langetatakse jaam robotlaeva peale. Kui kõrgus on õige ja elektromagnetid on ühenduses laevaga, alustatakse MC2500 akulaadimist läbi Delta MOOV<sup>AIR</sup> laadimismähiste kuni laeva aku on täis laetud.

Kui MC2500 saab missioonikäsu, siis vastavalt käsu prioriteedile lahkuab laev jaamast kas täislaetud, madala prioriteediga, või pooltäis akuga, kõrge prioriteediga, millest piisab missiooni täitmiseks. Selleks pumbatakse pontoon õhku täis, mis tõstab jaama laevast kõrgemale ning kui kõrgusandurite tagasisidest on teada, et laev saab ohutult eemalduda, liigub laev laadimisjaama alt eemale. Kui laev on piisavalt kaugel, tühjendatakse pontoon.



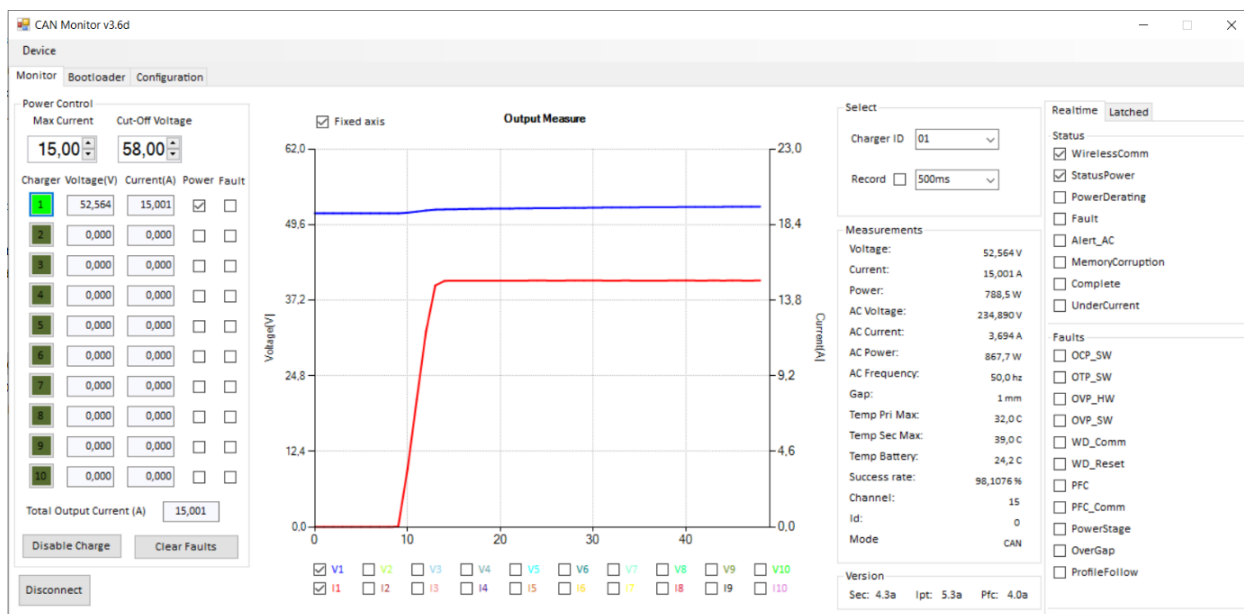
Joonis 4.19 Laadimisjaama olekudiagramm

## 5 LAADIMISJAAMA EHITUS JA KATSED

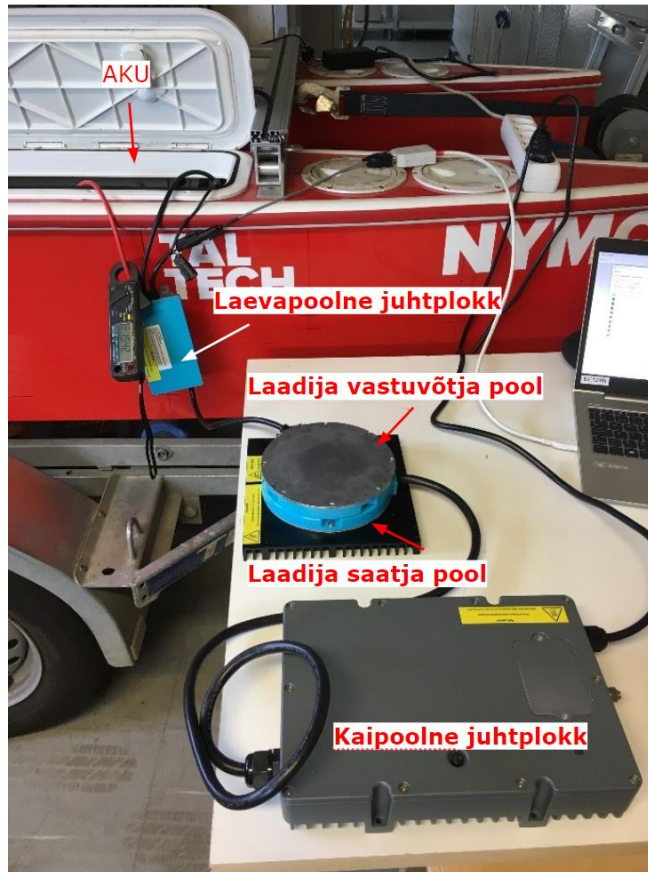
### 5.1 Katsed laboris

2021. aasta sügissemestril oli aine Tooteloome projekt (ainekood ATV0091) raames meeskonna projektiks MC2500 robotlaeva laadimisjaama tarbeks ostetud juhtmevaba laadija Delta MOOV<sup>AIR</sup> katsetused laboris ning hiljem vastuvõtva poole integreerimine laevale. Meeskonda kuulusid Henri Nurmela, Jürgen Jürgenson ja Merilin Metsik. Esimestel nädalatel võeti ühendust tootjaga, sest tootja kodulehel ei olnud vabalt kättesaadav täiendav informatsioon, ning tutvuti põhjalikult tootjalt saadud kasutusjuhendiga. Samuti selgus meilivestlusest, et MC2500 jaoks tellitud süsteem oli tarkvaraliselt maas ning vajas uuendusi akutüüpide ja -režiimide koha pealt. Lisaks saadi tootjalt tarkvara CAN Monitor, millega laadimissüsteemi konfigureerida, katsetada ja jälgida.

Peale mõnenädalast materjalidega tutvumist hakati planeerima ja koostama testimise eesmärgil kasutatavat elektriskeemi (Joonis 5.2), kus ühendati saatjapoolne juhtplokk vooluvõrku, vastuvõtva poole juhtplokk ning ampertangid MC2500 aku külge, informatsiooni kogumiseks ja laadimise juhtimiseks ühendati andmekaabli ja adapteriga arvuti ning tõsteti laadimismähised kohakuti. Esimene õnnestunud laadimine saadi tööle 15 ampriga pingel 58 V (Joonis 5.1).

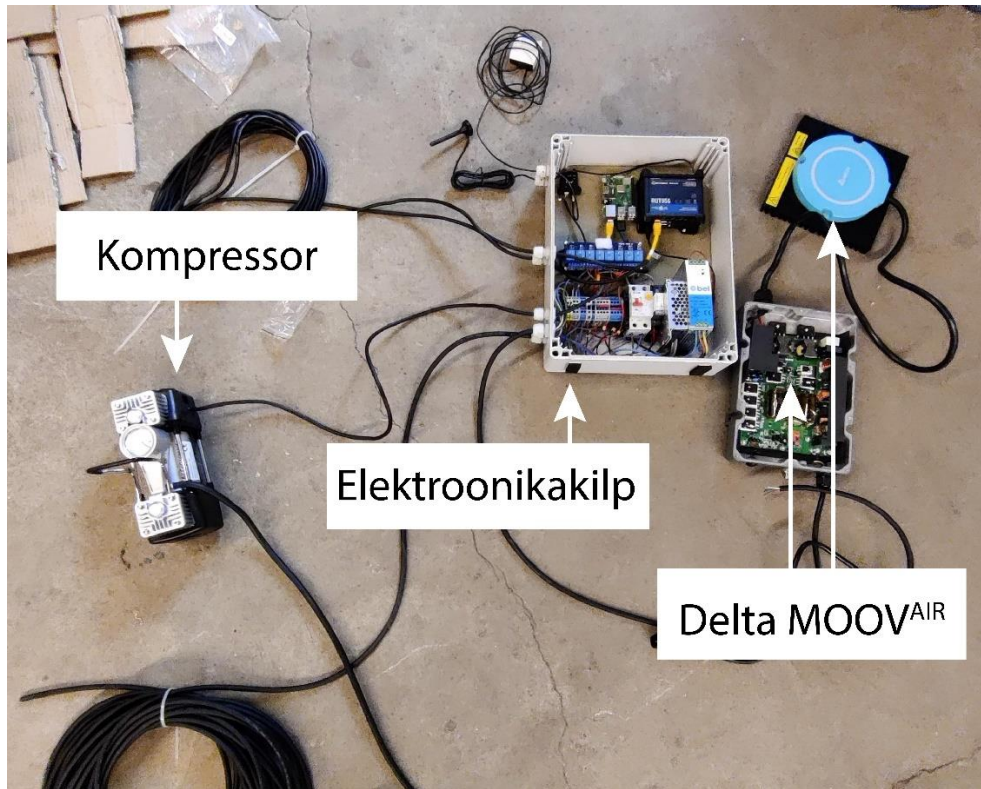


Joonis 5.1 Esimene õnnestunud laadimine



Joonis 5.2 TalTech NRG hoone laboris tehtavate katselaadimiste skeem

Peale juhtmevaba laadija katsetamist TalTechi energeetikahoone NRG-102 laboris järgnes ettenähtud komponentide tellimine vastavalt valitud toodetele (kirjeldatud 4.2) ja komplekteerimine autori poolt. Elektroonikakilbi esimene versioon, mis oli peamiselt toitesüsteemi kontrollimiseks ja katsetamiseks, koosnes kaitselülitist EATON PFL7-10/1N/C/003-A, 5 V toiteplokkist MEAN WELL LRS-35-5, 12 V toiteplokkist Bel Power LEN120-12, Phoenix DIN-liistu riviklemmid (toiteühenduste lihtsustamine), releed EATON Z-SCH230/1/25 (tagavara rele kompressori lülitamiseks) ja Weidmüller RCL314012W (esimene valik kompressori käivitamiseks), releemoodul 8 Relay Module, Raspberry Pi 3 Model B+, RUT956 ruuter ja Here+ RTK GPS majakas. Elektroonikakilbi külge ühendati välistest komponentidest Delta MOOV<sup>AIR</sup> juhtmevaba laadimissüsteem ja ONROAD HD 12 V kompressor (Joonis 5.3).



Joonis 5.3 Koostatud elektroonikakilp ja komponendid toitesüsteemi katsetamiseks

Koostatud süsteemi sisse lülitamisel ilmnis probleem, et kompressor ei käivitu. Kompressori lähemal uurimisel ja katsetamisel teiste toiteallikatega tuli välja, et kompressori käivitusvool on kõrgem, kui väljaantav vool 12 V toiteploki poolt. Selle lahendamiseks lisati teine 12 V / 25 A toiteplokk XP Power SMP350PS12. Samuti lisati Raspberry'le ühenduste lihtsustamiseks GPIO moodul, mis ühendati releemooduli andmepistikutega, et katsetada releede juhtimist Raspberryt kasutades. Elektroonikakilbist eemaldati ka EATON Z-SCH230/1/25 relee, sest sellele ei leitud kasutust. Katsetamisel oli uus toiteplokk võimeline kompressorit käivitama ja käimas hoidma.

Uuendatud elektroonikakilbi katsetamisel ilmnis, Raspberry väljundpinge 3,3 V ei ole sobiv releeploki lülitamiseks, mistõttu lisatu Raspberry ja releeploki vahele Arduino Nano mikrokontroller, mille väljundpinge 5 V sobib releede juhtimiseks.

## 5.2 Katsed sadamas

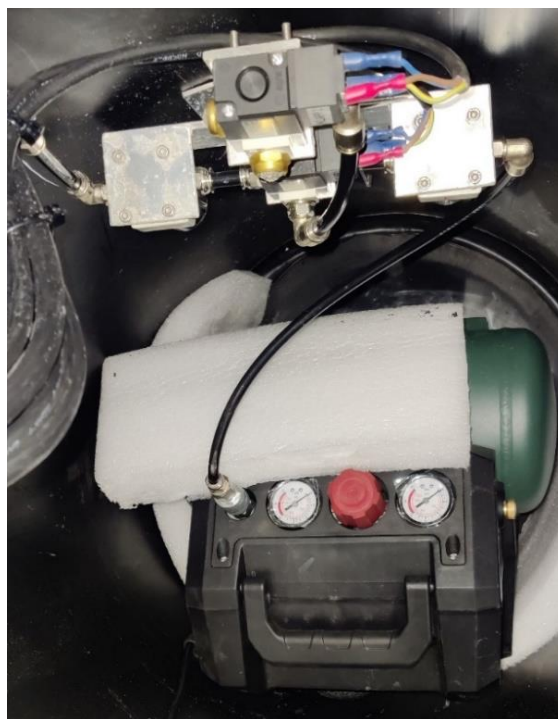
Koostatud elektroonikakilp paigaldati mehaanilisse konstruktsiooni ning valmis laadimisjaam paigaldati Tallinna Sadamasse (Joonis 5.4), et praktiliselt katsetada laadimisjaama

elektroonikat, laadimismähiste paigutust laadimise ajal ning jaama pumpamist, ja mehaanikat, jaama ujuvust ja vastupidavust keskkonnale. Probleemidena tuli välja, et valitud elektromagnetid on liiga nõrga jõuga ning ei suuda laeva lainetusega paigal hoida, et korrektselt laadida. Samuti tuli välja, et valitud kompressor ei ole võimeline piisavalt kaua töötama, et laadimisjaama veest välja tõsta.

Viimase probleemi lahenduseks vahetati ONROAD HD 12 V kompressor Metabo Basic 160-6 W OF kompressori (Joonis 5.5) vastu, mis töötab 230 V vahelduvvoolu pealt ning on võimeline konstantselt töötama, et oleks võimalik laadimisjaama vees tõsta dokkimiseks.



Joonis 5.4 MC2500 ja laadimisjaam Tallinna Sadamas



Joonis 5.5 Õhukompressor Metabo Basic 160-6 W OF laadimisjaama kere sees

### 5.3 Tuleviku arendustööd

Järgmine probleem, mis laadimisjaamal vajab lahendamist on tugevamad elektromagnetid. Selleks, et olla kindel magnetite võimes laevaga kontaktis olla, otsustas autor valida vähemalt 2000 N jõuga elektromagnetid. Autor leidis kaks sobivat toodet: AMPUL AM2093-12-DC ja Dictator EM GD 70 F 39 R, mille võrdlus on toodud Tabel 5.1.

Tabel 5.1 2000 N elektromagnetite võrdlus

Tootja ja mudel	 <p data-bbox="568 1795 876 1827"><b>AMPUL AM2093-12-DC</b></p>	 <p data-bbox="1023 1785 1364 1816"><b>Dictator EM GD 70 F 39 R</b></p>
Jõud F / N	2000	2000



Tabel 5.1 jätk 2000 N elektromagnetite võrdlus

Pinge $U / V$	12 / 24	24
Vool $I / mA$	-	142
Hind €	188,98	147,86 [58]
Mõõdud $K \times L \times S / mm$	40 x 120 x 120 [59]	39 x 103 x 75 [60]

AMPUL elektromagneti eeliseks on sobivus nii 12 V kui ka 24 V toitega ning ümar kuju, et saab kasutada sarnast süsteemi, mis laadimisjaamal hetkel on. Puuduseks on vajadus positsioneerimise koonused uuesti teha, kuna on mõõtmetelt diameetrilt 40 mm suuremad.

Dictator elektromagneti eeliseks on ligi 40€ odavam hind ning laiuse poolest oleks võimalik leida meetod hetke positsioneerimise koonuste taaskasutamiseks. Miinuseks on suurem *footprint*, mis vajab positsioneerimiskoonuste täiendavat modifitseerimist.

## KOKKUVÕTE

Lõputöö eesmärgiks oli MindChip OÜ poolt tehtud MC2500 ehk NYMO robotlaevale mõeldud laadimisjaama mehaanilisele osale lisaks projekteerida ning komplekteerida elektri- ja elektroonikalahendus. Täpsemalt sobiliku juhtmevaba laadimissüsteemi valimine, elektroonikakilbi koostamine koos autori poolt valitud komponentidega ning süsteemi katsetamine labori- ja sadamatingimustes.

Laadimisjaama lahendus sai alguse olemasolevate lahenduste uuringust, millest selgus, et MC2500 mõõdus laevale veel kommertslahendust ei ole, mistõttu oli vaja lahendus ise projekteerida ja valmistada. Esimene samm oli valida juhtmevaba laadimissüsteem, mis oleks mõõtetelt sobiv nii laadimisjaamale kui ka robotlaevale kinnitamiseks ning piisava võimsusega, et robotlaev viibiks väikese osa enda missioonist sadamas laadimas. Peale juhtmevaba laadimissüsteemi leidmist arvutati robotlaeva liikumise trajektoori põhjal aku tühjenemise aeg, millest sai leida, kui pikk on robotlaeva ühe merepõhja kaardistamise missiooniks kuluv aeg.

Lisaks juhtmevabale laadimissüsteemile valiti vastavalt MindChip koostatud mehaanilisele disainile ja tarkvarale lisaks elektroonikakilpi komponentidena GPS süsteem, juhtkontroller, ruuter, kompressoripump, sensorika ning toitesüsteem. Valitud komponentidest koostati elektroonikakilp, mida esmalt katsetati laboritingimustes elektroonika vigade leidmiseks ning hiljem Tallinna Sadamas, et katsetada koostööd mehaanilise disainiga ja tarkvaraga. Avastatud probleemidest jõuti lahendada laadimissüsteemi tarkvaraline häälestus ning kompressoripumba vahetamine koos toiteploki ja releega. Lahendamata jäi liiga nõrkade elektromagnetite probleem, mille lahendamiseks pakuti välja kaks suurema jõuga elektromagnetit. Kuna tegemist on prototüübiga, mida on praktilistes tingimustes katsetatud ainult mõned kuud, siis kõik problemaatilised kohad ei ole veel välja tulnud.

Lõputöö käigus ette antud ülesanne sai täidetud, kuna laadimisjaam on paigaldatud Tallinna Sadamasse ja esialgsed tingimused said täidetud ning laadimisjaam on kasutuskõlblik teatud määrdusega, et suure lainetusega ei ole kontakt elektromagnetil piisavalt tugev ja seeläbi ka laadimismahistel ideaalne.

## KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] Ports.com, „Ports in Europe,” [Võrgumaterjal]. Available: <http://ports.com/browse/europe/>. [Kasutatud 16 05 2023].
- [2] Mindchip OÜ, „Mindchip,” 2022. [Võrgumaterjal]. Available: <https://mindchip.ee/nymo/>.
- [3] MindChip OÜ, „AUTONOMOUS SHORT SEA SHIPPING,” TalTech, Tallinn, 2020.
- [4] Wärtsilä Corporation, „Vessel battery charging,” Wärtsilä, [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.wartsila.com/marine/products/ship-electrification-solutions/shore-power/charging>. [Kasutatud 03 2023].
- [5] Oasis Marine Power Ltd, „Oasis Power Buoy,” Jebb Smith Ltd, 2023.
- [6] Jebb Smith Ltd, „About,” [Võrgumaterjal]. Available: <https://oasismarine.co.uk/about/>. [Kasutatud 18 05 2023].
- [7] Marine Industry News, „Jebb Smith secures MarRI-UK funding for new Oasis Power Buoy,” 20 07 2020. [Võrgumaterjal]. Available: <https://marineindustrynews.co.uk/jebb-smith-secures-marri-uk-funding-for-new-oasis-power-buoy/>. [Kasutatud 10 05 2023].
- [8] Maersk Supply Services, „Headquarters Contact,” [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.maersksupplyservice.com/contacts/#headquarters-contact>. [Kasutatud 18 05 2023].
- [9] Stillstrom, „Maersk Supply Service launches new venture company, Stillstrom, to deliver offshore vessel charging,” 25 01 2022. [Võrgumaterjal]. Available: <https://stillstrom.com/2022/08/maersk-supply-service-stillstrom-launch/>. [Kasutatud 15 05 2023].
- [10] Stillstorm, „Stillstrom & Port of Aberdeen collaborate on pioneering cleantech charging solution,” 18 08 2022. [Võrgumaterjal]. Available:

- <https://stillstrom.com/2022/08/port-of-aberdeen-collaboration/>. [Kasutatud 15 05 2023].
- [11] Stillstorm, „Stillstrom and Ørsted to test offshore charging buoy to reduce vessel emissions,” 2020 09 2020. [Võrgumaterjal]. Available: <https://stillstrom.com/2022/08/stillstrom-orsted-test/>. [Kasutatud 15 05 2023].
- [12] WiBotic, „Wibotic-Mobile-Datasheet,” 05 2021. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.wibotic.com/wp-content/uploads/2021/05/Wibotic-Mobile-Datasheet.pdf>. [Kasutatud 04 2023].
- [13] Delta Electronics, Inc, „MOOVair 1 kW Wireless Charging System,” Delta Electronics, Inc, 2022. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.deltaww.com/en-US/products/Industrial-Battery-Charging/5776>. [Kasutatud 03 2023].
- [14] Delta Energy Systems, „1 kW Wireless Charging System MOOVair leaflet,” 09 2022. [Võrgumaterjal]. Available: <https://filecenter.deltaww.com/Products/download/19/1909/Products-202303061823241786.pdf>. [Kasutatud 03 2023].
- [15] International Electrotechnical Commission, „IP Ratings,” [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.iec.ch/ip-ratings>. [Kasutatud 24 04 2023].
- [16] Wiferion GmbH, „etaLINK 3000,” [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.wiferion.com/us/products/etalink-3000-inductive-charging-with-3-kw/>. [Kasutatud 03 05 2023].
- [17] Wiferion, „etaLINK3000 product flyer,” [Võrgumaterjal]. Available: [https://www.wiferion.com/doc/etaLINK3000-productflyer-v3\\_EN.pdf](https://www.wiferion.com/doc/etaLINK3000-productflyer-v3_EN.pdf). [Kasutatud 05 04 2023].
- [18] Maa-amet, „X-GIS 2.0,” Geoportaal, [Võrgumaterjal]. Available: <https://xgis.maaamet.ee/xgis2/page/app/maainfo>. [Kasutatud 27 04 2023].
- [19] Tallinna Sadam, „Vanasadam,” Tallinna Sadam, [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.ts.ee/vanasadam/>. [Kasutatud 27 04 2023].

- [20] DeepVision AB, „Side Scan Sonars,” 2018. [Võrgumaterjal]. Available: <https://deepvision.se/products/side-scan-sonars/>. [Kasutatud 18 05 2023].
- [21] „Navionics ChartViewer,” Garmin, [Võrgumaterjal]. Available: <https://webapp.navionics.com/#boating>. [Kasutatud 03 05 2023].
- [22] A. Tsupsman, „AUTONOOMSE ROBOTLAEVA ENERGIATÕHUSUSE UURIMINE JA TÕÖKINDLUSE PARENDAMINE,” TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL, Tallinn, Tallinn.
- [23] MindChip OÜ, „MIND for SHIP,” Tallinn.
- [24] GPS.gov, „Other Global Navigation Satellite Systems (GNSS),” 19 10 2021. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.gps.gov/systems/gnss/>. [Kasutatud 17 04 2023].
- [25] GPS.gov, „GPS Accuracy,” 03 03 2022. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.gps.gov/systems/gps/performance/accuracy/>. [Kasutatud 17 04 2023].
- [26] Marxact, „What is the difference between Standalone, Differential GPS and Real-time Kinematic?,” 27 12 2021. [Võrgumaterjal]. Available: <https://support.marxact.com/article/112-what-is-the-difference-between-standalone-differential-gps-and-real-time-kinematic>. [Kasutatud 19 04 2023].
- [27] Sparkfun, „<https://learn.sparkfun.com/tutorials/what-is-gps-rtk/all>,” 14 09 2018. [Võrgumaterjal]. Available: <https://learn.sparkfun.com/tutorials/what-is-gps-rtk/all>. [Kasutatud 19 04 2023].
- [28] PX4 Dev Team, „HEX/ProfiCNC Here+ RTK GPS,” 16 03 2023. [Võrgumaterjal]. Available: [https://docs.px4.io/v1.11/en/gps\\_compass/rtk\\_gps\\_hex\\_hereplus.html](https://docs.px4.io/v1.11/en/gps_compass/rtk_gps_hex_hereplus.html). [Kasutatud 19 04 2023].
- [29] Intel, „Intel NUC Board NUC7i3DNBE,” 2017. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.intel.com/content/www/us/en/products/sku/122501/intel-nuc-board-nuc7i3dnbe/specifications.html>. [Kasutatud 18 04 2023].
- [30] Arduino S.r.l., „Arduino GIGA R1 WiFi,” [Võrgumaterjal]. Available: <https://store.arduino.cc/products/giga-r1-wifi>. [Kasutatud 18 04 2023].

- [31] Raspberry Pi, „Raspberry Pi 3 Model B,” [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-3-model-b/>. [Kasutatud 18 04 2023].
- [32] Intel, „Intel® NUC Board/Kit NUC7i3DN,” 02 2018. [Võrgumaterjal]. Available: [https://simplynuc.eu/wp-content/uploads/2021/02/NUC7i3DN\\_TechProdSpec.pdf](https://simplynuc.eu/wp-content/uploads/2021/02/NUC7i3DN_TechProdSpec.pdf). [Kasutatud 19 04 2023].
- [33] Arduino S.r.l., „Arduino® GIGA R1 WiFi datasheet,” 14 04 2023. [Võrgumaterjal]. Available: <https://docs.arduino.cc/resources/datasheets/ABX00063-datasheet.pdf>. [Kasutatud 19 04 2023].
- [34] SocialCompare, „Raspberry Pi 3B+,” 25 08 2021. [Võrgumaterjal]. Available: <https://socialcompare.com/en/review/raspberry-pi-3-b-plus>. [Kasutatud 18 04 2023].
- [35] RaspberryPi.dk, „Raspberry Pi 3 Model B+,” [Võrgumaterjal]. Available: <https://raspberrypi.dk/en/product/raspberry-pi-3-model-b-plus-2/>. [Kasutatud 18 04 2023].
- [36] Automaailm, „HD kompressor 12V 2-silindriline, karbis,” [Võrgumaterjal]. Available: <https://automaailm.ee/hd-kompressor-12v-2-silindriline-karbis-s103-02380>. [Kasutatud 18 04 2023].
- [37] Metabo, „Basic 160-6 W OF (601501000) Kompressor,” [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.metabo.com/ee/et/seadmed/suruohk/kompressorid/mobiilsed-toeokojakompressorid/basic-160-6-w-of-601501000-kompressor.html>. [Kasutatud 18 04 2023].
- [38] Mouser Electronics, „XX918A3C2M12,” 12 07 2023. [Võrgumaterjal]. Available: [https://www.mouser.ee/datasheet/2/357/1/XX918A3C2M12\\_document-3059880.pdf](https://www.mouser.ee/datasheet/2/357/1/XX918A3C2M12_document-3059880.pdf). [Kasutatud 19 04 2023].
- [39] Luku-Expert, „UKSEMAGNET HEAD 50kg 12VDC/24VDC SEINALE PAIGALDATAV (12V/100mA või 24V/50mA),” [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.lukuexpert.ee/et/tuletorje/3299/UKSEMAGNET+HEAD+70kg+12VDC%252F24VDC+SEINALE+PAIGALDATAV+%2812V%252F100mA+v%C3%B5i+24V%252F50mA%29-UM.html>. [Kasutatud 19 04 2023].

- [40] Weidmüller Interface GmbH & Co. KG, „RCL314012W,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://catalog.weidmueller.com/catalog/Start.do?localeId=en&ObjectID=1984030000>. [Kasutatud 17 05 2023].
- [41] Eaton Industries GmbH, „Z-SCH230/1/25-20 - Installation contactor, 230VAC, 2N/O, 25A,“ [Võrgumaterjal]. Available: [https://datasheet.eaton.com/datasheet.php?model=120853&locale=en\\_GB](https://datasheet.eaton.com/datasheet.php?model=120853&locale=en_GB). [Kasutatud 17 05 2023].
- [42] Arduino S.r.l., „Arduino Nano,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://store.arduino.cc/products/arduino-nano>. [Kasutatud 19 04 2023].
- [43] Songle Relay, „SRD-05VDC-SL-C Datasheet,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.circuitbasics.com/wp-content/uploads/2015/11/SRD-05VDC-SL-C-Datasheet.pdf>. [Kasutatud 26 04 2023].
- [44] Teltonika, „RUT956,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://teltonika-networks.com/products/routers/rut956>. [Kasutatud 19 04 2023].
- [45] SMC, „3 Port Solenoid Valve Direct Operated Poppet Type,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://us.rs-online.com/m/d/9897cf40d4b44ff1b5b91c8ea8b30692.pdf>. [Kasutatud 18 05 2023].
- [46] YEInternational, „Toiteplokk 35W 5V 7A,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.yeint.ee/elektroonika-1/toiteallikad/toiteplokkid-korpusega/toiteplokk-35w-5v-7a>. [Kasutatud 11 05 2023].
- [47] Oomipood, „Toiteplokk 5VDC 7A 35W IP20 Mean Well LRS-35,“ [Võrgumaterjal]. Available: [https://www.oomipood.ee/product/lrs\\_35\\_5\\_toiteplokk\\_5vdc\\_7a\\_35w\\_ip20\\_mean\\_well\\_lrs\\_35](https://www.oomipood.ee/product/lrs_35_5_toiteplokk_5vdc_7a_35w_ip20_mean_well_lrs_35). [Kasutatud 11 05 2023].
- [48] Mouser Electronics, „MEAN WELL LRS-35-5,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://eu.mouser.com/ProductDetail/MEAN-WELL/LRS-35-5?qs=vDxCgdWo2h86Om%2Far%2FQvsg%3D%3D>. [Kasutatud 11 05 2023].

- [49] Mouser Electronics, „Bel Power Solutions LEN120-12,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://eu.mouser.com/ProductDetail/Bel-Power-Solutions/LEN120-12?qs=Rp5uXu7WBW8hPeb63dV2wA%3D%3D>. [Kasutatud 10 05 2023].
- [50] Mouser Electronics, „MEAN WELL EDR-120-12,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://eu.mouser.com/ProductDetail/MEAN-WELL/EDR-120-12?qs=5aQ9wn8iLe%252BbNyg1b8FcJA%3D%3D>. [Kasutatud 11 05 2023].
- [51] YEInternational, „Toiteplokk 125W 5V 15A, 12V 10A,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.yeint.ee/elektroonika-1/toiteallikad/toiteplokid-korpusega/toiteplokk-125w-5v-15a-12v-10a>. [Kasutatud 10 05 2023].
- [52] Mouser Electronics, „XP Power SMP350PS12,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://eu.mouser.com/ProductDetail/XP-Power/SMP350PS12?qs=w%2Fv1CP2dgqpRFFnhCiYdQ%3D%3D>. [Kasutatud 10 05 2023].
- [53] Mouser Electronics, „MEAN WELL SPV-300-12,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://eu.mouser.com/ProductDetail/MEAN-WELL/SPV-300-12?qs=bXBibfwyPRGop1klGb8bvQ%3D%3D>. [Kasutatud 11 05 2023].
- [54] Bel Power Solutions, „LEN120-12,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.belfuse.com/product/part-details?partn=LEN120-12>. [Kasutatud 10 05 2023].
- [55] YEInternational, „Toiteplokk DIN-liistule 60W 24V 2.5A,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.yeint.ee/elektroonika-1/toiteallikad/acdc-toiteplokid-din-latile/toiteplokk-din-liistule-60w-24v-25a-1>. [Kasutatud 11 05 2023].
- [56] Mouser Electronics, „MEAN WELL MDR-60-24,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://eu.mouser.com/ProductDetail/MEAN-WELL/MDR-60-24?qs=TaOZSEYtRiX%2FgE8ZUA70Qg%3D%3D>. [Kasutatud 11 05 2023].
- [57] Oomipood, „MDR-60-24,“ [Võrgumaterjal]. Available: [https://www.oomipood.ee/product/mdr\\_60\\_24\\_toiteplokk\\_din\\_liistule\\_24vdc\\_2\\_5a\\_60w\\_40\\_90\\_100mm](https://www.oomipood.ee/product/mdr_60_24_toiteplokk_din_liistule_24vdc_2_5a_60w_40_90_100mm). [Kasutatud 11 05 2023].



- [58] Automatikshop.de GmbH, „Dictator Haftmagnet Baureihe F für Feststellenanlagen,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.automatikshop.de/dictator/dictator-haftmagnet-baureihe-f-fuer-feststellenanlagen>. [Kasutatud 15 05 2023].
- [59] AMPUL SYSTEM s.r.o., „Electromagnet 200kg, 2000N, 120x40mm,“ [Võrgumaterjal]. Available: [https://www.ampul.eu/en/holding-electromagnets/2942-1679-electromagnet-200kg-2000n-120x40mm#/114-tension-24v\\_dc](https://www.ampul.eu/en/holding-electromagnets/2942-1679-electromagnet-200kg-2000n-120x40mm#/114-tension-24v_dc). [Kasutatud 15 05 2023].
- [60] DICTATOR Technik GmbH, „Electromagnets with Connection,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://en.dictator.de/wp-content/uploads/710-E-Electromagnets-with-Connection-Terminal.pdf>. [Kasutatud 15 05 2023].
- [61] Mean Well, „LRS - 35 series,“ 03 03 2023. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.meanwell-web.com/content/files/pdfs/productPdfs/MW/LRS-35/LRS-35-spec.pdf>. [Kasutatud 19 04 2023].
- [62] M. Reinok, „TÖÖSTUSLIKE ELEKTRISÕIDUKITE LAADIMISÜHENDUSE LOOMINE MASINNÄGEMISE ABIL,“ Tallinna Tehnikaülikool, Tallinn, 2021.