



TAL TECH

MEREKESKKONNA SEIREPLATVORM

Projekti "Efektiivne mereseire kestlikus sinimajanduses"
Arendusearuanne

20.11.2025

**Rahastatud RE.4.7 Merekeskkond meetme Taotlus voorust
Keskkonnaprogrammi merekeskkonna uuringud ja arendustööd
ning rakendatavad meetmed 2023 - 15.02.2023-17.03.2023,
projekti number RE.4.07.23-0046**

Uuringu autorid

- **Liina Tabri PhD**, projektijuht
- **Ruttar Teär MSc**, Arendustegevuse läbiviija
- **Priit Suluste BSc**, Arendustegevuse läbiviija

Tallinna Tehnikaülikool

Telefon: 620 2002

E-post: info@taltech.ee

Ehitajate tee 5, 19086 Tallinn

SISUKORD

SISSEJUHATUS.....	3
1. SEIREPLATVORMI ÜLEVAADE.....	4
1.1. PLATVORMI OSAD.....	5
1.1.1. TÖÖPAAT	5
1.1.2. ROV	9
1.1.3. AUTONOOMSE SEIREMOODULI KONTSEPTSIOON	11
1.1.4. TUGIVARUSTUS.....	22
1.2. SÜSTEEMI INTEGREERIMINE	22
2. KASUTAMINE	25
2.1. CURSUS 440 TÖÖPAADI KASUTAMINE, HOOLDUS JA HOIUSTAMINE	25
2.2. BLUEROV2 JA SONOPTIX ECHO KASUTAMINE, HOOLDUS JA HOIUSTAMINE.....	27
2.2.1. SONOPTIX ECHO MULTIBEAM KASUTAMINE	29
2.3. TUGIVARUSTUS.....	29
3. LOGIMINE	32
LISAD	35
Lisa 1 MIKROKONTROLLERI TÖÖ KOOD	35
Lisa 2 ANDMETÖÖTLUS SCRIPT	41
Lisa 3 AUTOMAAATNE SEIREARUANNE.....	49

SISSEJUHATUS

Mere-seire seadmepark võimaldab uurida veepealseid ja -aluseid protsesse ja keskkonnatingimusi. Metoodika võimaldab uurida mere protsesse kas eraldiseisvalt või kõikehõlmavast perspektiivist (nt. meriehitiste rajamisega muutunud merepõhja kuju mõju nii setteid liigutavatele veehoovustele kui ka ümbritsevale biosfäärile). Lisaks analüüsiti erinevate soetatud mõõteseadmete tööd Läänemere keskkonnas, et saada vajalikke sisendandmeid edasiste teaduslike mõõtmiste efektiivsemaks muutmisel. Uuritavate valdkondade hulka kuuluvad: Morfoloogilised protsessid nagu merepõhja reljeefi muutus, mida uuritakse kas veepinnal liikuvalt paadilt või keerukamate konstruktsioonide puhul allveerobotilt. Distsantsilt ehk paadist on mõõtmine vähem täpsem ja võib tekkida „pimedaid“ alasid, kuna sonar pakub ülalt alla kaardistus võimalust. Pimedate alade ja üksiku objekti lähedalt, täpselt ja täielikult kaardistamine on võimalik allveeroboti abil, millel tänu oma liikumisvabadusele on paremad eeldused nähtavuslünkade vältimiseks. Seire platvormile lisati eri komponentidele andurid millega saab mõõta vee keskkonna füüsikalisi ja keemilisi omadusi

Tõhus mereökosüsteemide seire nõuab pinna- ja veealuste mõõtetehnoloogiate integreerimist, et saada ülevaade veekeskkonna ruumilisest ja ajalisest dünaamikast. Traditsioonilised käsitsi proovivõtumeetodid on sageli ajamahukad ja piiratud ulatusega, eriti häguse või madala nähtavusega vetes. Kompaktne allveerobot (ROV), kõrglahutusega sonar ja kaasas kantavad analüütilised seadmed võimaldavad luua paindliku ja kulutõhusa seireplatvormi, mille abil on seire tegevuses vajalike mõõtmisi ja proovivõtte võimalik läbi viia kohapeal ja reaalajas ning vähema inimressursiga.

1. SEIREPLATVORMI ÜLEVAADE

Järgnevalt on kirjeldatud seireplatvormi tehnika arhitektuuri, integreerimisprotsessi ja töövõimekust. Platvormi eesmärgiks on pakkuda terviklikku lahendust nii veepealsete kui ka veealuste protsesside uurimiseks läänemere keskkonnas. Koostatud seireseadmepark võimaldab uurida morfoloogilisi, keemilisi ja bioloogilisi protsesse.

Platvorm kujunes kolmest peamisest komponendist, tööpaadist, allveerobotist ja tugiseadmetest, koosnevaks süsteemiks, mis ühendati funktsionaalselt teineteist täiendavaks tervikuks. Loodud süsteem on modulaarne ja teisaldatav, sobides nii välitöödeks rannikumadalikes kui ka rakendatav avavee seireteks, ning on ühtlasi ühilduv Tallinna Tehnikaülikooli Kuressaare kolledži MARTE arenduslabori olemasoleva teadusinfrastruktuuriga.

Platvormi praktiline rakenduspotentsiaal on ulatuslik. Süsteem võimaldab uurida näiteks meretuuleparkide vundamentide ümbruses toimuvaid looduslike muutusi ja uhtumisprotsesse, hinnata sadamaalade muda- ja settedünaamika muutusi ajas. Bioloogiliste näitajate seire võimaldab hinnata vetikate kasvu, hõljumi sisaldust ja kalastiku aktiivsust. Keemiliste andurite abil saab tuvastada vee määrata hapnikutaseme muutusi, mis on oluline indikaator ökosüsteemi tervise hindamisel. Samuti on allveerobotil võimekus asetada merepõhja statsionaarsed andurid mis võimaldavad pikaajaliselt koguda heli- ja rõhuandmeid bioloogiliste või antropogeensete protsesside tuvastamiseks.

Platvormi arendustöö hõlmas lisaks seadmete füüsilisele integreerimisele ka metoodika loomist kogutud andmete riskasutuseks ja standardiseeritud seireraportite koostamiseks. Katsebasseinis ja välitingimustes teostatud testide tulemusel töötati välja ühtne lähenemine, mis võimaldab kombineerida batümeetrilisi, keemilisi ja bioloogilisi mõõtmisi ühtseks seireandmestikuks. See loob aluse merepõhja ja veesamba protsesside kompleksseks hindamiseks, sh inimtegevuse mõjude, nagu sadamaehitiste või meretuuleparkide rajamisega kaasnevate muutuste jälgimiseks.

Platvormi modulaarne ülesehitus ja laiendatav arhitektuur muudavad selle sobivaks nii teaduslike uuringute kui ka praktilise keskkonnajärelevalve jaoks.

1.1. PLATVORMI OSAD

Seireplatvorm koosneb kolmest põhilisest alamsüsteemist:

- Pinnasüsteem: *Barrel Cursus 440* klaasplastist tööpaat;
- Veealune süsteem: *Blue Robotics BlueROV2* allveerobot koos sensormoodulitega;
- Tugivarustus ehk andmelogimissüsteemid, sukeldumis varustus ja väikevahendid.

Kõik komponendid on kavandatud modulaarsetena, et võimaldada kiiret ümberseadistamist erinevateks seirestsenaariumideks — alates rannikumadalikest kuni sadamakeskkondadeni.

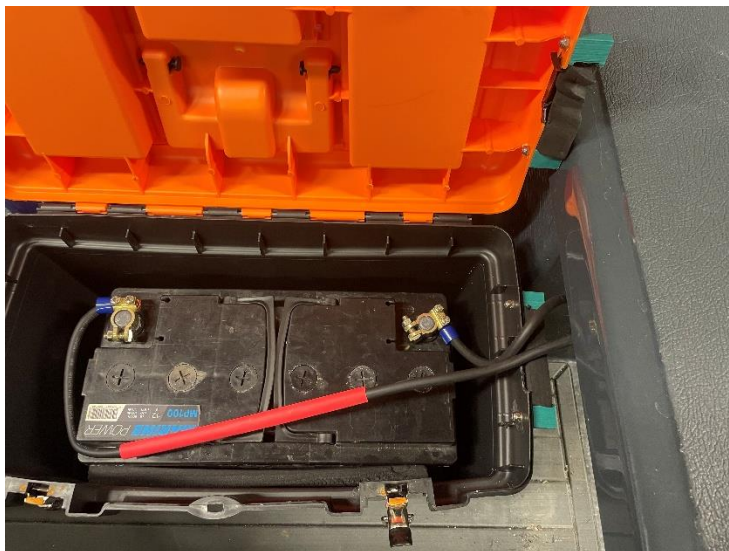
1.1.1. TÖÖPAAT

Projekti pinnamooduli(Figure 1.1) baasiks on Barrel Boats'i toodetud Cursus 440, 4,4 meetri pikkune ja 4 kohaline komposiitkeregaga tööpaat, mille süsteemid kohandati teaduslikuks kasutuseks.



Joonis 1. Pinnamoodul

Paadi elektrisüsteemi lisati täiendav 100 Ah aku ja 12/230 V inverter, mis hiljem asendati seisumüra vähendamiseks akupangaga mida on võimalik laadida paadi mootori generaatoriga sõidu ajal.(Figure 1.2, Figure 1.3)



Joonis 2 100 Ah aku



Joonis 3 lisavarustus töö paadi tekil

Paat varustati Lowrance Elite FS-9 sonar- ja plotterisüsteemiga, mis kasutab Active Imaging™ 3-in-1 tehnoloogiat, võimaldades CHIRP-, DownScan- ja SideScan-kujutist. (Figure 1.4, Figure 1.5)



Joonis 4 Plotter



Joonis 5 Sonar

Süsteem toetab merepõhja morfoloogia. Süsteem toetab ka ohutut navigeerimist veekogudel (GPS asukoht, mere kaardid, teekonna

jälgimine). Lisaks paigaldati vöörimootor, mis toimib aktiivse ankruna, hoides paati kindlas asukohas ka lainetuse või hoovuste korral. (Figure 1.6)



Joonis 6 Vöörimootor

Ohutuse eesmärgil on paat varustatud libisemiskindla põranda ja rooli mooduliga.

Tabel 1. Lõplik tööpaadi varustus

Varustus	Mudel	Kogus
Paat	Cursus 440	1 tk
Treiler	Tiki BP750-R	1 tk
Päramootor	Tohatsu MFS20EEPTS	1 tk
Knaabid		4 tk
Pootshaak		1 tk
Ankur		1 tk
Vendrid		2 tk
Paukvest 150N		4 tk

Plotter	Lowrance	1 tk
Sonar	Lowrance	1 tk
Vöörimootor	Minnkotta	1 tk
Seisu ja transpordikate		1 tk

1.1.2. ROV

Veealuseks mooduliks on Blue Robotics'i BlueROV2. Allveerobotil on kaheksa tõukurit, mis tagavad manööverdusvõime ning stabiilse liikumise kuues vabadusastmes. Roboti juhtsüsteem põhineb Pixhawk kontrollerial ja ArduSub tarkvaral, mida opereeritakse QGroundControl platvormi kaudu.



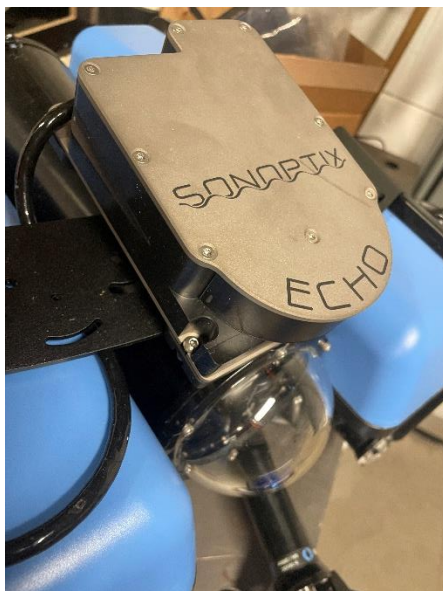
Joonis 7 ROV

Roboti arenduse käigus koostati andurite ja programmeeritava kontrolleri koostus. Allvee roboti sensoorne alamsüsteem koosneb ESP 32 juhitud ja hõõruse, sügavuse, juhtivuse ning lahustunud hapniku andurist. Esimeste seirete käigus sai selgeks et erinevate taimestiku ja sette proovide võtmise tarvis on vaja allvee robotile lisada ka füüsiline manipulaator. Manipulaatoriks valiti soetatud roboti tootja poolt pakutav, robotiga ühilduv, lisaseade.

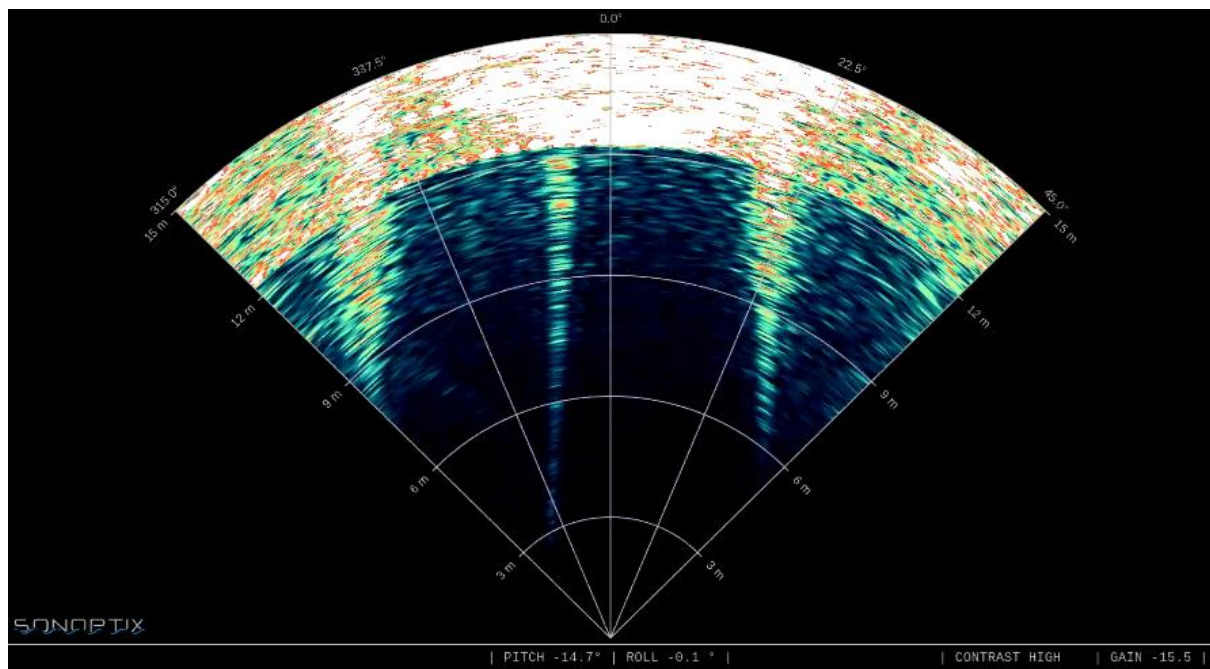


Joonis 8 ROV aktuaator

Lisaks paigaldati robotile imaging-sonar, mis võimaldab genereerida punktipilvi veealustest objektidest, pakkudes olulist nähtavuse parandust häguses vees või valgustingimustes, kus optilised kaamerad ei ole tõhusad.



Joonis 9 ROV-i allvee sonar



Joonis 10

Lisaks allveeroboti tootjapoolsele varustusele kuhu kuuluvad allvee valgustid, juhitud kaamera, sonar ja aktuaator. Täiendati roboti konfiguratsiooni anduritega, mis võimaldavad koguda andmeid vee erinevate parameetrite ja vees paiknevate konstruktsioonide kohta. ülevaade allveeroboti sensormooduli arendamisest

1.1.3. AUTONOOMSE SEIREMOODULI KONTSEPTSIOON

Korpus

Soodsa, kättesaadavatest komponentidest koosnev mõõtesüsteem, mis tagaks merekeskkonna peamiste parameetrite kvantitatiivse jälgimise seadme eesmärk ei olnud konkureerida teadusliku kõrgtasemega mõõtesondidega, vaid pakkuda operatiivset, mobiilse ja prototüübi tasemel täpsusega mõõtmisvõimekust, mis sobituks BlueROV2 platvormiga kokku.

Esimene prototüüp – 3D-prinditud kamber

Algne korpus trükiti PETG materjalist mõttega:

- kiire iteratsioon;
- ligipääs
- odav katsetus.

Probleemid katsetustel seoses PETG mikro-poorsusega ja vee läbitungimisega pikemas survekeskkonnas ka läbiviigud ei taganud kindlat IP-taset. Seetõttu otsustati edasise tegevuse jaoks võtta kasutusele allvee roboti tootja poolt varuosana müüdav veekindel korpus mille töökindluses saab olla kindel. Tegemist on polükarbonaat korpuse, kahekordsete O-ring tihenditega ja standardsete PG-läbiviikudega sensorikaablitele ostu tootega. Sellegi poolest olid esimesed iteratsioonid 3D prinditud korpusega vajalikud selgitamiseks välja vajalikke parameetreid lõpliku lahenduse valikuks. Edasistes arendusfaasides täpsustus vajadus modulaarse korpuse järele, mida oleks võimalik kasutada kahes funktsionaalses konfiguratsioonis:

- ujuv seiremoodul, mis stabiliseeritakse vees kindlale ujuvuse ja ankru abil
- põhja vajuv seade, mida kasutatakse juhtudel, kui on vajalik pikaajaline statsionaarne mõõtmine veekogu põhjas

Sellise kahefunktsioonilise kasutusloogika aluseks oli soov tagada platvormi kohandatavus erinevatele uurimisülesannetele. Mõlemad konfiguratsioonid töötati välja ballasti kombineerimise teel: raskemas variandis oli mooduli kogumass 7 kg, mis tagas negatiivse ujuvuse ja vajumise põhja suunas; kergemas konfiguratsioonis oli mass 5 kg, mis võimaldas seiret kontrollitud sügavustel. Ballasti ja korpuse mahu suhte dimensioneerimisel lähtuti standardsetest Archimedese printsiibil põhinevatest arvutustest, mis võimaldavad hinnata ujuvuse neutraalse tasakaalu tingimusi survekõlblikes veesügavustes. Seadme energiatarbe analüüsi tulemusel kujunes mõõteperioodi maksimaalseks pikkuseks ligikaudu kaks nädalat, tingimusel et mõõtmisi tehti kaheksa korda ööpäevas. Selline tsükliline mõõterežiim oli katseliselt valideeritud, võttes arvesse sensorite voolutarvet, ESP-32 platvormi energiakasutust ning kasutatud liitiumaku nominaalmahtu.

Loodud seiremooduli oluline eripära oli selle veesisene transporditavus BlueROV2 allvee roboti abil, mis võimaldas jaama paigutada nii avamere kui ka rannikualade keerukatesse keskkonnatingimustesse. ROV-põhine paigutusmehhanism võimaldas vältida kaablitest sõltuvat käsitsi sildumist ja tagas täpse asukohapõhise mõõtmisülesande täitmise.

Seirejaama sisemine konstruktsioon valmistati täielikult 3D-prinditud arhitektuurina, mis võimaldas:

- sensoripesade ja kaablisuundade täpset integreerimist,

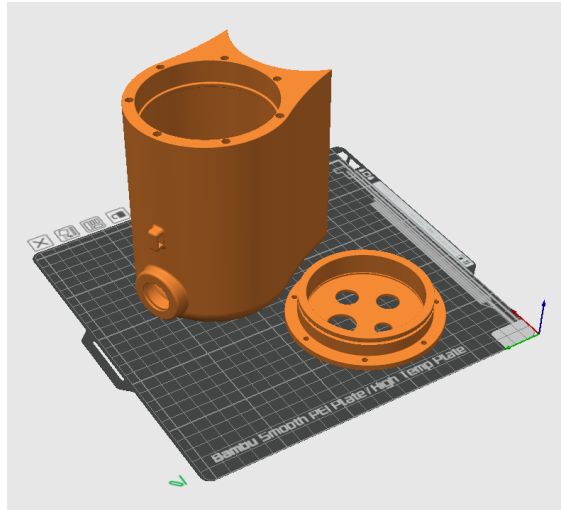
- sisemoodulite vibratsiooni- ja löögitaluvuse parandamist topoloogilise optimeerimise abil,
- kiiret muudatuste sisseviimist katseperioodide vahel.

Sensorikomplekt kujundati eesmärgiga katta merekeskkonna võtmeparameetrid, mis on olulised nii füüsikalise-keemiliste protsesside hindamisel. Lõplik komplekt hõlmas:

- lahustunud hapniku (DO) andurit, mis võimaldas hinnata aeratsiooniseisundit;
- TDS-andurit, mis tugineb elektrijuhtivuse mõõtmisel ja võimaldab hinnata vee soolasuse ning lahustunud ionide koondnäitajaid;
- hägususe andurit, mis töötab optilise tagasihajumise põhimõttel;
- pH-meetrit, mis võimaldab määrata happe-aluse tasakaalu;
- IMU-süsteemi, mis salvestab ruumiasendidünaamikat ja võimaldab korrigeerida mõõteandmeid liikumistest tingitud häirete suhtes;
- rõhuandureid, millega määratakse sügavus ja hüdrostaatilised kõikumised;
- temperatuuriandureid, mis on vajalikud nii füüsikaliste protsesside iseloomustamiseks kui ka teiste sensorite temperatuurikompensatsiooniks.

Kõik sensorid integreeriti ESP32 mikrokontrolleripõhisesse süsteemi, mis võimaldas I²C ja analoogliideste kombineerimist ning tagas piisava logimissageduse ka pikemate mõõtesarjade korral.

Arendustsükli jooksul hinnati mooduli toimivust nii katsebasseini kontrollitud tingimustes kui ka väljakatsetel looduslikes veehoidlates, kus valideeriti korpuse survekindlust, sensorika stabiilsust, andmete ajajoondust ning ROV transpordimehhanismi töökindlust.



Joonis 11 Disain faas



Joonis 12 Autonoomne seirejaam eraldiseisvalt



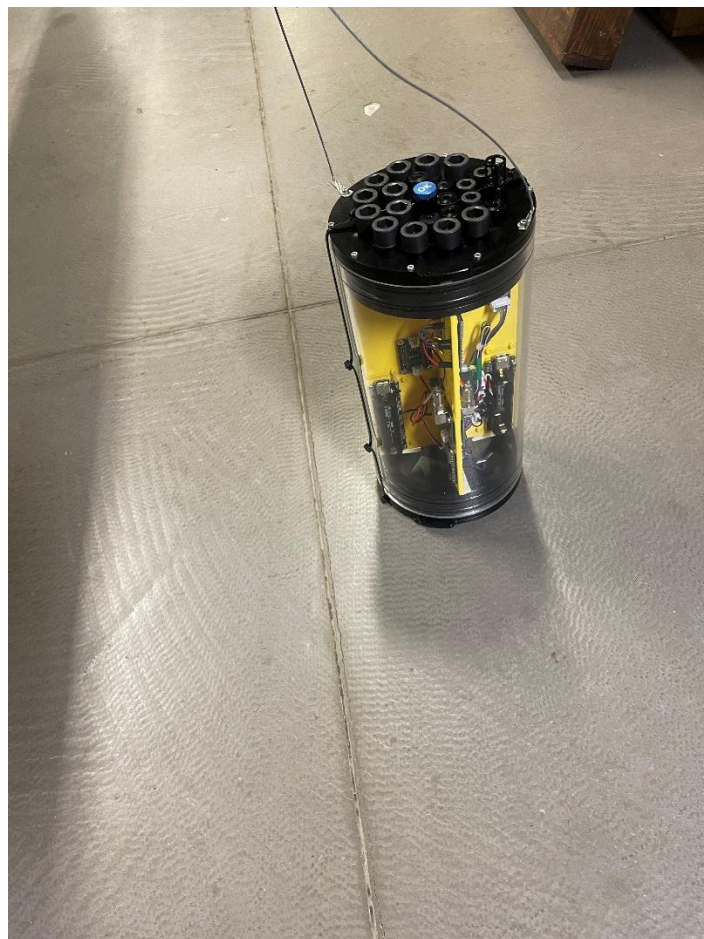
Joonis 13 Autonoomse seirejaama 1 iteratsioon integreerituna ROV lisamooduliks



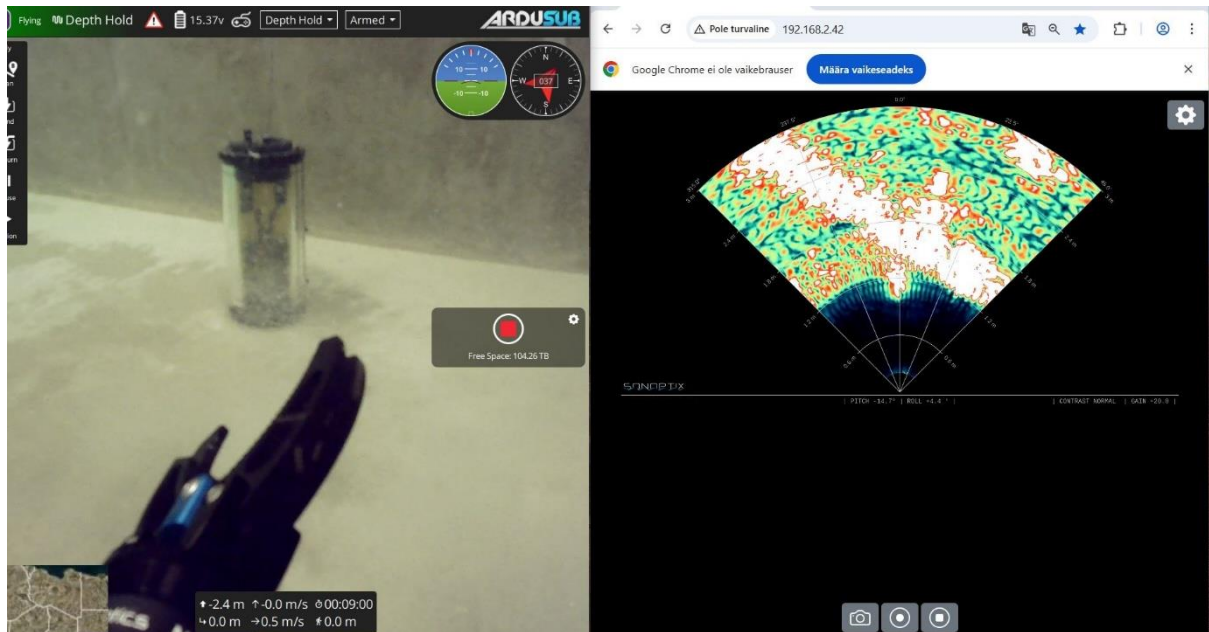
Joonis 14 Lõplik autonoomne seirejaam koostamise faasis



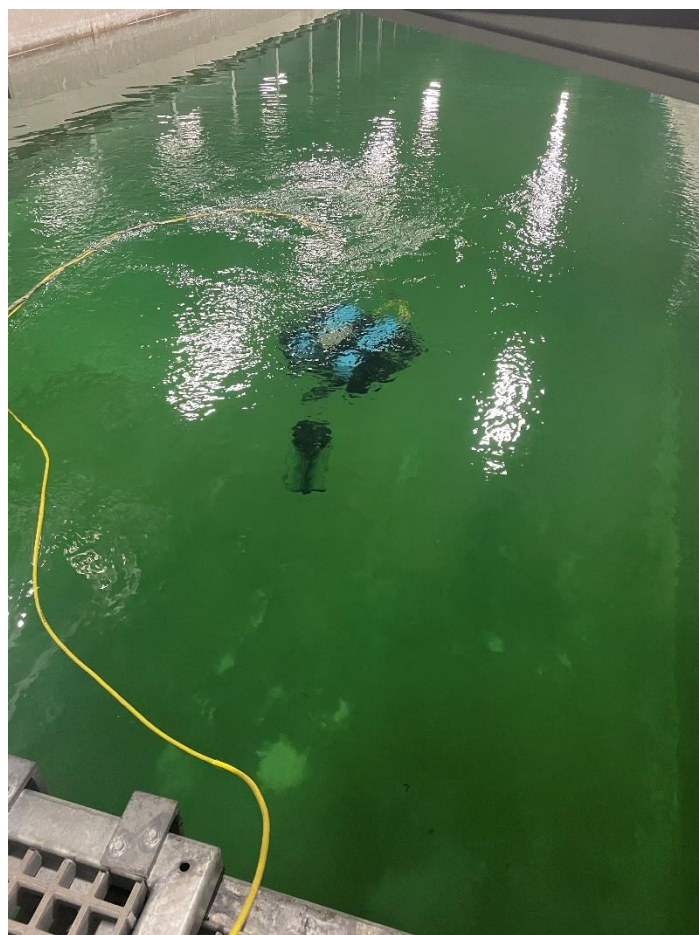
Joonis 15 Autonoomse seirejaama lõpliku lahendi kerge versioon



Joonis 16 Autonoomse seirejaama lõpliku lahendi raske versioon



Joonis 17 Autonoomse seirejaama ja allveeroboti katsed Kuressaare kolledži MARTE mudelkatsebasseinis



Joonis 18 Allveerobot transportimas allvee seire moodulit Kuressaare kolledži MARTE mudelkatsebasseinis

Elektroonika

Mikrokontrolleri ja sensorite hinnatase sooviti jätta hobiautomaatikaklassi tasemele. Seetõttu valiti laiatarbekomponendid. Eeldus oli, et kõik komponendid oleksid kergesti asendatavad. Anduritele seatud esialgsed nõuded :

- Temperatuur: ± 0.5 °C
- pH: ± 0.1 – 0.2 pH ühikut
- Hägusus: kvalitatiivne NTU skaalal
- Lahustunud hapnik: ± 0.2 – 0.5 mg/L
- TDS: ± 2 – 3% mõõteulatusest
- Integreeritavus BlueROV2 süsteemiga (I²C ühenduvus)

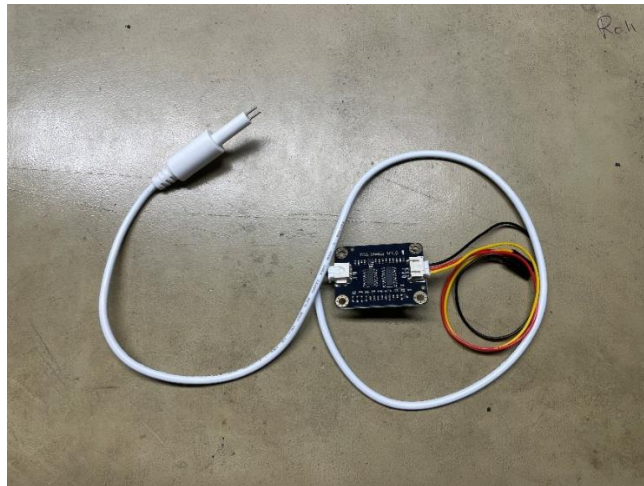
Lahustunud tahkise anduriks valiti TDS Meter v1.0 mille töö põhineb vee elektrijuhtivuse mõõtmisel. Temperatuuri jäädvustamiseks valiti Minidodoca DS18B20 temperatuuri andur. Madala hinnaga kuid prototüüpseks seireks piisava täpsusega pH anduriks leiti PH0–14 mis oma loomult on tüüpiline elektrokeemiline klaaselektrood koos analoogmõõtemooduliga. Lahustunud hapniku anduriks valiti Optiline DO andur (fluorestsentsil põhinev), mille eelis on

- hooldusvabadus (ei vaja membraani vahetust),
- stabiilne kalibratsioon,
- Tootja dokumentatsiooni järgi ± 0.5 mg/L täpsus sobib rannikumere seireks.

Lisaks paigaldati ka laialt kasutatav TSW-20M hägususe andur, mis kasutab IR-valgusallika ja fotodiodi hajumispõhist optilist meetodit. Sellise anduri mõõteulatus võiks olla piisav rannikuvee ja sadamaalade kvantitatiivseks hindamiseks.



Joonis 19 Esialgne rõhuandur



Joonis 20 TDS andur

Mikrokontrolleri valikukriteeriumiks oli eelkõige madal hind ning madal energia kulu kuid samas et see toetaks I2C, UART ja OneWire protokolle. Kriteeriumitele vastas ESP32 WROOM ()Figure 1.15mikrokontroller, sest sellel on suur arv GPIO liideseid, mis sobib mitme analooganduri üheaegseks lugemiseks. Kõnealune kontroller on programmeeritav ja sisaldab riistvaralist tuuma, mis võimaldab piisava kiirusega logimise.



Joonis 21 ESP 32 wroom32

Suhtlusloogika valik

Kuigi sensormoodulil kasutati eri protokolle andurite signaali lugemiseks, valiti I2C primaarseks põhjendusega:

- I2C toetab kuni 127 seadet, mis võimaldab mooduli laiendatavust;
- ROV-i sisemuses on juhtmepaari pikkus lühike ning I2C töötab hästi kuni 1–2 m kaablitel;
- ESP32 I2C-rakendus on stabiilne ja dokumenteeritud;
- BlueROV2 omas vaba I2C ühendust ja see läbi saab seiremoodulit ühendada ka robotiga

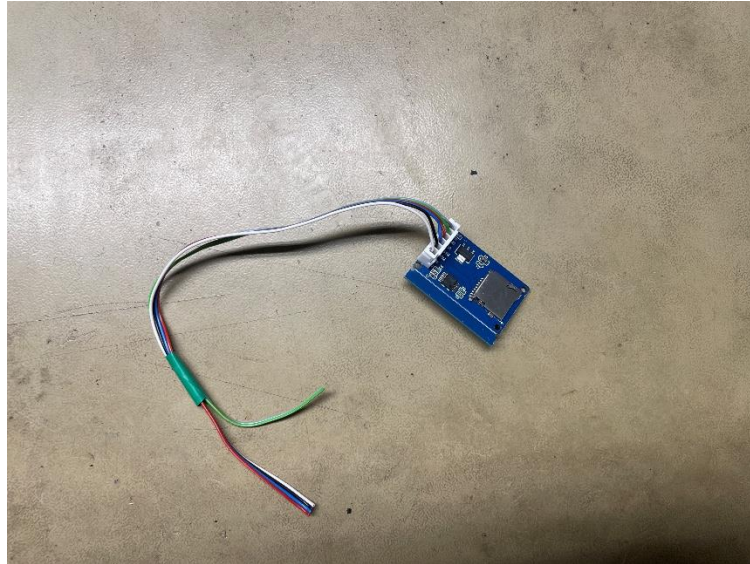
Toiteallikas

- Seiremoodul on varustatud 18650 akumooduliga, mis katsete käigus toimisvähemalt 2 h. Pikemateks seireperioodideks on kergel võimalik paigaldada lisa aku moodulid
- Andurite toitepingete jaoks (3.3V-5V) Kasutati dc-dc pinge muundureid .
- Kõik tundlikud analoogandurid paigutati eraldi 5 V toitebussile, mis vähendas DO ja pH signaalimüra

ROV kaablis vaba juhtmepaari kasutamine

BlueROV2 dokumentatsioonist selgus et ühendus kaablis on vaba juhtmepaar, mida valmistati ette et seda kasutada UART

kommunikatsiooniks allveeroboti küljes oleva seirejaama ja robotit juhtiva arvuti vahel. Küll aga rakendati mikrokontrolleri juhtimiseks lõpuks ESP32 Wroom poolt pakutavat juhtmevaba andmeside lahendust sisselülitamiseks seire alguses ja logimist micro SD mälukaardile.(Figure 1.16)



Joonis 22 SDkaardi liides

Logimissüsteemi tarkvara arendus

Logimissüsteemi põhielemendid olid:

- reaalaajas andurite lugemine 5 Hz sagedusega;
- sünkoonne ajatempel ESP32 RTC-modi kasutades;
- failipõhine logimine SD-kaardile .TXT formaadis;

Veebipõhise kasutajaliidese arendus

ESP32 seadistati WiFi-AP moodi

IP põhine UI funktsionaalsus:

- *Start/STOP logging* nuppu
- anduri-statuuse indikaatoreid

UI oli ehitatud HTML5 + Javascript + Bootstrap raamistikul.

Seiremooduli mikrkontrolleri programm Lisas 1

Tabel 2. Allveeroboti varustus

Varustus	Kirjeldus	Kogus
ROV	BlueroboticsROV2	1 tk
Gripper	BlueroboticsROV2 ühilduv	1 tk
Sonar		1 tk
Andur juhtivus		2 tk
Häigususandur		2 tk
Hapnikuandur		2 tk
Temperatuuri andur		2 tk
Rõhuandur		2 tk

1.1.4. TUGIVARUSTUS

Tugivarustuse peamiseks eesmärgiks on olla toetav peal ja allvee seire sujuvaks kulgemiseks. Näiteks sukeldumisvarustus soetati komplekti juhtudeks kui allveerobot jääb kinni või tehtav seire vajab otsest lähenemist. Tugivarustuse alla kuuluvad ka loodud seireseadmestikust saadud andmete valideerimiseks vajalikud labori seadmed ja väikevahendid.

1.2. SÜSTEEMI INTEGREERIMINE

Mereuuringute ja allveeseire praktiline läbiviimine eeldab mitme sõltumatu andmeallika samaaegset kasutamist. ESP32-põhine allvee-seiremoodul kogub lokaalselt keskkonnaandmeid, allveerobot registreerib missiooni käigus navigatsiooni- ja telemeetriaandmeid ning tööpaadi NMEA2000 võrk edastab pinnaseire jaoks vajalikku navigatsiooni- ja keskkonnainfot. Kuigi kõik need süsteemid tegutsevad autonoomselt ja kasutatakse erinevatel tehnilistel alustel, on võimalik need siduda ühtseks terviklikuks andmestikuks, tingimusel et iga süsteem kasutab täpset ja standarditud ajatemplit. Selline lähenemine võimaldab rekonstrueerida missiooni kulgu täieliku detailsusega ning tõsta seireandmete teaduslikku usaldusväärsust.

ESP32-baasil loodud seiremoodul töötab tavaliselt autonoomsena, salvestades oma andmed lokaalsesse mälusse. Andmelogid sisaldavad

järjepidevalt ajatemplit, füüsikalisi ja keemilisi andureid, temperatuurikompensatsiooni ning vajadusel olekulipikuid. Andmestiku töökindluse seisukohalt on oluline, et ESP32 sisemine kell oleks eelnevalt sünkroniseeritud, ümbritsevate seadmete võrdlussignaali abil, sest hilisem andmete ühiseks ajaskaalale toomine sõltub ajatempli täpsusest.

Allveeroboti missioonilogid sisaldavad lisaks keskkonnaandmetele ka telemeetrilisi ja kineetilisi parameetreid, mis on olulised robotilise liikumise mõistmiseks. Need logid registreerivad sügavust, kursinurka, kiirendusi, thrusterite koormusi, sonarite ajatempleid, GPS-koordinaate ning erinevaid missiooni staatuseid. Iga logi rida on varustatud sisemise ajamärgiga, mis võimaldab hiljem siduda roboti trajektoori ESP32 andurite lugemitega ning määrata täpse geograafilise konteksti.

Tööpaadi NMEA2000 võrk lisab süsteemi kolmanda andmekihi. See võrk edastab navigatsiooni- ja seisundipakette, mis sisaldavad GPS-koordinaate, kurssi ja kiirust, sügavust ning pardamasinate parameetreid. Need andmed logitakse spetsiaalse NMEA2000-USB adapteri kaudu. Tulemuseks on ajapõhine rida sündmusi, mis kirjeldab täpselt, kus tööpaat missiooni toimumise ajal asus ja millised olid ümbritsevad olud.

Mitmest sõltumatust allikast pärinevate andmepakettide ühendamise eeldab „resampling“ut ehk ühisele ajaskaalale projitseerimise. Kuna ESP32 baasil loodud allveeseiremoodul, allveerobotite telemeetria ja tööpaadi NMEA2000 võrk kasutavad omaette kella, ajavormingut ja andmesagedust, on andmete ühilduvuse eelduseks normaliseerimine. Normaliseerimise eesmärk on teisendada kõik ajaread ühele pidevale ajafunktsioonile nii, et iga mõõtemomendi kohta oleks võimalik määrata selle ekvivalent kõigis teistes andmeridades. See tegevus põhineb ajas määratud juhuslike protsesside joondamisel ja interpoleerimisel, mis on statistiliselt põhjendatud mitmesignaalliliste süsteemide analüüsi standardne võte.

Andmete ühendamine erinevatest logidest samale skaalale viiakse läbi Pythonis, kus ajatempli alusel ühtlustatakse andmed üheks tabeliks ja see järel protokolliks. Protsess algab kõigi failide kokku kogumisest ühtsesse töö kausta ja faili nimede täpsest määratlemisest. See järel käivitatakse ette kirjutatud programm mis koosneb lugemisest, ajavormingu normaliseerimisest ning vajadusel sekundilise resolutsiooni lisamisest. Seejärel liidetakse andmestikud, kasutades ajatemplit ühendustulbana, mis loob ühe tervikliku ajajoone, kuhu on kantud kõik ESP32 mõõtmised, allveeroboti telemeetriakirjed ja NMEA2000 navigatsioonielemendid.

Kui ühendatud andmestik on koostatud, on võimalik genereerida seireprotokoll, mis toimib nii aruandluse kui ka teadusliku dokumenteerimise alusena. Protokoll algab üldpildiga missioonist, mis sisaldab tööala geograafilisi kordinaate, töö kestvust, missiooni ajavahemikku ning põhiliste keskkonnaparametrite koondväärtusi. Need väärtused arvutatakse liidetud andmestikust, kasutades keskvärtusi, äärmusvärtusi ja vajadusel mediaane, et saada ülevaade keskkonnaoludest suuremahuliste kõikumiste korral. Protokolli esimene osa annab seeläbi ammendava sisendi missiooni geograafilisest ulatusest, kestusest ja mõõteandmete üldisest iseloomust.

Protokolli teises osas esitatakse detailtabel, mis sisaldab kõiki ühendatud ajatempleid ja vastavaid mõõteväärtusi. See osa dokumenteerib operatsiooni täieliku kulgemise ning tagab, et iga andmerea saab vajadusel rekonstrueerida, kontrollida või edasiseks analüüsiks kasutada. Sellise detailse ajajoone olemasolu on kriitiline kõrgtehnoloogiliste allveemissioonide puhul, kus vead sensoriloogikas või navigatsioonis võivad sõltuda ajas väga väikestest moondetest.

2. KASUTAMINE

2.1. CURSUS 440 TÖÖPAADI KASUTAMINE, HOOLDUS JA HOIUSTAMINE

Tööpaat Cursus 440 on loodud väikese meeskonnaga teaduslikuks seireks ja proovivõtuks ning selle kasutamine eeldab rahulikku, planeeritud ja hoolikat tegutsemist. Enne merele minekut tuleb alati veenduda, et kõik elektrilised ja mehaanilised süsteemid on töökorras, aku on laetud ning paadi kere ja mootorid on kontrollitud visuaalselt. Kui paat on varustatud lisaseadmetega, nagu vöörimootor, sonar ja akupank, tuleb veenduda, et juhtmed, pistikud ja kaitsmed on kuivad ning ühendused kindlad. Akude pinget tasub kontrollida enne iga väljasõitu, et tagada häireteta töövoog.

Vees olles tuleb vältida liigset koormust ja vibratsiooni seadmetele, mis on kinnitatud tekile või sisemistele elektrisüsteemidele. Sõitu alustatakse alati madalal kiirusel, et veenduda mootori ja roolisüsteemi sujuvas töös ning selles, et ka paadi manööverdusvõime ei ole varustuse lisandumise tõttu muutunud. Kui tööpaati kasutatakse seirealuse stabiilse platvormina, tuleks manööverdada nii, et lained ja hoovused tabaksid paati minimaalselt – eelistatavalt paadi vööri suunalt. Aktiivse ankru ehk vöörimootori funktsiooni kasutamisel peab jälgima, et mootor jääks täielikult vette, kuid ei tõmbaks sisse pinnal hõljuvaid prügi ega vetikaid, mis võivad labasid ummistada.

Sonari kasutamisel tuleb esmalt seadistada soovitud töörežiim ja sügavusvahemik. Lowrance Elite FS-9 kuvab põhja reljeefi reaajas, kuid täpse mõõtmise eeltingimus on, et kiirus oleks väike ja paadi asend stabiilne. Sonaril kuvatud andmeid võib paralleelselt salvestada või eksportida, et neid hiljem töödelda koos ROV-i või teiste seireallikate andmetega. Kui kasutusel on analüsaatorid, mis vajavad 230 V toidet inverteri või akupanga kaudu, tuleb need käivitada alles siis, kui paadi toitevõrk on stabiliseerunud ning koormusjaotus on kontrollitud. Inverteri ventilaatorite töö on normaalne nähtus ja näitab, et soojuseraldus toimub korrektselt.

Reisi käigus tuleb jälgida kogu aeg nii paadi kui seireseadmete energiatarvet, kui samaaegselt on töös sonar, vöörimootor ja valgustus. Elektroonilised seadmed on soovitatav välja lülitada kohe pärast mõõtmiste lõppu, enne mootorite seiskamist või paadi transportimist kaldale.

Pärast merel viibimist tuleb paat alati hoolikalt puhastada. Eriti oluline on soolase vee järel loputada kogu kere ja teki pind mageveega. Sonarianduri ja vöörimootori labade ümbrus tuleb üle vaadata, eemaldades sinna kinnitunud vetikad või liiva. Kõik elektriühendused tuleb kuivatada ja vajadusel katta kaitsva silikoonpihustiga, et vältida korrosiooni.

Pikaajalisel hoiustamisel tuleks akud hoida jahedas ja kuivas ruumis ning kord kuus kontrollida nende pinget. Inverter ja akupank vajavad samuti perioodilist kontrolli: ühendused ei tohi olla oksüdeerunud ning pingekaod peaksid jääma minimaalseks.

Kui paati ei kasutata pikema aja jooksul, tuleks see hoiustada siseruumis või varikatuse all, kus otsene päikesevalgus ja sademed ei pääse pinnale mõjuma. Paadi sisemus tuleks enne hoiustamist kuivatada ja ventilatsioon tagada, et vältida kondensatsiooni ja hallituse teket. Kõik eemaldatavad elektroonilised seadmed, näiteks sonariekraan, akud ja inverter, tuleks hoiustada eraldi stabiilsel temperatuuril. Roolimootor ja mehaanilised liikuvad osad tuleks enne hoiustamist määrida kergelt, et kaitsta neid korrosiooni eest.

Kevadel enne esimest kasutust on soovitatav teha ülevaatus: kontrollida kere, sõukruvi, juhtsüsteeme, kaableid ja paadi siseseid kaitsmeid. Sonari ja vöörimootori funktsionaalsus tuleks testida magevees, tagamaks, et kõik ühendused on korras ning tihendid ei lase vett sisse.

Cursus 440 tööpaadi eluiga ja töökindlus sõltuvad otseselt hooldusest. Puhas, kuiv ja korralikult hoiustatud paat ei ole lihtsalt transportvahend, vaid täieõiguslik osa kogu seiresüsteemist. Hoolikalt laetud akud, õigesti säilitatud kaablid ja mageveega loputatud kere tagavad, et iga uus väljasõit algab täpselt sama usaldusväärsest nagu eelmine.

2.2. BLUEROV2 JA SONOPTIX ECHO KASUTAMINE, HOOLDUS JA HOIUSTAMINE

Enne ROVi vette laskmist tuleb veenduda et kõik vee tihedad avad on suletud ja et aku on täielikult laetud ning ühendatud vastavalt ohutusnõuetele. Aku klemmide ja kaablite puhtus on oluline, sest soolane mereõhk põhjustab kiiresti oksüdatsiooni. Tarkvaraliselt tuleks kontrollida, et QGroundControl programm tunneb ROVi ära, kuvab õigesti videovoogu ja andurite näidud ning side töötab stabiilselt. Alles seejärel võib ROV asetada vette, alustades tavaliselt rahulikust ja selgeveelisest alast.

Vee alla laskmisel peab kaabel liikuma vabalt, kuid mitte rippuma liigselt kaabli pingevaba, kuid juhitud asetus väldib nii propellerite takerdumist kui veetakistuse teket. Kui ROV on vees, tasub testida ujuvust ja stabiilsust: õigesti ballastitud ROV jääb neutraalse ujuvuse lähedale, ei kipu kiiresti pinnale ega vajuma sügavusse. Juhtimissüsteemis aktiveeritakse sobiv töörežiim, näiteks „Stabilize“ või „Depth Hold“, mis hoiab sügavust automaatselt. Liikumist alustatakse alati aeglaselt — väikesed liigutused ette, tagasi ja külgsuunas aitavad tunnetada juhtimise tundlikkust ning reageerimist.

Kui ROV on stabiilne ja kõik süsteemid vastavad ootustele, võib alustada. Kaamera ja valgustus tagavad visuaalse jälgitavuse, samal ajal kui juhtpaneelil kuvatakse sügavus, veetemperatuur ja orientatsioon. Oluline on säilitada sujuv liikumine ja vältida järske manöövreid, sest iga tõukur muudab veevoolusid, mis võivad tõsta setteid ja hägustada nähtavust. Manööverdamine peaks olema rahulik, järjepidev ja täpselt juhitud, eriti siis, kui ROV kannab lisaseadmeid, nagu Sonoptix ECHO sonar või proovivõtumehhanism.

Sonoptix ECHO multibeam-sonar käitub kui ROVi „tehislik silm“ olukordades, kus nähtavus on väike või valgus ei tungi piisavalt sügavale. Kui sonar on ROV-i süsteemiga ühendatud ja aktiveeritud, tuleb avada arvutis IP põhine kasutajaliides, kus määratakse töövahemik ja sagedus. Lühikeste kauguste puhul kasutatakse kõrgemat sagedust, mis annab detailse pildi lähiojektidest, pikemate vahemaade puhul aga madalamat, et tagada suurem leviala ja paremini eristatavad kontuurid. Sonari ekraanil kuvatakse reaajas punkt pilv või kujutis, mille kontrasti, võimendust ja värvitooni saab vajaduse järgi muuta. Kui pilt on stabiilne ja objektid selgelt nähtavad, võib alustada süstemaatilist kaardistust, liikudes ROV-iga piki

ette planeeritud trajektoori. Sonari ja ROVi andmed sünkroniseeritakse, et iga mõõtepunkt sisaldaks metaandmetena ka positsiooni, sügavust ja kaldenurka.

Kui töö on lõppenud, viiakse ROV aeglaselt pinnale. Kaablit keritakse sisse ühtlase pingega, vältides selle keerdu või sõlmede teket. Pinnale tõstmisel tuleb seadet mitte haarata propelleritest, vaid raamiosadest või spetsiaalsest tõstekõrvast. Kohe pärast veest väljavõttu loputatakse ROV ja sonar põhjalikult mageveega, et eemaldada soolajäägid ja bioloogilised saasteained. Kõik välised pistikud, korpused ja tihendid tuleks üle kontrollida, eriti pärast meresoolases keskkonnas töötamist. Pärast loputust tuleb seade lasta kuivada varjus, otsese päikesevalguse eest kaitstult, ning seejärel eemaldada aku edasiseks hoolduseks või laadimiseks.

Akude hooldus on seadme pikaajalise seisukohalt kriitiline. Liitiumpolümeerakusid tuleb laadida ainult tootja soovitatud laadijaga, jälgides, et laengutase ei langeks alla 20 protsendi ega tõuseks üle 4,2 voldi elemendi kohta. Pärast iga tööpäeva tuleks aku laetus taastada ligikaudu 60–70 protsendile, kui seadet ei kasutata mitme päeva jooksul. Täislaetud akude pikaajaline hoiustamine soojas ruumis vähendab nende eluiga, seetõttu on soovitatav neid hoida jahedas, kuivas ja hästi ventileeritud kohas.

ROVi optilised ja mehhaanilised komponendid vajavad perioodilist kontrolli. Kaamera klaaspind ja valgustid tuleks puhastada pehme, mitteabrasiivse lapiga; korpuse O-rõngad tuleks üle vaadata ja vajadusel määrada spetsiaalse silikoonmäärdega, mis tagab tihendite elastsuse ja vee-kindluse. Sonari puhul tuleb tähelepanu pöörata sensoripea esipinna puhtusele isegi õhuke soolakristallikiht võib mõjutada signaali kvaliteeti.

Seadmete hoiustamisel tuleb tagada, et need oleksid kuivad, elektrisüsteemid välja lülitatud ja kaablid korralikult kokku keritud. Sonarit ja ROVi ei tohiks jätta pikka aega päikese kätte või niiskesse keskkonda, kuna see võib põhjustada elektroonikakomponentide mikrokorrosiooni. Parim hoiustamistemperatuur on 10–20 °C. Enne järgmist kasutuskorda on soovitatav teha lühike kuiva testi-seanss: ühendada kõik süsteemid, kontrollida toidet, pildi ja side olemasolu ning kinnitada, et mootorid pöörlevad vabalt.

Niisugune süsteemne kasutus- ja hooldusrutiin tagab, et BlueROV2 ja Sonoptix ECHO püsivad töökindlad, pakuvad järjepidevat mõõte-täpsust ja pikendavad seadmete eluiga märgatavalt.

2.2.1. SONOPTIX ECHO MULTIBEAM KASUTAMINE

Sonoptix ECHO multibeam-sonar sobib ideaalselt alla ja ette suunatud kaardistuseks ning objekti märkamiseks. Kui sonar on juba integreeritud ROV-süsteemi või paadi külge ja Ethernet-ühendus seadistatud, käivitub selle kasutamine üsna intuitiivselt Sonoptix ECHO pakub veebipõhist kasutajaliidest aadressil 192.168.2.4, kus saab reguleerida ulatust, võimendust (gain), kontrasti ja värvipaletti.

Alustades vali sobiv töörežiim lähtudes kaugusest ja nähtavusest: lühikeste vahemaade jaoks vali kõrgema sagedusega režiim (nt ~ 700 kHz) ja laia sektornurgaga ($\sim 120^\circ$), pikemate vahemaade jaoks madalam sagedus (~ 400 kHz) ja kitsama sektornurgaga ($\sim 90^\circ$) — see tagab täpsema kujutise eri tingimustes. Kui sonar töötab, jälgi real-ajas kuvatavat pildi või punktipilve voogu. Kui kaugusobjektid on selgelt eristatavad ja näidud stabiilsed, võib alustada kaardistust või objektijälgimist. Andmete kogumine käib sünkroonselt ROV positsiooni-andmetega, et iga sonaripildi alumine meta-info sisaldaks asukohta, sügavust ja orientatsiooni. Sonari abil saab ka kaardistada struktuure või reljeefi, mis jäävad optilise kaameraga nähtavuse tõttu varju, näiteks konstruktsioonide servad või alad, mida pinnalt vaadates ei näe.

Missiooni lõppedes lõpetab sonar töövoo, salvesta logifailid, väljalülitamiseks katkesta Ethernet-ühendus, toide ja loputa sonar mageda veega, et eemaldada soolad ja vitamiinid, ning kuivata seade hoolikalt. Järgmisel kasutuskorral kontrolli taas ühendused, asetused ja pildikvaliteet.

2.3. TUGIVARUSTUS

Varustus jaguneb sisuliselt kaheks: esiteks sukeldumisvarustuseks, mis võimaldab teostada töid pinnalähedastes ja konstruktsioonidega seotud tööpiirkondades, ning teiseks mõõte- ja seirevahenditeks, mis toetavad veeproovide kogumist ja seirejaamade kalibreerimist.

Sukeldumisvarustuse tuumikuks on poolkuivülikond. Tulenevalt Sukeldumis tööde keerukusele ja reeglistikule ei ole esmalt otstarbekas soetada kuivülikonda kuna meeskonnas puudub vastava pädevusega liige. Pool kuiv kalipso on sobiv lahendus suvisteks välitöödeks ning sisetöödeks, kus termilist kaitset on mõõdukalt vaja. Selle kasutamisel tuleb alati kontrollida sobivust, sulgureid ja liigendikohtade seisukorda ning kanda kalipsot koos kapuutsi ja sobivate jalatsitega, et tagada keha ühtlane soojusisolatsioon. Pärast igit kasutuskorda on vajalik kogu ülikonda loputada jooksva mageveega, vältida selle kokkupuudet otsese päikesevalgusega ning lasta materjalil täielikult kuivada. Kuivatamiseks tuleb vältida voltimist, et neopreen ei murduks, ning regulaarselt, tuleks kontrollida õmbluste ja kaela- ning randmeavade kulumist.

Töösukeldumise keskseks komponendiks on suruõhuballoon koos tarvikutega. Balloone tohib täita üksnes sertifitseeritud täitejaamades ning enne igit kasutust tuleb hinnata ballooni visuaalset seisukorda, pöörates tähelepanu roostele, mõlkidele ja ventiilimehhanismi puhtusele. Balloone hoitakse vertikaalasendis kuivas ruumis. Balloone tuleb kord iga viie aasta järel läbida survekatse vastavalt kehtivatele standarditele. Suruõhusüsteemide lahutamatu osa on ka kaheastmeline regulaator, mis tagab hingamisõhu turvalise rõhu. Regulaatorit tuleb kasutada ainult balloone ja BCD-dega, mis vastavad kehtivatele ohutusstandarditele. Iga sukeldumise eel tehakse lekke- ja rõhutest ning pärast kasutust pestakse regulaator põhjalikult mageveega ning lastakse sellel kuivada varjus. Regulaator vajab kord aastas hooldust volitatud tehnilises teeninduses.

Sukeldumiskompuuter jälgib sügavust, tõusukiirust ja inertseid gaasikoormusi. Enne kasutamist tuleb kompuuter kalibreerida vastavalt tootjaprotokollile ning pärast missiooni puhastamine seisneb mageveega loputamises ja nupukonstruksiooni kontrollis.

Ujuvuse reguleerimisseade ehk BCD võimaldab sukeldumist stabiliseerida. Enne vette minekut tuleb testida ballooni ühendust, täite- ja tühjendusventiilide toimivust ning veenduda, et rihmad ja kinnitusmehhanismid on töökorras. BCD sisemust tuleb regulaarselt loputada mageveega, et eemaldada soolajäägid, ning ventiilikomplekti hooldatakse kord aastas.

Lisaks kuuluvad sukeldumisvarustuse juurde raskusvöö, mask ja lestad. Raskused tuleb jaotada tasakaalustatult ning maski klaasi tuleb iga kasutuskorra eel töödelda uduvastase ainega. Kõiki neid elemente tuleb

pärast tööpäeva loputada mageveega ning kontrollida kummiosade pragunemist.

Teise varustuskategooria moodustavad mõõte- ja seirevahendid. NMEA2000 võrgu 4-teeline T-ühendustarvik võimaldab tööpaadi navigatsiooni- ja seirevõrku laiendada ning siduda arvutisüsteemi või väliseid sensoreid, mis on vajalikud operatiivseks telemeetriaks. Hoolduse seisukohast on vaja regulaarselt eemaldada soolajäägid ning kontrollida korrosiooni, mis võib mõjutada signaali kvaliteeti.

Oksüdomeeter kasutatakse seirejaama lahustunud hapniku andurite kontrollimiseks ja kalibreerimiseks. Selle elektroodide niiskuse hoidmine, membraanide ja elektrolüüdi õigeaegne vahetamine ning puhtamislahustega hoolikas puhastamine tagavad selle mõõtmistäpsuse. Elektroodi tuleb hoida spetsiaalses niisutuslahuses ning vältida ülekuumenemist või otsest päikesevalgust, mis võiks sensori tundlikkust vähendada.

Veeproovide võtmiseks kasutatakse Niskin-tüüpi 1.7-liitrist samplerit, mis on rahvusvaheliselt standardiseeritud vahend steriilsete veeproovide kogumiseks kindlatest sügavustest. Kasutamine eeldab avatud asendis allalaskmist ning sulgemist distantismehhanismi abil täpselt soovitud sügavusel. Pärast veest välja tõstmist tuleb proov viivitamata dekanteerida steriilsetesse anumatesse ning samplerit põhjalikult loputada. Hoolduse käigus kontrollitakse regulaarselt tihendite elastseid omadusi ja tehakse vajadusel desinfitseerimine etanoolilahusega.

Kõik eelmainitud varustuselemendid transporditakse pehmendustega turvakohvrites, mis kaitsevad seadmeid põrutuste, vibratsiooni ja niiskuse eest.

3. LOGIMINE

ESP32 ja NMEA2000 logimise protsess nõuab, et mõõteseadmed oleksid ühendatud uurimisplatvormi arvutisüsteemi kaudu et kasutajal oleks ühtne ja võimalikult lihtne liides logimise käivitamiseks ja lõpetamiseks.

Seadmete ühendamise

Enne kasutajaliidesesse sisenemist tuleb luua korrektne võrgukonfiguratsioon, et nii ESP32 põhine allveeseiremoodul kui ka NMEA2000 logija oleksid tööjaama või tööpaadi arvutiga samas lokaalses võrgus. ESP32 seadmed töötavad tavaliselt WiFi ühenduse kaudu ning neile määratakse fikseeritud IP-aadress kas ruuteri seadetes või seadme enda konfiguratsioonifailis. Tavapärased aadressid jäävad vahemikku 192.168.1.x või 192.168.0.x, sõltuvalt võrguplaanist.

Kui ESP32-l on näiteks aadress 192.168.1.40, siis on see aadress see, mille kaudu kasutajaliides brauseris avatakse. NMEA2000 süsteem vajab eraldi ühendust kas USB- CAN-gateway kaudu. Sellel juhul toimib ka NMEA-liides IP-tasemel ning sellele antakse samuti statiline aadress, näiteks 192.168.1.41. Mõlemad seadmed tuleb ühendada samasse võrku kas WiFi, LAN-kaabli või kombineeritud lahenduse kaudu.

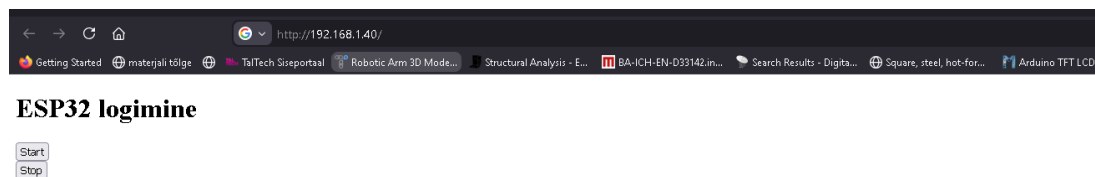
Tööjaama arvuti peab suutma „pingida“ neid aadresse, mis kinnitab, et võrk on aktiivne ning seadmed vastavad. Alles pärast edukat pingimist on soovitatav edasi liikuda kasutajaliidesesse. Kui ühendus puudub, tuleb kontrollida ruuteri DHCP-tabelit, kaablite füüsilist ühendust või seadmete toidet.

Ligipääs kasutajaliidesele veebibrauseris

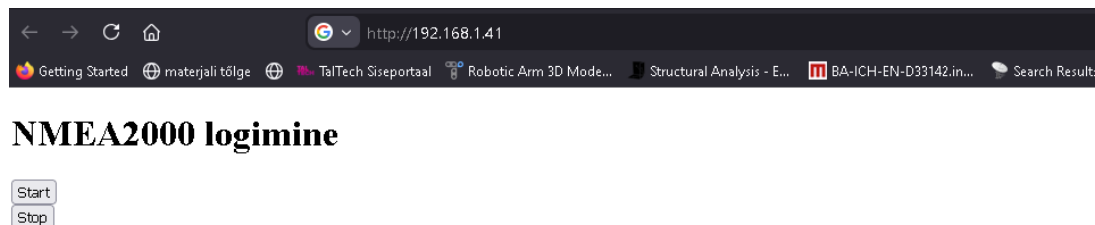
Logimise kasutajaliides on mõlemal süsteemil veebipõhine ja töötab lokaalses IP-võrgus. Kasutaja sisestab brauseri aadressiribale seadme IP-aadressi koos HTTP-protokolliga, näiteks:

<http://192.168.1.40/> ESP32 logimise liides

<http://192.168.1.41/> NMEA2000 logimise liides



Joonis 23 ESP32 logimise UI



Joonis 24 NMEA200 logimise UI

Kuna kasutajaliidesed on minimalistlikud ja sisaldavad ainult kahte nuppu, puudub vajadus täiendavate seadete või menüüde järele. Veebileht avaneb tavaliselt koheselt, kuna leht on majutatud seadme enda mälus ja ei sõltu välistest serveritest. Baaskontrolli funktsioonid (näiteks „Device Online“ indikaator) kuvatakse automaatselt ning näitavad, kas seade on töökorras ja valmis logima.

Logimise alustamine kasutajaliideses

Kui ühendus seadmega on loodud, saab kasutaja logimise käivitada Start-nupu vajutamisega. ESP32 puhul algab sel hetkel reaajas andmete salvestamine seadme SD-kaardile või selle sisemällu, sõltuvalt seadme konfiguratsioonist. Logi failinime määrab seade ise, kasutades tipus kas ajatemplit või eeldefineeritud missiooni ID-d.

NMEA2000 logimisel käivitab Start CAN-võrgu raamistikust PGN-ide (Parameter Group Number) reaajas lugemise ja nende salvestamise logifaili. Ka NMEA logid sisaldavad alati UTC-põhist ajatemplit, et neid oleks võimalik hiljem Pythoni skriptidega sünkroniseerida ESP32 ja allveeroboti logidega.

Kasutaja ei pea sisestama ühtegi tehnilist seadet, andurit ega filtrit. Kõik vajalikud parameetrid — PGN-ide loetelu, logimise intervall ja andurite konfiguratsioon — on seadmes eelnevalt määratud. Liides vähendab tahtlikult operatiivseid valikuid, et vältida vigaseid logimisseadeid välitingimustes.

Logimise lõpetamine toimub Stop-nupuga. See käsk sulgeb logifaili, loputab puhvermällu jäänud kirjed ning tagab, et logid on korrektselt kirjutatud. ESP32 seadme failid saab alla laadida mälukaardilt . NMEA2000 logija puhul salvestatakse logifail otse tööjaama, kust see tuleb arhiveerida missiooni kausta koos ESP32 ja ROV logidega.

Kõik logid tuleb seejärel suunata Pythoni põhisele analüüsiskriptile, mis ühendab need ühisele ajaskaalale ning vormistab seireprotokolli.

LISAD

LISA 1 MIKROKONTROLLERI TÖÖ KOOD

```

#/*
* - WiFi AP/ruuteri kaudu ühendus
* - HTML UI: valge leht + Start/Stop nupud
* - Logimine SD-kaardile CSV kujul
*/

#include <WiFi.h>
#include <WebServer.h>
#include <SD.h>
#include <SPI.h>

// ----- WiFi seaded -----
const char* ssid    = "SINU_WIFI_SSID";
const char* password = "SINU_WIFI_PAROOL";
// ----- SD-kaardi seaded -----
const int SD_CS_PIN = 5;
File logFile;

// ----- Veebiserver -----
WebServer server(80);

// ----- Logimise olek -----
bool loggingActive = false;
unsigned long lastLogMillis = 0;
const unsigned long logIntervalMs = 1000; // logimise intervall (ms)
// ----- HTML kasutajaliides -----
const char index_html[] PROGMEM = R"rawliteral(
<!DOCTYPE html>

```

```

<html lang="et">
<head>
  <meta charset="UTF-8">
  <title>ESP32 logimine</title>
</head>
<body>
  <h1>ESP32 logimine</h1>
  <form method="POST" action="/start">
    <button type="submit">Start</button>
  </form>
  <form method="POST" action="/stop">
    <button type="submit">Stop</button>
  </form>
</body>
</html>
)rawliteral";
// ----- Abifunktsioon: avab uue logifaili -----
bool openNewLogFile() {
  // Lihtne muster: log_XXXXXXXXX.csv, kus XXXXXXXXX on millis()
  String filename = "/log_" + String(millis()) + ".csv";
  logFile = SD.open(filename, FILE_WRITE);
  if (!logFile) {
    Serial.println("Logifaili avamine ebaõnnestus");
    return false;
  }
  // Kirjutame päiserea CSV-sse
  logFile.println("millis,sensor1,sensor2");

```

```

    logFile.flush();
    Serial.print("Logimine alanud, fail: ");
    Serial.println(filename);
    return true;
}
// ----- Abifunktsioon: lõpetab logimise -----
void closeLogFile() {
    if (logFile) {
        logFile.flush();
        logFile.close();
        Serial.println("Logifail suletud.");
    }
}
// ----- HTTP handlerid -----
void handleRoot() {
    server.send(200, "text/html", index_html);
}
void handleStart() {
    if (!loggingActive) {
        if (openNewLogFile()) {
            loggingActive = true;
        }
    }
}
// Tagasi pealehele
server.sendHeader("Location", "/", true);
server.send(302, "text/plain", "");
}

```

```

void handleStop() {
  if (loggingActive) {
    loggingActive = false;
    closeLogFile();
  }
  server.sendHeader("Location", "/", true);
  server.send(302, "text/plain", "");
}

void handleNotFound() {
  server.send(404, "text/plain", "Not found");
}

// ----- Setup -----
void setup() {
  Serial.begin(115200);
  delay(1000);
  Serial.println();
  Serial.println("ESP32 logimise süsteem käivitub...");
  // SD-kaart
  if (!SD.begin(SD_CS_PIN)) {
    Serial.println("SD-kaardi initsialiseerimine ebaõnnestus!");
  } else {
    Serial.println("SD-kaart OK.");
  }
  // WiFi ühendus
  WiFi.mode(WIFI_STA);
  WiFi.begin(ssid, password);
  Serial.print("Ühendan WiFi-võrku: ");

```

```

Serial.println(ssid);
while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
    delay(500);
    Serial.print(".");
}
Serial.println();
Serial.print("WiFi ühendatud, IP aadress: ");
Serial.println(WiFi.localIP());
// Veebiserveri teekonnad
server.on("/", HTTP_GET, handleRoot);
server.on("/start", HTTP_POST, handleStart);
server.on("/stop", HTTP_POST, handleStop);
server.onNotFound(handleNotFound);
server.begin();
Serial.println("HTTP server käivitatud.");
}
// ----- Loop -----
void loop() {
    // Teeninda HTTP päringuid
    server.handleClient();
    // Logimise loogika
    if (loggingActive && logFile) {
        unsigned long now = millis();
        if (now - lastLogMillis >= logIntervalMs) {
            lastLogMillis = now;
            // Näidisandurid (asenda oma reaalsed andurid):
            int sensor1 = analogRead(34); // nt pinge, vool, DO jne

```

```

    int sensor2 = analogRead(35); // teise anduri kanal

    // Lihtne CSV rida
    String line = String(now) + "," + String(sensor1) + "," +
String(sensor2);
    logFile.println(line);
    logFile.flush();
    Serial.println(line);
}
}
}

```

LISA 2 ANDMETÖÖTLUS SCRIPT

Seirearuande automaatne koostamine kolmest sama ID-ga toorandmete failist failist.

```
import sys
import os
import glob
from datetime import timedelta
import pandas as pd
from docx import Document

# -----
# 1. Abi: andmete lugemine
# -----

def load_csv(path, required=True):
    """Loeb CSV faili, kui olemas. Kui required=True ja puudub, viskab
    veateate."""
    if not os.path.isfile(path):
        if required:
            raise FileNotFoundError(f"Faili ei leitud: {path}")
        else:
            return None
    df = pd.read_csv(path)
    if "timestamp" not in df.columns:
        raise ValueError(f"Failis {path} puudub 'timestamp' veerg.")
    # ISO8601/murdsekunditega ajad
    df["timestamp"] = pd.to_datetime(df["timestamp"],
    format="ISO8601")
    df = df.sort_values("timestamp").reset_index(drop=True)
    return df
```

```

def build_merged_df(folder, suffix):
    """
    Loeb esp_<suffix>.csv, rov_<suffix>.csv, nmea2000_<suffix>.csv
    ja ühendab need üheks ajaliselt joondatud tabeliks (merged_df).
    """

    esp_path = os.path.join(folder, f"esp_{suffix}.csv")
    rov_path = os.path.join(folder, f"rov_{suffix}.csv")
    nmea_path = os.path.join(folder, f"nmea2000_{suffix}.csv")
    print(f" * Loen ESP faili: {esp_path}")
    esp = load_csv(esp_path, required=True)
    print(f" * Loen ROV faili: {rov_path}")
    rov = load_csv(rov_path, required=True)
    print(f" * Loen NMEA2000 faili: {nmea_path}")
    nmea = load_csv(nmea_path, required=True)

    # tagame, et veerud on õigesti nimega
    # (nende failidega, mille ma sulle genereerisin, peaks need kõik
    alolevad olema olema)

    # esp: timestamp, lat, lon, temperature_C, DO_mgL, pH,
    turbidity_NTU, TDS_mgL

    # rov: timestamp, depth_m, roll_deg, pitch_deg, yaw_deg

    # nmea: timestamp, lat, lon, sog_ms, cog_deg, hdg_deg

    # ühendame ajaliselt lähima naabri järgi

    # esmalt ESP + ROV
    merged = pd.merge_asof(
        esp.sort_values("timestamp"),
        rov.sort_values("timestamp"),
        on="timestamp",
        direction="nearest",
        tolerance=pd.Timedelta("1s"),

```

```

        suffixes=("_esp", "_rov"),
    )
    # seejärel ESP+ROV koos NMEA-ga
    merged = pd.merge_asof(
        merged.sort_values("timestamp"),
        nmea.sort_values("timestamp"),
        on="timestamp",
        direction="nearest",
        tolerance=pd.Timedelta("1s"),
        suffixes=("", "_nmea"),
    )
    return merged

# -----
# 2. Kokkuvõtte arvutamine
# -----

def compute_summary(merged_df):
    """Arvutab missiooni alguse, lõpu, kestuse ja peamised statistilised
    tunnused."""
    if merged_df.empty:
        raise ValueError("Merged dataframe on tühi, ei saa kokkuvõtet
        teha.")
    t_min = merged_df["timestamp"].min()
    t_max = merged_df["timestamp"].max()
    duration = t_max - t_min
    # lat/lon võtame NMEA lat/lon (kui olemas), muidu ESP omad
    if "lat" in merged_df.columns and "lon" in merged_df.columns:
        lat_min = merged_df["lat"].min()
        lat_max = merged_df["lat"].max()
        lon_min = merged_df["lon"].min()

```

```

lon_max = merged_df["lon"].max()
else:
    lat_min = lat_max = lon_min = lon_max = None
def safe_mean(col):
    return merged_df[col].mean() if col in merged_df.columns else
None
def safe_min(col):
    return merged_df[col].min() if col in merged_df.columns else None
def safe_max(col):
    return merged_df[col].max() if col in merged_df.columns else None
summary = {
    "mission_date": t_min.date(),
    "t_start": t_min,
    "t_end": t_max,
    "duration": duration,
    "lat_min": lat_min,
    "lat_max": lat_max,
    "lon_min": lon_min,
    "lon_max": lon_max,
    "temp_mean": safe_mean("temperature_C"),
    "temp_min": safe_min("temperature_C"),
    "temp_max": safe_max("temperature_C"),
    "do_mean": safe_mean("DO_mgL"),
    "do_min": safe_min("DO_mgL"),
    "do_max": safe_max("DO_mgL"),
    "ph_mean": safe_mean("pH"),
    "ph_min": safe_min("pH"),
    "ph_max": safe_max("pH"),
    "ntu_mean": safe_mean("turbidity_NTU"),

```

```

        "ntu_min": safe_min("turbidity_NTU"),
        "ntu_max": safe_max("turbidity_NTU"),
        "depth_mean": safe_mean("depth_m"),
        "depth_min": safe_min("depth_m"),
        "depth_max": safe_max("depth_m"),
    }
    return summary
# -----
# 3. Wordi raport: Üldskoondtabel + detailseksioon
# -----
def build_word_report(output_docx, summary, suffix):
    """
    Koostab Wordi seirearuande:
    I. Üldskoondtabel – tabel keskmiste ja äärmusväärtustega
    II. Detailtabeli kirjeldus – viide merged_dataset_<suffix>.txt failile
    """
    doc = Document()
    # Pealkiri
    doc.add_heading(f"Seirearuanne – missioon {suffix}", level=1)
    # I. Üldskoondtabel
    doc.add_heading("I. Üldskoondtabel", level=2)
    table = doc.add_table(rows=0, cols=2)
    table.style = "Table Grid" # SIIT tulevad raamid
    def add_row(label, value):
        row_cells = table.add_row().cells
        row_cells[0].text = label
        row_cells[1].text = "" if value is None else str(value)
    # – Üldised metaandmed
    add_row("Missiooni kuupäev", summary["mission_date"])

```

```

add_row("Missiooni algusaeg", summary["t_start"])
add_row("Missiooni lõppaeg", summary["t_end"])
add_row("Kogukestus", summary["duration"])
# Kasutaja poolt täidetavad (jäetakse tühjaks!)
add_row("Tööpaadi nimi", None)
add_row("Allveeroboti tüüp", None)
add_row("Seiremooduli ID", None)
add_row("Andurid", None)
add_row("Ilmastikutingimused", None)
add_row("Märkused (vead, eripärad)", None)
# Tööpiirkonna koordinaadid
add_row("Tööpiirkonna min LAT", summary["lat_min"])
add_row("Tööpiirkonna max LAT", summary["lat_max"])
add_row("Tööpiirkonna min LON", summary["lon_min"])
add_row("Tööpiirkonna max LON", summary["lon_max"])
# Keskmised seireparameetrid
add_row("Keskmine temperatuur [°C]", summary["temp_mean"])
add_row("Keskmine DO [mg/L]", summary["do_mean"])
add_row("Keskmine pH [-]", summary["ph_mean"])
add_row("Keskmine hägusus [NTU]", summary["ntu_mean"])
add_row("Keskmine sügavus [m]", summary["depth_mean"])
# Äärmusväärtused
add_row("Min temperatuur [°C]", summary["temp_min"])
add_row("Max temperatuur [°C]", summary["temp_max"])
add_row("Min DO [mg/L]", summary["do_min"])
add_row("Max DO [mg/L]", summary["do_max"])
add_row("Min pH [-]", summary["ph_min"])
add_row("Max pH [-]", summary["ph_max"])
add_row("Min hägusus [NTU]", summary["ntu_min"])

```

```

add_row("Max hägusus [NTU]", summary["ntu_max"])
add_row("Min sügavus [m]", summary["depth_min"])
add_row("Max sügavus [m]", summary["depth_max"])
# II. Detailtabeli osa

doc.add_heading("II. Proovivõtu, liikumise ja keskkonnaandmete
detailtabel", level=2)

p = doc.add_paragraph()
p.add_run(
    f"Detailne ajarida kõigi logiväljadega (ESP, ROV, NMEA2000) on
salvestatud faili "
    f"merged_dataset_{suffix}.txt kujul TAB-eraldatud tekstifailina. "
    "Fail sisaldab kõiki ajatempleid, kõiki andurivälju ning telemeetria
tunnuseid "
    "edasiseks analüüsiks."
)
doc.save(output_docx)
# -----
# 4. Merged TXT salvestamine
# -----

def save_merged_txt(merged_df, folder, suffix):
    out_path = os.path.join(folder, f"merged_dataset_{suffix}.txt")
    merged_df.to_csv(out_path, index=False, sep="\t")
    return out_path
# -----
# 5. Main
# -----

def main():
    if len(sys.argv) != 3:
        print("KASUTUS:")
        print(" python seire_merger_script.py <sufiks> <kaust>")

```

```

    print('Nt: python seire_merger_script.py 9 "C:\\data\\missioonid"')
    sys.exit(1)
suffix = sys.argv[1]
folder = sys.argv[2]
print("Sufiks:", suffix)
print("Kaust: ", folder)
# 1) Loeme ja merge'ime
print("1) Loen ja ühendan andmefaile...")
merged_df = build_merged_df(folder, suffix)
# 2) Arvutame kokkuvõtte
print("2) Arvutan kokkuvõtte näitajad...")
summary = compute_summary(merged_df)
# 3) Salvestame merged TXT
print("3) Salvestan merged TXT...")
merged_path = save_merged_txt(merged_df, folder, suffix)
print("  ->", merged_path)
# 4) Teeme Wordi aruande
print("4) Koostan Wordi seirearuande...")
docx_path = os.path.join(folder, f"seire_protokoll_{suffix}.docx")
build_word_report(docx_path, summary, suffix)
print("  ->", docx_path)
print("VALMIS.")
if __name__ == "__main__":
    main()

```

LISA 3 AUTOMAATNE SEIREARUANNE

Seirearuanne – missioon 9

I. Üldskoondtabel

Missiooni kuupäev	2025-08-23
Missiooni algusaeg	2025-08-23 13:21:00
Missiooni lõppaeg	2025-08-23 14:20:59.800000
Kogukestus	0 days 00:59:59.800000
Tööpaadinimi	
Allveeroboti tüüp	
Seiremoduli ID	
Andurid	
Ilmastikutingimused	
Märkused (vead, eripärad)	
Tööpiirkonna min LAT	58.24585962307664
Tööpiirkonna max LAT	58.24597442271427
Tööpiirkonna min LON	22.47213466937789
Tööpiirkonna max LON	22.47225926208512
Keskmine temperatuur [°C]	18.599973692894007
Keskmine DO [mg/L]	8.099935461087087
Keskmine pH [-]	8.019954868910343
Keskmine hägusus [NTU]	2.19907074497614
Keskmine sügavus [m]	0.990976213850091
Min temperatuur [°C]	18.395165986643228
Max temperatuur [°C]	18.815873861417856
Min DO [mg/L]	7.926294586678311
Max DO [mg/L]	8.270947269631627
Min pH [-]	7.975189908735152
Max pH [-]	8.062761433908994
Min hägusus [NTU]	1.66544505588073
Max hägusus [NTU]	2.752732106443029
Min sügavus [m]	0.4579887751975204
Max sügavus [m]	1.442691457276887

II. Proovivõtu, liikumise ja keskkonnaandmete detailtabel

Detailne ajarida kõigi logiväljadega (ESP, ROV, NMEA 2000) on salvestatud faili merged_dataset_9.txt kujul TAB-eraldatud tekstifailina. Fail sisaldab kõiki ajatempleid, kõiki andurivälju ning telemeetria tunnuseid edasiseks analüüsiks.