



samk



Satakunnan ammattikorkeakoulu
Satakunta University of Applied Sciences

MARKO TASKINEN

AUV-robotin mekaaninen ja sähköinen suunnittelu sekä toteutus

SÄHKÖ JA AUTOMAATIOTEKNIIKAN
TUTKINTO-OHJELMA
2022

Tekijä(t) Taskinen Marko	Julkaisun laji Opinnäytetyö, AMK	Päivämäärä 23.05.2022
	Sivumäärä 57	Julkaisun kieli Suomi
Julkaisun nimi AUV-robotin mekaaninen ja sähköinen suunnittelu sekä toteutus		
Tutkinto-ohjelma Sähkö ja automaatiotekniikka		
<p>Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli vedenalaisen, mahdollisimman monikäyttöisen autonomisen tutkimusaluksen prototyypin suunnittelu sekä sen valmistus.</p> <p>Tämän projektin työryhmä koostui opiskelijoista, joilla jokaisella oli oma osa-alueensa tehtävänä. Projektin toteuttaminen oli sen verran monimutkainen ja laaja kokonaisuus, ettei se olisi ollut rajallisessa aikataulussa mahdollista toteuttaa pelkästään vain yhden ihmisen työnä vaan se oli järkevämpää jakaa useammalle henkilölle.</p> <p>Olen tässä opinnäytetyössä käsitellyt vain niitä asioita, joita olen tässä projektissa itse suunnitellut ja tehnyt tai teettänyt ulkopuolisella tekijällä joko ajan säästämiseksi tai syystä, että ei ole ollut mahdollisuutta niitä itse valmistaa puuttuvien työstökoneiden takia. Näitä ovat rungon ja oheislaitteiden muodostavat erilaiset komponentit kuten kehikko, painerunko, potkuriakselit sekä joitakin kiinnikeitä ja koteloita.</p> <p>Projekti ei valmistunut tämän opinnäytetyön kirjoittamisen aikana, joskin joitakin sen osa-alueista valmistui ja saatiin testattua.</p>		
<u>Asiasanat</u> vedenalainen tutkimus, autonominen, sukeltava robotti, mekaaninen suunnittelu		

Author(s) Taskinen Marko	Type of Publication Bachelor's thesis	Date 23.05.2022
	Number of pages 57	Language of publication: Finnish
Title of publication Mechanical and electrical design and implementation of the AUV robot		
Degree program Electrical and Automation Engineer		
<p>The purpose of this thesis was to design a prototype as versatile as possible underwater autonomous research vessel and manufacture it.</p> <p>The working group for this project consisted of students, each with their own area of responsibility. The implementation of the project was so complex and extensive that it would not have been possible to carry out it in a limited time, as the work of only one person, but it was more sensible to share it with several people.</p> <p>In this thesis, I have dealt only with the things that I have designed and done myself in this project or commissioned by an external manufacturer, either to save time, or because it has not been possible to manufacture them myself due to the lack of machine tools. These include the various components that make up the body and peripherals, such as the frame, thrust body, propeller shafts and some brackets and housings.</p> <p>The project was not completed at the time of writing this thesis, although some aspects of it were completed and tested.</p>		
<u>Key words</u> underwater research, autonomous, submersible robot, mechanical design		

ALKUSANAT

Tämä prosessi on ollut minulle intensiivinen oppimiskokemus, ei ainoastaan ammatillisesti, mutta myös henkilökohtaisella tasolla. Tämän opinnäytetyön kirjoittamisella on ollut minuun suuri vaikutus. Niinpä haluankin kiittää niitä henkilöitä, jotka ovat antaneet minulle mahdollisuuden toteuttaa osaa tästä mielekkäästä projektista.

Ensimmäiseksi haluaisin kiittää tässä projektissa mukana olleita opettajia sekä opiskelijoita opiskelupaikassani Satakunnan ammattikorkeakoulu. Erityisesti projektipäällikkö Timo Kermistä, yliopettaja Mirka Leinoa, tutkimusjohtaja Petteri Pulkkista kuin myös laboratoriomestari Harri Aholaa mahdollisuudesta tehdä tutkimus- ja suunnittelutyötä tämän haastavan projektin parissa. Lisäksi haluan erityisesti mainita projektin johtaja Toni Aaltosen, jonka idea tämä alkujaan oli. Haluan kiittää sinua erinomaisesta yhteistyöstä ja kaikista niistä antamistasi arvokkaista ohjeista ja mahdollisuuksista, joita minulla projektin tekemiseen oli.

Lisäksi haluan myös kiittää tässä projektissa mukana olleita Ulla Tuomisen Säätiötä kuin myös Satakunnan Korkean Teknologian Säätiötä tämän hankkeen rahoittamisesta. Kiitos myös Winnovan ammatillisen oppilaitoksen lehtori Antti Salminen, lehtori Isto Jokinen ja lehtori Tuomas Kyyhkynen osallistumisestanne projektin vaatimien metallitöiden sekä pintakäsittelyn suorittamiseen. Helkama Bica Oy:n Erica Johnsonille iso kiitos kaapeleista sekä Satakunnan pelastuslaitoksen Rauman yksikön sukeltajat Jyri Salonen, Jarno Heinilä ja Sakari Lehtonen, jotka omalla osallistumisellaan auttoivat tärkeän datan keräyksen osalta.

Kiitos myös kaikille muille tässä mainitsemattomille henkilöille ja muille tahoille. Osallistumisenne, tukenne ja neuvonne ovat korvaamattomia.

SISÄLLYS

1 JOHDANTO	6
2 MIKÄ ON AUV.....	8
2.1 Offshore teollisuus	8
2.2 Sotilaskäyttö.....	9
2.3 Akateeminen/tieteellinen käyttö.....	10
3 ESIKUVA PROJEKTILLE	12
4 SUUNNITTELU JA RAKENTAMINEN	14
4.1 RUNKO.....	15
4.1.1 Päätietokone ja kaikuluotain	18
4.1.2 Päävirtalähde	20
4.1.3 Akku.....	23
4.2 POTKURILAITTEET.....	25
4.3 KAAPELOINTI	29
4.3.1 Läpiviennit	30
4.3.2 Kiinnikkeet	31
5. TULOKSET	39
5.1 Tiiviys	40
5.2 Potkurilaitte	47
5.3 Kaapelit	50
5.4 Kaikuluotain.....	51
6. JATKOKEHITYS	53
6.1 Potkurilaitteet.....	53
6.2 Kellukkeet.....	53
6.3 Manipulaattori.....	54
6.4 Kamera	54
LÄHTEET.....	55
KUVALUETTELO.....	56
LIITTEET	

1 JOHDANTO

Marja-Riitta Saarivirran opinnäytetyö – Autonomiset vedenalaiset laitteet pähkinänkuoressa esiteltiin Satakunnan ammattikorkeakoulun tilaisuudessa vuoden 2018 lopussa. Tässä samassa tilaisuudessa oli mukana Toni Aaltonen, joka esitteli omat näkemysensä laitteen toteuttamisesta kohtalaisen pienin kustannuksin. Aaltonen saikin pian tilaisuuden jälkeen mahdollisuuden alkaa vetämään tätä hanketta laitteen prototyypin suunnittelemiseksi sekä valmistamiseksi. Tutkimussuunnitelman valmistuttua hanke hyväksyttiin ja vuoden 2019 alussa alkoi laitteen suunnittelu ja toteutus.

Tämän projektin tarkoituksena oli suunnitella ja rakentaa kauko- ja autonomisesti ohjattava sukellusrobotti niin, että sillä voidaan sukeltaa useampaan kymmeneen metriin. Tavoitteeksi asetettiin 50 metriä. Robotin suunnittelussa ja rakentamisessa on pyritty mahdollisimman pieniin kustannuksiin, joten siinä on käytetty muiden yritysten sponsoimista palveluita sekä tarvikkeita.

Pääominaisuus eli kaikuluotainkuvan piti välittyä robottia ohjaavalle käyttäjälle. Tämän kuvan tuli olla reaaliaikaista sekä mahdollisimman hyvälaatuista ja tallennettavissa. Kaikuluotainkuvaukseen kameran sijaan päädyttiin suunnitelmissa siksi, että valon määrä vähenee hyvin nopeasti mentäessä jo muutaman metrin syvyyteen sameassa vedessä. Kaikuluotainvalinnassa päädyttiin veneilyssä käytettäviin luotaimiin, jotka edulliseen hintaansa nähden ovat kuitenkin melko hyviä kuvan laadultaan.

Sukeltavan robotin tiiviidenkestoksi määriteltiin 50 m, joka vastaa noin 5–6 bar painetta. Tämä haluttiin erityisesti painerungoille, joihin sijoitettiin elektroniikka ja akut. Myös kaikille kaapeliläpiviennelle, potkurilaitteistolle sekä muille laitteeseen kiinnitettävälle komponenteille asetettiin samat vaatimukset.

Laite varustettiin kahdella kaapelilla. Virransyöttö- sekä tiedonsiirtoon tarvittavalla valokuitukaapelilla, joille piti miettiä maksimipituus lisättynä mahdollinen kallistuskulma sekä varalla oleva pituus. Tämä siksi, että veneen tai ohjausaluksen sijainti voi muuttua hyvinkin nopeasti tuulen ja aallokon vaikutuksesta. Lopputulokseksi projektille odotettiin laitetta, joka suunnitelmien mukaan pystyy liikkumaan autonomisesti sekä suoriutuu ensisijaisesta tehtävästään tunnistaa kaikuluotainkuvan perusteella ihminen.

Koska koko projekti olisi ollut liian suuri yhden ihmisen tehtäväksi edes kohtuullisessa aikataulussa, oli järkevämpää jakaa tehtävät eri osa-alueille. Toni Aaltonen kokosi työryhmän opiskelijoista tekemään yhdessä projektin eri osia. Mukaan valikoitui opiskelijoita mekaniikan, elektroniikan, sähkön sekä ohjelmoinnin osaajista.

Tartuin tilaisuuteen osallistua tähän projektiin Toni Aaltosen kerrottua minulle, että tällainen laite olisi mahdollista tehdä ja, että hän on nyt keräämässä työryhmää projektille. Aaltonen myös kysyi, tietäisinkö osaavia henkilöitä tähän tehtävään. Muutaman päivän asiaa mietittyäni ehdotin itseäni osalliseksi tuohon projektiin, joten suurin osa mekaanisesta suunnittelusta, 3D-kuvien piirtämisestä sekä mekaanisesta ja sähköisestä kokoonpanosta on minun osani tästä työstä.

Suunnittelu- ja kokoonpanotyötä tein osa-aikaisesti opintojen ohella sekä kesälomalla työharjoittelumuotoisena kesän 2019 aikana. Suunnittelu alkoi selvittämällä olemassa olevia ratkaisuja, jotka sitten muutettiin tähän projektiin paremmin sopiviksi. Työn edetessä luotiin myös monia kontakteja eri toimialoille yhteistyötä varten.

2 MIKÄ ON AUV

AUV on lyhenne sanoista ”Autonomous Underwater Vehicle”. Se on eräänlainen vedenalainen sukelluslaitejärjestelmä, joka palvelee sekä siviili- että sotilasoperaatioita suorittaen sille annettuja tehtäviä autonomisesti eli itsenäisesti. Lukuisat AUV-laitteet on suunniteltu ja valmistettu käytettäväksi puolustuksen, energian ja tieteellisen tutkimuksen aloilla, ja ne voivat toimia jopa 100–6000 metrin syvyydessä. (Ocean explorer 2021.)

AUV:n yleisin käyttöalue on öljyteollisuudessa, jossa sitä käytetään yksityiskohtaiseen merenpohjan kartoittamiseen. Toinen tämän alan käyttöalue on vedenalaisten putkien tarkastus. Muita AUV-laitteen soveltamisaloja ovat merentutkimus sekä vesialueen topografisten ominaisuuksien kartoitus. (Schmidt Ocean Institute 2021.)

Näitä tehtäviä suorittaakseen laitteeseen voidaan asentaa valikoima erilaisia antureita, kuten esimerkiksi monisäteinen kaikuluotain. Ensisijainen sotilaallinen sovellus on miinojen etsintä, vastatoimenpiteet ja purkutyöt. Näihin käyttöalueisiin erikoistuneet AUV-laitteet käyttävät eteenpäin suuntautuvaa kaikuluotainta sekä sivuskannausluotainta kerätäkseen ja käsitelläkseen tietoja. (Schmidt Ocean Institute 2021.)

2.1 Offshore-teollisuus

Öljyn etsintä sekä sen hyödyntäminen alkoi vuosien mittaan vaatia laajempaa toimintaa. Tutkimukset ulottuivat rannikkoalueiden ulkopuolelle ja tällä hetkellä öljyä hyödynnetään 1000 metrin syvyydestä. Vastaavien syvyyksien etsinnässä perinteiset hydrografiset mittaustekniikat eivät pystyneet vastaamaan annettuun tehtävään. (Schmidt Ocean Institute 2021.)

Antureiden käyttöönotto ja ROV:n (Remote Operating Vehicle) käyttö edellyttivät erittäin pitkää kaapelia tietojen siirtoon. Nämä pitkät kaapelit tekivät syvänmeren tutkimuksesta vähemmän tuottavaa ja kustannukset ovat lähes eksponentiaalisesti verrannolliset veden syvyyteen. Nämä tekniset puutteet saivat aikaan radikaalit ratkaisut

offshore-teollisuudessa, jotta päästäisiin eroon kaapeleista. (Schmidt Ocean Institute 2021.)

Autonomiset vedenalaiset laitteet ovat loistava vaihtoehto öljy- ja kaasuteollisuuden merenpohjan tutkimiseen ja mittaamiseen. Bourne-antureilla varustetut AUV-laitteet voivat toimia syvänmeren alueilla täydellisesti. Ennen kuin öljy-yhtiö perustaa min-käänlaista vedenalaista infrastruktuuria merenpohjaan, voidaan AUV-laitetta käyttää yksityiskohtaisten karttojen laatimiseen merenpohjasta. Tämä mahdollisuus voi tuoda valtavia etuja yrityksille, jotka voivat asentaa laitteensa kustannustehokkaampaan tapaan. AUV-laitteen tuottamien tutkimustulosten mukaan yritykset voivat tehdä tarkan toteutettavuusraportin, jonka mukaan voidaan ennustaa ovatko porauslaitokset tietyillä alueilla mahdollisia. (Schmidt Ocean Institute 2021.)

Edellä mainittujen lisäksi AUV-laitteita voidaan käyttää laajalti putkilinjojen tutkimiseen. Ne voivat tutkia putkivikoja, korroosiota ja taipumista.

2.2 Sotilaskäyttö

AUV-laitteet oli aluksi tarkoitettu sotilaskäyttöön. Käyttämällä AUV-laitteita välttäisiin sotilashenkilöstön korkeilta kustannuksilta, sekä vähennettäisiin vaarallisesta ympäristöstä aiheutuvaa vaaraa ihmisille ja viimeisenä muttei suinkaan vähäisimpänä pitkän käyttöiän vuoksi. Autonomiset vedenalaiset laitteet kehitettiin aluksi miinojen etsintään ja purkuun. Tämä siksi, että miehittämätön vedenalainen laite voi sukeltaa paljon kauemmin kuin ammattimainen sukeltaja. Sen lisäksi tämä vähensi sukeltajan mahdollisuutta joutua onnettomuuteen miinanraivausoperaation aikana. Myöhemmin anturitekniikoita ja järjestelmiä on parannettu huomattavasti, mikä on parantanut vedenalaisia laitteita sekä niiden toimintakykyä todella laajassa mittakaavassa. (Schmidt Ocean Institute 2021.)

Toisen maailmansodan aikana AUV-yksiköiden käytössä tarkasteltiin uutta kehitystä. Miehittämättömästä vedenalaisesta laitteesta tuli strateginen ase vedenalaisen sodan aikana. AUV-laitteesta tuli ASW:n (Anti Submarine Warfare) huippu sen ollessa yksi

taitavimmista ja onnistuneimmista työkaluista vedenalaisilla taistelukentillä. Lisäksi strategisten alueiden kartoitus oli erittäin tärkeää. (Schmidt Ocean Institute 2021.)

AUV-laitteet pystyvät kartoittamaan merenpohjan antureillaan. Käyttämällä monisäikeistä USBL- (Ultra Short Baseline) ja LBL- (Long Baseline) kaikuluotainta saatiin paljon korkeamman resoluution tietoja perinteisiin menetelmiin verrattuna. Tämä teki tehtävän suorittamisesta helpompaa. AUV:t eivät kuitenkaan vielä täysin pysty korvaamaan sukeltajan työtä, vaikkakin ne voivat olla suureksi avuksi erityisesti matalissa rannikkovesissä. (Schmidt Ocean Institute 2021.)




2.3 Akateeminen/tieteellinen käyttö

Alkuperäisestä kehityksestä nykyiseen muotoon AUV:t on rakennettu toimimaan akateemisilla aloilla. Ensimmäisen AUV:n kehitti jo vuonna 1957 Stan Murphy, Bob Francois sekä myöhemmin Terry Ewart Washingtonin yliopiston Applied Physics Laboratory:ssä. Tämä oli Special Purpose Underwater Research Vehicle eli SPURV, jota käytettiin diffuusion, akustisen siirron ja sukellusveneiden tutkimiseen. AUV-laitteita käytetään usein järvien ja valtamerien sekä niiden pohjan tutkimiseen ja vuodesta 1957 lähtien on AUV:llä ollut suuri merkitys tässä asiassa. (Schmidt Ocean Institute 2021.)

AUV:ita voidaan käyttää myös vedenalaisen ekosysteemin tutkimiseen. Akustiset anturit, kamerat ja erikoisanturit voivat mitata kemiallisia yhdisteitä, suolapitoisuutta, lämpötilaa ja jopa mikroskooppista elämää. Koska AUV:n modulaarinen infrastruktuuri mahdollistaa laitteen monipuolisuuden erilaisilla antureilla, se on ainutlaatuinen jokaiseen tutkimustarkoitukseen. (Schmidt Ocean Institute 2021.)

AUV:n erilainen suunnittelu on ollut erittäin menestyksekkästä tutkimuksessa/tieteellisellä alalla. AUV, nimeltään Glider on varustettu siivillä ja se voi kulkea jopa 14000 km yhdellä latauksella. Glider kulkee reitillään tehden siksakliikettä. Tämän kaltainen liike sallii sen tutkia vedenalaista elinympäristöä ja muita parametrejä kerros kerrokselta hyvin pitkään. Merenalainen arkeologia onkin toinen AUV-laitteiden akateeminen hyödyntämisen kohde. (Schmidt Ocean Institute 2021.)

Seuraavassa kuvassa (Kuva 1) näkyy muutamia esimerkkejä Schmidt Ocean Instituten suunnittelemissa AUV-laitteista mukaan lukien aiemmin tekstissä mainittu Glider.

Technical Specifications	AUV	GMK	TR-92 (Glider)
			
Operational Depth	1000 msw	300 msw	300 msw
Operation mode	Autonomous, Semi-Autonomous	Autonomous, Semi-Autonomous	Autonomous, Semi-Autonomous
Weight	325 Kg (in the air) 0 Kg (in water with ballast weight)	75 Kg (in the air) 0 Kg (in water with ballast weight)	85 Kg (in the air) 0 Kg (in water with ballast weight)
Body	6000 series aluminum, Stainless Steel	6000 series aluminum, Stainless Steel	6000 series aluminum, Stainless Steel
Payload Capacity	35 Kg	5 Kg	5 Kg
Dimensions	Height: 0,325 meters Length: 2,475 meters Depth: 0,865 meters	Diameter: 300 mm Length: 2000 mm	Diameter: 300 mm Height: 2000 mm Span: 2000 mm Mean Chord: 100 mm:
Cruise Speed	3 Knots	3 Knots	0,8 Knots (w/out motor) 3 Knots (w/motor)
Endurance	15 hours at cruise speed	15 hours at cruise speed	5000 hours (w/ou7 motor) 50 hours (combined)
Power Source	Li-polymer battery packs	Li-polymer battery packs	Li-polymer battery packs
Thrusters	2 Horizontal and 4 Vertical Thrusters	2 Horizontal and 4 Vertical Thrusters	1 Horizontal Thruster
Emergency Relocation	Emergency Module that contains GPS, radio modem, pinger and flasher iridium and GPRS are optional	Emergency Module that contains GPS, radio modem, pinger and flasher iridium and GPRS are optional	Emergency Module that contains GPS, radio modem, pinger and flasher iridium and GPRS are optional
	Sensors		
Depth Sensor	CTD (Conductivity, Temperature and Depth)	CTD (Conductivity, Temperature and Depth)	CTD (Conductivity, Temperature and Depth)
Heading Sensor	IFG Fiber Gyro Compass	IFG Fiber Gyro Compass	IFG Fiber Gyro Compass
Altitude	Altimetre	Altimetre	Altimetre
Acoustic Tracking	Acoustic modem and USBL	Acoustic modem and USBL	Acoustic modem and USBL
Communication	Tritech Seaking Forward	Tritech Seaking Forward	Tritech Seaking Forward
Sonar	Looking Sonar, Edgetech Side Scan Sonar	Looking Sonar, Edgetech Side Scan Sonar	Looking Sonar, Edgetech Side Scan Sonar
Navigation	Teledyna RDI	Teledyna RDI	Teledyna RDI
Camera	Workhorse DVL Color Zoom Camera Low Light Camera	Workhorse DVL Color Zoom Camera Low Light Camera	Workhorse DVL Color Zoom Camera Low Light Camera

Kuva 1. Muutama esimerkki AUV-laitteista (Schmidt Ocean Institute. Autonomous underwater vehicle).

3 ESIKUVA PROJEKTILLE

Tätä projektia varten lähdettiin tutkimaan muiden vastaavanlaisten laitteiden valmistajien suunnittelemia ja heidän rakentamiaan malleja sekä kartoittamaan, mitä ominaisuuksia haluttiin omaan versioon ja minkälainen olisi sen järkevä kokoluokka.

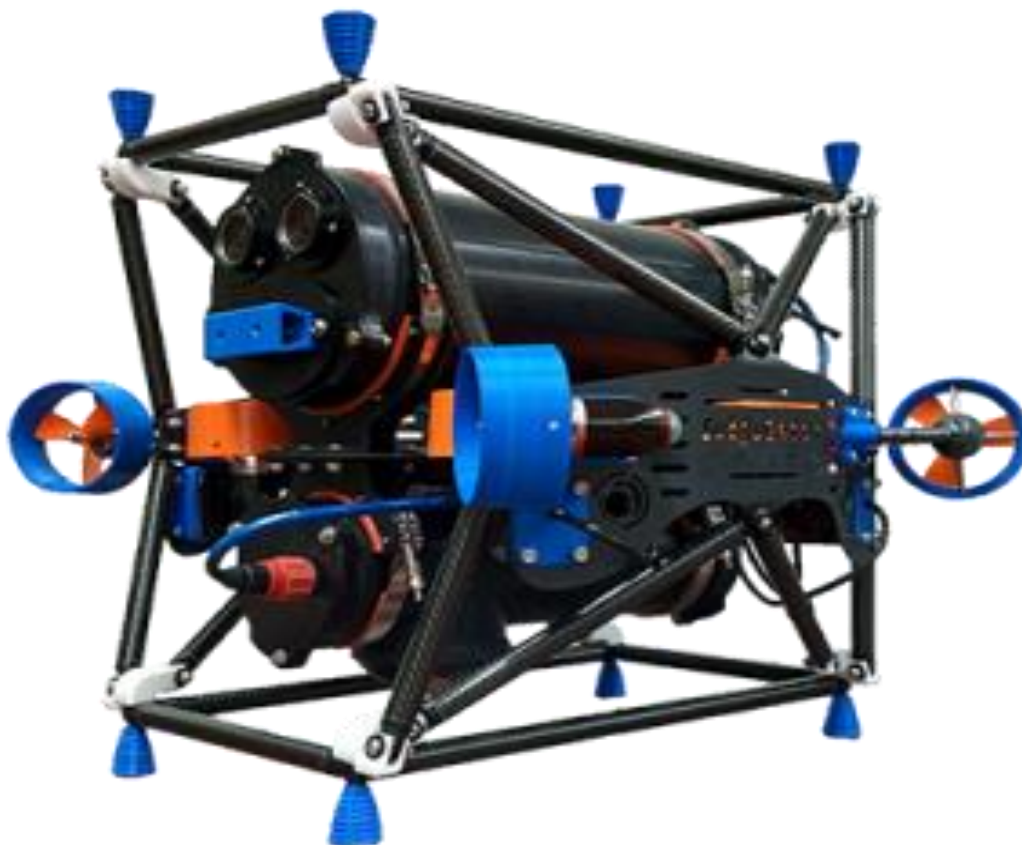
Millainen laitteesta pitäisi rakentaa ja minkälaista tehtävää sen tulisi suorittaa? – kysymykseen vastasi kuvassa (Kuva 2) näkyvä Floridan yliopistossa rakennettu Subjugator, joka toimi esikuvana ja suuntaa antavana mallina oman AUV-laitteemme suunnittelussa (University of Florida 2017). Tämä laite valikoitui osittain siitäkin syystä, että heillä on monivuotinen kokemus autonomisten vedenalaisten laitteiden suunnittelusta, kehittelystä ja rakentelusta kuin myös niillä voitokkaasta kilpailemisesta vuosien aikana. Toisaalta kyseinen malli vaikutti mielestäni myös melko yksinkertaiselta ja kompaktilta toteuttaa sekä muokata omien näkemysten ja tarpeiden mukaan. Sukellusrobottia lähdettiin siis rakentamaan hyväksi todettujen mallien mukaan, osittain kopioidulla ja hyödyntämällä muiden suunnittelemia ja rakentamia ratkaisuja.

Aivan täyttä kopiota emme tietenkään lähteneet tekemään, vaan laitteet eroavat toisistaan aika laillakin. Ehdot rakentamiseen saneli pitkälti budjettimme, joka floridalaisiin verrattuna oli melko pieni. Siinä missä floridalaisten käyttämät summat suunnitteluun ja rakentamiseen ovat useita kymmeniä tuhansia oli meidän käytettävissämme pyöreät 10 000 €:n rakennusbudjetti, jolla laite piti saada rakennettua. Suunnitteluvaiheessa oli jo selvää, että suurin osa budjetista menisi tarvittaviin elektroniikkalaitteisiin, joten rungon rakentamisessa piti huomioida omavalmisteiden osuus sen sijaan, että kaikki projektissa tarvittavat rungon komponentit olisi ostettu valmiina.

Kun floridalaiset käyttivät laitteessaan kallista, jopa yli 100.000 \$ kaikuluotainta, korvautui se meidän suunnitelmassamme reaaliaikakuvaa tuottavalla huomattavasti edullisemmalla veneilykäyttöön tarkoitettulla versiolla. Tähän ratkaisuun päädyimme siksi, että kirkasvetisen altaan sijaan sukeltavan robottimme käyttökohteeksi suunniteltiin sameat vedet, joissa kameran tuottama kuva olisi ollut melko rajallinen valon määrän vähentyessä hyvinkin nopeasti jo muutamassa metrissä pinnan alla.

Kamerasovellus olisi myös vaatinut riittävän tehokkaan valaistuksen asentamisen laitteeseen, joka tässä kohtaa todettiin kuitenkin kannattamattomaksi.

Rakennusmateriaalivalinnat, kameroiden korvaus kaikuluotaimilla sekä muu elektronikka, potkurijärjestelmät ja kaikki kaapeliläpiviennit poikkeavat esikuvastaan hyvin paljon. Kaikki on kuitenkin suunniteltu ja rakennettu huomioiden se seikka, että laitetta tullaan käyttämään hyvin vaihtelevissa ja kosteissa olosuhteissa.

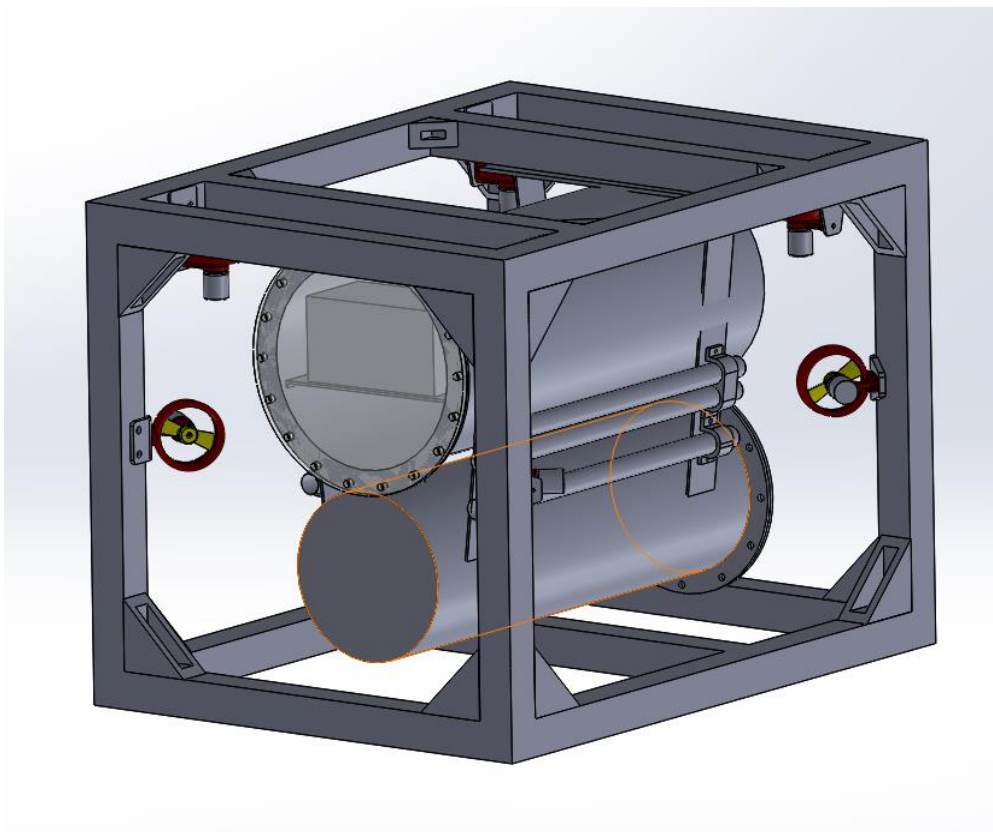


Kuva 2. Esikuvana toiminut Floridan yliopiston työryhmän 2016 suunnittelema ja rakentama Subjugator, jota mukailten oma laitteemme rakennettiin. (University of Florida. 2016. Subjugator).

4 SUUNNITTELU JA RAKENTAMINEN

Sukellusrobottia (Kuva 3) suunniteltiin ja rakennettiin Satakunnan ammattikorkeakoulun tiloissa Porissa vuosien 2019–2020 aikana muiden opintojen ohella sekä kevätlukukauden päättyessä kesäloman aikana. Osa itse suunnitelluista komponenteista teetettiin ulkopuolisella toimijalla joko ajan säästämiseksi tai syystä, ettei ollut itse mahdollista niitä valmistaa puuttuvien työstökoneiden tai työstömenetelmien vuoksi. Näitä olivat alumiinista valmistettujen painerunkojen hitsaus sekä rungon osien niin sanottu jauhemaalaus.

Suunnittelu toteutettiin kaikkien niiden tietojen, taitojen ja osaamisen mukaan, joita vuosien varrella oli tarttunut matkaan koulun penkiltä, työelämästä erilaisissa työtehtävissä sekä tutkimalla muiden valmistajien suunnitelmia ja rakenteita vastaavanlaisista laitteista. Siitä huolimatta, koska kyseessä oli prototyyppi, meni projektin edetessä muutama suunnitelma uusiksi, kun valmis komponentti tai toteutustapa ei sitten vastannutkaan toivottua tulosta.



Kuva 3. 3D-mallinnus robotin fyysisestä rakenteesta

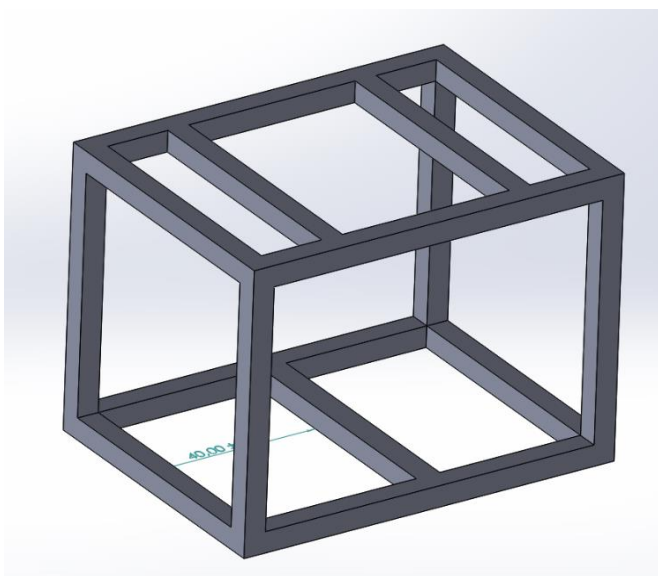
4.1 Runko

Robotin runko koostuu kolmesta osasta. Siinä on kaksi kiinteästi toisiinsa liitettyä painerunkoa sekä niitä suojaava kehikko, jonka sisäpuolelle on sijoitettu myös muut robotin vaurioherkät komponentit kuten kaikuluotaimien anturit ja potkurilaitteet sekä niiden kaapelit. Kehikko rakennettiin Minitecin 45x45 alumiiniprofiilista (Kuva 4) sen kestäväan rakenteen, helpon muunneltavuuden ja saatavuuden vuoksi.



Kuva 4. Kuvakooste Minitec 45x45 alumiiniprofiilista

Alumiiniprofiilin rakenteen yhtenäiset kiinnitysurat tekivät elementtien yhdistämisen ja siirtämisen melko vaivattomaksi. Osat kiinnitettiin toisiinsa Minitecin omalla powerlock-kiinnikkeillä ja järjestelmään sopivat myös vakiopultit ja -mutterit, joita käytettiin esimerkiksi kehikon (Kuva 5) ja painerunkojen tukevaan ja varmaan kiinnitykseen.

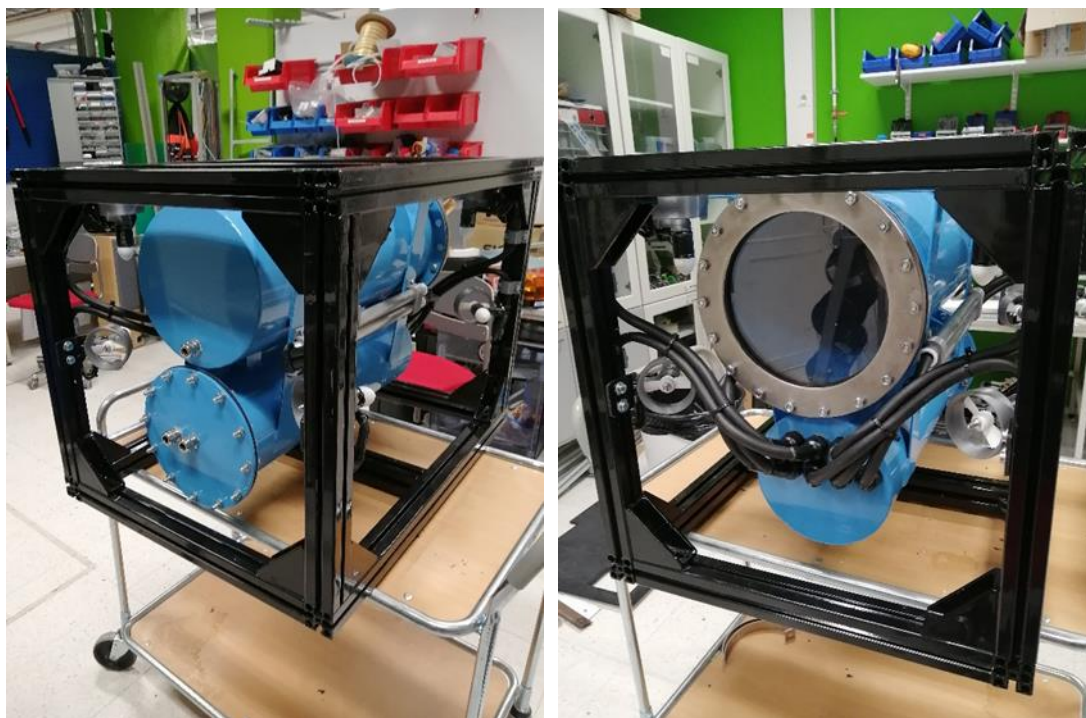


Kuva 5. Kehikon 3D-suunnitelma

Kehikon suunnittelussa ja muotoilussa otettiin huomioon, että sen pitää tukea ja suojata robotin rakennetta ja, että siihen on helppo lisätä tarvittaessa myös mahdollisia lisäosia kuten esimerkiksi manipulaattori. Huomioitavaa oli myös painerunkojen kiinnitys kehikkoon painopisteen pysymiseksi mahdollisimman keskellä viemättä kuitenkaan liikaa tilaa muilta laitteilta tai vaikuttamatta sen kelluntaan. Kuvassa (Kuva 6) robotin painerungot ja kehikko yhteen liitettynä.

Kehikko on kooltaan 600x600x800 mm (K x L x S) ja sen yksinkertaista rakennetta tukee myös joka nurkkaan asennetut kulmakiinnityspalat. Niin kehikon kuin painerunkojenkin suunnittelussa huomioitiin veden virtauksen vaikutuksen minimointi niin, että vesi pääsee virtaamaan laitteen läpi vaikuttamatta sen ohjautuvuuteen.

Painerungot on valmistettu leikkaamalla alumiinilevystä piirustusten mukaiset palat laserleikkurilla. Runkojen päätylaipat on leikattu 5 mm alumiinilevystä, kun taas levyn taivuttamiseksi putken muotoon käytettiin 3 mm levyä sen helpomman taivutuskäsiteltävyyden vuoksi. Tämän runkorakenteen todettiin olevan riittävän vahva kestämään 50 metrin syvyydessä vallitsevan 5–6 bar vedenpaineen. Painerunkojen hitsaus oli yksi ulkopuolisella teetettyjä töitä ja sen suoritti Antti Salminen Porin Winnovasta.



Kuva 6. Kuvakooste kehikosta sekä painerungoista

Ylemmän painerungon sisämitat ovat 250 x 600 mm (halkaisija x pituus) ja sen sulkevana kantena on paksuudeltaan 10 mm kirkas polykarbonaattilevy, joka toimii linssinä, mikäli laite mahdollisesti myöhemmin varustetaan kameralla. Tämän linssin kiinnitystä tukemaan leikattiin vielä 10 mm paksuisesta rosterilevystä sille sopiva kaulus. Tähän ylempään runkoon asennettiin laitteen päätietokone sekä kaikuluotaimen yksikkö.

Alemman painerungon sisämitat ovat 200 x 600 mm (halkaisija x pituus). Siinä sulkevana kantena on kaksi 5 mm paksua, alumiinista valmistettua levyä. Toiseen kanteen porattiin reiät etäkäyttöön tarvittavien maasähkö- ja tiedonsiirtokaapelien läpivientejä varten, toisen olleessa umpinainen autonomisesti suoritettavaa ajoa varten. Tämä runko pitää sisällään laitteen virtalähteen, akuston, sulakkeet sekä moottorinohjaimet kahdeksalle potkurilaitteelle. Liitteessä (Liite 1) on kuvattu kaapelien ja eri komponenttien kytkentäkaavio sekä niiden sijoitus.

Tiivisteinä kummassakin käytettiin 2 mm Black Cold 978-C-tyyppistä teollisuuden yleistiiivistettä, joka on tarkoitettu muun muassa vedelle, öljylle ja paperiteollisuuden massoille. Sen ominaisuuksiin kuului valmistajan mukaan hyvä puristuvuus ja erinomainen kuumen kestävyys kuin myös paineensietokyky. Sen rakenne koostui aramid- ja epäorgaanisista kuiduista sekä NBR-kumiseoksesta. Tiivisteet valmisti ja toimitti ETRA Oy Raumalta tehtyänä ja toimitettuani heille ensin tarvittavat piirustukset.

Tiiviste ei kuitenkaan tuottanut painetestissämme toivottua tulosta, joten tilalle hankittiin 4 mm ETRA NBR Premium -kumilevyä, josta leikattiin uudet vastaavat tiivisteet. Samalla lisättiin myös kiinnityspulttien määrää kummassakin laipassa. Ylempään laippaan kolminkertainen ja alempaan laippaan kaksinkertainen määrä alkuperäisen ollessa vain kuusi pulttia kummassakin.

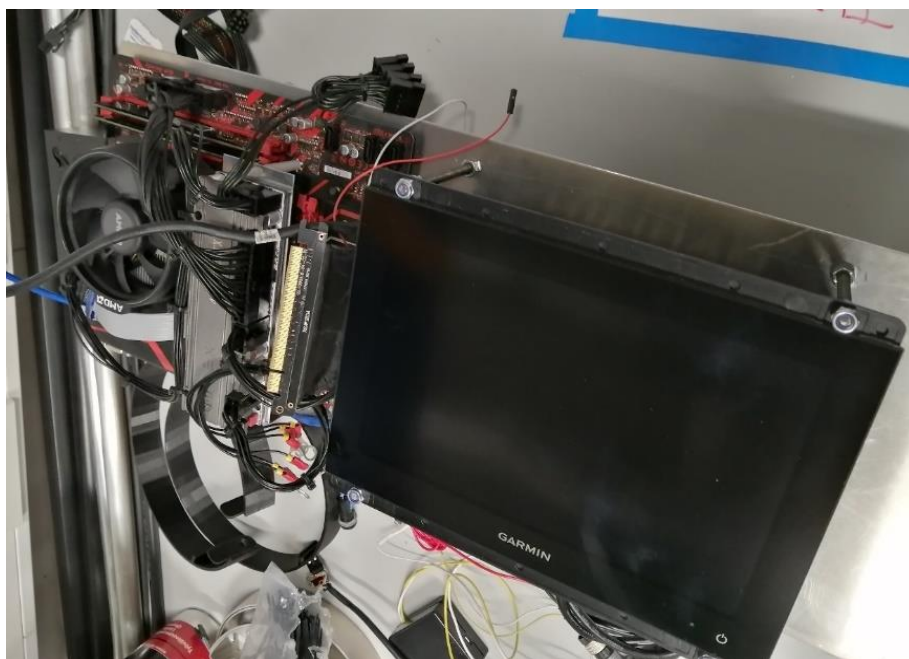
Ennen kehikon ja painerunkojen yhteen liittämistä ne jauhemaalattiin niin ikään Porin Winnovassa toimineen Isto Jokisen toimesta. Tässä kohtaa ennen maalausta on tärkeää huomioida se seikka, että kaikki ne tarvittavat kiinnitys- ja läpivientien reiät on jo valmiiksi suunniteltu, porattu ja kierteytetty. Toki se onnistuu myös jälkeinpäin, mutta se jättää aina jälkensä eikä tässä tapauksessa ole helposti korjattavissa.

4.1.1 Pää tietokone ja kaikuluotain

Sukellusrobotin pää tietokoneena (Kuva 8) on AMD-pohjainen x86-tietokone, jota voidaan käyttää niin laitteen akuista saatavalla virralla kuin päävirtalähteen 24 V DC-jännitteellä. Kaikuluotainyksikkönä toimii GARMIN 8400 XSY reaaliaikakuvaa tuottavalla LVS 12 -kaikuanturilla sekä sen lisäksi vielä GT54UHD-TM-viistokaikuanturilla (Kuva 7).



Kuva 7. Vasemmalla LVS 12 -reaaliaika-anturi ja oikealla GT54UHD-TM-viistokaikuluotain



Kuva 8. Pää tietokone ja kaikuluotainyksikkö



Kuva 9. Levyn alapuolelle on kiinnitetty tietokoneen näytönohjainyksikkö

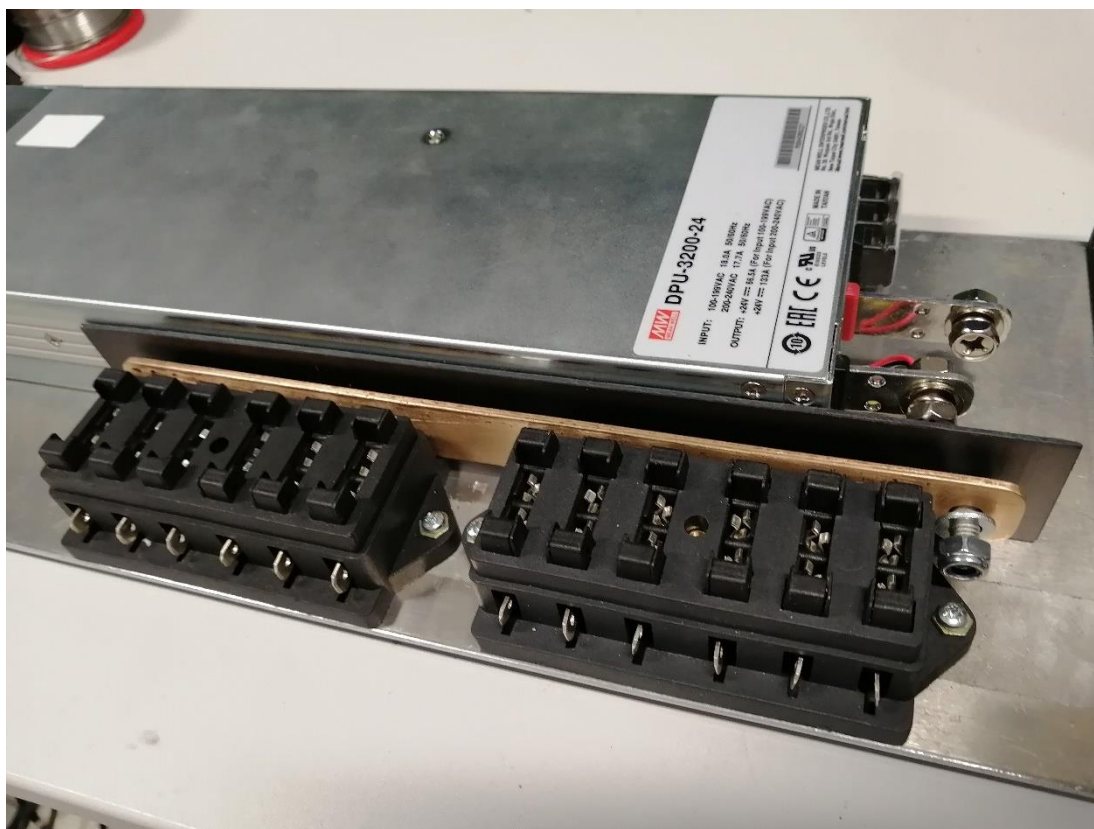
Kuvissa 8 ja 9 näkyy, miten laitteet on asennettu 230x600 mm kokoiseen alumiinilevyyn jättäen tilaa mahdollisille huoltotoimenpiteille sekä mahdollisen kamerasen-
nusta varten, mikäli kyseinen laite myöhemmin asennetaan. Alumiinilevyyn päädyin
tässä suunnitelmassa siksi, että kestävämpänä materiaalina vastaavaan muoviseen le-
vyyn verrattuna se on huomattavasti tukevampi ja voidaan käyttää paksuudeltaan
ohuempana ja näin ollen tilaa säästävämpänä kokona. Alumiini johtaa myös laitteiden
kehittämää lämpöä paremmin virtaavan veden jäähdyttämään runkoon kuin, mitä
pelkkä muovilevy tekisi.

Alumiinilevyn ja siihen kiinnitettyjen laitteiden väliin on jätetty riittävä ilmaväli muun
muassa juuri jäähdytystä varten ja suunnitelmissa oli myös jonkinlainen lisäeristys me-
tallin ja tietokoneen koteloimattoman piirilevyn väliin, joka jäi vielä asentamatta.
Tämä eriste olisi esimerkiksi 1–3 mm paksuinen muovista tai kumista muotoon lei-
kattu matto, joka kiinnitetään liimaamalla alumiinilevyyn.

Kaikuluotainten mukana tulleita antureiden kiinnikkeitä emme tässä projektissa käyt-
täneet koska ne eivät sellaisenaan soveltuneet tähän kiinnitysmuotoon. Koska anturit
oli saatava kehikon suojaan mahdollisilta pohjakosketuksilta, niiden kiinnitys laitteen
runkoon oli suunniteltava uusiksi mahdollisimman varman kiinnityksen takaamiseksi.

4.1.2 Päävirtalähde

Sukellusrobotin päävirtalähteenä on kuvassa (Kuva 10) näkyvä MEANWELL DPU-3200, joka muuntaa 240 VAC -maasähkön 24 VDC -muotoon. Laitteen fyysinen koko on 325,8x107x41 (P x L x K), joka sinällään antaa sille mahdollisuuden pieneenkin tilaan asennettavaksi. Sulakerasioina on kaksi virtakiskolla yhteen liitettyä 6-osaista 30 A ja 32 V lattasulakepesää. Sulakerasioiden virtakiskon ja virtalähteen väliin asennettiin 2 mm muovista leikattu eriste eliminoimaan mahdolliset oikosulkuun johtavat tekijät.



Kuva 10. Päävirtalähde ja sulakerasiat

Antti Virtasen rakentamat moottorinohjaimet (8 kpl) vaativat oman kiinnikkeensä, joka niin ikään suunniteltiin ja valmistettiin 3D-mallina. Se vaati kuitenkin muutostöitä jälkepäin lisätyn yhdeksännen piirikortin sekä kondensaattoreiden vuoksi.

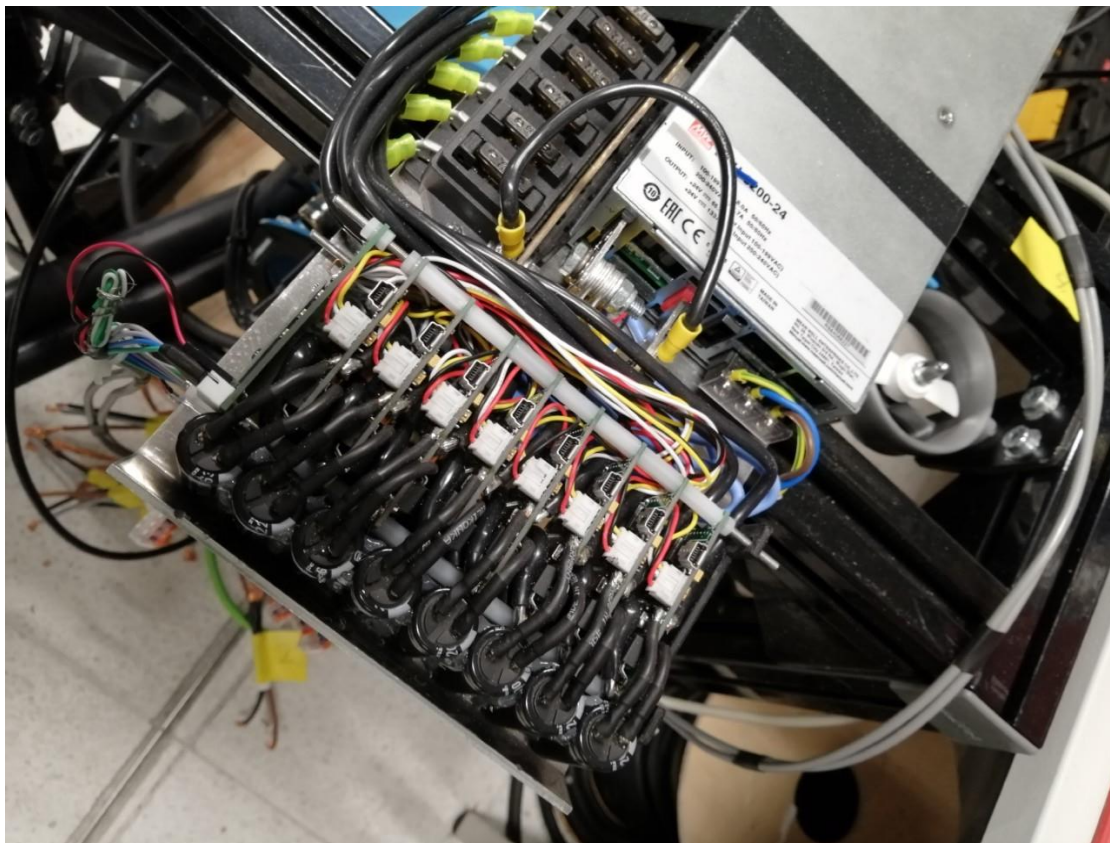
Virtalähde, sulakerasiat ja moottorinohjaimet (Kuva 11) on kiinnitetty 160x475 mm kokoiseen alumiinilevyyn joko ruuvaamalla tai kaksipuolisella teipillä, kuten tässä tapauksessa virtalähteen kohdalla on tehty.



Kuva 11. Virtalähde, sulakerasiat sekä 3D-tulostettu kiinnike vielä tässä vaiheessa kahdeksalle ohjainkortille.

Koska vanha kahdeksalle moottorinohjankortille (Kuva 12) suunniteltu kiinnike ei mielestäni enää muutettuna vastaa niitä ominaisuuksia kuin ennen muutosta, on jatkokehityssuunnitelmissa kokonaan uuden kiinnikkeen suunnittelu ja valmistus.

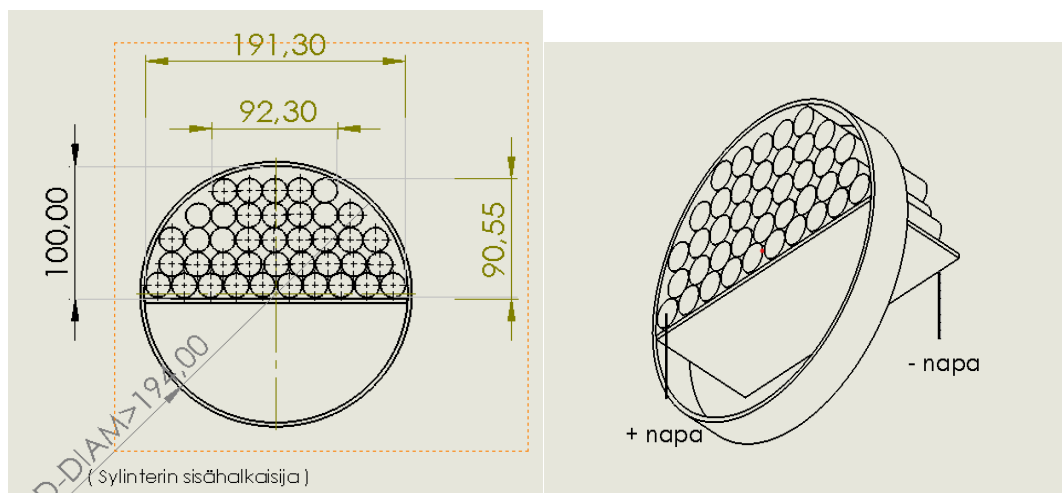
Tilan ahtauden vuoksi tämä tulee olemaan haastavaa, koska kiinnikkeen kokoa pitäisi kasvattaa niin pituus, korkeus kuin leveys suunnassakin.



Kuva 12. Moottorinohjainkortit asennettuna vanhaan muutoksen vaatineeseen kiinnikkeeseen.

4.1.3 Akku

Sukellusrobotti on varustettu myös akkukäytöllä, mikä mahdollistaa liikkumisen autonomisesti silloin, kun ei käytetä kauko-ohjausta ja maista syötettyä jännitettä. Koska malliin sopivaa valmista akkua ei niin vain markkinoilta löytynyt, piti se suunnitella itse (Kuva 13). Tein Solidworks-ohjelmalla suunnitelman akun sijoittamiseksi alempaan painerunkoon, jota kuvissa näkyvä rengas esittää Yksi akkupaketin seitsemästä moduulista on tässä suunnitelmassa suuntaa antavana mallina akun rakenteelle.



Kuva 13. Kuvakoosteesta suunnitelma akun sijoittamisesta alempaan painerunkoon

Robotin akku muodostuu yhteensä 280 yksittäisestä kooltaan 18,55x65,2 mm (pituus x halkaisija) olevasta Samsung INR 18650-35E Li-Ion 3,6 V 3450 mAh / 8 A (13 A) ilman suojapiiriä olevasta akusta, jotka on koottu kytkemällä rinnan 40 akkua seitsemän moduulin sarjoiksi. Nämä moduulit on koottu yhteen kooltaan 90,55x190x460 (korkeus x leveys x pituus) kokoiseen pakettiin. (Akkula 2021.)

Painoa tällä akkupaketilla on noin 15 kiloa. Sen nimellisjännite on 25,2 V, nimellinen kapasiteetti 24,15 Ah ja teho 3,4 kW. Akun latausjännite on 4,2 V ja lataaminen suoritetaan vakiovirtalähteellä. Siitä, miten pitkään akku robottia kuljettaa vedessä, ei tiedetä, sillä potkurilaitteiden viemää virtaa ei todellisessa tilanteessa ole vielä mitattu niin kuin ei myöskään tietokoneen ja muiden virtaa kuluttavien laitteidenkaan osalta.

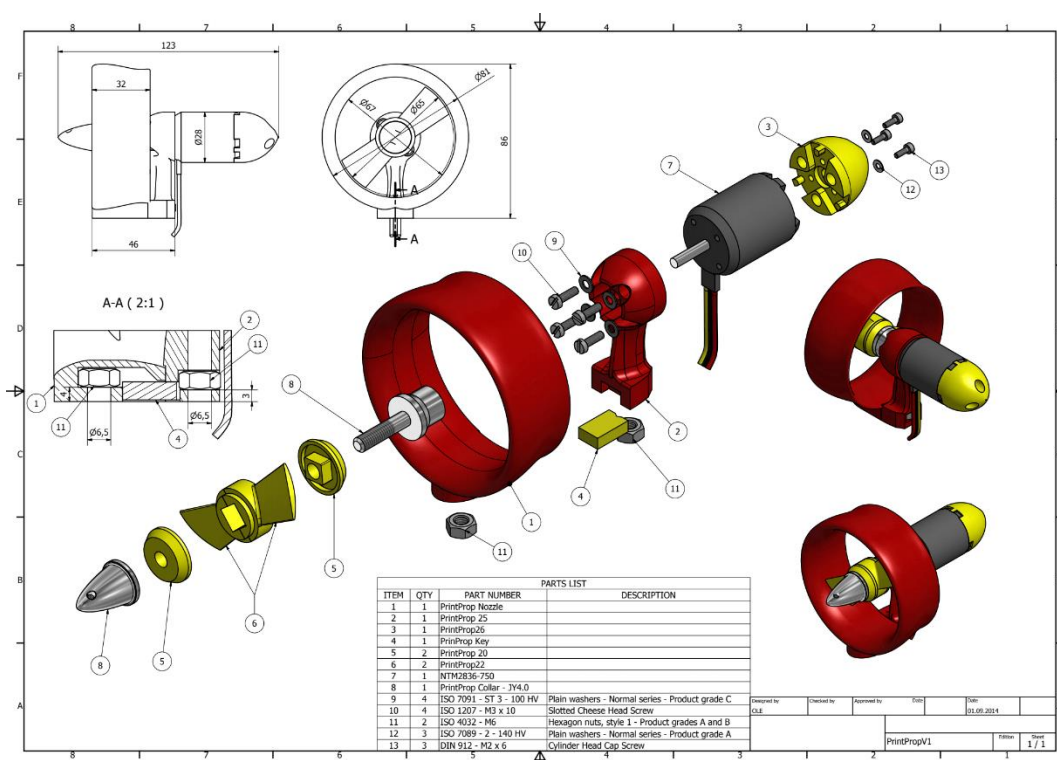


Kuva 14. Akku ja päävirtalähde koottuna samaan pakettiin

Akun ja virtalähteen välissä on kooltaan 4x190x460 mm polykarbonaattilevy erottamassa ne toisistaan. Levy ja akkupatterit tullaan teippaamaan yhdeksi kokonaisuudeksi vielä ennen lopullista asennusta, jolloin myös sen rakenteesta saadaan näin tukevampi. Akun kiinnitys toteutetaan toistaiseksi hihnoilla ja kuvassa (Kuva14) näkyvän pannan (joita lopulliseen kokoonpanoon tulee kaksi) tarkoitus on pitää tämä kokonaisuus paikoillaan painerungon sisällä

4.2 Potkurilaitteet

Sukellusrobotti on varustettu esikuvansa mukaisesti kahdeksalla potkurilaitteella. Ne perustuvat Ole Hermanin suunnittelemaan suulakepotkurimalliin (Kuva 15), joka hie- man muokattuna oli yhteensopiva valitsemiimme sähkömoottoreihin (Ole Herman thruster plans 2016). Muokattavat osat ladattiin Solidworks-piirustusohjelmaan, jossa tehtiin tarvittavat muutokset ennen 3D-tulostusta PLA-muovista.

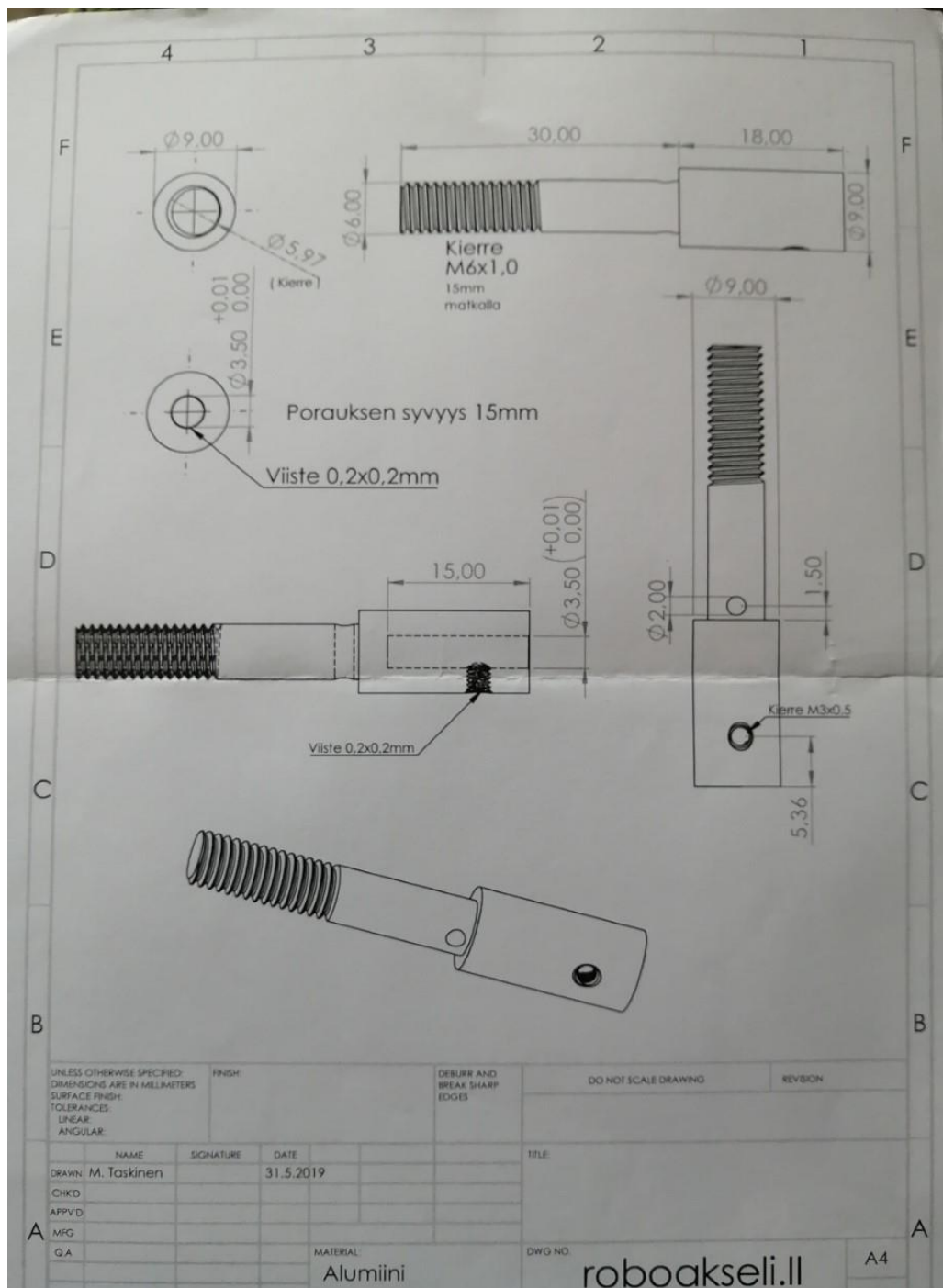


Kuva 15. Ole Hermanin suunnittelema potkurilaitteiston 3D-tulostettava runko

Muutoksia tehtiin runkoon, johon moottori kiinnittyy, potkuriakseliin, potkurin napoihin sekä moottorin perään kiinnitettävään osaan, jota pidennettiin ja siitä poistettiin turhat ruuvireiät erilaisen kiinnitystavan vuoksi. Muilta osin mallia käytettiin sellaisenaan.

Ole Hermanin mallin mukainen akseli ei sellaisenaan käynyt omiin suunnitelmiimme sen liian yksinkertaisen rakenteen vuoksi, joten suunnittelin sen kokonaan uusiksi (Kuva 16). Lähtökohdaksi suunnittelussa otin sellaisen seikan, että potkuri ei missään tilanteessa pääsisi pyörimään oman akselinsa ympäri ja että potkuriakselin kiinnitys

moottorin akseliin on riittävän tukeva ja varma. Näin ollen akselin pituus kasvoi. Potkurin pyörittäminen akselilla eliminointiin käyttämällä sokkatappia ja vastaavasti potkurin napaan uurretulla uralla, johon sokkatappi asettuu. Lukitus varmistettiin vielä käyttämällä tähtiprikkaa kiinnityksessä. Kiinnitys moottorin akselille varmistettiin lukitusruuvilla. Akselit valmistettiin Porin Winnovassa Tuomas Kyyhkysen toimesta.



Kuva 16. Uudelleen suunniteltu potkuriakseli

Potkurilaitteiden moottoreina pyörii NTM Rotor Drive 450 Series 1700 kv hiiliharjattomat sähkömoottorit (Kuva 17). Akseleihin on asennettu kaksilapainen Kaplan-tyyppinen potkuri, jonka lapa-alueen halkaisija on 65 mm. Moottoreiden käyttöjännite on 22,2 V ja teho 930 W. Moottorin pyörimisnopeus suurimmillaan on 1700 rpm, joten neljän samaan suuntaan pyörivän moottorin työntötehon pitäisi olla riittävä robotin kokoon nähden. (HobbyKing Rotor Drive 2021.)

Moottoreiden ohjaus tapahtuu niin, että työntövoima ohjaa robottia eteenpäin, kun neljän kulmiin asennetun moottorin potkurit pyörivät myötäpäivään (Kuva 18). Taaksepäin edetään, kun potkurit pyörivät vastapäivään. Paikallaan käännettäessä pyörivät sivumoottorit vastakkaisiin suuntiin. Pystysuunnassa olevilla neljällä moottorilla liikutaan ylös ja alas. Ohjelmistona toimii Truster mapper, joka laskee halutut työntövoimat eri potkurilaitteille. Se osaa ottaa huomioon myös tilanteet, jos jokin potkurilaitteista on vikaantunut, jolloin se kykenee laskemaan käskyt pelkästään toimivien potkurilaitteiden mukaan. Tieto halutuista liikkeistä tulee kontrollerilta.

Ennen asennusta moottorit purettiin osiin ja roottorien käämit suojattiin vielä ylimääräisellä lakkakerroksella varta vasten sähkömoottoreihin tarkoitettulla lakalla. Näin haluttiin varmistua siitä, että käämien eristys olisi varmasti vedenpitävä.



Kuva 17. Potkurilaitteen moottori



Kuva 18. Potkurilaitteet ja niiden kaksi eri kiinnitystapaa

Potkurilaitteet kiinnitettiin runkoon 5 mm alumiinilevystä laserleikattujen kiinnikkeiden avulla. Kiinnikkeistä neljä taivutettiin 130 asteen kulmaan ja ne sijoitettiin häkin kulmatolppiin mahdollisimman optimaaliseen kohtaan. Tämä asennus mahdollistaa ajamisen eteen- ja taaksepäin, mutta myös mahdollisimman vaivattoman paikallaan kääntymisen.

4.2 Kaapelointi

Sukellusrobotin virta ja dataliikenne suunniteltiin kulkemaan kahta eri kaapelia pitkin. Virtakaapeliksi potkurilaitteille valikoitui Helkama Bika Oy:n H-FLEX PWR C-PUR 3x6 mm² taipuisa häiriösuojattu kaapeli ja päävirtalähteelle vastaavasti saman toimittajan H-FLEX PWR C-PUR 3x2,5 mm² taipuisa häiriösuojattu kaapeli, jota varattiin etäohjausta varten 100 metriä. Jännitteensyöttö (230 VAC) saadaan aggregaatilla.

Tätä kaapelityyppiä käytetään yleisesti kannettavissa tai liikutettavissa kohteissa, laivojen maasähkökytkennöissä, nostureissa sekä erilaisissa teollisuuden sovelluksissa. Sitä käytetään myös robotti teknologiassa ja kaapeli voidaan upottaa mereen. Kaapelilla on hyvät mekaaniset ominaisuudet, korkea vetolujuus, se on kulutusta kestävä ja kestää myös UV-säteilyä, kemikaaleja, öljyä ja muita nesteitä. Kaapelin maksimikäyttölämpötila on -35-+80 Celsiusastetta. (Helkama Bika Marine and offshore cables 2021.)

Kun robottia ajetaan kauko-ohjauksella, siirtyy data robotilta käyttäjälle valokuitukaapeli pitkin. Päätietokoneessa on Gigabitin rj45-portti ja alemman painerungon laipaan on kiinnitetty rj45-kuitumuunnin. Yhteys näiden kahden välillä on toteutettu cat6-kaapelilla. Kannettavalle tietokoneelle liittämisen helpottamiseksi kuitu muutetaan kupari Ethernetiksi.

Vaikka sähkökaapeli omaa korkean vetolujuuden (15 N/mm²), toimii valokuitukaapeli myös sähkökaapelin vetosuojana vielä korkeamman vetolujuutensa ansiosta, mikä kaapelityypin mukaan vaihtelee 500–1750 N välillä. (Elisanet 2021.)

Samaan nippuun suunniteltiin kiinnitettäväksi myös paineistettu ilmaletku, jonka tarkoitus tässä on tehdä kaapeleista lievästi kelluvia. Toinen vaihtoehto voisi olla kiinnittää kaapeleihin tasaisin välein vaahtomuovirullia nosteen aikaansaamiseksi. Tällä tavoin minimoitaisiin kaapeleista robotille aiheutuva haittanoste. Koska kaapelien kuormasta aiheutuu robotille vastusta veden alla liikkuessa, niin sitä enemmän tarvitaan potkurilaitteiden tuottamaa työntötehoa, mitä enemmän on kaapelia vedessä, jotta voitaisiin liikkua samalla nopeudella kaapelia perässä vetäen.

4.2.1 Läpiviennit

Kaapelien läpivientiin käytettiin metallisia EMSKV-L M20 ja M25 pitkällä kierteellä olevia holkkitiivistä. Niitä varten painerunkoon porattiin reiät, joihin tehtiin myös kierteet. Asennuksen yhteydessä kierteisiin laitettiin tiivistäineeksi SIKAFLEX 591 -saumausmassa, jota valmistajan mukaan voidaan käyttää rankoissakin marine-sääolosuhteissa. Tämän lisäksi lukitus varmistettiin vielä holkkitiivisteen kierteisiin asennetulla vastamutterilla. Tämä toimenpide toteutettiin kaikissa läpivientiholkeissa. Kaapelien asennuksen jälkeen tiiviys varmistettiin vielä liimalla varustetulla kutistesukalla, joka samalla myös jäykisti kaapelin asennusta (Kuva 19).

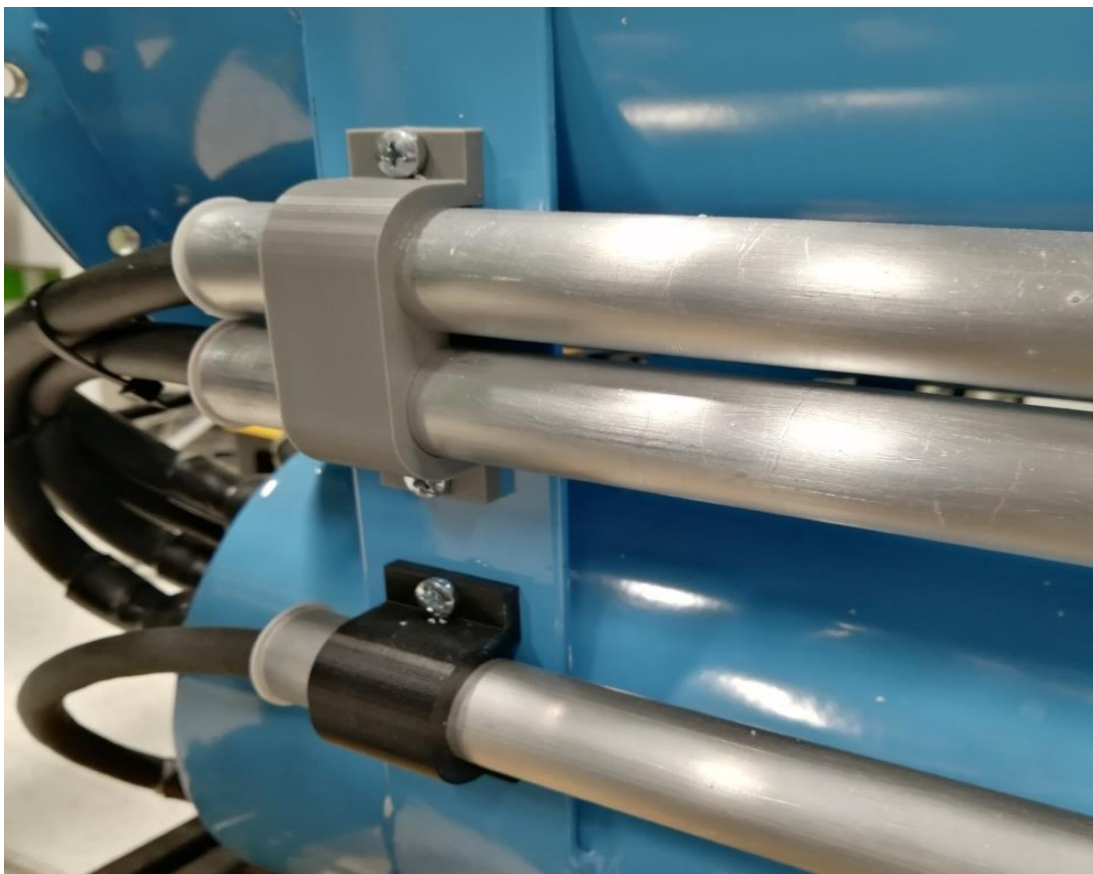


Kuva 19. Läpivientiholkkitiivistet sekä kaapelin asennuksen jälkeinen tiivistys

4.2.2 Kiinnikkeet

Kaapeleiden ja alumiiniputkien kiinnitystä varten suunnittelin omat kiinnikkeet, jotka 3D-tulostettiin PLA-muovista (Kuvat 20 ja 21). Päädyin tähän ratkaisuun siksi, että kaupasta valmiina ostettavat kiinnikkeet eivät rakenteeltaan, lujuudeltaan ja/tai materiaaliltaan täyttäneet niitä vaatimuksia, joita kiinnikkeiltä halusin.

Kiinnikkeitä suunnitellessa pyrin ottamaan huomioon riittävän vahvan rakenteen aikaansaamisen, jotta ne kestäisivät paremmin rasitusta eivätkä näin ollen olisi vaurioherkkiä vaikeimmissakaan olosuhteissa. Ruuvipenkissä tekemäni testin perusteella kiinnikkeet täyttävät niille asettamani kriteerit.



Kuva 20. Alumiiniputkien kiinnitys



Kuva 21. Kaapeleiden kiinnikkeet

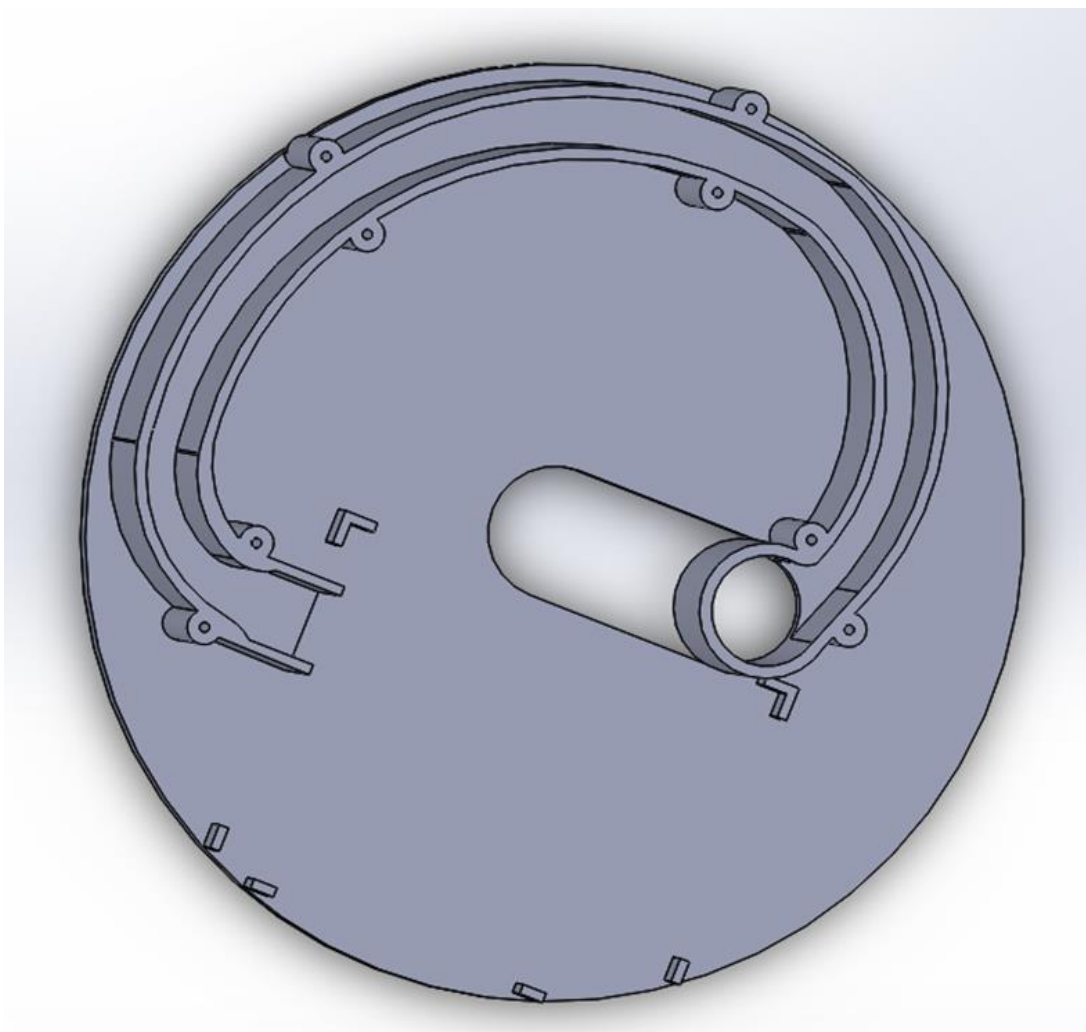
Koska halusin potkurilaitteiden syöttökaapeli-asennuksessa välttää turhaa pituutta, asensin kaapelit aika tiukalla sovituksella paikoilleen. H-FLEX PWR C-PUR 3 x 6 mm² kaapeli ei ole kovinkaan taipuisa lyhyellä matkalla ja sen asennuksessa halusin kuitenkin välttää liian jyrkkää taivutusta, sillä jos kaapeli on taivutettu annetun rajan yli, tämä saattaa aiheuttaa vaurioita kaapelin sisäiseen rakenteeseen, mikä voi vuorostaan johtaa oikosulkuun kaapelin sisällä. Kaapelin asennukseen suunniteltu kiinnike on kyllä riittävän tukeva, mutta sen kiinnitys runkoon vain kahdella ruuvilla ei ehkä kuitenkaan ole riittävän varma kaapelin pyrkiessä taivuttamaan sitä. Selvä tuotekehityksen paikka tässäkin.

Eräänlainen kaapelikiinnike on myös alemman painerungon laippaan suunnittelemani kiinteästi asennettava valokuitukaapelin kiinnike/kotelo, johon on kiinnitetty myös rj45-kuitumuunnin (Kuva 22). Ajatuksena tässä oli suojata kaapelia, mutta myös ohjata se hallitusti omaa reittiä muuntimelle.

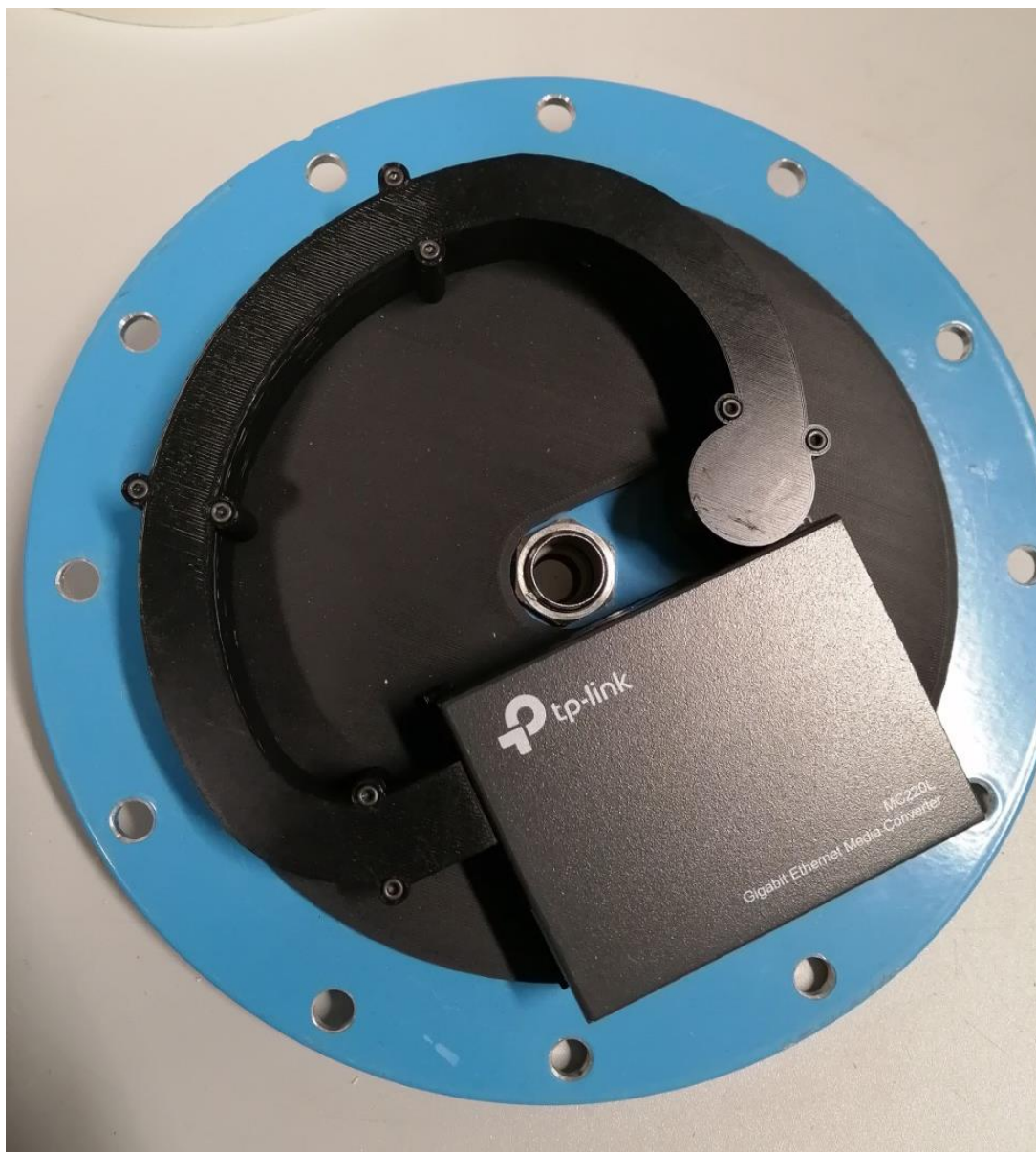


Kuva 22. Mallinnus kaapelin ja rj45-kuitumuunninkotelon sijoittamisesta

Valokuitukaapeli tulee ensin M25-läpivientiholkin läpi, mikä kiristetään ja tiiviys varmistetaan kutistesukalla. Tämän jälkeen kaapeli kulkee kotelon uomaan pitkin muuntimelle, josta lähtee cat6-kaapeli tietokoneelle (Kuvat 23 ja 24). Kun laippa halutaan vaihtaa, se on helppo kytkeä irti tietokoneesta irrottamalla vain cat6-kaapeli sekä liittimellä varustettu jännitteensyöttökaapeli ja asentaa paikoilleen umpilaippa autonomista liikkumista varten.



Kuva 23. 3D-suunniteltu kaapeli- ja rj45kuitumuunninkotelo kiinnikkeelle. Suunnitelmaan kuuluu myös kansi kaapelikourulle.



Kuva 24. Valmis kotelointi-/kiinnitys valokuitukaapelille sekä kuitumuuntimelle. Keskellä laippaa oleva läpivientiholkki on varattu jännitteensyöttökaapelille.

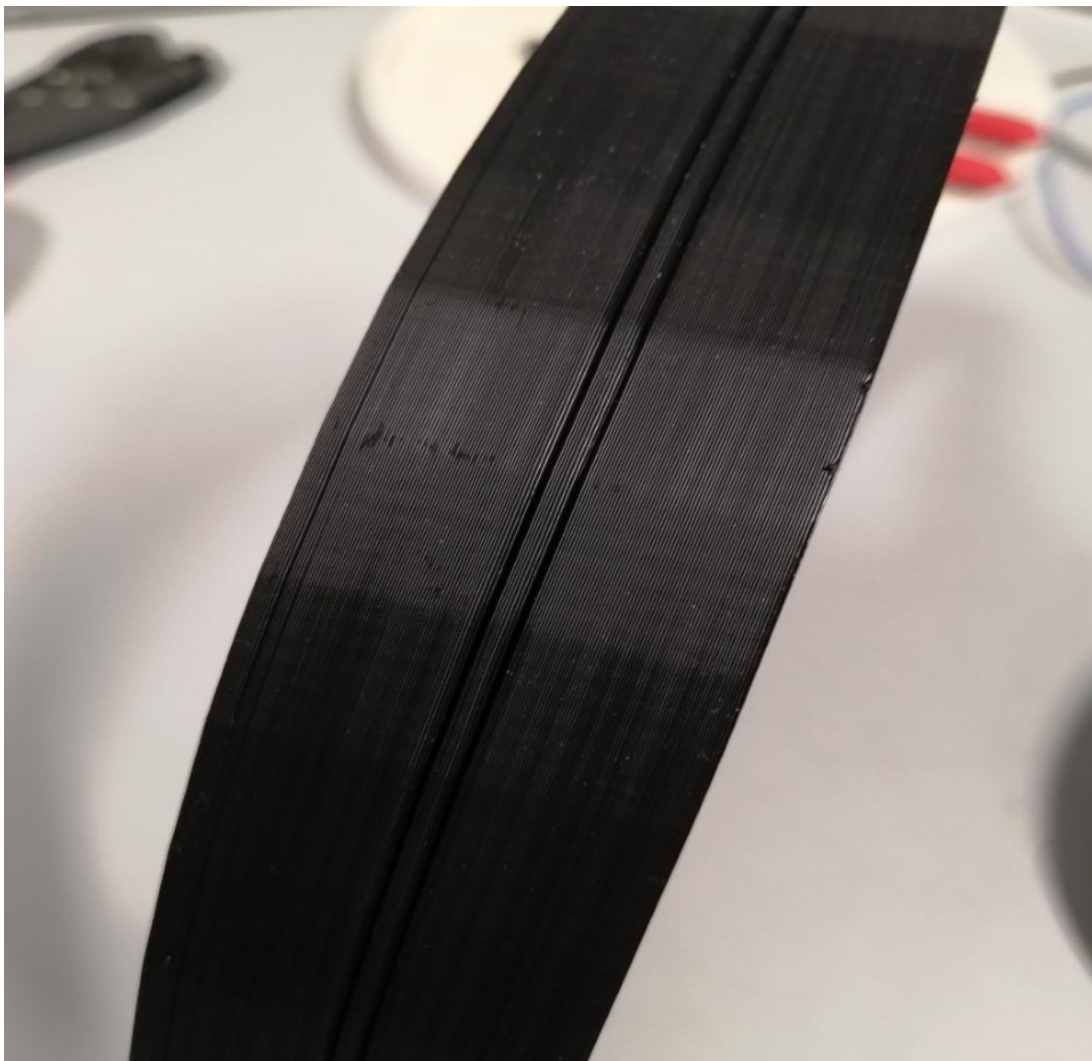
Valokuitukaapelikotelon/-muuntimen kiinnitys on toistaiseksi toteutettu vahvalla kaksipuolisella teipillä, mikä ei välttämättä ole se paras mahdollinen kiinnitystapa mutta toimiva ratkaisu nyt tässä tapauksessa. Kaapelikiinnikkeiden lisäksi suunnittelin myös muita projektissa tarvittavia kiinnikkeitä tarpeen ja käyttökohteen mukaan.

Painerunkojen sisälle asennettavien alumiinilevyille kiinnitettyjen laitteiden sekä akun tulisi pysyä paikoillaan robotin liikkua siinäkin tapauksessa, että robotti kääntyisi syystä tai toisesta väärinpäin. Tämän asia huomioon ottaen suunnittelin kummankin painerungon sisälle sopivat pannat, jotka kiinnittyvät alumiinilevyn reunaan.

Kumpaankin levyyn kiinnitetään kaksi kuvan (Kuva 25) mukaista panna, jotka on mitoitettu juuri ja juuri rungon sisähalkaisijaa pienemmäksi, jotta kokoonpano saadaan ujutettua sisään, mutta ne eivät sallisi kuitenkaan liian suurta sivuttaissuuntaista liikumavaraa laitteistolle. Suunnittelin pantoihin myös jonkinlaista lukitusmekanismia, jolla estettäisiin laitekokoonpanon pyörähtäminen ympäri painerungon sisällä, mutta hylkäsin tuon suunnitelman siitäkin syystä, että jo laitteiden oma paino on riittävä pitämään ne paikoillaan kovemmassakin pyöriyksessä.



Kuva 25. 3D-tulostetut pannat



Kuva 26. Pannan urat 0,5 mm kuparijohtinta varten

Jonkinlaisesta kaapelin tai ainakin johtimen kiinnikkeestä voidaan puhua myös tässä yhteydessä, sillä pannat eivät pelkästään pidä laitteita paikoillaan, vaan niillä on toinenkin hyvin tärkeä tehtävä. Ne toimivat myös painerunkojen kosteus/vuotoanturina.

Koska laitetta käytetään vedessä, jossa paine on 5–6 barin luokkaa on hyvin mahdollista, että jossain vaiheessa jostain syystä vettä saattaa päästä laitteen sisälle aiheuttaen vakavia vaurioita elektroniikkalaitteille. Myöskään kondenssiveden muodostumisen mahdollisuutta ei voi jättää huomioimatta. Tästä syystä on erityisen tärkeää saada tieto vuodosta/kosteudesta jo mahdollisimman varhaisessa vaiheessa, jotta tilanteeseen voidaan reagoida välittömästi.

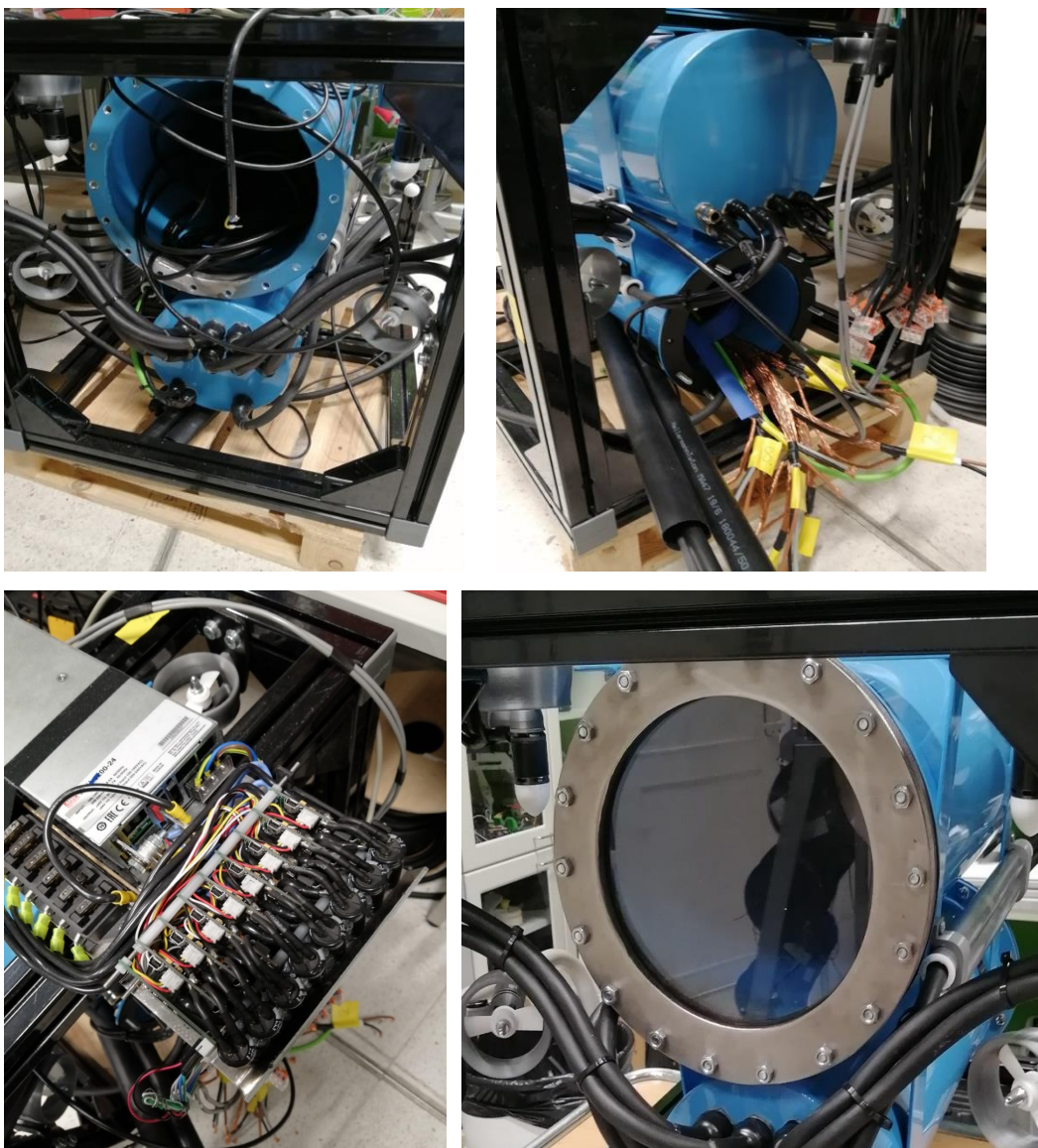
Kuvassa (Kuva 26) on pannassa nähtävissä rinnakkain kaksi syvyydeltään ja leveydeltään 1 mm uraa, joihin on kumpaankin porattu 1 mm reikä. Tuohon uraan asennetaan 0,5 mm² kirkas kuparilanka, joka tulee ulos tuosta 1 mm reiästä ja jatkuu johtimena kontrollerille. Kun vesi yhdistää nämä kaksi lankaa se antaa signaalin kontrollerille/tietokoneelle, josta lähtee välittömästi ilmoitus käyttäjälle. Käyttäjän reaktionopeudesta riippuu, miten nopeasti laite saadaan pintaan.

Mikäli väistämätön kuitenkin syystä tai toisesta tapahtuisi ja kaikki toiminnot menetetään, on suunnittelussa otettu huomioon se, että laite nousee itsestään pintaan. Mutta koska laitetta ei ole päästy vielä testaamaan vedessä, on tässä vaiheessa vaikea arvioida lisänosteen vaatimaa kellukkeiden määrää, jotta laitteesta saadaan lievästi kelluva.

Omat kiinnikkeensä tarvitsevat myös runkoon asennettavat paineanturit, siipiras vedennopeusanturi sekä nuo aiemmin mainitut kaikuluotaimen anturit, joiden suunnittely on tätä kirjoittaessa vielä kesken.

5 TULOKSET

Koska suunnittelin ja rakensin robottia (Kuva 27) varsinaisten opintojen ohella, siihen käytetty rakentelu-aika oli toisinaan melko rajallinen poislaskettuna kesäloman aikana suorittamani työharjoittelu projektin parissa. Aikataulun takia ei robotin testisukellusta ehditty tekemään ennen tämän opinnäytetyön valmistumista. Siitä huolimatta joitain yksittäisiä testauksia on kuitenkin tehty osa-alueittain, kuten muun muassa painerunkojen tiiviyskoe, yksittäisen potkurilaitteen testaus sekä potkurilaitteen syöttökaapelin tiiviyskoe, puhumattakaan ohjelmistopuolen testauksista ja simuloinneista.



Kuva 27. Kuvakokoelma laitteen nykytilasta

5.1 Tiiviys

Ennen varsinaista loppukokoonpanoa ja tulevaa sukellusta ajatellen laitteen painerungot haluttiin testata mahdollisten vuotojen havaitsemiseksi. Testaus suoritettiin liittämällä kumpikin painerunko vuorollaan vesijohtoverkoston, jossa on 5 bar paine. Testausta varten painerungon läpivientiholkkiin asennettiin metalliputki, johon kiinnitettiin vesiletku (Kuva 28). Vedellä paineistetut rungot olivat paineen alaisina useamman tunnin, jonka jälkeen ne voitiin todeta varmasti tiiviiksi.



Kuva 28. Ylemmän painerungon tiiviiden testaus



Kuva 29. Liitos vesihanaan



Kuva 30. Paineen mittaus

Vesiletkun toinen pää liitettiin vesihanaan ja väliin asennettiin vedenpainemittari ker-tomaan käytettävästä paineesta (kuvat 29 ja 30). Jo ensimmäinen testaus paljasti ra-kenteen heikon kohdan. Sen lisäksi, että tiivistemateriaaliksi valittu 2 mm Black Cold 978-C ei ollutkaan tarkoitukseen sopiva, niin myös laippojen kiinnitys vain kuudella pultilla oli riittämätön. Nämä kaksi tekijää yhdessä aiheuttivat runsaan vuodon jo en-nen kuin vesi oli edes kunnolla täyttänyt säiliön.

Korjaavana toimenpiteenä kiinnityspulttien määrää lisättiin kumpaankin painerun-koon. Ylempään tuli kolminkertainen ja alempaan painerunkoon kaksinkertainen määrä kiinnityspultteja. Samalla vanha tiivistemateriaali korvattiin 4 mm ETRA NBR Premium -tyyppisellä kumitiivisteellä. Näiden suunnitteluvirheiden korjausten jälkeen painetesti uusittiin.

Laippojen kiinnitys useammalla pultilla sekä uusi tiiviste toimivat edellistä testiä pa-remmin, mutta nyt havaittiin uusi ongelma. Kun säiliö täyttyi vedellä ja paine nousi 5 bariin huomattiin uusi vuotokohta ylemmän painerungon hitsaussaumassa. Vuoto-kohta oli tosin vain minimaalinen vuotaen noin pisaran minuutissa.



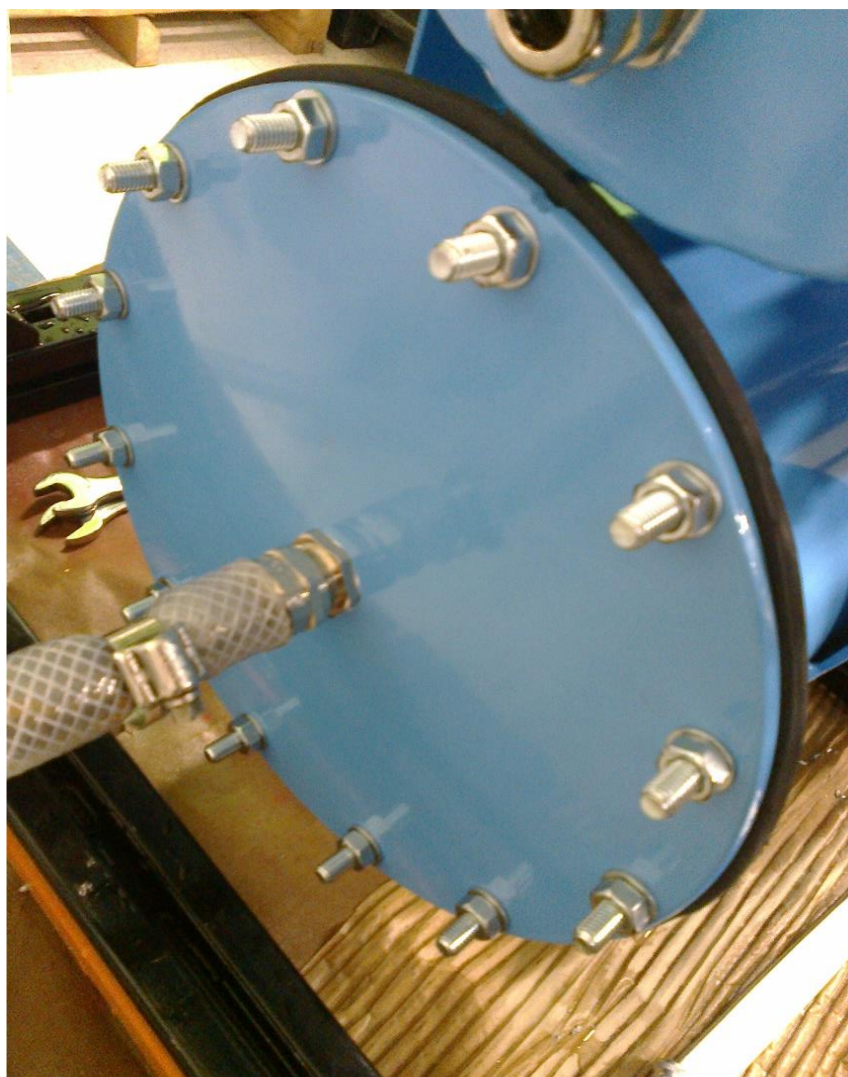
Kuva 31. Vuotokohta alhaalta ensimmäisen korjauksen jälkeen



Kuva 32. Vuotokohta ylhäältä ensimmäisen korjauksen jälkeen

Vuotokohdan korjaus ei onnistunut vielä ensimmäisellä kerralla, vaan uudella tiiviyskokeella huomattiin sen vuotavan edelleen. Kuvissa (kuvat 31 ja 32) on nähtävissä hitsaamalla korjatut kohdat, mutta myös edelleen jatkuva vuoto. Vuotokohta saatiin korjattua tiiviiksi vasta kolmannella kerralla viivästyttären painetestausta sekä rakentamista useilla päivillä, sillä tähän mennessä kasattu kokoonpano purettiin ja painerungot toimitettiin Porin Winnovaan korjattavaksi.

Kolmas painetesti tuotti viimein halutun lopputuloksen. Ja tässä vaiheessa pääsimme testaamaan myös alemman painerungon, joka todettiin tiiviiksi (Kuva 33).

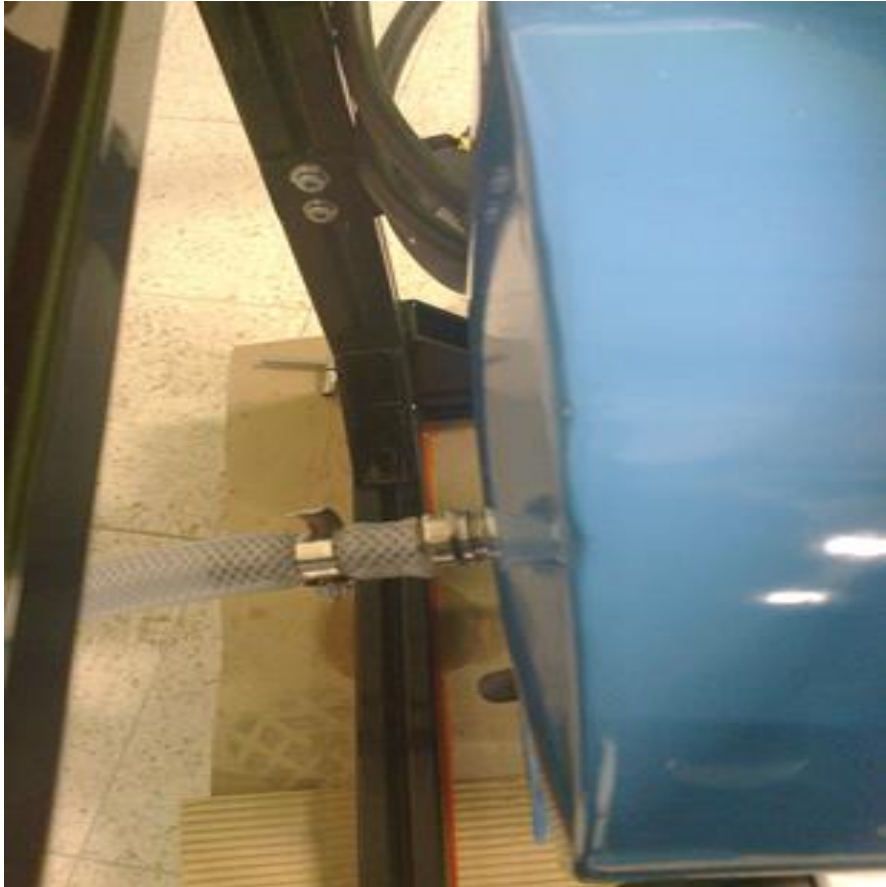


Kuva 33. Alemman painerungon tiiviiden testaus, joka suoritettiin samoin toimenpitein kuin ylemmän painerungon testauskin.

Oltuaan useamman tunnin paineen alaisina rungot todettiin vesitiiviiksi. Vedenpaine oli kuitenkin jonkin verran vaikuttanut painerunkojen rakenteeseen, joka näkyi selvästi päätylaippojen muodoissa. Paine oli pullistanut päätylaippoja (Kuva 34) niin ylemmässä kuin alemmassakin rungossa noin 10–16 mm verran aiheuttamatta kuitenkaan vuotoon johtavia vaurioita. Myöskään kaapeli- tai tässä tapauksessa paineveden läpivienneissä ei havaittu vuotoja.



Kuva 34. Ylemmän painerungon polykarbonaattilaipan (linssin) pullistumat painetestin jälkeen. Laippaa tukevan kauluksen puuttuminen ei kuitenkaan aiheuttanut testin aikana vuoto ongelmia.



Kuva 35. Ylemmän painerungon takapään laipan pullistumat painetestin jälkeen



Kuva 36. Alemman painerungon pullistumat painetestin jälkeen

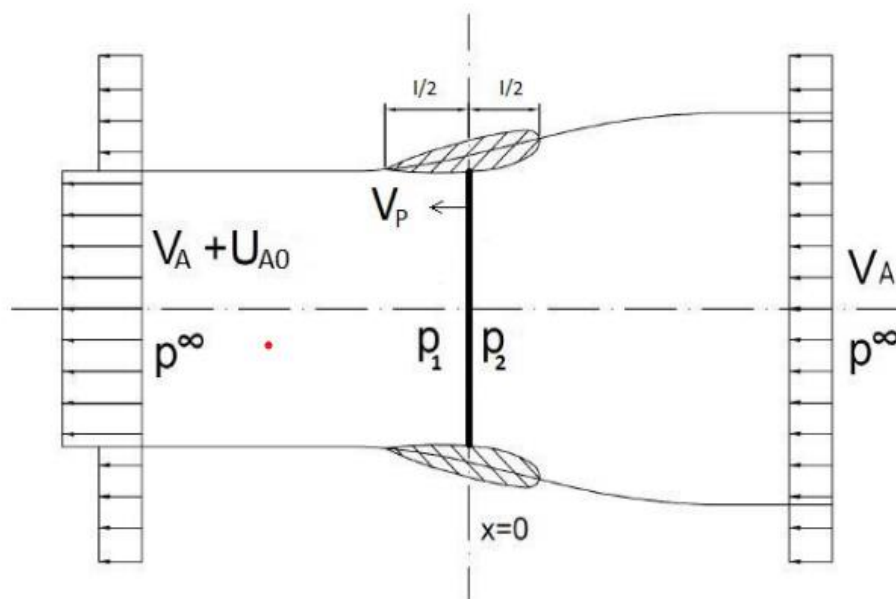


Kuva 37. Alemman painerungon laipan pullistumat painetestin jälkeen

Siitä huolimatta, että painetesti aiheutti pieniä muutoksia kuvissa (Kuvat 35–37) näkyviin painerunkojen laippojen muotoon, ei kummassakaan painerungossa havaittu vuotoa aiheuttavia vaurioita niin hitsaussaumoissa kuin läpivientiholkkien tiivistyksissäkään.

5.2 Potkurilaite

Potkurilaitteena robotissa toimii kahdeksan suulakepotkuria. Suulakkeen tehtävänä on pakottaa potkurin ympärillä oleva virtauskenttä määrättyyn muotoon. Tähän virtauskentän muutokseen liittyy työntöä, jonka suulake kehittää. (Matusiak 2005.)



Kuva 38. Suulakepotkurin yksinkertaistettu malli. (Matusiak, J. Laivan propulsio 2005).

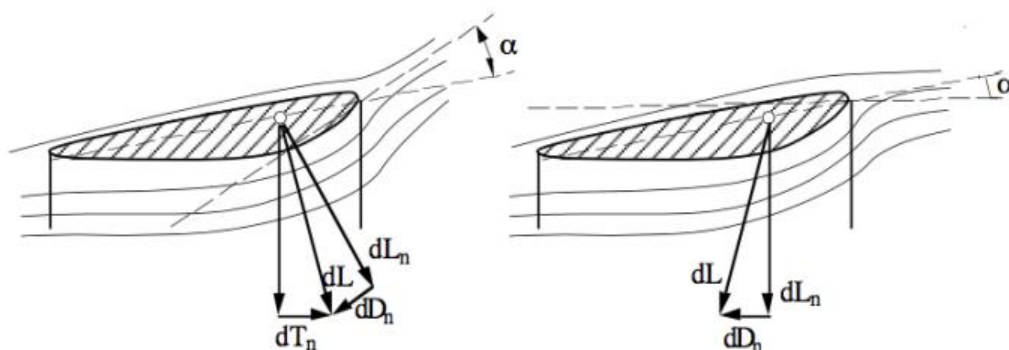
Suulakepotkurin periaate voidaan kuvata liikemäärän suhteilla. Suulakepropulsiosysteemi muuttaa potkurin ympärillä olevaa virtauskenttää, ja tämä muutos aiheuttaa joko negatiivisen tai positiivisen työntön, joka puolestaan riippuu suulakkeen profiilin muodosta. Tämä toimintaperiaate voidaan esittää suulakepotkuriteorialla. Kuva 38 esittää yksinkertaistetun suulakepotkurisysteemin, jossa p_∞ on paine kaukana kentässä ja p_1 sekä p_2 ovat paineet ala- ja ylävirrassa. $l/2$ tarkoittaa, että potkurin taso on sijoitettu keskelle suulaketta, ja V_p on nopeus potkuritasossa. (Matusiak 2005.)

Sekä suulakkeen että potkurin läpi kulkeva virtaus aiheuttaa propulsiosysteemin kokonaistyöntön T

$$T = \rho (VA + UA) A0UA0$$

Kaava 1. Suulakepotkurin kokonaistyöntö (Matusiak 2005)

Robotissa käytettävä suulakepotkurin tyyppi on kiihdyttävä suulake. Kiihdyttävä suulake kiihdyttää nimensä mukaisesti potkuria kohtaavaa virtausta. Aluksissa, joissa vaaditaan hyvää paaluvetoa ja potkuri on raskaan kuormituksen alaisena, kiihdyttävän suulakkeen käyttö on perusteltua. Tämän suulaketyypin käyttö voi tulla kyseeseen myös aluksessa, jossa potkurin halkaisija on niukasti rajoitettu. Kiihdyttävää suulaketta käytettäessä etenemisluvun tulee olla pieni tai jopa nolla, sillä nopeuden ollessa suuri, työntö muuttuu negatiiviseksi, ja siten suulake vastustaa potkuria sekä pienentää kokonaistyöntöä. (Matusiak 2005, 104–105.)



Kuva 39. Kiihdyttävän suulakkeen muoto ja siihen vaikuttavat tekijät. (Matusiak, J. Laivan propulsio 2005)

Kiihdyttävän suulakkeen profiili nähdään kuvasta (kuva 39) ja toiminta voidaan esittää virtausteknisesti nostovoiman synnyllä. Suulakkeen muoto aiheuttaa sen, että virtaus kiihtyy eli sen nopeus kasvaa suulakeprofiilin sisäpinnalla. Nopeuden suureudessa tulee paineen alentua Bernoullin yhtälön mukaan (Kaava 2). Suulakkeen ulkopinnoilla on siten suurempi paine ja sen vaikutuksesta syntyy noste alaspäin, sekä vastusvoimia

dLn ja dDn . Resultanttivoiman dL x-suuntainen vektori kuvaa suulakkeen työntöelementtiä dTn . Kokonaistyöntö muodostuu näiden työntöelementtien summana. Pyörteet saavat alkunsa potkurin navasta ja lapojen kärjistä. Suulaketta käyttämällä vähennetään lavan kärkivirtauksen häviöitä, jolloin suulakepotkurisysteemin kehittämä työntö ja momentti ovat suurempia samalla halkaisijalla sekä nopeudella liikkuvaan avopotkuriin verrattuna.

$$p + \frac{1}{2}\rho v^2 = \text{vakio} .$$

Kaava 2. Bernoullin yhtälö (Matusiak 2005)

Yhtä tällaisen moottorinohjaimen kytketyn suulakepotkurilaitteen toimintaa testattiin vesiastiassa, jonka virkaa toimitti 50 litran muovilaatikko. Sille ei rakennettu mitään kiinnikettä, joka tässä kohdin olisi voinut toisaalta olla tarpeellinen, vaan testi suoritettiin pitämällä laitetta käsin paikoillaan vesiastiassa. Potentiometristä säätämällä laitteeseen syötettiin jännitettä lisäämällä sitä vähän kerrallaan. Moottorin täyteen kierroslukuun 1700 rpm emme päässeet, sillä sen kiinnipitämisessä alkoi olla hankaluuksia jo pienemmilläkin kierroksilla. Selvää kuitenkin oli, että työntövoimaa neljällä eteen ja taaksepäin vievällä potkurilaitteella on riittävästi, samoin kuin myös niillä neljällä ylös ja alas liikuttavalla potkurilaitteellakin.

Potkurilaitteen virrankulutusta eri nopeuksilla ei tässä testissä mitattu. Tieto olisi ollut sikäli oleellinen laskettaessa akun kestävyysden kapasiteettia autonomisesti ajettaessa.

5.3 Kaapelit

Potkurilaitteiden jännitteensyöttökaapelien moottorinpuoleisten kaapelien päät tiivistettiin samalla SIKAFLEX 597 -saumasmassalla kuin läpivientiholkkien kierteet painerungoissa. Tämän lisäksi niihin asennettiin myös liimalla varustettu kutistesukka. Tällä rakenteella haluttiin varmistaa, että vesi ei pääse kulkeutumaan kaapelin läpi painerungon sisälle aiheuttaen vaurioita elektroniikalle.

Vastaavalla tavalla kuin painerunkojen testaus suoritettiin myös tälle kaapelin tiivistämiseen tarkoitetulle ratkaisulle tiiviyskoe. Tätä varten tehtiin kuvassa (Kuva 40) nähtävälle kaapelinpätkälle sama toimenpide kuin varsinaisille asennettaville kaapeleille, joita emme sellaisenaan halunneet käyttää testiin, koska vesi olisi tehnyt niistä käyttökelvottomia. Tiivistetty kaapelinpätkä kiinnitettiin vesiletkuun, avattiin hana ja seurattiin, oliko kehittämämme ratkaisu vesitiivis. Testin tulos oli yllättävän positiivinen.

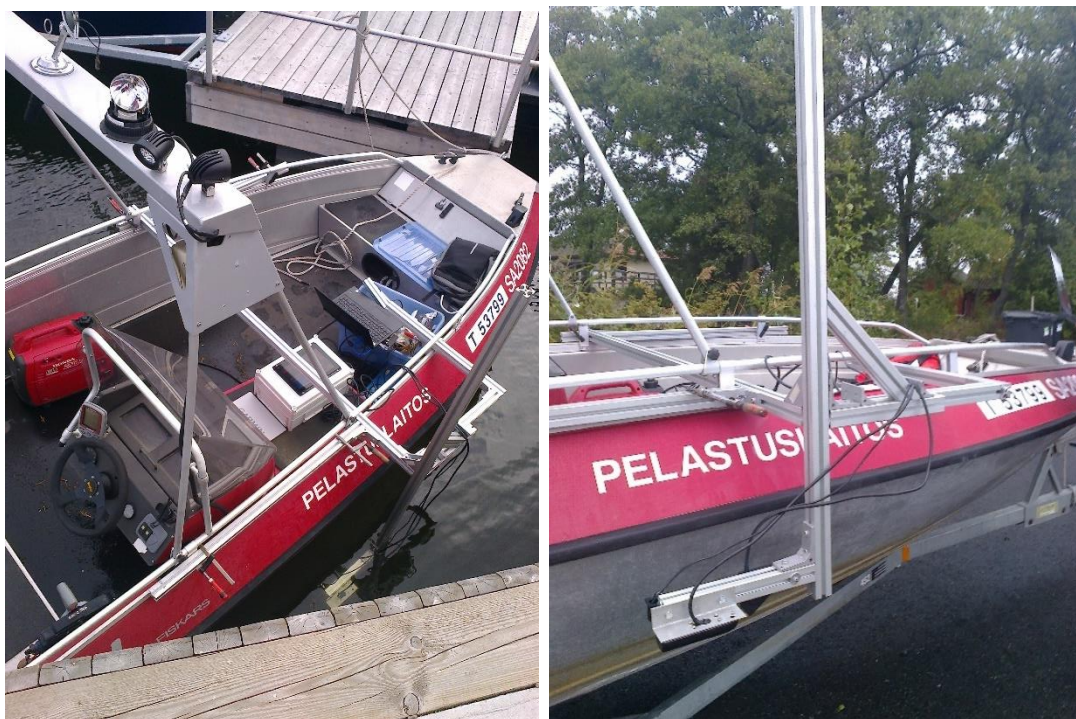


Kuva 40. Kuvakokoelma potkurilaitteiden jännitteensyöttö kaapelien tiiviyden testaus.

5.4 Kaikuluotain

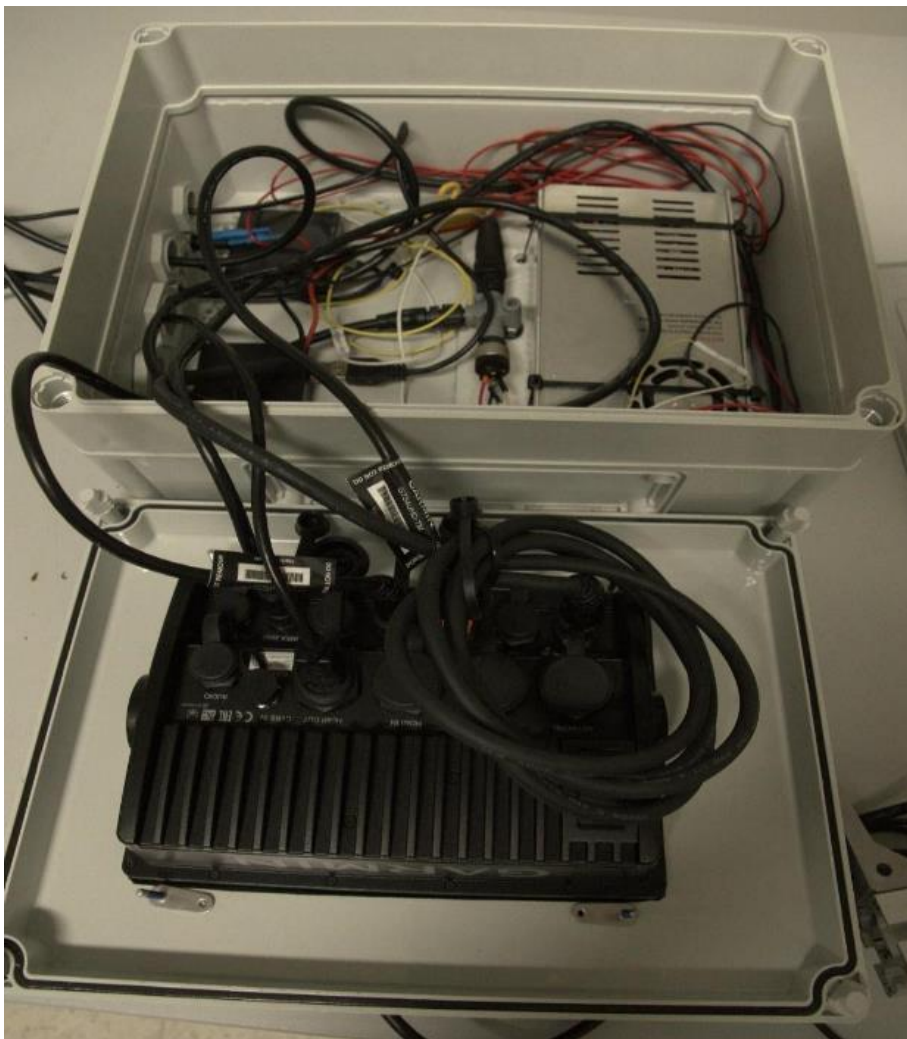
Osallistuin sukellusrobotin suunnittelun ja rakentamisen lisäksi myös datankeruuoperaatioon yhdessä Toni Aaltosen sekä Satakunnan pelastuslaitoksen Rauman yksikön sukellusryhmän kanssa. Tällä operaatiolla oli tarkoitus opetella käyttämään ja kalibroimaan kaikuluotainta ja testata antureiden ja väylien toimintaa. Datan keruu toteutettiin kiinnittämällä anturit veneeseen alumiiniprofiilista rakennetulla, tarpeen mukaan muokattavalla telineellä (Kuva 41) ja kerätty tieto tallennettiin kannettavalle tietokoneelle.

Koska robotin tehtävänä on tunnistaa ihminen vedessä, käytimme kuvauskohteena sukeltajaa, joka makasi meren pohjassa mahdollisimman monessa eri asennossa, kun ajoimme veneellä kohteen ohi tai yli. Testiajot kestivät useita tunteja ja sisälsivät useasta eri tulokulmasta tallennettuja kuvia. Kaikuluotaimella tallennettiin samaan aikaan kaikkiaan viisi eri kuvaa. Reaaliaikakuvaa veneen alta sekä edestä, kahden eri kameran tallentamaa sivukuvaa sekä viistokaikukuvaa. Kooltaan jokainen kuva on 531 x 500 pikseliä.



Kuva 41. Kuvakooste Rauman pelastuslaitoksen veneestä varusteltuna datankeräyslaitteistolla

Datankeräyslaitteisto koostui kuvan (Kuva 42) mukaisesta kokoonpanosta. Tämä piti sisällään ROS-ohjelmiston (Robot Operating System) sisältävän kannettavan tietokoneen, johon käytettävät laitteet kytkettiin usb-väylien välityksellä. Kokoonpano sisältää oman virtalähteen (laatikossa oikealla), NMEA-muuntimen (vasemmalla ylhäällä), sekä Inertia-mittauksen (vasemmalla alhaalla). Laatikon kanteen on kiinnitetty kaiku-
luotainyksikkö. Virtaa laitteille syötettiin aggregaatilla.



Kuva 42. Datankeräyslaitteisto

Tämän testin tuloksena datan siirto tietokoneelle toimi luotettavasti ja ilman ongelmia jopa monen tunnin käytön jälkeen. Kaikuluotaimen asetukset mahdollisimman hyvään kuvanlaatuun ja kohteen tunnistamiseen saatiin myös kohdalleen.

6 JATKOKEHITYS

Koska robottia ei ole vielä päästy testaamaan sen oikeassa elementissä, eli vedessä, on hieman hankalaa arvioida sen käyttäytymistä sekä toimintaan vaikuttavia ja muutoksen vaativia tekijöitä tässä vaiheessa. Suunnittelun ja rakentamisen aikana on jo muutamia huonoksi havaittuja ideoita tehty uudelleen työn edetessä. Perusasiat niin ohjelmiston kuin rungon rakenteen sekä laitteistojen osalta on enimmäkseen saatu valmiiksi. Tarkoitus olisi nyt saada rakennettua laite valmiiksi ja suorittaa testiajot, josta saatujen tulosten perusteella suunnitellaan laitteen jatkokehitystä sekä parantelua. Jotain jatkokehityksen aiheita kuitenkin on ja tässä kappaleessa niistä tärkeimmät.

6.1 Potkurilaitteet

Potkurilaitteiden jatkokehitys on yksi asioista, johon tulee kiinnittää huomiota. Potkurilaitteet tulisi suojata myös niin, ettei merikasvit ja muut levät pääse sotkeutumaan potkureihin aiheuttaen vaurioita. Yksinkertaisin toimenpide olisi kiinnittää potkuria ympäröivään suulakkeeseen jonkinlainen suojaverkko, niin potkurin eteen kuin taaksekin.

Laitetta ylös ja alaspäin liikuttavien potkurilaitteiden paikoitus ja kiinnitys tulisi suunnitella uudelleen. Niiden nykyinen sijoitus häkin yläosassa suojaa niitä hyvin osumilta, mutta ongelmaksi saattaa muodostua se, että robotin noustessa pintaan potkurilaitteet eivät välttämättä enää kosketa vettä. Tämä tosin on paljolti riippuvainen myös siitä, miten laite kelluu.

6.2 Kellukkeet

Jotta täydellisen laitevian sattuessa robotti ei painuisi pohjaan, on siihen asennettava myös kellukkeet, jotka nostavat laitteen pintaan. Koska laitteen lopullista painoa on vaikea vielä tässä vaiheessa laskea tai edes arvailla, on tarvittavien kellukkeiden kokoa hankala mitoittaa.

6.3 Manipulaattori

Robotin pääasiallinen tehtävä on kaikuluotainkuviin perustuva tunnistaminen. Suunnitelmissa oli myös mahdollisen manipulaattorin asennus, jonka myötä laitteen käyttökapasiteetti kasvaa. Manipulaattori toimisi tartuntavälineenä, jota ohjataan etänä. Manipulaattorilla voidaan poimia esineitä, tarttua kohteisiin sekä liikuttaa niitä. Manipulaattorin ohjaus tapahtuu käyttäjän tietokoneeseen liitetyllä ohjaimella ja sähkömoottoreita liikuttavat ohjauksen komennot suoritetaan esimerkiksi Arduino Uno -mikrokontrollerin avulla.

6.4 Kamera

Robotin ylempään painerunkoon on jätetty tilaa myös mahdollisen tallennettavaa reaaliaikakuvaa lähettävää kameraa varten. Siitä syystä sulkevana kantena on umpinaisen alumiinilaipan sijaan käytetty kirkasta 10 mm polykarbonaattilevyä. Kameran tulisi olla ohjattavissa näyttämään suoraan eteenpäin, mutta myös viistosti alaspäin. Sitä pitäisi voida myös zoomata sekä tarkentaa etäohjauksen avulla. Kameran asennuksen lisäksi pitäisi asentaa myös valot robotin runkoon. Valoja miettiessä tulisi kiinnittää huomio tehokkuuteen, mutta myös pieneen virrankulutukseen.

Lopuksi voidaan vielä todeta huomion kiinnittäminen eri työvaiheisiin ja työvaiheiden järjestykseen. Esimerkiksi painerunkojen tiiviyskoe olisi ollut järkevämpää suorittaa ennen osien jauhemaalausta samoin kuin kaikkien kaapeliläpivientien vaatimien reikien porauksen ja kierteytyksenkin. Nyt tuo maalipinta kärsi vaurioita suoritettujen korjaushitsausten ja läpivientireikien työstön seurauksena. Mutta koska koulujen sulkeminen kesän ajaksi olisi siirtänyt toimenpiteen vasta syyslukukauden alkuun päädyimme ratkaisuun, että osat maalataan ennen muita toimenpiteitä.

LÄHTEET

Helkama Bika Oy. Kaapelit. Haettu 15.9.2021.

<https://helkamabika.com/Helkama-Bika-Marine-and-offshore-cables.pdf>

Matusiak, J. Laivan propulsio. Haettu 11.10.2021.

<https://docplayer.fi>

Ocean Explorer. What is an AUV? Haettu 18.8.2021

<http://oceanexplorer.noaa.gov/facts/auv.html>

Ole Herman thruster plans. Haettu 5.9.2021.

<https://www.dropbox.com/sh/35tuy8w8eqgbqmj/AABvNNS-gETQgje4NH3BPpjgKa?dl=0>

Rotor Drive 1700kv 450 Series brushless dc motor. Haettu 13.9.2021.

<https://www.amazon.co.uk/HobbyKing-Rotor-Drive-1700KV-Booole/dp/Bo1EE0W6KS>

Samsung INR 18650-35E Li-Ion akku, Haettu 13.11.2021

<https://akkula.fi/samsung-inr-18650-35e-li-ion-akku-3450-mah-8-a-ei-suojapiiriä/>

Schmidt Ocean Institute. Autonomous underwater vehicle (AUV). Haettu 18.8.2021.

<https://schmidtocean.org>

University of Florida. 2016. Subjugator. Haettu 12.8.2021

http://subjugator.org/?page_id=2661

Valokaapelit tele- ja tietoverkossa. Haettu 19.9.2021.

<http://www.elisanet.fi>

Kuva 1. Schmidt Ocean Institute. Autonomous underwater vehicle (AUV).

<https://schmidtocean.org>

Kuva 2. University of Florida. 2016. Subjugator.

http://subjugator.org/?page_id=2661

Kuva 4. Minitec Framing Systems LLC

<https://www.minitecframing.com>

Kuva 7. Garmin kaikuluotaimet.

<https://www.marinea.fi>

Kuva 15. Ole Hermanin thrusteri.

<https://www.dropbox.com/sh/35tuy8w8eqgbqmj/AABvNNS-gETQgje4NH3BPpjgKa?dl=0>

Kuva 17. Potkurilaitteen moottori.

<https://www.amazon.co.uk/HobbyKing-Rotor-Drive-1700KV-Booole/dp/Bo1EE0W6KS>

Kuva 28. Suulakepotkurin yksinkertaistettu malli.

<https://docplayer.fi>

Kuva 39. Kiihdyttävän suulakkeen muoto ja siihen vaikuttavat tekijät.

<https://docplayer.fi>

LIITTEET

Liite 1. Sukelluslaitteen johdotukset.

