



TALLINNA TEHNICAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND
Mehaanika ja tööstustehnika instituut

KALAKASVANDUSTE VÕRKUDE PARANDAMISE TÖÖRIIST KAUGJUHITAVALE ALLVEEDROONILE

FISH CAGE NET REPAIRING TOOL FOR REMOTELY OPERATED UNDERWATER DRONE

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Mihkel Evard

Üliõpilaskood 191824MATM

Juhendaja: Toivo Tähemaa, teadur

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud.

Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

“26” mai 2021

Autor: Mihkel Evard

/allkirjastatud digitaalselt/

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

“26” mai 2021

Juhendaja: Toivo Tähemaa

/allkirjastatud digitaalselt/

Kaitsmisele lubatud

“.....” 2021

Kaitsmiskomisjoni esimees: Martin Eerme

/allkirjastatud digitaalselt/

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina, Mihkel Evard (sünnikuupäev: 09.04.1996)

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „Kalakasvanduste võrkude parandamise tööriist kaugjuhitavale allveedroonile”,

mille juhendaja on Toivo Tähemaa,

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

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

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

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

¹*Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil.*

/allkirjastatud digitaalselt/

26.05.2021

Mehaanika ja tööstustehnika instituut

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Mihkel Evard, 191824MATM
Õppekava, peeriala: MATM02/18 - Tootearendus ja tootmistehnika, 1 - tootearendus
Juhendaja(d): Teadur Toivo Tähemaa, +372 5091918
Konsultant: Timmu Tollimägi, juhatuse liige, Unsinkable Robotics OÜ,
timmu.tollim2gi@gmail.com

Lõputöö teema:

Kalakasvanduste võrkude parandamise tööriist kaugjuhitavale allveedroonile.
Fish Cage Net Repairing Tool for Remotely Operated Underwater Drone.

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Allveeroboti peamiste kitsaskohtade kaardistamine
2. Tööriista disainimiseks lähteülesande koostamine
3. Tööriista lahenduse disainimine

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Drooni kitsaskohtade kaardistamine	20.03.2021
2.	Lahendatava probleemi valimine ja lähteülesande koostamine	07.04.2021
3.	Lahendi disainimine ja tugevusarvutused	16.05.2021
4.	Magistritöö vormistamine	25.05.2021

Töö keel: Eesti **Lõputöö esitamise tähtaeg:** "26" mai 2021 a

Üliõpilane: Mihkel Evard "26" mai 2021 a
/allkiri/
Juhendaja: Toivo Tähemaa "26" mai 2021 a
/allkiri/
Konsultant: Timmu Tollimägi "26" mai 2021 a
/allkiri/
Programmijuht: Martin Eerme ".....".....20.....a
/allkiri/

SISUKORD

EESSÕNA	7
Lühendite ja tähiste loetelu.....	8
1. SISSEJUHATUS	9
2. ALLVEEDROONI VERSIOONID.....	10
2.1. Allveedrooni esimene versioon	10
2.2. Allveedrooni teine versioon.....	11
2.3. Allveedrooni teise versiooni kitsaskohtade kaardistamine.....	12
2.3.1. Kere disain ja mootorite paigutus	12
2.3.2. Universaalne tööriistade klamber	12
2.3.3. Kalavõrkude parandustööriist	12
2.3.4. Veekindlad pistikud	13
2.3.5. Akude kiirem vahetamine	14
2.3.6. Mikrobalansseerimine.....	14
2.3.7. Valgustid.....	14
2.4. Lahendatava kitsaskoha valimine	15
3. TEEMA AKTUAALSUS.....	16
4. OLEMASOLEVAD LAHENDUSED	18
4.1 Sarnastele toodetele väljastatud patendid	20
5. PARANDUSTÖÖRIISTA LÄHTEÜLESANDE KOOSTAMINE.....	22
6. PARANDUSTÖÖRIISTA DISAINIMINE	24
6.1. Parandustööriista kontseptsiooni valimine	24
6.1.1. Parandustööriista energiaallika valimine	24
6.1.2. Kinnituse põhimõtte valimine.....	25
6.2. Parandustööriista komponendid, materjalid ja tootmistehnoloogia.....	28
6.2.1. Paranduslapi disainimine	29
6.2.2. Klambrite disainimine.....	31
6.2.3. Paranduslape ümbritseva kaitsekorpuse disainimine.....	35
6.2.4. Tööriista ja roboti vahelise kinnituse disainimine	37
6.3. Kontrollarvutused	40
6.3.1. Alakoostude ujuvuste leidmine.....	40
6.3.2. Tugevusarvutused ning katsetused	41

6.3.3. Veerõhu mõju tööriistale	51
7. OMAHINNA ARVUTUS	53
8. EDASINE ARENDUS	55
KOKKUVÕTE.....	56
SUMMARY	57
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU	58
LISA 1. TÖÖRIISTAPOOLSE KINNITUSE JOONIS	62
LISA 2. KINNITUSTORU JOONIS	63
LISA 3. VAHELÜLI JOONIS	64
LISA 4. KAITSEKORPUSE JOONIS	65
LISA 5. KLAMBRI ALUMISE OSA JOONIS	66
LISA 6. TÖÖRIISTA KOOSTEJOONIS (leht 1/3).....	67
LISA 6. TÖÖRIISTA KOOSTEJOONIS (leht 2/3).....	68
LISA 6. TÖÖRIISTA KOOSTEJOONIS (leht 3/3).....	69

EESSÕNA

Magistritöö teema valik tehti konsulteerides allveerobotite arendaja Unsinkable Robotics OÜ meeskonnaga. Leiti, millised on ettevõttes antud hetkel suurimad tootearenduslikud väljakutsed ning valiti üks neist põhjalikumaks lahendamiseks. Töö valmimiseks vajalik lähteinfo koguti peamiselt Unsinkable Robotics OÜ meeskonnalt, valdkondlikest teadusartiklitest, valdkonnas pädevate institutsioonide ja ettevõtete avalikustatud uuringutest, tootjate kodulehtedelt ja valdkonna spetsialistidelt.

Töö autor tänab Unsinkable Robotics OÜ tegevjuhti ja juhtinseneri Timmu Tollimägi, kes oli abiks allikate otsimisel, prototüüpide katsetamisel ja magistritööle tagasiside andmisel. Samuti soovib autor tänada juhendajat Toivo Tähemaad, kelle kastist välja mõtlemise oskus on muljetavaldav.

Magistritöö raames kaardistati Unsinkable Robotics OÜ allveedrooni teise versiooni peamised kitsaskohad, valiti neist välja üks kriitilisem ning disainiti lahendus, mida saaks rakendada drooni kolmanda versiooni juures. Antud töö keskendub allveerobotile kalakasvanduste võrkude parandamise tööriista disainimisele. Nimetatud lahenduse lähteülesande olulisemaiks nõudeks oli asjaolu, et tööriist peab olema suuteline ühe sukeldumisega parandama mitu võrguauku.

Allveedroon, allveerobot, ROV, ROUV, kalakasvandused, kalavõrk, magistritöö.

Lühendite ja tähiste loetelu

den – denier, kiudude ja tekstiilide mõõtühik, 1 den = 1 g/9000 m

F_L – jõud, mis on vaja klambriks osutada, et see parandatava võrgulapi külge kinnitada

F_{LMAX} – maksimaalne jõud ühe klambri kohta, mida robot suudab kaheksale klambriks korraga parandatava võrgu külge kinnitamiseks rakendada

F_V – survevedru poolt avaldatav survejõud

F_{VMIN} – minimaalne survevedru poolt avaldatav survejõud (juhul, kui magasin on jäänud viimane võrgulapp)

F_T – jõud, mis on vajalik, et kinnitusklamber võrgu küljest roboti tagurdades lahti tõmmata

F_{TMAX} – roboti maksimaalne tõukejõud

g – raskuskiirendus

GRP – klaaskiuga tugevdatud polümeer/plastik (ingl k *Glass Reinforced Plastic*)

HDPE – kõrgtihedusega polüeteen

HPPE – kõrgtugev polüeteen

LEM – lõplike elementide meetod (ingl k *Finite Element Method*, FEM)

m – mass

MPa – megapaskal

N – njuuton

PA – polüamiid ehk nailon

PE – polüeteen

PES – polüester

PLA – polülaktiid

PMMA – polümetüül metakrülaad

PP – polüpropeen

R – vedru jäikus

ROUV – kaugjuhitav allveedroon (ingl k *Remotely Operated Underwater Vehicle*)

s – vedru siire

1. SISSEJUHATUS

Unsinkable Robotics OÜ on 2019. aastal asutatud Eesti idufirma, mis tegeleb kaugeltjuhitavate allveerobotite arendusega (*ROUV – remotely operated underwater vehicle*). Roboti peamised tegevusvaldkonnad on veealuste objektide tuvastus, vaatlus ja erinevad hooldustööd. Tööpaikadeks on näiteks sadamad, kalakasvandused, vrakid, veealused kaablid ning torujuhtmed. Ettevõtte peamiseks sihtturuks on Norra tööstusettevõtted, kuna sealne *offshore*-tööstus on üks Euroopa suurimaid ning seega on robotile potentsiaalseid rakendusi väga palju.

Ettevõtte erineb teistest konkurentidest selle poolest, et ta allveerobotid on kergemad, tarvitavad seega vähem energiat ning on modulaarsed. Modulaarsus tähendab antud juhul seda, et robotit on võimalik lihtsasti varustada iga erineva töö iseloomust tulenevate vajalike komponentide ja tööriistadega. Praeguseks on robotist Unsinkable Robotics OÜ meeskonna poolt välja arendatud ja lansseeritud kaks versiooni ning hetkel töötatakse kolmanda versiooni arendusega.

Käesoleva töö eesmärk on kaardistada allveeroboti teise versiooni peamised kitsaskohad, koostada ühe valitud kitsaskoha lahendamiseks põhjalik lähteülesanne ning leida võimalikult optimaalne lahendus nimetatud probleemile.

Antud magistritöö on üles ehitatud nii, et esmalt viiakse lugeja kurssi Unsinkable Robotics OÜ poolt väljalastud allveerobotite versioonidega, kaardistatakse roboti teise versiooni peamised kitsaskohad, mida soovitakse roboti kolmanda versiooniga parandada, ning valitakse üks kitsaskoht, mida töös põhjalikumalt lahendatakse. Seejärel kirjeldatakse täpsemalt, miks on nimetatud teema aktuaalne ning lahendamist väärt. Järgnevalt tuuakse välja hetkel olemasolevad alternatiivsed lahendused ja püstitatakse lahenduse disainimiseks põhjalik lähteülesanne, kus fikseeritakse lahendile peamised ootused ja piirid. Magistritöö kuues peatükk keskendub võimalikult optimaalse lahendi disainimisele, selle komponentide kirjeldamisele ning tugevusarvutuste läbiviimisele. Töö lõpus on toodud ka lahenduse omahinna analüüs ning kokkuvõtte peamistest ideedest, mida toote edasisel arendamisel rakendada.

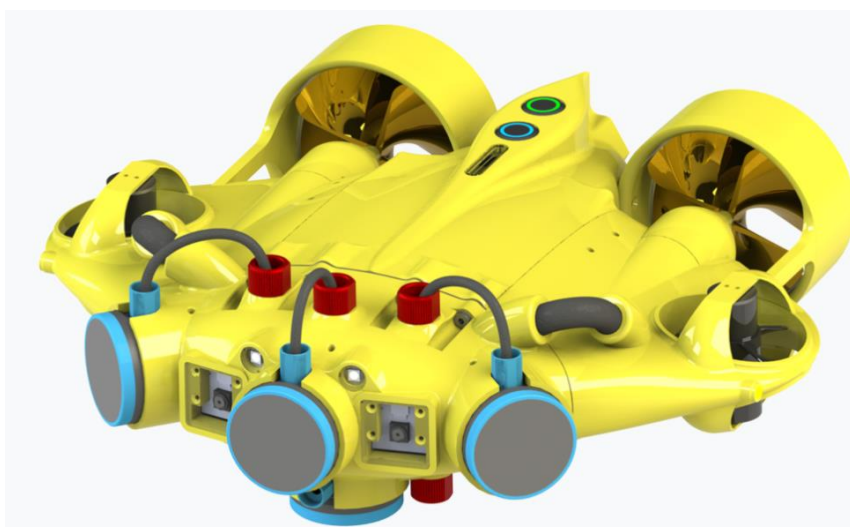
3D mudelite loomine ning lõplike elementide meetodiga läbiviidud analüüsid on teostatud *SolidWorks 2019* programmi kasutades.

2. ALLVEEDROONI VERSIOONID

Drooni versioonide kirjeldamisel on toetunud Unsinkable Robotics OÜ meeskonna poolt jagatud informatsioonile, samuti pärinevad toodud joonised ettevõtte oma kollektsioonist. Kitsaskohtade kaardistamisel on lähtunud nii ettevõtte enda kogemustest kui ka töö autori tähelepanekutest.

2.1. Allveedrooni esimene versioon

Unsinkable Robotics OÜ poolt välja töötatud allveeroboti esimese versiooni eesmärk oli teostada vee all peamiselt lihtsamaid vaatlusülesandeid. Selle jaoks oli seadme küljes kaks ettesuunatud kaamerat ning kolm sonarit. Lisaks oli seadmele paigaldatud ka üks allapoole suunatud sonar, mille eesmärgiks oli merepõhja ja seal olevate objektide tuvastamine. Juhtimine toimus *Arduino* mikrokontrolleri abil. Liikumiseks oli robotil kokku neli propelleriga mootorit, millest kaks vertikaalselt paigutatud liigutasid robotit vees üles-alla ja kaks horisontaalset edasi-tagasi. Mootorite pöörlemiskiiruste muutmisega sai robot ka ümber oma vertikaaltelje pöörata ja seega liikumissuunda muuta. Joonisel 2.1 on toodud roboti esimese versiooni 3D mudel.



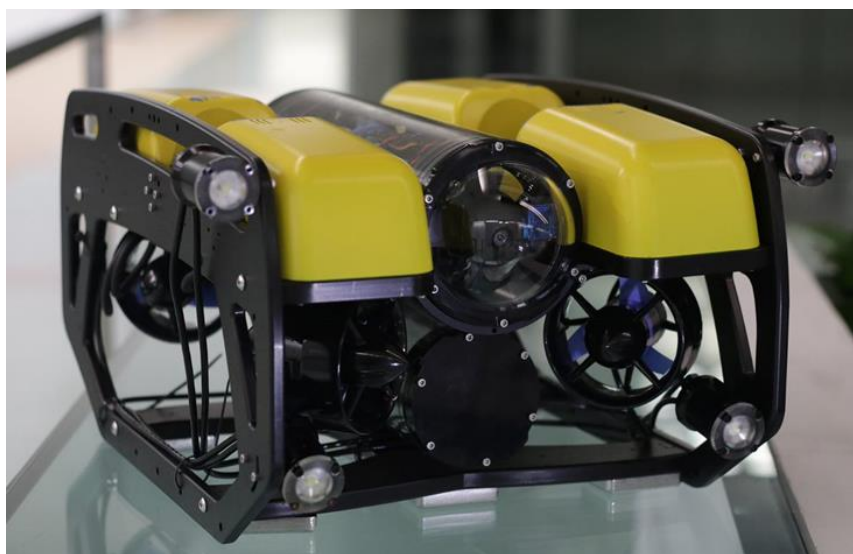
Joonis 2.1 Allveeroboti esimene versioon – 3D mudel

Roboti peamiseks puudusteks olid mootorite paigutusest tulenev piiratud liikumisvabadus, samuti väga väike kandevõime ning lühike tööaeg, mis tulenes sellest, et akude jaoks ei olnud robotis piisavalt ruumi. Lisaks, kuna seadme juures oli kasutatud mitmeid kihtlisandusmeetodiga toodetud detaile, siis ei olnud korpus piisavalt veekindel ning mikropraod põhjustasid lekkimist. Samuti ei olnud kasutatavad sensorid piisavalt võimekad ning põhjustasid juhtimisprobleeme.

Vigadest hoolimata oli esimene versioon tootearenduse osas vajalik etapp, et reaalselt robotit vee all testida ning järgmise versiooni arendamiseks lähteülesannet täiendada.

2.2. Allveedrooni teine versioon

Allveedrooni teise versiooni arenduseks osteti ettevõttele juba funktsionaalne allveerobot, millele viidi sisse mitmeid parandusi [1]. Seega said võrreldes esimese roboti versiooniga eemaldatud mitmed puudujäägid ning funktsionaalsust oluliselt edasi arendatud. Joonisel 2.2 on kujutatud roboti teine versioon.



Joonis 2.2 Allveeroboti teine versioon

Liikumiseks on seadmele paigaldatud neli horisontaalset propelleriga mootorit, mis kõik on paigutatud vertikaaltelje suhtes 45-kraadise nurga alla. Selline mootorite paigutus annab seadmele oluliselt juurde manööverdusvõimet. Vertikaalseks liikumiseks on robotil endiselt kaks mootorit. Nii juhtelektroonika kui akupakk on paigutatud veekindlate akrüülitorude või -kapslite sisse. Elektroonikakapslis on ka ettesuunatud kaamera, mida saab operaatori poolt üles-alla liigutada. Roboti opereerimine toimub kaldal olevast arvutist, mis on kaabli abil ühendatud roboti elektroonikakapslis oleva *Raspberry Pi* arvutiga. *Raspberry Pi* külge on liidestatud *Pixhawk Flight Controller*, mis on mõeldud reaalajas roboti küljes oleva riistvaraga suhtlemiseks. Selle abil kontrollitakse ka mootoreid.

Kuigi allveeroboti teine versioon on teinud suure tootearendusliku sammu edasi, on sellel siiski mitmeid puudusi, mida järgmise versiooni juures saaks parandada. Kolmanda versiooni arendamisel jätab ettevõtte aluseks roboti teise versiooni, kuid

fikseeritakse selle puudused ning püütakse parandada neist võimalikult mitmed. Seadme teise versiooni peamised probleemkohad kaardistati, need on toodud koos kokkuvõtivate kirjeldustega järgnevas peatükis.

2.3. Allveedrooni teise versiooni kitsaskohtade kaardistamine

2.3.1. Kere disain ja mootorite paigutus

Tulenevalt roboti disainist käitub seade hetkel veidi „närviliselt“ ning tekib ülejuhitavuse efekt. See on peamiselt põhjustatud mootorite tihedast omavahelisest paigutusest. Lisaks on hetkel puudu võimekus robotit kallutada edasi-tagasi suunas. Selline helikopterilaadne kallutamine on vajalik veealuste ülesannete täitmisel ning aitab tõsta manööverdamisvõimet. Probleemi lahendamiseks tuleks ümber disainida olemasolev kere ning mootorite paigutus, kallutamise võimaldamiseks tuleks lisada veel kaks vertikaalse teljega mootorit. Uuendatud kere puhul tuleks kaaluda ka hüdrodünaamika parendamist.

2.3.2. Universaalne tööriistade klamber

Ettevõtte üks eesmärk on suurendada roboti modulaarsust, mis tähendaks seda, et robotile oleks lihtsasti võimalik külge kinnitada erinevaid tööriistu või abivahendeid, mida parasjagu ülesande täitmiseks vaja on. Sellisteks tööriistadeks on näiteks eriotstarbelised sensorid või kaamerad, robotkäed, lõikurid, haaratsid jne. Selleks, et robotile selline laiendusvõimalus lisatööriistade näol anda, peaks robotil olema universaalne kinnituskoht või klamber, kuhu külge neid tööriistu kiiresti ja mugavalt kinnitada.

2.3.3. Kalavõrkude parandustööriist

Ettevõtte üks peamisi tööpaiku on kalakasvandused. Üks oluline funktsioon, mida soovitakse robotile juurde anda, on kalakasvanduste kalavõrkude parandustööriist. Kalakasvandustes kasutatakse kalade elamisterritooriumi piiramiseks veepõhja ankurdatud võrke. Neid võrke hooldatakse põhjalikult iga kalade kasvutsükli lõpus peale kasvanduse tühjendamist, mis juhtub lõhekasvatuse näitel iga 18 kuu tagant. Võrkude hooldamiseks võetakse võrgud veest välja, puhastatakse ja parandatakse. Hooldustest olenemata võib hoolduste vahelistel perioodidel tekkida võrkudesse auke, mis põhjustavad kalade kasvandusest põgenemist. [2][3][4]

Selleks, et võrkudesse tekkinud auke ajutiselt ehk kuni järgmise hoolduseni parandada, tuleb tuukritel sukelduda kuni mitmekümne meetri sügavusele, mis on ohtlik ning väga kulukas ettevõtmine. Siinkohal saavad allveerobotid oluliselt aidata ning selleks ongi vaja disainida ülesandeks sobilik tööriist, mis roboti külge kinnitub ning mille abil võrku tekkinud auke saab parandada.

2.3.4. Veekindlad pistikud

Roboti peamised elektroonikakomponendid asuvad elektroonikakapslis, mis on oma olemuselt isoleeritud akrüültoru. Akud asuvad eraldiseisvas sarnases akukapslis. Elektroonikakapsli, akukapsli ja muude eraldiseisvate elektroonikakomponentide vahel on veekindlad ühenduskaablid, mis on veekindlalt veetud läbi nimetatud kapslite otsaseinte. Need ühendused on rõhu- ja veekindlad, kuid probleeme võib nendega tekkida siis, kui mõnda komponenti, kaablit või akut on vaja välja vahetada. Sellises olukorras tuleb kapslitelt otsakorgid eemaldada, kaablid lahti ühendada ning siis tagasi kokku panna, mis võtab kokkuvõttes palju aega ning kulutab tihendeid, mis suurendab lekkeohtu. Nimetatud probleemi saaks lahendada veekindlate läbiviikude asendamisel veekindlate pistikutega. Sellisel juhul piisaks näiteks sensori väljavahetamiseks pistik lahti ühendada ning uus komponent tagasi ühendada, kaoks ära kapslite lahti võtmise vajadus. Nimetatud viisil oleks tegemist nii-öelda *plug&play* lahendusega.



Joonis 2.3 Allveeroboti elektroonika- ja akukapsli kaablite läbiviigud

Joonise 2.3 keskel ülemises osas on näha elektroonikakapslit ning alumises osas akukapslit. Kapslite küljes olevad punased osad on kaablite läbiviigud, mida soovitakse asendada veekindlate pistikutega.

2.3.5. Akude kiirem vahetamine

Hetkel on samuti üsna ajamahukas aku vahetamise protsess. Aku vahetamiseks tuleb akukapsel lahti keerata, aku seest eemaldada, kaabel lahti ühendada, uus akupakk sisse panna, kaabel tagasi külge ühendada ning kapsel taas sulgeda. Akukapsel on kruvitud roboti külge, kuhu ligipääs võib olla piiratud, kui robot kannab kaasas ka mõnda tööriista, näiteks täiendavat kaamerat. Akuvahetuse protsessi on võimalik oluliselt kiirendada ja lihtsustada. Lisaks eelnevas punktis nimetatud pistikutele, mis juba aitaksid akuvahetust kiirendada, muudaks protsessi kiiremaks ka see, kui aku tühjaks saades vahetada välja kogu akukapsel. Seega näeks protsess välja selline, et esmalt ühendatakse pistikust lahti akukaabel, seejärel ühendatakse kere küljest lahti akukapsel, asendatakse see uue täislaetud akut sisaldava kapsliga ning lõpuks taasühendatakse kaabel pistikusse. Sellise lahenduse jaoks tuleb akukapslit kere küljes hoidev ühendus disainida võimalikult kiiresti lahti-kinni ühendatavaks.

2.3.6. Mikrobalansseerimine

Robot peab suutma olla vees paigal ning heljuma. Vee tihedus ei ole alati samasugune ning sõltub nii vee temperatuurist kui soolsusest. Samuti ei ole konstantne roboti mass ja raskusjaotus, mis sõltub robotile paigaldatud tööriistadest. Allveeroboti balansseerimiseks kasutatakse hetkel ballastraskuseid, mis enne vette laskmist, võttes arvesse parajasti küljes olevat varustust või tööriistu, katseeksitusmeetodil külge kruvitakse. Seade on senikaua stabiilne, kuni tööriistu või abivahendeid ei liigutata. Kui näiteks roboti haarats merepõhjast mõne objekti haaraks, muutuks raskuskeseme asukoht ning robot ei oleks enam tasakaalus. Selleks, et uuesti robot tasakaalustada, peab pardal olema mingisugune süsteem, mis raskuskeseme asukohta muudaks – näiteks mahuti, millesse saab õhku tihendades merevett sisse pumbata ning vajadusel vastupidi välja pumbata.

2.3.7. Valgustid

Seadmehel on hetkel küljes neli leedvalgustit, mis võimaldavad kasutajal kaamerate vahendusel näha veealust olukorda. Kuna roboti töösügavusel sageli ei ole pinnalt pärinevat valgust kas üldse või on seda väga vähe, on valgustite roll väga oluline. Selleks, et valgustid ka vaadeldavat objekti piisavalt valgustaksid, peavad need olema kaamera ja objekti suhtes korrektselt paigutatud. Hetkel tekib pildikvaliteediga teatud olukordades probleeme, mis on põhjustatud just valgustite paigutusest. Üks oluline põhimõte on see, et valgustid peaksid olema kaamerast tagapool, et osa valgusest ei

jõuaks otse kaamerasse ja ei pimestaks ning vähendaks seetõttu oluliselt pildikvaliteeti. Teine printsiip valgustite paigutuses on see, et mida rohkem eemal valgustid kaamerast on, seda ühtlasemalt on objekt valgustatud ning lihtsamini tuvastatav selle kuju. Seda seetõttu, et valgus peegeldub õhumullidelt ning vees hõljuvalt orgaanikalt tagasi ning tagasipeegelduv valgus pimestab kaamerat ning põhjustab ülevalgustamist. Valgustite laiali ajamine leevendaks selle efekti mõju. Probleemi lahendamiseks tuleks paigutada valgustid kaamera suhtes sobivalt ning rohkem üksteisest eemale.

2.4. Lahendatava kitsaskoha valimine

Käesolev töö lahkab põhjalikumalt kalavõrkude parandamise tööriista temaatikat. Autor on põhjalikumaks lahendamiseks võtnud selle teema, kuna see on ettevõttele hetkel üks suurimaid takistusi kliendibaasi laiendamiseks ning seega vajalik praeguses arenguetapis esmajärjekorras lahendada. Lisaks aitab tööriista konstrueerimine kaasa ettevõtte eesmärgile muuta robot enam modulaarsemaks. Tööriista disainimine valiti teemaks ka seetõttu, et antud probleem on võimalik lahendada eraldiseisvalt roboti ülejäänud kitsaskohtade lahendamisest, mis magistritöö mahupiirangut arvestades ei oleks võimalik.

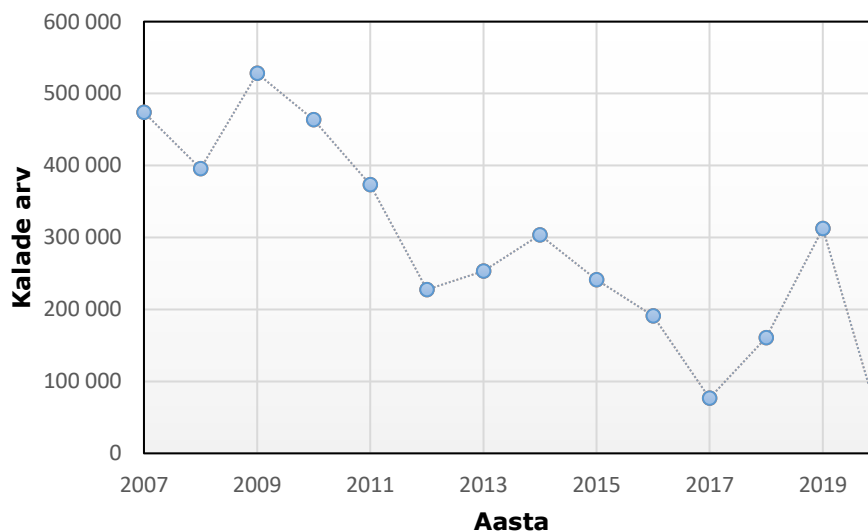
Esmalt kirjeldatakse, miks selline tööriist vajalik on, milliseid funktsioone peab see täitma ning määratletakse probleemi lahendamiseks lähteülesanne. Seejärel disainitakse nõuetele vastav ning võimalikult optimaalne lahend.

Kuna ettevõtte peamine sihtturg on Norra kalakasvandused, kus peamiseks kalaliikideks on atlandi lõhe ja vikerforell [5], siis on ka magistritöö keskendunud peamiselt Norra kalakasvanduste ja nende konkreetsete kalaliikide eripäradele.

3. TEEMA AKTUAALSUS

Roboti üheks peamiseks potentsiaalseks tegevuspiirkonnaks on kalakasvandused, kus teostatakse veealust vaatlust eesmärgiga jälgida võrkude seisukorda ning tuvastada võimalikke probleeme. Kalakasvandustele on suur probleem võrkudesse tekkinud augud, mille kaudu kalad farmist põgenevad. Kalade põgenemine ei ole mitte ainult finantsiline kulu kasvatajatele, vaid ka potentsiaalne oht ümbrisevale veekeskkonnale, kuna kasvandusekalad võivad võõrliigina levitada haigusi, parasiite ning põhjustada eri liikide ristamist. [6][7]

Statistika näitab, et aastatel 2007-2020 on Norra kalafarmidest põgenenud keskmiselt ca 290 000 kala aastas. Võttes arvesse vaid atlandi lõhe, on see arv ca 185 000 kala aastas. Põgenenud kalade kogust aastate lõikes väljendab graafik, mis on toodud Joonisel 3.1. Arvestades, et kõiki juhtumeid ei raporteerita, on reaalne kalade kogus veelgi suurem. [8]



Joonis 3.1 Põgenenud kalade arv Norra kalakasvandusest aastatel 2007-2020

Võttes aluseks atlandi lõhe turuhinna ajaloo, ulatub kalakasvatavate kahju keskmiselt üle kahe miljoni euroni aastas [9]. Kalkulatsioonis on eeldatud põgenenud kala keskmiseks kaaluks 2,5 kg [10][11][12]. Arvutuses ei ole arvesse võetud fakti, et osa kaladest püütakse hiljem siiski ka kinni, kuna kalade kinni püüdmine põhjustab ettevõtjatele omakorda kulusid ning kalade põgenemise eest määratakse kasvatajatele ka trahve. Nimetatud kahju suurus on välja toodud vaid atlandi lõhe puhul, mistõttu lisandub sellele ka teiste kalaliikide põgenemisest tekitatud kahju. Kalade põgenemise statistikat ja sellest tekkinud finantsilist kahju on kajastatud Tabelis 3.1 [8][9].

Tabel 3.1 Norra kalakasvandustest põgenenud kalade poolt põhjustatud finantsiline kahju

Aasta	Lõhe hind (EUR/kg)	Põgenenud kalu (tk)	Põgenenud lõhed (tk)	Lõhede osakaal	Kahjusumma lõhedest (€)
2007	3,21	473 831	303 275	64%	2 433 782
2008	3,22	395 597	112 861	29%	908 531
2009	3,53	528 060	195 407	37%	1 724 467
2010	4,66	463 820	306 722	66%	3 573 311
2011	4,1	373 368	367 246	98%	3 764 272
2012	5,56	227 527	38 199	17%	530 966
2013	5,07	253 384	198 182	78%	2 511 957
2014	4,82	303 761	287 100	95%	3 459 555
2015	4,7	241 469	156 993	65%	1 844 668
2016	6,8	190 844	127 825	67%	2 173 025
2017	6,54	76 587	17 187	22%	281 007
2018	6,33	160 779	159 105	99%	2 517 837
2019	6,01	312 486	287 663	92%	4 322 137
2020	5,2	44 741	43 364	97%	563 732
Kokku					30 609 246
Keskmine					2 186 375

Kalade põgenemise suurimaks põhjuseks on aukude tekkimine võrkudesse. Augud võivad aastate jooksul tekkida mereloomade hammustuste tulemusena, tormide käigus, paatide ja muude objektidega kokkupõrkel või võrkude sisse-välja tõstmisel. Seega saaks võrgus olevate aukude õigeaegne parandamine ennetada tekkivatest kahjudest suure osa. [6]

4. OLEMASOLEVAD LAHENDUSED

Unsinkable Robotics OÜ ning nende Norra partnerite sõnul kasutatakse peamiselt kalavõrkude aukude parandamisel tuukrite abi. Tuukrite kasutamine on väga kulukas, kuna vajab spetsiaalsete oskustega sertifitseeritud tööjõudu. Sellise teenuse hind jääb ettevõtte kogemusel Norras suurusjärku 200 €/h. Arvestades, et võrkude hooldust on vaja teha igapäevaselt ning see vajab üldjuhul ohutuse tagamiseks vähemalt neljaliikmelist meeskonda, moodustab võrkude hooldus märkimisväärse osa kalafarmi kuludest. Selline töö on ka võrdlemisi ohtlik arvestades, et kalafarmide sügavus on kuni 50 meetrit [13].

Kalafarmide võrkude hooldamiseks kasutatakse ka allveeroboteid. Peamiselt on selliste dronide ülesandeks vaadelda võrke ning leida võimalikke kahjustusi. Lisaks vaatlusrobotitele on olemas ka puhastusrobotid, mis tavapäraselt lastakse trosside abil paadilt vette, kus see mööda kalavõrku edasi „sõidab“ ning võrku orgaanilisest materjalist puhastab.

Kalavõrkude aukude parandamiseks on robotiseeritud lahendusi vähe. Peamised turul kättesaadavad allveerobotid, mis suudavad ka parandada võrgus olevaid auke, on toodud Tabelis 4.1. Autor märgib, et kõikide tabelis toodud lahenduste puhul on eelduseks ka allveeroboti enda olemasolu, kuhu külge parandustööriist kinnitatakse. Seejuures roboti enda maksumust lahenduse hinna sisse ei arvestatud.

Tabel 4.1 Olemasolevate lahenduste võrdlus

Mudel	Plussid/miinused	Hind
Deep Trekker Net Patch Kit – DTG3 [14][15]	+ Suhteliselt kiire lapi kinnitamine - Kulukas - Üks lapp sukeldumise kohta - Ajutine lahendus, vajab tuukreid	Ca 2100 €, mis sisaldab ühe augu parandamiseks vajalikku lappi
ROVEEE Fish Net Repair [16][17]	+ Suhteliselt kiire lapi kinnitamine - Üks lapp sukeldumise kohta - Puudulik vastupidavus hoovustele ja lainetele	Info puudub
Sperre Fish Net Sewing Machine [18][19]	+ Suudab ühe sukeldumisega parandada mitmeid auke + Ei vaja tuukrite sekkumist - Väga suurte dimensioonide ja kaaluga	Ca 18 000 €

Deep Trekker Net Patch Kit – DTG3 puhul on tegemist ajutise augu lappimise lahendusega. Tööriist haarab auku ümbritsevast võrgust ning klammerdab paranduslapi ülemise ja alumise serva võrgu külge. See hoiab augu mõneks ajaks kindlustatuna, kuid

teatud aja jooksul peavad tuukrid auku siiski põhjalikumalt parandama. Joonisel 4.1 on näha Deep Trekker DTG3 allveerobotit, millele on külge kinnitatud võrguparandamise lapp.



Joonis 4.1 Deep Trekker Net Patch Kit – DTG3

Sperre Fish Net Sewing Machine on tööriist, mis on võimeline võrkudesse tekkinud auke kinni õmblema. See tähendab, et ühe sukeldumisega on võimalik parandada mitmeid auke, kuna seade ei pea tulema pinnale lappimismaterjali täiendama. Küll aga on tööriist oma mõõtmetelt väga suur – 1520x1420x500 mm ning mass on ca 56 kg. See tähendab, et tööriist vajab opereerimiseks robotit, mille kaal on vähemalt 100 kg. Joonisel 4.2 on näha Sperre võrguõmblemise tööriist, raami materjaliks on roostevaba teras.



Joonis 4.2 Sperre võrgu parandamise tööriist

ROVEEE Fishing Net Repair lahenduse kohta on avalikult kätte saada võrdlemisi vähe informatsiooni. Suure tõenäosusega on tegemist samuti ajutise augu lappimise lahendusega. Võrk parandatakse plastvõrest lapiga, lapp kinnitub võrgu külge plastist klambritega. Antud lahendus sobib rahulikus vees olevate võrkude parandamiseks ning pole täpsemalt teada kui suurele lainetusele ning hoovustele lapid vastu peavad, kuna lainetus tekitab jäigas lapis suuri pingeid. Samuti ei ole teada lahenduse maksumus. Toote 3D mudel on nähtav Jooniselt 4.3.



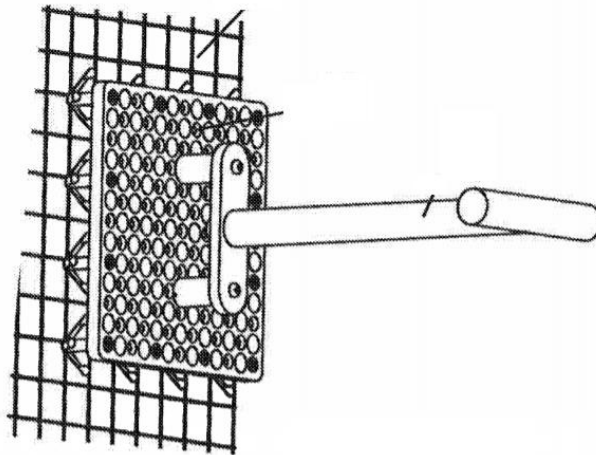
Joonis 4.3 ROVEEE võrgu parandamise tööriist

Kõik kolm väljatoodud lahendust töötavad mõnevõrra erineva printsiibi alusel. Deep Trekkeri tööriist haarab võrgust ning klammerdab võrgulapi eraldi ajami abil, Sperre seadeldis õmbleb tekkinud ava kinni ning Roveee võrgulapp kinnitatakse spetsiaalsete klambrite abil täismehaaniliselt kalavõrku rammides.

4.1 Sarnastele toodetele väljastatud patendid

Töö käigus viidi läbi otsing sarnastele toodetele väljastatud patentide osas. Tuvastati kaks kehtivat patenti, mis seonduvad kõige enam kalavõrkude parandamise tööriista temaatikaga.

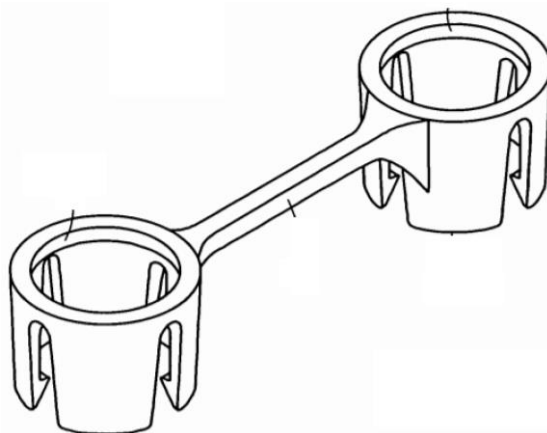
Patent number WO2015147650A1 on 2015. aastal väljastatud Norra ettevõttele STM MASKINERING AS. Patenteeritud on kalavõrgu parandamise tööriist, mille tööpõhimõtte kohaselt asetatakse vardalaadse elemendi otsas olev perforeeritud plaat võrguauku kohale. Plaat kinnitub võrgu külge ankrualaadsete kinnituselementidega, mis paigalduse käigus lükatakse läbi võrguaukude, seejärel eemaldatakse varras plaadi küljest. [20]



Joonis 4.4. Patenteeritud lahendus WO2015147650A1

Joonisel 4.4. on nähtav patenteeritud lahenduse skemaatiline selgitus, kus on näha nimetatud perforeeritud plaati, ankrulaadseid kinnituselemente ning varrast.

Ameerika Ühendriikides on 2013. aastast patendiga number US8615851B2 kaitstud ka toode, mille tööpõhimõte on ühendada kaks kõrvuti olevat kalavõrgu sõlme. Antud seade on kasulik juhtudel, kui purunenud on näiteks üks nõor võrgu silmuses. Sel juhul paigaldatakse jäik ühenduslüli üle purunenud võrgunööri selliselt, et see haarab kahest kõrvuti olevast sõlmekohast fikseerides sellega purunenud võrgu. Patent on väljastatud ettevõttele Foster-Miller Inc. [21]



Joonis 4.5 Patenteeritud lahendus US8615851B2

Joonisel 4.5 on toodud kõnealune lahendus. Jooniselt on näha jäika elementi, mille mõlemad otsad kinnituvad võrgu sõlme kohale ning sellega fikseerivad tekkinud ava ning ei lase sellele edasi rebeneda.

5. PARANDUSTÖÖRIISTA LÄHTEÜLESANDE KOOSTAMINE

Kalavörke puhastatakse põhjalikult peale igat kalade kasvutsükli, mis on atlandi lõhe puhul kuni 18 kuud [2][3][4]. Siis tõmmatakse võrgud veest välja, puhastatakse ja parandatakse. Seega peaks arendatava tööriista puhul parandatud võrguosa tööiga olema vähemalt 18 kuud. Selle aja jooksul ei tohi kinnitus lahti tulla, laguneda ega eritada ohtlikke materjale. Paranduslahendus peab olema veekindel, suutma hoida oma kvaliteeti veealuse rõhu ja soolase merevee tingimustes. Töös on eeldatud, et kalafarmid ulatuvad maksimaalselt kuni 50 m sügavusele.

Kalafarmide võrkude silmuseid on üldjuhul kahte tüüpi – ruudukujulised ja heksagonaalsed. See, millist võrgu tüüpi milliste silmuste suurustega kasutatakse, oleneb mitmetest teguritest, peamiselt kalade tüübist ja suurusest, kasvatuspiirkonna tingimustest, vajalikest tugevusnäitajatest ning ka kasvatajate enda eelistusest [22]. Parandustööriista peaks olema võimalik kasutada erinevate võrgutüüpide puhul, kuid peamiselt keskendub antud lahendus Norra kalakasvandustes kasutatavatele võrgutüüpidele.

Unsinkable Robotics OÜ poolt kogutud andmete põhjal on ligi 80% võrkudesse tekkinud aukudest vaid paari silmuse suurused. See tähendab, et aukude tuvastamine võib kohati olla keeruline, kuid aukude parandamine jällegi sellevõrra lihtsam.

Selleks, et robot koos parandustööriistaga vee all stabiilselt saaks liikuda, peab arvestama ka tööriista ujuvuse ja tihedusega. Roboti enda tihedus on ligilähedane vee tihedusega, seda selleks, et robot suudaks mootorite abita oma viimast positsiooni säilitada. Samuti peab ka parandustööriist oma tiheduselt olema võimalikult lähedane vee tihedusele. Lisaks tuleb arvestada, et tööriist ei pea vees olema mitte ainult tervikuna neutraalse ujuvusega, vaid ka peale igat augu parandamist peab see nii jääma. Seega tuleb teatud parandamiskontseptsioonide puhul arvestada ka augu parandamismaterjali arvelt tuleneva massi ja seega süsteemi keskmise tiheduse muutumisega. Vastasel juhul muutuks iga parandusega kogu robotsüsteemi ujuvus ning robot hakkaks vees tõusma või langema. Selleks, et robot oleks stabiilne ka külgsuundades, peaks tööriistasüsteem olema võimalikult sümmeetriline. Selle tulemusena hoitakse süsteemi raskuskese võimalikult lähedal oma pikisuunalisele teljele, tagades, et robot ei hakka kummalegi poole vajuma.

Allveerobotil on eesosas kaamera, millega saab tuvastada võrgus asuva augu täpse asukoha. Selline protseduur eeldab seda, et tööriist ega selle osad ei kata ära kaamera vaatevälja. Kui tööriist on kaamera ees, ei ole suure tõenäosusega augu asukoht võrgus hästi tuvastatav. Parandustööriista roboti suhtes asetsemisel peaks arvestama ka asjaolu, et roboti küljes olevad leedvalgustid oleksid võimalised võrku piisavalt palju valgustama, et nähtavus oleks vee all hea ning võrguauk tuvastatav.

Kuna augu parandamine toimub vees, tuleb arvestada ka võimalike hoovustega. Kalakasvanduspiirkondades ei ole küll hoovused üldjuhul tugevad, kuid siiski omab see teatud mõju roboti stabiilsusele. Seega peaks disainis arvestama ka asjaoluga, et väga täpsed positsioneerimised ja liikumised võivad olla raskendatud.

Tingimus, mis tõstaks roboti töövõimekust oluliselt ning tekitaks ka konkurentsieelise, on põhimõte, et robot on võimeline parandama mitut auku ühe sukeldumisega. Seega võetakse täiendavalt töö eesmärgiks leida lahendus, mille puhul saab ühe sukeldumisega parandada vähemalt viis võrguauku.

6. PARANDUSTÖÖRIISTA DISAINIMINE

6.1. Parandustööriista kontseptsiooni valimine

6.1.1. Parandustööriista energiaallika valimine

Kontseptsiooni valikul analüüsiti esmalt, mis energialiiki võrgu parandamise protsessis kasutatakse. Arvestades, et seadme arendamisel on üheks eesmärgiks hoida lahendust võimalikult väikse massi ja maksumusega, samuti, et seadet saaks võimalikult kiirelt töökorda seada, siis on realistlikke energiaallikast lähtuvaid kontseptsioone kaks – roboti akudest saadav madalpingeline elektrivool või täielikult mehaaniline lahendus. Täismehaaniline lahendus tähendaks seda, et tööriist ei saa opereerimiseks lisaenergiat ning augu parandamine peaks toimuma vaid roboti enda kaugjuhitavate mootoriga liikumise ja kaamerate abil. Sobivaima energiaallika valimiseks koostati Tabel 6.1, kus on välja toodud mõlema meetodi peamised eelised ja puudused.

Tabel 6.1 Energiaallikate eelised ja puudused

	Täismehaaniline	Elektriline
Eelised	<ul style="list-style-type: none">• Eeldatavalt väiksema massiga süsteem, ei vaja olulist ujuvuse kompenseerimist.• Töökindlamad ja robustsemad komponendid.• Ei kuluta roboti akuenergiat.• Lihtne tööpõhimõtte kaugjuhtimisel, ei vaja lisanuppe- või käske juhtpuldil.	<ul style="list-style-type: none">• Võimaldab keerukamat parandamissüsteemi.• Eelduslikult töökindlam kinnitussüsteem.
Puudused	<ul style="list-style-type: none">• Vajalik väga töö- ja eksimiskindel disain.• Vähe potentsiaalseid kinnituskontseptsioone.	<ul style="list-style-type: none">• Vajalik sulgeda elektrilised komponendid rõhu- ja veekindlasse keskkonda.• Vähendab roboti tööaega vee all.• Suhteliselt suure massiga lisakomponendid, mis vajavad ujuvuse kompenseerimist.

Tabelis toodud eeliste ja puuduste alusel leidis autor, et antud olukorras on otstarbekam lahendada süsteem täismehaaniliselt. Seda seetõttu, et praeguses roboti versioonis on lähtutud põhimõttest, et hoida seade võimalikult väikeste gabariitidega, väikese massiga ning pika tööajaga. Seda ülesehitust toetaks just mehaaniline lahendus, mis ei

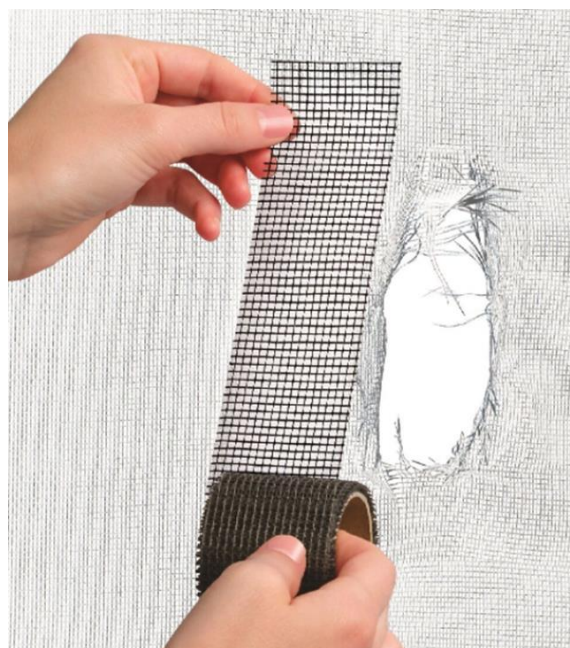
vaja keerukamaid lisaajameid, ülekandeid, liikuvaid elemente ja rõhukindlaid korpusi, mis tõstaksid tööriista massi ning kulutaks akuenergiat. Autor ei välista, et roboti järgmistes versioonides võiks olla otstarbekam kasutada just elektroonilisi lisakomponente kasutavat lahendust.

6.1.2. Kinnituse põhimõtte valimine

Järgmisena valiti kinnituse põhimõtte ehk meetod, kuidas auk kalavõrgus parandatakse. Meetodi valimise aluseks oli printsiip, et parandamisel saab kasutada vaid roboti liikumis- ja manööverdamisvõimet. Potentsiaalsete kinnitusprintsiipide valikul leiti alternatiivseid olukordi ka teistest valdkondadest. Järgnevalt on toodud võimalikud lahendused ning nende lühikirjeldus.

Lisamaterjali paigaldamine lapina

Augule pannakse peale asendusmaterjal lapi kujul. Roboti külge on kaldal kinnitatud üks või mitu kindla suurusega lappi, roboti ülesandeks on auku ümbritseva materjali külge see lapp kinnitada. Lahenduse põhimõtet muust valdkonnast illustreerib Joonis 6.1, kus sääsevõrk parandatakse antud juhul kleebitava võrgulapiga [23]. Kuigi näites on toodud lapi paigaldamine kleepimise teel, siis kalavõrgu parandamisel peaks kasutama kinnitusklambreid või muid sarnaseid kinnituselemente, et võrgulapp parandatava võrgu külge kinnitada.



Joonis 6.1 Lisamaterjali paigaldamine lapina - illustratsioon

Meetodi puuduseks on asjaolu, et lapi suurus on fikseeritud ning erineva suurusega lappide paigaldamine ühe sukeldumisega on keeruline. See-eest paigaldusprotsess on antud juhul lihtne ning tehtav ka elektrooniliste abivahenditeta. Meetodi näiteks igapäevaelust on näiteks rebenenud pükste põlvekoha või särgi küünarnukikoha parandamine lapi peale õblemisega. Peatükis 4 toodud olemasolevatest lahendustest kasutavad Deep Trekkeri ning Roveee seadmed just lappimismeetodit.

Materjali algse oleku taastamine nõelumise/õblemisega

Antud printsiibi kohaselt oleks roboti ülesandeks auk kinni nõeluda materjali (nöör, pael, võrgumaterjal vms) lisamisega. Selle lahenduse eeliseks on see, et igat auku saab õmmelda olenevalt augu suurusest nii ulatuslikult kui vaja. Küll aga on täismehaanilise lahenduse puhul seda keeruline rakendada, kuna ei ole elektroonilisi komponente, mis õblemist teostaks. Antud meetodit kasutatakse igapäevaelus olukordades, kus on vaja taastada materjali algne olek ja kuju, näiteks jalgpalli väravavõrgu parandamisel.



Joonis 6.2 Materjali algse oleku taastamine nõelumise/õblemisega - illustratsioon

Joonisel 6.2 on näha antud meetodi näide, kus kollases võrgus oleva augu parandamiseks on lisatud musta värvi lisamaterjali [24]. Peatükis 4 toodud olemasolevatest lahendustest kasutab Sperre tööriist just nõelumismeetodit.

Materjali pingutamine auguga ala katmiseks

Antud kontseptsiooni puhul haarab robot auku ümbritsevast võrgust, pressib selle kokku ning fikseerib. Fikseerimine võib toimuda näiteks klambriga, nõõriga või materjali sulatamisega. See meetod on efektiivne, kui lõpptulemus ei pea olema esteetiliselt ilus ning materjal ei pea oma algset kuju täielikult säilitama. Miinuseks on taaskord fakt, et ilma elektrooniliste abivahenditeta on keerukas materjalist kinni haarata ja seda

pingutada. Samaväärset lahendust kasutatakse pigem lühiajaliseks kinnitamiseks, näiteks meditsiinis haavade kokku klammerdamiseks.



Joonis 6.3 Materjali pingutamine auguga ala katmiseks - illustratsioon

Joonisel 6.3 on näha sarnast lahendust, kus batuudi ohutusvõrku tekkinud auk on parandatud nii, et tekkinud auku ümbritsevat materjali on venitatud ning fikseeritud, et auguga osa ära katta [25].

Kinnitusprintsipi valimiseks koostati hindamismatriks (Tabel 6.2), kus hinnati lahendite sobivust seatud kriteeriumitele. Kriteeriumiteks on võetud peamised tegurid, mis kõige enam mõjutavad roboti maksumust, vastupidavust ja kasutusmugavust. Lahendusele anti hindeid 3-palli süsteemis, kus 1 on vähim ja 3 suurim antav punktide arv. Kriteeriumite mõju osakaalud on võrdsed.

Tabel 6.2 Kinnituskontseptsioonide hindamismatriks

	Lappimine	Õmblemine	Pingutamine
Lahenduse arenduse maksumus	3	1	2
Paranduse ja kinnituse kvaliteet	2	3	2
Ühe sukeldumisega mitme augu parandamise võimalikkus	2	3	2
Lahenduse töötamise võimalikkus elektroonikaseadmeteta	3	1	1
Seadme kasutamise lihtsus	3	1	2
Erinevate suurustega aukude parandamise võimekus	2	3	2
Punkte kokku	15	12	11

Kriteerium „lahenduse arenduse maksumus“ kujundab suures osas ka tööriista müügihinna. Kuna lappimismeetod on täismehaaniliselt võrdlemisi lihtsasti lahendatav, siis on ka selle hind madalaim. Kriteeriumi „ühe sukeldumisega mitme augu parandamise võimalikkus“ eest sai enim punkte õblemismeetod, kuna aukude parandamiseks on vaja vee alla kaasa võtta põhimõtteliselt vaid üks nõõrirull. Lappimis- ja pingutamismeetodi puhul peab tööriistal olema mahukas magasin, kus võrgulappe ja klambreid hoitakse. Kriteeriumi „erinevate suurustega aukude parandamise võimekus“ puhul hinnati, kui hästi saab tööriistaga parandada erinevaid auke. Nii lappimis- kui pingutamismeetodi puhul saab kasutada võrgulappe ja klambreid, mis on võrreldes parandatava auguga üledimensioneeritud ning sellega tagada, et suudetakse parandada enamik tekkinud aukudest. Kui auk on suurem, saab asetada mitu paranduslappi või klambrit. Kõige paremini vastab nimetatud kriteeriumile õblemismeetod, mille puhul on parandatava augu suurus on kõige vähem piiratud.

Hindamismatriksi abil valiti otstarbekaimaks kinnitusviisiks lapi asetamine augu kohale. Tegemist on antud tingimustes kõige odavama, lihtsama ning robustsema lahendusega, mida on ilma täiendavate elektroonikaseadmeteta suhteliselt lihtne rakendada. Antud lahenduse puhul peab silmas pidama, et komponendid peavad olema disainitud selliselt, et operatori eksimisvõimalus oleks võimalikult väike ning ei tekiks olukorda, kus lapp ei jää võrgu külge kinni või robotit ei saa lapi küljest lahti. Selleks, et võrgulapp augu kohale kinnituks, peavad lapi küljes olema mingisugused komponendid, mida on võimalik mehaaniliselt vaid roboti liikumise abil fikseerida.

6.2. Parandustööriista komponendid, materjalid ja tootmistehnoloogia

Võrguparandustööriist koosneb mitmetest erinevatest detailidest. Tööriist peab kinnituma roboti külge ning olema suunatud robotist ettepoole, kuna roboti kaamerad on suunatud ette. Tööriist peab olema võimeline hoidma paigas võrgulappe ning kui lapp on augu kohale paigutatud, peab olema võimalik antud lapp tööriista küljest eemaldada. Seejärel peab olema võimalik paigaldada järgmist lappi ilma, et robot vahepeal pinnale tuleks ja inimene füüsiliselt robotit seadistaks. Kogu süsteemis tuleb kasutada materjale, mis on piisavalt vastupidavad soolasele merekeskkonnale, rõhule ning hoovustele. Samuti peavad need olema veele võimalikult lähedase tihedusega, et süsteemi heljuvus oleks tagatud. Andmaks ülevaate süsteemis kasutatavate võimalike konstruktiivsete materjalide kohta, koostati materjalide omaduste kohta informatiivne Tabel 6.3.

Tabel 6.3 Potentsiaalsete konstruktsioonimaterjalide võrdlus

	RV teras (AISI-316) [26][27]	Alumiinium (6061-T6) [28][29]	HDPE [30][31]	PMMA [32][33]	GRP* E-Glass [34][35] [36]
Tihedus (g/cm³)	8,00	2,70	0,95	1,18	1,80
Voolepiir (MPa)	240	280	30	70	150
Elastsusmoodul (GPa)	193	69	1	3	25
Vastupidavus mereveele	Väga hea	Hea	Väga hea	Väga hea	Väga hea
Tootmise lihtsus	Hea	Hea	Väga hea	Väga hea	Keskmine
Hind	Hea	Keskmine	Väga hea	Hea	Keskmine

*CRP - *Glass Reinforced Plastic* ehk klaaskiuga tugevdatud polümeer/plastik

Autor leiab, et peamiste konstruktsioonide juures on mõistlik kasutada plaste. Seda seetõttu, et tööriistale ei peaks paigutama eraldi ujukeid, mis näiteks terasekomponentide puhul nende ujuvust peaks kõrge tiheduse tõttu kompenseerima. Kuna roboti töö käigus ei ole tekkivad jõud ja pinged märkimisväärselt suured, siis on ka plastide mehaanilised omadused piisavad ülesande täitmiseks. Üheks sobivaks plastiks on autori hinnangul HDPE ehk kõrgtihedusega polüeteen. Seda põhjusel, et tegemist on veekeskkonnas vastupidava materjaliga, mille tihedus on 0,95 g/cm³, seega vees ujuv. Antud materjali kasutatakse mitmetes merekeskkonnaga seotud paikades, näiteks paatides ja sadamadokkides [37]. Seega on antud materjal sobiv kasutamiseks ka tööriista komponentides.

6.2.1. Paranduslapi disainimine

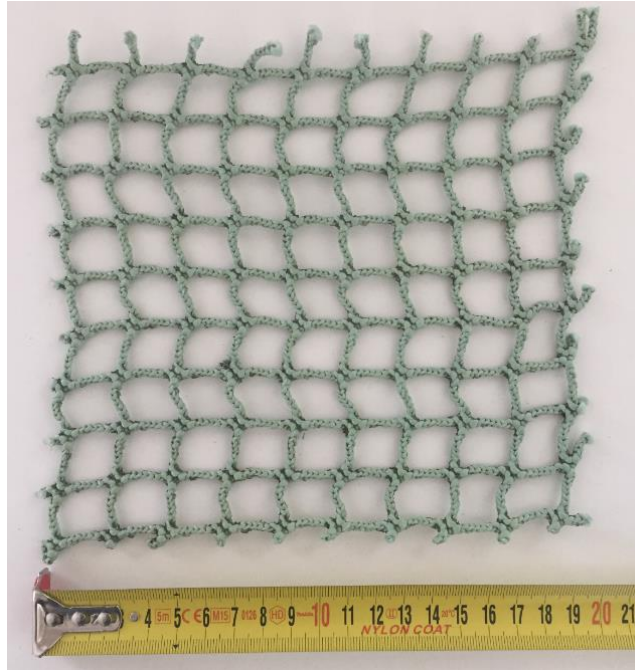
Paranduslapina oleks mõistlik kasutada kalavõrgu enda materjali, kuna see on juba spetsiaalselt välja töötatud just sellisele keskkonnale vastu pidama ning kalakasvandustes on seda materjali alati käepärast võtta. Samuti on see materjal, erinevalt näiteks jäigast plastlapist, piisava painduvusega, mis tagab väiksemad pinged võrgu lainetamise korral. Kalavõrgud on valmistatud üldjuhul erinevatest plastikiududest. Kõige enam on kasutuses polüamiid ehk nailon (PA), kuid sellele lisaks ka polüester (PES), polüpropeen (PP), polüeteen (PE) ja kõrgtugev polüeteen (HPPE). Ülevaade nende materjalide omadustest on toodud Tabelis 6.4 [22][38].

Tabel 6.4 Paranduslapi materjalide võrdlus

	PA	PES	PP	PE	HPPE
Tihedus (g/cm³)	1,14	1,38	0,91	0,95	0,97
Vees ujuv	Ei	Ei	Jah	Jah	Jah
Eritugevus (g/den)	9	9	7	5	40
Vastupidavus abrasiivsele kulumisele	Väga hea	Hea	Hea	Hea	Hea
Vastupidavus katkemisele	Väga hea	Väga hea	Väga hea	Väga hea	Väga hea

Kõik tabelis toodud materjalid on sobivad kasutamaks kalavõrkude paranduslapina. Samuti on sobivad erinevate silmuste suurustega võrgulapid. Tavapäraselt kasutakse kas ruudukujulisi või heksagonaalseid silmuseid, mille ühe silmuse läbimõõduks on 15-50 mm [39][40]. Kuna enamasti on vaja lappida, on paari silmuse laiused, siis on autor roboti arendajate kogemusele toetudes leidnud, et optimaalne võrgulapi suurus võiks olla ca 200x200 mm. Selline suurus võimaldab parandada suurema osa aukudest ning samuti on jäetud suuruses varu. Varu on peamiselt vajalik seepärast, et võrgulappi ei ole veealuste hoovuste, võrgu liikumise ja roboti ebastabiilsuse tõttu võimalik paigaldada väga täpselt ning mõnevõrra üledimensioneeritud paranduslapp vähendab oluliselt võimalust, et lapp paigaldatakse august mööda.

Antud töö puhul on lõppdisaini testimiseks kasutatud 20x20 mm ruudukujuliste silmustega nailonist kalavõrku (Joonis 6.4). Tegemist on Norra kalandusettevõttest pärineva levinud võrgutüübiga, andes seega ettekujutuse realselt kasutatava võrgu omadusest.



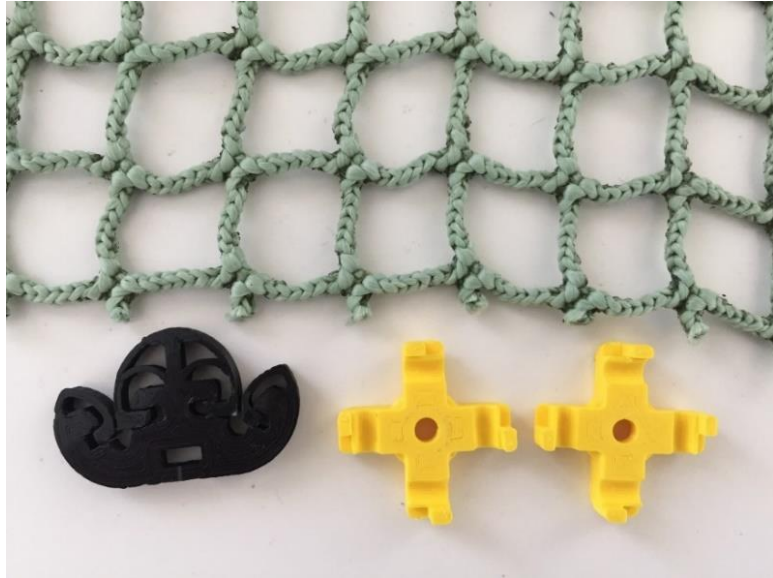
Joonis 6.4 Näidislapp 20x20 mm silmusega

Kasutatav lapp võeti mõõtmetega 180x180 mm ehk 9x9 silmust. Silmuste arv peab olema paaritu, et klambreid oleks võimalik sümmeetriliselt kinnitada ka lapi külgede keskele. Antud võrgu tihedus on ca 1,14 g/cm³ kohta, seega on see vees uppuv.

6.2.2. Klambrite disainimine

Klamber, mis kinnitab võrgulapi auguga võrgu külge, on lahenduse üks kriitilisemaid elemente. Klamber peab olema võimalikult töökindel, et igas olukorras kinnitamine kindlasti toimuks. Ühtlasi ei tohiks kogu protsess ebaõnnestuda seetõttu, et üks klamber jääb kinnitamata. Selleks, et olla kindel klambri disainis, konstrueeriti klamber sellisena, et seda oleks võimalikult lihtne toota ka kihtlisandusmeetodiga. See annab võimaluse kiiresti toota prototüüpe, neid testida ning tulemuste põhjal uusi lahendusi disainida.

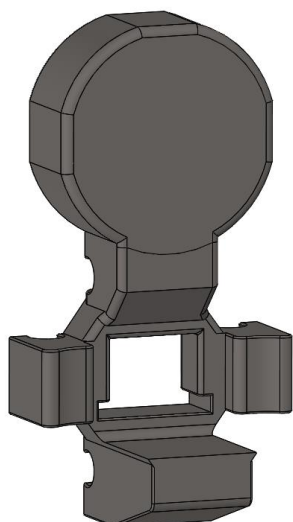
Allveeroboti arendusmeeskonna enda poolt on juba üks võimalik klambri disain välja töötatud ning see on hetkel katsetamisel. Tegemist ei ole lõpliku disainiga, mistõttu pakub töö autor välja ka omapoolse alternatiivi klambri disainile. Joonisel 6.5 on kujutatud Unsinkable Robotics OÜ poolt välja töötatud disain.



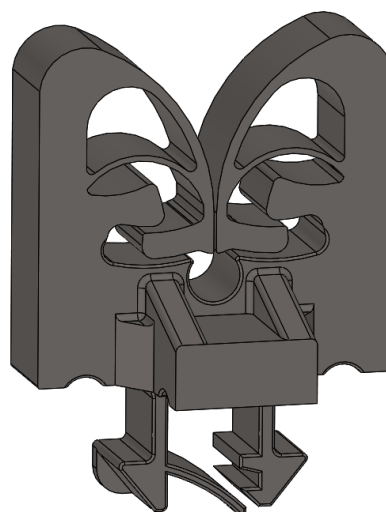
Joonis 6.5 Unsinkable Robotics OÜ poolt välja töötatud klambrisüsteem

Pildil toodud klambrisüsteemi kinnituspõhimõtte on see, et kollased ristikujujulised detailid kinnitatakse võrgulapi külge selliselt, et üks detail on ühelt pool ja teine teiselt pool võrku. Musta värvi detail kinnitatakse poldi ja mutriga omakorda kollaste detailide külge. Mustal klambri detailil on kaks lõksu, millega parandatavast võrgust haaratakse. Sellised klambrikomplekte on ühe võrgulapi küljes vähemalt neli.

Kui esmane disain eeldab, et ühe klambriaga haaratakse kahest võrgunöörast (silma kahest vastasküljest), siis töö autori pakutav alternatiivne klamber haarab ühest nööri korraga. Selle muudatuse põhjuseks on töökindluse kasvatamine – kui klamber on ettenähtud haarama kahest nööri, kuid mingil põhjusel haarab ainult ühest, siis tekib olukord, kus roboti tagurdades hakkab klamber tööriista kere painutama ning paranduslappi võib olla keerulisem tööriista kere küljest eemaldada. Autori disainitud klambri puhul seda ohtu ei ole – klamber kas on kinni või ei ole, vahepealset varianti ei ole. Klamber on disainitud nii, et see koosneks võimalikult vähestest komponentidest ning selle kinnitamine võrgulapi külge oleks võimalikult kiire ja lihtne. Joonistelt 6.6 ja 6.7 on näha autori poolt disainitud klambri ülemine ja alumine osa.



Joonis 6.6 Kinnitusklambri alumine osa
– 3D mudel

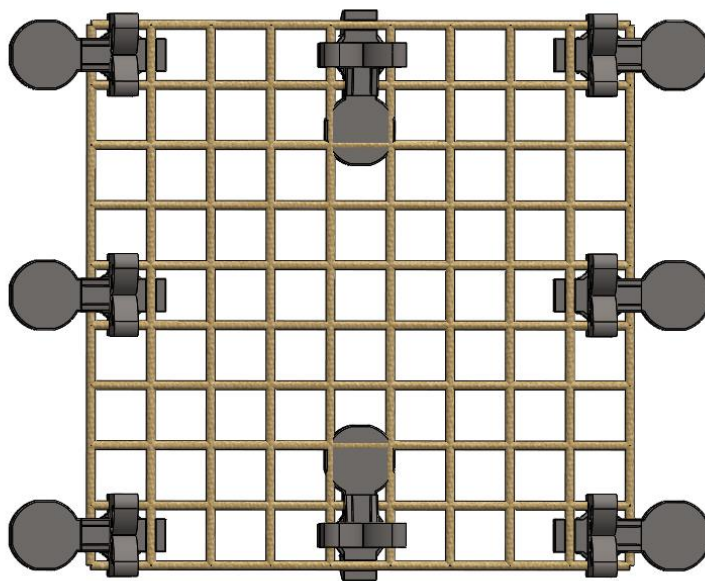


Joonis 6.7 Kinnitusklambri ülemine osa
– 3D mudel

Klambri ülemise osa küljes olev lõks on disainitud selliselt, et võrk saab küll võrdlemisi lihtsasti liikuda sinna sisse, kuid välja enam seal liikuda ei saa. Lõks on piisavalt kitsas, et peale võrgunööri fikseerimist ei oleks võrgunööriil seal väga palju liikumisruumi, mis võiks põhjustada olukorra, kus liigse inertsit tõttu lõks puruneb või nöör tuleb lõksust välja. On kolm potentsiaalset olukorda, kus nöör ei pruugi klambri lõksu kinni jääda - klamber satub täpselt kahe nööri vahele (silmuse keskele) ning seega ei haara kumbagi nööri, klamber satub samuti täpselt kahe nööri vahele, kuid haarab kahest nöörist korraga ning kolmas olukord, kus klamber satub täpselt sõlme koha peale, mis takistab klambri edasi liikumist. Nende ohtude ennetamiseks on klambri laius valitud selliselt, et ei saaks tekkida olukorda, kus klamber läheb kahe nööri vahelt läbi – igal juhul satub mõni nöör lõksu olenemata lähenemiskohast- või nurgast. Kui lõksu satub kaks nööri korraga, siis üks neist lihtsalt ei jää kinni ning liigub tagurdamisel lõksusuust välja. Tõenäosus, et kahe nööri sattumisel ei kinnitu ükski nöör klambri külge, on olemas, kuid autori hinnangul suhteliselt väike, et tagada klambri piisav töökindlus. Autori hinnangul ei teki probleemi sellega, et sõlme kohale sattudes klambri lõksu ühtki võrgunööri ei jõuaks, kuna klamber on piisavalt õhuke. Seega, kui klamber peaks sattuma täpselt kahe silmuse vahele, libiseb klamber siiski ühele või teisele poole ning haarab nöörist. Selleks, et klamber antud disaini ja mõõtmete juures kõige efektiivsemalt töötaks, peab parandatava kalavõrgu silmuste suurus olema kuni 30x30 mm ning võrgunööri läbimõõt kuni 4 mm.

Klambrid on asetatud igasse võrgulapi nurka ning külgede keskele, seega kokku 8 klambrit. Selline asetus annab piisava kindluse, et võrk fikseeritakse, isegi kui mõni klamber jääb lahtiseks või mingil põhjusel peaks peale paigaldust lahti tulema.

Klamברי alumisel osal on näha ümar väljaulatuv juhik. Väljaulatuv juhik on selleks, et klambrid saaks kinnitada võrgulappe ümbritseva kaitsekorpuse külge, kus sees lapid paiknevad ning mis ühtlasi toimib kui lappide magasin. Ka servade keskele saab kinnitada samad klambrid selliselt, et ümar osa on suunatud lapi keskosa poole (Joonis 6.8).



Joonis 6.8 Klambrite paigutus võrgulapi küljes – 3D mudel

Klambreid oleks saanud teha kahte erinevat tüüpi – üks väljaulatuva osaga ning teine väljaulatuva osata, kuid autori hinnangul ei oleks kahe klambri tüübi tootmisest saavad kasu eriti suur ning tootmistehnoloogiliselt on mõistlikum toota ühte tüüpi klambreid.

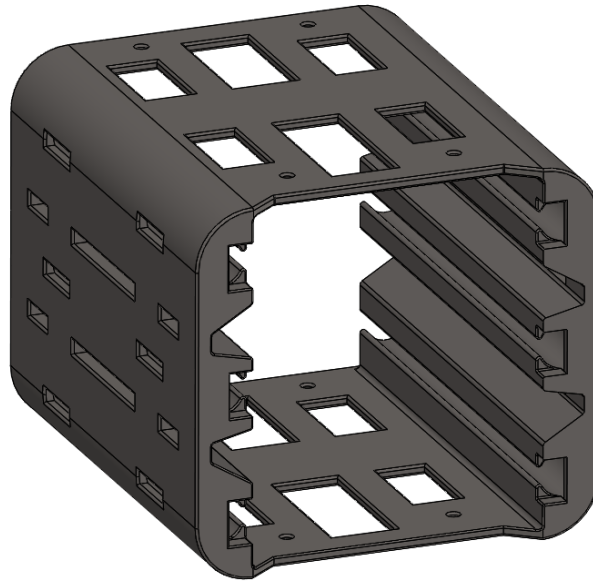
Autori hinnangul on klambri tootmisel otstarbekas kasutada HDPE plasti. Seda põhjusel, et tegemist on hästivormitava, veekeskkonnas ujuva ja vastupidava materjaliga. Klambreid saab toota survevalu meetodiga. Kui klambri tulevaste disainide juures on võimalik konstrueerida see sellisena, et detaili laius on ühtlane, siis võib kaaluda ka ekstrudeerimise teel detailide tootmist. Selleks, et kalavõrkude täishoolduse puhul, kui võrgud veest välja tõstetakse, lapid ära võetakse ja kõik võrguaugud korralikult parandatakse, oleks lihtsamini märgatavad need kohad, kus lapiga on auk parandatud, saab kasutada kalavõrgust erineva värviga klambreid – näiteks musti, valgeid või siniseid.

6.2.3. Paranduslapp ümbritseva kaitsekorpuse disainimine

Ühe sukeldumisega peab olema võimalik paigaldada mitu paranduslappi ning seda peab olema võimalik teha ilma elektrooniliste abikomponentideta. Kui üks lapp võrgu külge kinnitatakse ja see raami küljest vabastatakse, siis peab järgmine lapp koheselt olema valmis kinnitamiseks. See eeldab, et paranduslapid peavad olema üksteise otsa kuidagi laotud ning tööriista külge fikseeritud. Samuti tuleb arvestada asjaolu, et igal üksikul paranduslapil ei tohiks olla oma jäika raami, kuna selline jäik raam võib kalavõrgu lainetamise tõttu takistada võrgu normaalset liikumist ning tekitada raami liigseid pingeid, mis võib raami painutada või purustada.

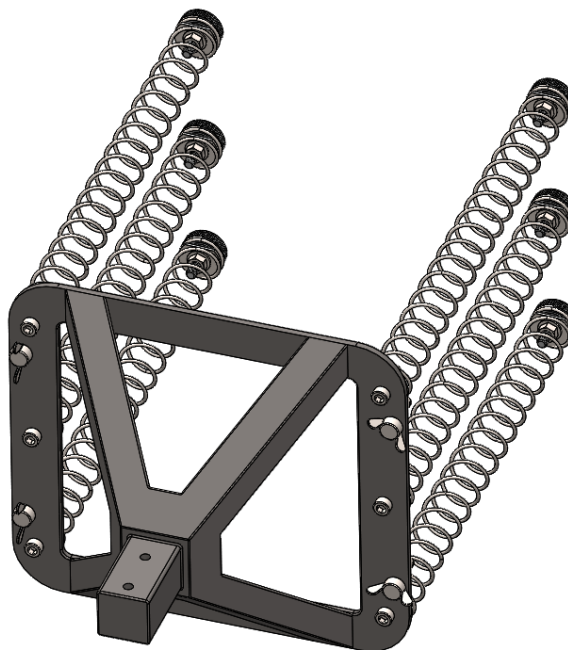
Disainitud tööriistal on lappe ümbritsev kaitsekorpused, millel on mitu ülesannet. Esiteks kinnituvad võrgulapid korpuse külge, kust neid järjest „ette söödetakse“ ning seega töötab korpus kui lappide magasin. Samuti on korpus oluline lappide kaitsmiseks välise keskkonna eest, kuna võib juhtuda, et robot või tööriist põrkavad kokku mõne veealuse objektiga. Samuti, kuna sukeldumispaikades võib leiduda vetikaid, lahtisi võrgunööre või muid sarnaseid objekte, võivad need kaitsekorpuse olemasolul võrgulappide ja nende klambrite külge kinni jääda.

Tööriista korpuse disain on kujutatud Joonisel 6.9. Korpuse seintes on läbivad avad, mis on tehtud selleks, et vähendada veetakistust liikumisel. Ülemisele küljele tehtud avad on head ka selleks, et tööülesannet täites on operaatoril kaamera abil võimalik veenduda kas magasinis on veel lappe alles. Ülemisele ja alumisele küljele on tehtud ka ümarad avad, kuhu saab vajadusel roboti stabiliseerimiseks kinnitada lisaraskused (alumise külje külge) või ujukid (ülemise külje külge).



Joonis 6.9 Võrgulappide kaitsekorpused – 3D mudel

Korpuse tagumise külje külge kinnitub vahelüli, mille eesmärk on tööriista kinnitamine roboti külge. Nimetatud komponent on korpuses küljest eemaldatav, et roboti kasutajal oleks mugav võrgulappide klambreid korpuse kanalitesse sisestada. Vajadusel saab võrgulappe ka korpuse eesosast kanalitesse sisestada, kuid see on autori hinnangul ebamugavam. Samuti kinnituvad survevedrud vahelüli külge. Joonisel 6.10 on toodud vahelüli koos survevedrudega.



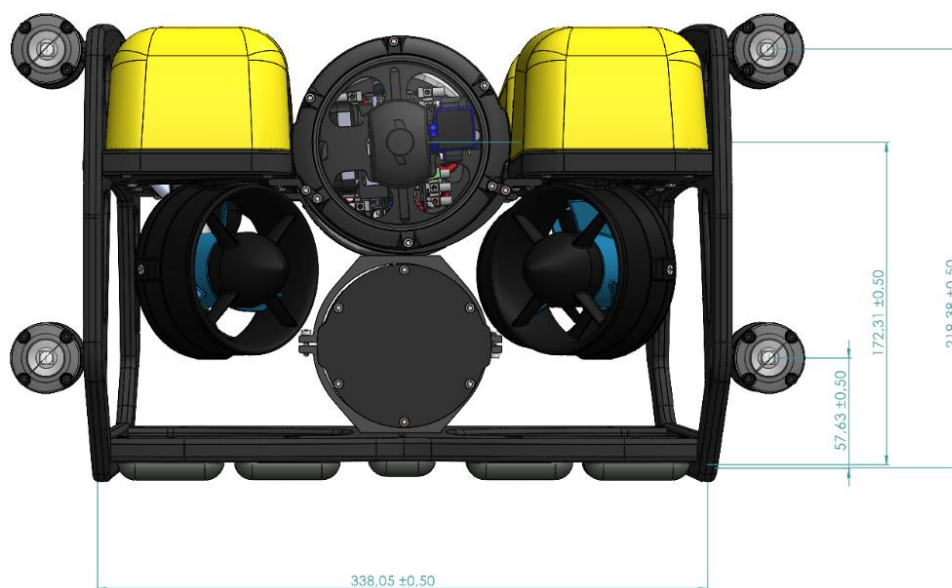
Joonis 6.10 Vahelüli koos survevedrudega – 3D mudel

Selleks, et korpus töötaks lappide magasinina ning toimuks lappide etteandmine, on korpuse servades ümarad kanalid, mille sees klambrite väljaulatuvad juhikud asetsevad. Roostevabast terasest vedrud suruvad neid pidevalt ettepoole, tagades, et lapiid on alati surve all. Kanalite, milles asetsevad vedrud ning milles liiguvad võrgulapi klambrite juhikud, otsas on stoppersein, mis ei lase vedrudel paranduslappe korpusest välja suruda. Kui võrgulapi klamber parandatava kalavõrgu külge kinnitub ja robot lapiid vabastamiseks tagurdab, siis tõmmatakse klambri ümar kinnitus kanalist välja, mis on võimalik tänu kanalite otste võrgulapipoolsetesse osadesse tehtud avadele. Kui mõni klamber jääb võrgu külge kinnitamata, siis tõmmatakse kanalist ikkagi välja ka see kinnitus.

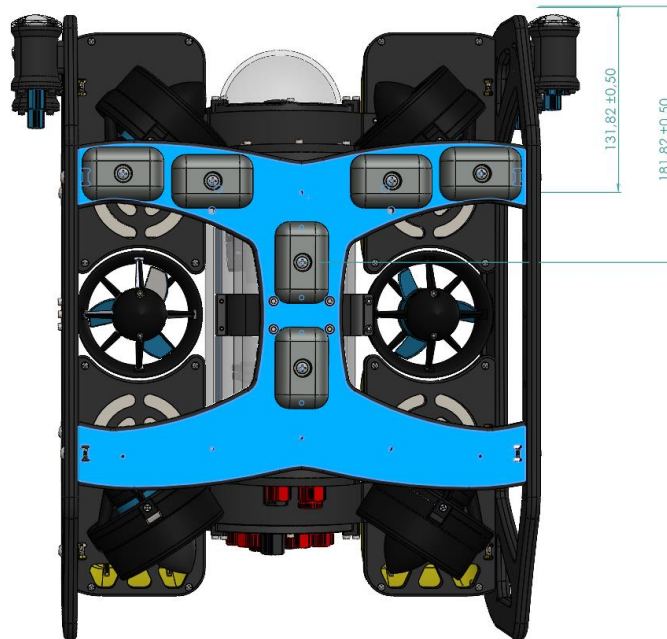
Nii kaitsekorpus kui vahelüli on valmistatud HDPE plastist survevalu meetodil, vahelüli puhul võib kasutada ka ekstrusioonkeevitust. Vahelüli kinnitub korpuse külge nelja liblikpoldiga, et kasutaja saaks võimalikult kiirelt ja mugavalt võrgulappide magasinini täita.

6.2.4. Tööriista ja roboti vahelise kinnituse disainimine

Tööriista paigutus roboti suhtes peab olema selline, et kaamera vaateväli ei oleks varjatud ning võrguni jõudev valgustus oleks piisav töö tegemiseks. Tööriista ja lappide paigutust mõjutavad mõõtmed on toodud Joonistel 6.11 ja 6.12. Joonistel toodud mõõtmed on millimeetrites.



Joonis 6.11 Allveeroboti 3D mudeli eestvaate, tööriista paigutust mõjutavad dimensioonid



Joonis 6.12 Allveeroboti 3D mudeli altvaade, tööriista paigutust mõjutavad dimensioonid

Nimetatud tingimustele vastamiseks kinnitatakse tööriist roboti alumisele küljele. Seda ka seetõttu, et roboti stabiilsuse ja juhitavuse tagamiseks peab süsteemi raskuskeset hoidma võimalikult madalal. Olgu märgitud, et raskuskeseme lõpmatult madalale liigutamine ei ole samuti kasulik ning raskuskesemel on juhitavuse tagamiseks optimaalne asukoht, mis asub süsteemi keskteljest madalamal. Robotisüsteemi optimaalse raskuskeseme asukoha leidmist antud magistritöös ei käsitleta.

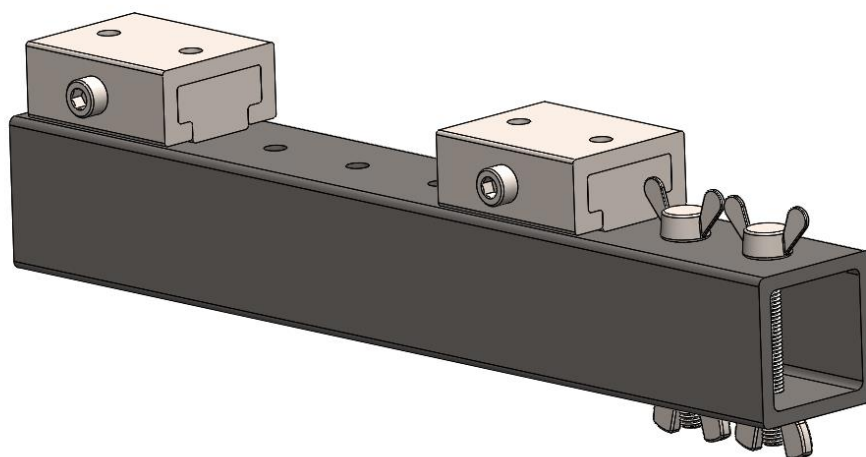
Joonisel 6.12 sinisega märgitud pind on roboti alumine külg, mille külge on hetkel kinnitatud ka Joonisel 6.12 nähtavad robotit stabiliseerivad roostevabast terasest lisaraskused. Selle sama pinna külge on otstarbekas ka kinnitada tööriist. Lisaraskused saab ümber paigutada sobivamasse kohta, kus need tööriistale ette ei jää.

Jooniselt 6.11 on näha, et antud pinnast kuni kaameraläätse keskpunkti on ca 172 mm, alumiste valgustite keskpunkti ca 58 mm ning ülemiste valgustite keskpunkti ca 219 mm. Autor nendib, et antud tööriista lahenduse puhul jääb tööriist alumistele valgustite ja parandatava augu vahele, mis põhjustab olukorra, kus alumised valgustid ei saa parandatavat ala täielikult valgustada. Autori hinnangul saab parandatav võrk siiski piisavalt valgustatud töö tegemiseks. Joonisel 6.12 on toodud ka ligikaudse kinnituste asukohtade kaugus roboti eesosast.

Tööriista korrektseks positsioneerimiseks roboti suhtes kasutatakse kinnitustoru, mis ühest otsast kinnitub roboti põhja külje, teine ots kinnitub tööriista vahelüli külge. Antud

toru saab kasutada universaalse kinnituskomponendina ka muude tööriistade kinnitamiseks.

Kinnitustoru disainis on lähtunud põhimõttest, et tööriista paigaldamine roboti külge ja tööriista vahetamine oleks võimalikult kiire ja mugav. Vahelüli ja kinnitustoru omavaheliseks fikseerimiseks tuleb vahelüli väljaulatuv osa toru sisse libistada ning fikseerida kahe liblikpoldi ja -mutriga. Kinnitustoru roboti külge kinnitamiseks on mõlema detaili küljes roostevabast terasest kinnituskomponent, mis üksteise sisse libistatakse ning ühe poldiga fikseeritakse. Joonisel 6.13 on toodud kinnitustoru koos kinnituselementidega. Vasakul pool on näha kaks komplekti roostevabast terasest detaile, mille ülemine komponent on kinnitatud roboti põhja külge. Paremal on näha liblikpolte ning -mutreid, millega fikseeritakse vahelüli toru külge. Vahelüli väljaulatuv osa on näha Joonisel 6.10.



Joonis 6.13 Kinnitustoru koos kinnituselementidega – 3D mudel

Kinnitustorusse on tehtud avad, et roboti sukeldudes torusisene ala täituks täielikult veega ning ei jääks õhumulle. Seda selleks, et õhumullid võivad teadmata hetkel roboti töö käigus toru seest väljuda ja sellega robotit destabiliseerida. Toru alumisse külge tehtud avad on suurema diameetriga, et oleks võimalik roostevabast terasest komponendi kinnitamiseks vajalikku mutrit padruniga kinni hoida. Toru on valmistatud ekstrudeeritud ja lõiketöödeldud HDPE plastist. Kinnitusdetailid, poldid, mutrid ja muud metallelemendid on AISI 316 roostevabast terasest, mis on väga hästi vastupidav materjal ka soolases vees. Kinnitusdetailid on toodetud freesimise teel.

Nii kinnitustoru kui teiste tööriista komponentide puhul võiks kasutada õhku sisaldavaid suletud detaile, mis töötaksid vee all kui ujukid ning sellega vähendaksid süsteemi keskmist tihedust, kuid kuna need komponendid asuvad suures osas madalamal, kui roboti raskuskese, siis muudaks see robotit ebastabiilsemaks või isegi ajaks roboti vees ümber.

6.3. Kontrollarvutused

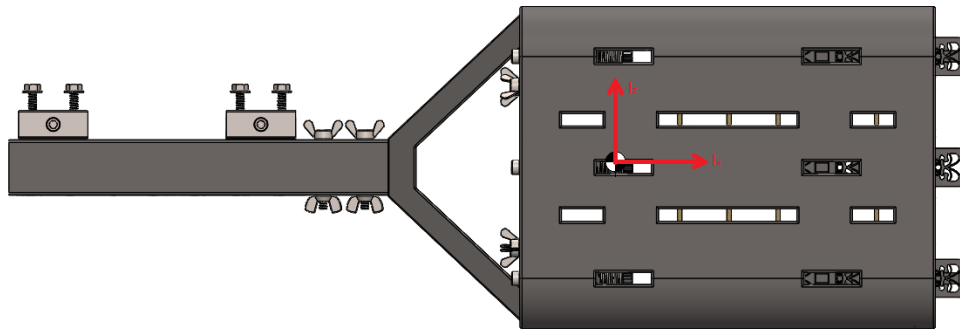
6.3.1. Alakoostude ujuvuste leidmine

Roboti tööpaikadeks võivad olla erinevate omadustega veekeskkonnad, nii mageveebasseinid kui soolane merevesi. Vee tihedus sõltub konkreetse asukoha soolsusest ja temperatuurist, kuid jääb üldjuhul vahemikku 0,99-1,03 g/cm³ [41]. Seega peaks tööriista komponentide tihedus olema sellele vahemikule võimalikult lähedane. Järgmisena on toodud kõikide tööriista alakoostude massid ja tihedused, mis peaksid olema eraldiseisvalt neutraalse ujuvusega (Tabel 6.5).

Tabel 6.5 Alakoostude tihedused

Alakoost	Mass (g)	Tihedus (g/cm³)	Kommentaar
Paranduslapp koos 8 klambriga	94	0,99	Tihedus on eesmärgipärane.
Tööriista kaitsekorpuse ja vahelüli koos vedrude ning kinnitusdetailidega	3906	1,06	Tihedus on lähedal eesmärgile. Kui tiheduse erinevus mõjutab roboti juhitavust või raskendab lappide paigaldust, saab korpuse külge kinnitada ujukid.
Kinnitustoru koos robotikinnituste ja kinnituskomponentidega	873	3,59	Kuna roboti põhjas on ca 1 kg jagu lisaraskusi, siis saab antud alakoostu ujuvuse kompenseerimiseks eemaldada roboti lisaraskused. Alakoostu raskuskese on roboti all, seega see stabiilsust oluliselt ei muuda.

Tabelist 6.5 nähtub, et kõikide alakoostude tihedused on ligilähedased vee tihedusele, või on eesmärk muudmoodi saavutatav, seega ei oma need erilist mõju süsteemi ujuvusele. Töös on arvestatud, et roboti ujuvus on neutraalne. Tööriista raskuskese on toodud Joonisel 6.14.



Joonis 6.14. Tööriista 3D mudeli külgvaade - raskuskeseme asukoht

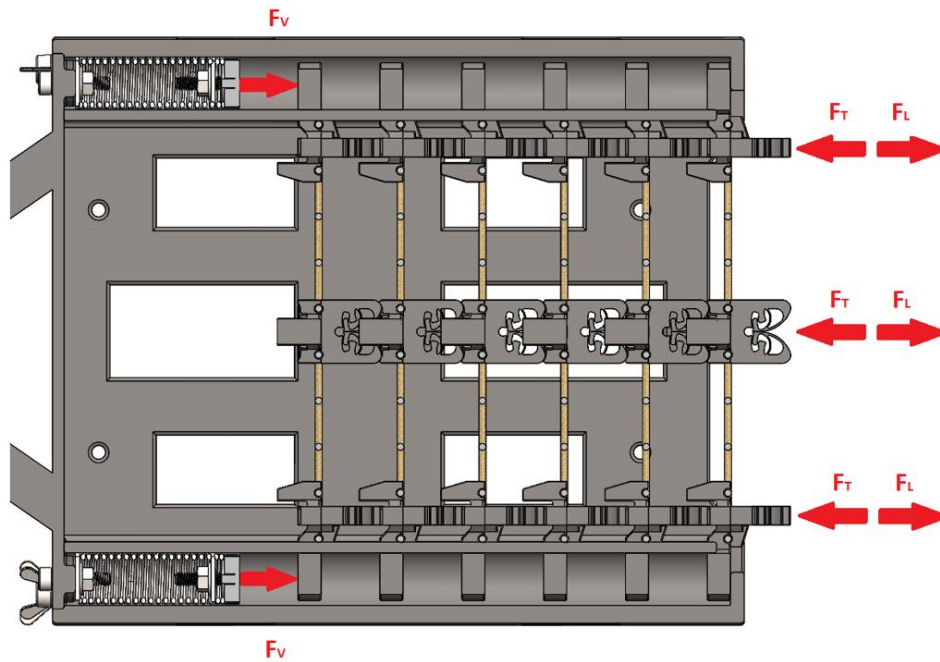
Jooniselt 6.14 on näha raskuskeseme asukoht X- ja Z-telje suhtes. Y-telje suhtes asub raskuskese sümmeetriateljel.

6.3.2. Tugevusarvutused ning katsetused

Tööriista kõige kriitilisem ja nõrgem koht on kinnitusklamber, mis ühendab võrgulappi parandatava võrguga. Kinnitusklambri töökindluse tuvastamiseks viidi läbi tugevusarvutused kohtades, mis on autori hinnangul kõige nõrgemad. Teised komponendid – kaitsekorpused, vahelüli, kinnitustoru ning kinnituselemendid – on autori hinnangul valitud piisava tugevusvaruga ning nende osas eraldi tugevusanalüüsi sellest tulenevalt läbi ei viida. Võrgulapid on toodetud kasutamiseks tööriistaga sarnastes tingimustes ning seetõttu ei vaja samuti täiendavat tugevusanalüüsi.

Klambri tugevust kontrolliti mitme erineva koormusskeemi puhul. Esmalt kontrolliti, kas klambrit on üldse võimalik parandatava võrgu külge kinnitada, arvestades ka roboti mootorite maksimaalset tõukejõudu. Seejärel viidi läbi analüüs, kas klamber ka parandatava võrgu küljes püsib, kui robot tagurdades võrgulappi tööriista küljest vabastab. Samuti kontrolliti ka klambri alumise osa tugevust olukorras, kus survevedru osutab maksimaalset survejõudu klambri väljaulatuvale juhikule. Viimasena kontrolliti, kas survevedrude poolt avaldatav survejõud on piisav, et kinnitada ka viimane magasinis olev võrgulapp.

Joonisel 6.15 on toodud jõudude mõjumise skeem. Tähistega F_V on toodud vedrude poolt avaldatav survejõud, mis mõjub igal ajal ning on seda suurem, mida enam lappe magasinis on. Tähistega F_L on tähistatud jõud, mis on vaja klambritele osutada, et need parandatava võrgulappi külge kinnitada. F_T on tähistatud jõud, mis on vajalik, et kinnitusklamber võrgu küljest roboti tagurdades lahti tõmmata.

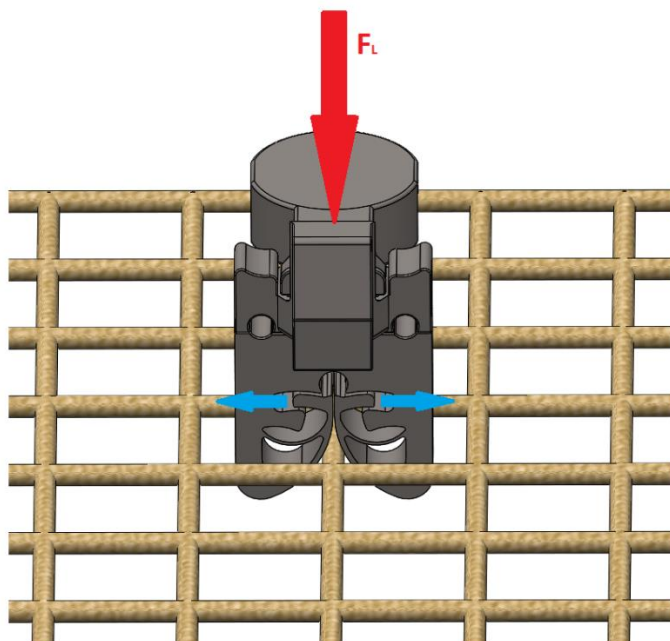


Joonis 6.15 Jõudude mõjumise skeem – löige tööriista 3D mudelist

Selleks, et klambrite tugevust ning kasutusmugavust paremini katsetada, toodeti klambritest kihtlisandusmeetodiga prototüübid. Disaini pidevalt täiendades jõuti lõpliku lahenduseeni, mille puhul klambrid kinnituvad teineteise külge edukalt olles samas koost piisavalt jäik. Prototüüpklambrite materjaliks oli PLA plast.

Klambri võrgu külge kinnitamiseks vajaliku jõu leidmine

Allveeroboti teise verisooni ja selle mootorite spetsifikatsioonist tulenevalt on teada, et roboti maksimaalne horisontaalne tõukejõud F_{TMAX} on 9 jõukilogrammi ehk ca 88 N [1]. Arvestades, et droon peaks üheaegselt lükkama võrgu külge kõik kaheksa võrgulapi küljes olevat klambrit, peaks iga klambri kinnitamiseks vajaminev lükkejõud F_{LMAX} olema kuni 11 N. Reaalsuses võib küll lapi kinnitamine toimuda mõningase nurga all ning mõni klamber võib kinnituda varem, mis tähendaks, et tõukejõud jaguneks vähemate klambrite peale korraga. Sellest olenemata kasutatakse arvutuses siiski maksimaalset väärtust. Joonisel 6.16 on toodud katse selgitav skeem. Katsega leiti jõud F_L , mille tulemusel liiguvad lõksu haarad siniste nooltega tähistatud kombel laiali ning haaratav võrgunöör liigub lõksu. Skeemi lihtsuse huvides on skeemilt välja jäetud paranduslapp, mis kinnituks klambri ümarate soonte vahele.



Joonis 6.16 Vajaliku lükkejõu leidmise selgitav skeem – 3D mudel

Leidmaks, kui suurt jõudu F_L on vaja kasutada klambri kinnitamiseks, viidi läbi katsetused prototüüpidega. Võrk kinnitati võimalikult jäigalt välise raami külge ning dünamomeetri vahendusel tõmmati klambrit võrgu külge. Viidi läbi kaheksa katset ning tulemused on nähtavad Tabelis 6.6.

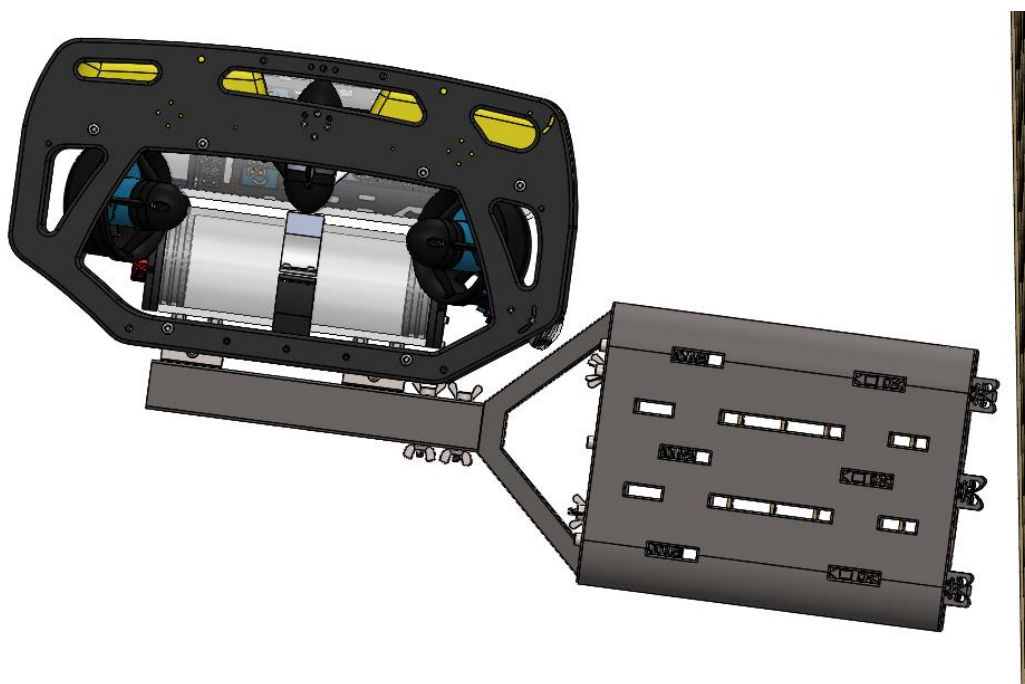
Tabel 6.6 Klambri kinnitamisjõu katselised tulemused

Katse nr.	Leitud jõu F_L väärtus (N)
1	5,0
2	5,5
3	4,0
4	5,5
5	4,0
6	4,5
7	5,0
8	4,0

Katsetuste käigus veenduti, et maksimaalne vajalik jõud klambri võrgu külge kinnitamiseks on 5,5 N. Kuna maksimaalne lubatud jõud on 11 N, siis järeldati, et robotil on piisavalt tõukejõudu, et kõik kaheksa klambrit korraka võrgu külge kinnitada.

Autori hinnangul oleks mõistlik võrgulappide kinnitamisel lähtuda põhimõttest, et esmalt kinnitada ülemised klambrid ning siis alumised. Vastav põhimõte on toodud ka

Joonisel 6.17. Joonise paremas osas on toodud parandatav võrk ning vasakul allveerobot koos tööriistaga.



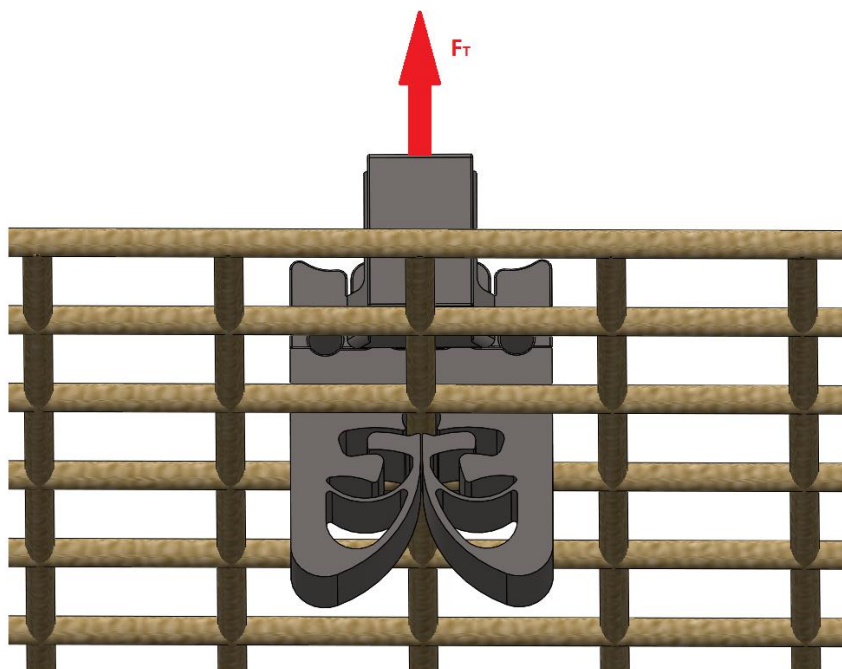
Joonis 6.17 Võrgulappide kinnitamise protsess – 3D mudel

Selline kinnitamisviis tagab, et kõiki klambreid ei pea korraga vastu võrku suruma, seega klambrid kinnituvad lihtsamalt. Samuti on selline kinnitamine mõistlik, kuna siis on kaamera abil, mis asub roboti ülaosas, võimalik positsioneerida võrgulapp parandatava augu suhtes kõige täpsemini. Lisaks tasub märkida, et kui robot koos tööriistaga vees edasi liigub, siis tööriistast tuleneva lisaveetakistuse tõttu kaldub robot niikuinii mõnevõrra Joonisel 6.17 toodud asendi suunas, seega ei pea operaator antud asendi saavutamiseks eraldi oluliselt vaeva nägema.

Klambri lõksu vastupidavuse kontrollimine tõmbele

Kui paranduslapp on kalavõrgu külge kinnitatud, hakkab robot tagurdama, et paranduslapp tööriista küljest vabastada. Selleks, et paranduslapp ka võrgu külge kinni jääks, peab klambrilõks piisavalt tugev olema. Arvutustega kontrolliti üle kõige ekstreemsem olukord, kus võrgu külge on kinnitunud üks klamber ning kus robot kogu tõukejõuga seda üht klambrit võrgu küljest eemale tõmbab. Lapp peab ka sellises olukorras kalavõrgu külge jääma, kuna muidu võib paranduslapp tööriista külge jääda ebasobivas asendis ning robot tuleb tuua pinnale, et ebaõnnestunult kinnitatud lapp operaatori poolt eemaldada ning tööriista taas töökorda seada. Küll aga juhul, kui paranduslapp jääb kalavõrgu külge liiga nõrgalt või ebakindlalt, on kaamera abil

võimalik see tuvastada ning vajadusel uus lapp sellele kohale asetada. Joonisel 6.18 on toodud selgitav skeem antud katse jaoks. Katsega leiti jõud F_T , mis on vajalik, et võrgunöör klambri lõksu küljest laht tuleks. Skeemi lihtsuse huvides on skeemilt jäetud välja paranduslapp, mis kinnituks klambri ümarate soonte vahele.



Joonis 6.18 Klambri purustamiseks vajaliku tõmbejõu leidmise selgitav skeem – 3D mudel

Roboti maksimaalne tõukejõud F_{TMAX} nii edasi kui tagasi suunas on ca 88 N, seega peaks lõks vastu pidama vähemalt nii suurele jõule. Kuna klambritest oli olemas prototüübid, siis kõige realistlikuma tulemuse saamiseks kontrolliti tugevust katsete käigus. Klamber kinnitati võimalikult jäigalt ning koormati lõksusid kuni purunemiseni. Pilt katsest on toodud Joonisel 6.19.



Joonis 6.19 Klambri lõksu vastupidavuse test

Joonisel 6.19 on näha, et klamber on kinnitatud ülalt kõiega võimalikult jäiga tala külge, mis toetub mõlemast servast samuti jäigalt. Klambri lõksu sisse on kinnitatud paranduslapp, mida hakati koormata alla suunas, kuni klambri lõks purunes.

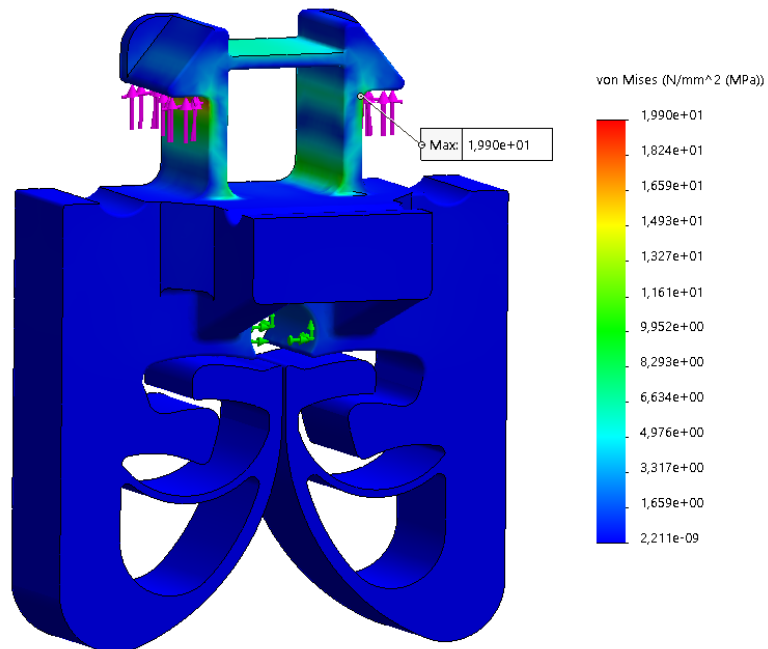
Maksimaalne koormuse mass, millele lõksud vastu pidasid oli 24 kg ehk tõmbejõud F_T on ca 235 N, mis on suurem, kui nõutud 88 N, seega on lõksud piisavalt vastupidavad. Tuleb arvestada, et prototüüpide puhul oli tegemist kihtlisandusmeetodiga toodetud PLA plastist detailidega, mille tugevusnäitajad on võrreldavad HDPE omadustega [42], kuid kihtlisandusmeetodi puhul ei ole tootmiskvaliteet nii kõrge, seega võib lõpptoodete vastupidavus veelgi suurem olla.

Klambri kahe poole vahelise kinnituse tugevuse kontrollimine

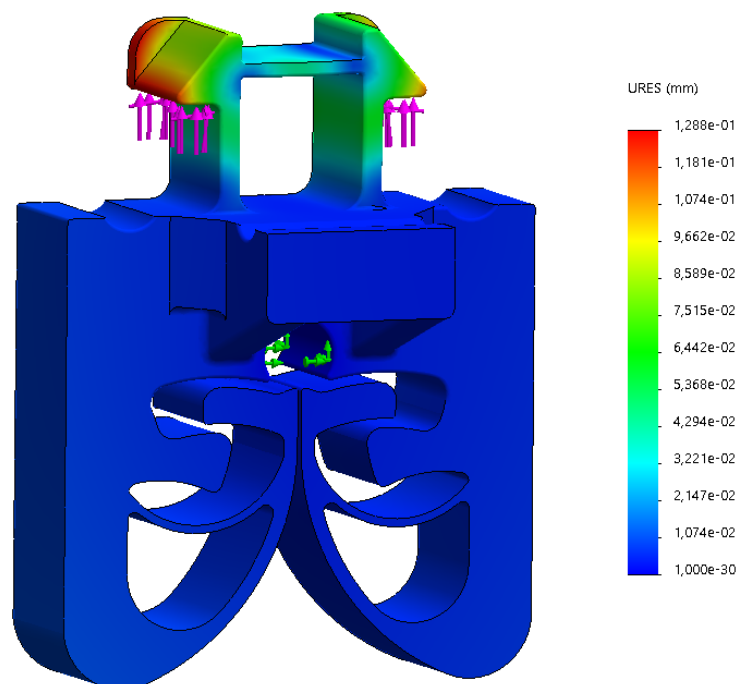
Samuti nagu peab klambri lõks vastu pidama tõmbele, peab ka kahe klambri poole vaheline tappkinnitus sarnasele koormusele vastu pidama, mis tähendab, et kui robot kogu oma tõukejõuga klambrit kalavõrgu küljest ära tõmbab, ei tohi ka klambri pooled teineteise küljest lahti tulla. Antud kinnituse tugevust kontrolliti nii LEM ehk lõplike elementide meetodit kasutades kui ka realses katses.

LEM-i puhul fikseeriti detail jäigalt ning osutati 88 N suurune jõud kinnituse haaradele. Arvutuses on kasutatud autori disainitud klambrit, millel on samuti haarade vahel

jäigastav lüli, kuid mudelit on arvutuse jaoks lihtsustatud. Koormuskeemist tulenevad pinged ning deformatsioonid on toodud Joonistel 6.20 ja 6.21. Antud joonistel on näha, et roheliste nooltega tähistatud pind on märgitud fikseerituks ning roosad nooled näitavad jõu mõjumise asukohta ning suunda.



Joonis 6.20 LEM tulemusena leitud pinged autori disainitud klambri haarades – 3D mudel



Joonis 6.21 LEM tulemusena leitud deformatsioonid autori disainitud klambri haarades – 3D mudel

Tugevusanalüüsi tulemusena leiti, et maksimaalne detailis tekkiv pinge on ca 20 MPa, mis on madalam kui materjali tõmbetugevus, seega on detail piisavalt tugev. Kui katsetuste käigus peaks selguma, et detail siiski koormusele vastu ei pea, siis on võimalik haarade jalgu paksemaks muuta, raadiusi suurendada või muud moodi detaili tugevdada. Maksimaalne tekkiv deformatsioon on ca 0,13 mm, mis on autori hinnangul lubatav.

Katsetuses koormati klambri koostu kuni purunemiseni sarnaselt lõksu katsetuse protseduuriga (Joonis 6.19). Antud katsetuste tulemusena leiti, et jäigastav lüli puruneb ning klambri pooled tulevad teineteise küljest lahti koormuse 18 kg ehk ca 177 N juures. Seega on kinnitus piisavalt tugev.

Klambri tugevusanalüüs vedru poolt avaldatud survele

Kuna klambriid on disainitud nii, et survevedruga surutakse just väljaulatuvat juhikut, siis on detaili nõrgim koht väljaulatuva osa kael, mis võib liigse jõu rakendamisel murduda. Kaela teeb nõrgemaks ka asjaolu, et nõõri jaoks on sinna tehtud süvend, mis toimib pingekontsentraatorina.

Klamber on konstrueeritud nii, et see toetub vastu eesoleva klambri tagumist osa. See on nii seetõttu, et ümarad osad ei hakkaks kanalis liigselt pöörduma, vaid hoiaksid end võimalikult risti kanali teljega. Selline disain garanteerib olukorra, kus vedrud ei suru edasi mitte ainult klambri kanalis olevaid osasid, vaid survejõud kantakse edasi ka klambri peaosasse.

Vedru surve on suurim, kui ta on maksimaalselt kokkusurutud. Vedru poolt mõjuv maksimaalne jõud on leitav Valemis 6.1 toodud Hooke' seaduse alusel [43].

$$F_V = R * s \quad (6.1)$$

kus F_V – vedru poolt avaldatav maksimaalne survejõud, N

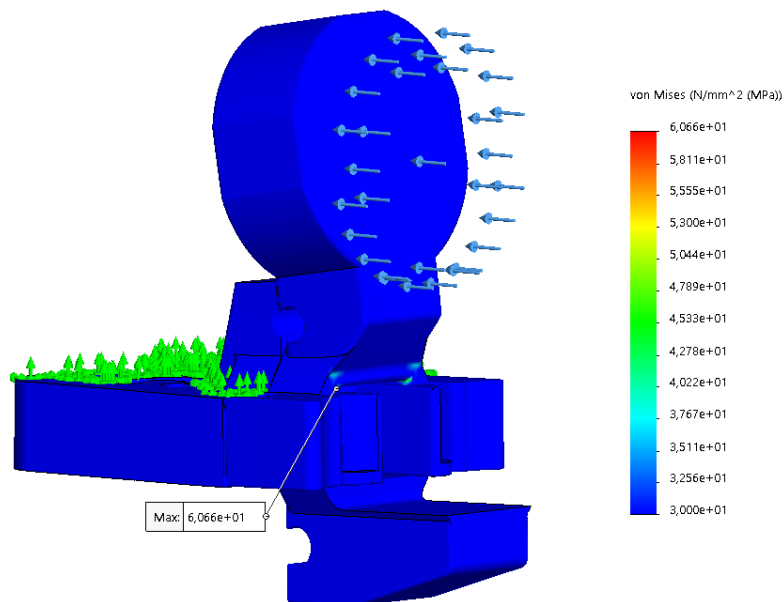
R – vedru jäikus, N/mm

s – vedru siire, mm

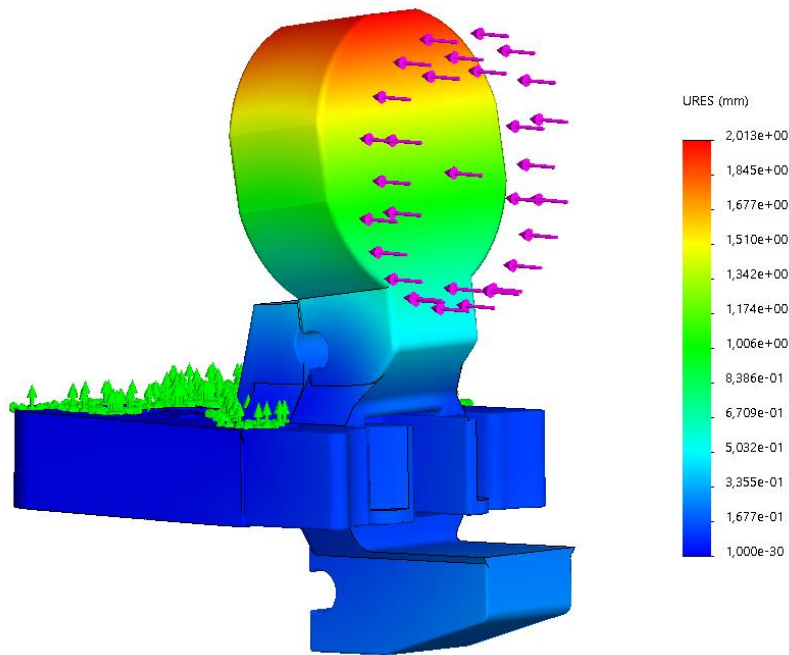
Survevedru spetsifikatsioonidest on teada, et vedru pikkus on 290 m. Kui magasinis on kuus paranduslappi, siis on vedru maksimaalselt kokkusurutud ning vedru pikkus on 87 mm. Seega on vedru pikenemine 203 mm. Vedru jäikus on 0,469 N/mm. Seega on Valemiga 6.1 leitav maksimaalne mõjuv survejõud.

$$F_V = R * s = 203 * 0,469 = 95,2 \text{ N}$$

Tugevusanalüüs viidi läbi LEM analüüsina, mille tulemusena leiti, et autori disainitud klambris tekkiv maksimaalne pinge on antud jõu puhul ca 61 MPa ning maksimaalne deformatsioon ca 2 mm. Tuvastati, et lubatust kõrgemad pinged on vaid ava nurkades ehk pingekontsentraatori läheduses, igal pool mujal on pinged oluliselt madalamad ning alla materjali tõmbetugevuse piiri. Joonisel 6.22 on kuvatud analüüsi tulemus, kus on värviskaala seatud nii, et alla 30 MPa pinged on toodud tumesinisega. Joonisel 6.23 on kuvatud deformatsioonid. Mõlemal joonisel on jõud mõjumise suund toodud siniste nooltega ning fikseeritud pind roheliste nooltega. Koormusskeemi on mõnevõrra lihtsustatud, arvestatud ei ole ka hõõrdumist detailide vahel.



Joonis 6.22 LEM tulemusena leitud pinged autori disainitud klambri juhikus – 3D mudel



Joonis 6.23 LEM tulemusena leitud deformatsioonid autori disainitud klambri juhikus – 3D mudel

Joonisel 6.22 kuvatud tulemuste põhjal on autor arvamusel, et reaalsuses on komponent siiski piisavalt tugev. Hinnang põhineb asjaolul, et pinget ületavad lubatud vaid pingekontsentraatorite läheduses, kus LEM analüüsi tulemused ei pruugi tihti kõige täpsemad olla. Samuti on arvutus mõnevõrra lihtsustatud. Fikseeritud tasapind ei ole reaalsuses fikseeritud päris täies ulatuses ning seetõttu suunatakse osa pingetest just sellesse klambri osasse. Detailide pindade vahel ei ole arvutuses arvesse võetud ka hõõrdumist. Lisaks on klambri soonte vahel tegelikkuses võrgulapp, mis takistab klambri osade omavahelist deformeerimist veelgi.

Kui katsetustel peaks selguma, et komponent koormusele siiski vastu ei pea, on võimalik vähendada pingekontsentraatorite mõju suurendades raadiuseid, suurendades materjali paksust või lisades tugevdavaid elemente. Tekkinud deformatsioon on vastuvõetav.

Survedru minimaalse survejõu kontrollimine

Selleks, et klambrit saaks kalavõrgu külge kinnitada, peavad survedrud olema piisavalt jäigad ning osutama piisavat vastujõudu. Survedrude poolt avaldatav jõud on vähim siis, kui nad on minimaalselt kokkusurutud, seega juhul, kui kinnitatakse viimast magasinis olevat võrgulappi. Arvestades, et kaheksa klambrit kinnitatakse samaaegselt, on maksimaalne vajalik jõud leitav korrutades klambrite arvu varasemalt

leitnud maksimaalse kinnitamisjõuga 5,5 N (Tabel 6.6). Seega on vajalik maksimaalne vedrude survejõu väärtus 44 N.

Olukorras, kus magasinis on jäänud üks paranduslapp, on vedru pikkus 267 mm, vedru deformeeritava pikkus on 290 mm. Seega on kuue vedru kombineeritud survejõud leitav Valemi 6.1 abil.

$$F_{VMIN} = R * s = (290 - 267) * 0,469 * 6 \approx 64,7 \text{ N}$$

Arvutusest tulenevalt saab väita, et vedrude survejõud on piisav, et kinnitada ka viimane magasinis olev paranduslapp.

6.3.3. Veerõhu mõju tööriistale

Tööriista disaini juures on oluline ka vastupidavus vee all oleva rõhu vastu. Hetkel on roboti potentsiaalne sukeldumisvõimekus ca 300 meetrit. Vee poolt avaldatav rõhk on leitav valemiga 6.2 [43].

$$P = g * \rho * h \quad (6.2)$$

kus P – vee poolt avaldatav rõhk, Pa
 g – raskuskiirendus, m/s^2
 ρ – vedeliku tihedus, kg/m^3
 h – vedeliku sügavus, m

Arvutuses arvestatakse, et vee tihedus on 1000 kg/m^3 ning raskuskiirendus on $9,81 \text{ m/s}^2$. Seega on mõjuv veerõhk leitav järgmiselt.

$$P = g * \rho * h = 9,81 * 1000 * 300 \approx 2,94 * 10^6 \text{ Pa} = 2,94 \text{ MPa}$$

Kuigi tööriista nii sügaval ei kasutata, on autori hinnangul mõistlik siiski tagada süsteemi vastupidavus ka maksimaalsel sukeldumissügavusel. Seda eriti põhjusel, et kui kasutaja peaks mingil põhjusel tööriista nii sügaval kasutama ning mõni komponent vee all puruneb, siis võib juhtuda, et olenevalt purunenud komponendist, võib tööriista ujuvus muutuda ning põhja vajuda, kust seda enam suure tõenäosusega kätte ei saa.

Kalavõrgu lapi puhul ei ole rõhu mõju märkimisväärne, kuna tegemist on materjali tavapärase töökeskkonnaga. Kuna kõikide tööriista komponentide puhul kasutatakse kas täismaterjali või kinnitustoru puhul veega täidetud toru, siis peavad kõikide materjalide tugevuspiirid olema kõrgemad, kui nimetatud 2,94 MPa. Kasutatud

materjalid on peamiselt HDPE plast, vähesemal määral ka roostevaba teras AISI-316, mille kõikide voolepiir on oluliselt kõrgem, kui vee poolt avaldatav rõhk. Seega ei avalda veerõhk komponentidele olulist mõju.

7. OMAHINNA ARVUTUS

Tööriista omahinna kalkuleerimiseks saadi kasutatavate komponentide hinnad kas e-poodidest või võeti otse ettevõtetelt hinnapakumised. Omahinna arvutamisel on lähtutud loogikast, et toodetakse kokku kümmeööriista koostu. Igas koostus on kuus võrgulappi, kuid kuna paranduslapi puhul on tegemist sisuliselt kulumaterjaliga, siis arvestati, et igale koostule on 30 võrgu paranduslappi ehk magasinini saab täita viis korda. Omahinna kujunemine on toodud Tabelis 7.1.

Tabel 7.1 Omahinna kujunemine

Komponent	Komponentide arv ühes koostus (tk)	Komponentide arv kokku (tk)	Pakkuja	Maksumus kokku (€)
Robotipoolne kinnitus	1	10	Fractory Solutions OÜ	400,00
Tööriistapoolne kinnitus	1	10	Fractory Solutions OÜ	300,00
Kinnitustoru	1	10	Coextrudedplastics, Eccom OÜ	450,00
Vahelüli	1	10	Vesimentor OÜ	10 000,00
Kaitsekorpused	1	10	Vesimentor OÜ	30 000,00
Ülemine klamber	48	2400	Vesimentor OÜ	4830,00
Alumine klamber	48	2400	Vesimentor OÜ	4830,00
Võrgulapp	6	300	Luxsol LLC	340,00
Survevedru [44]	6	60	Barnes Group Inc	480,00
Sisekuuskantpolt peitpea M6x25 [45]	4	40	Baltic Bolt OÜ	8,14
Sisekuuskantpolt M6X25 [46]	10	100	Baltic Bolt OÜ	24,91
Sisekuuskantpolt M6X45 [46]	2	20	Baltic Bolt OÜ	17,80
Lukustusmutter M6 [47]	20	200	Baltic Bolt OÜ	102,00
Liblikpolt M6X25 [48]	4	40	Baltic Bolt OÜ	102,00
Liblikpolt M6X50 [49]	2	20	Baltic Bolt OÜ	35,60
Liblikmutter M6 [50]	2	20	Baltic Bolt OÜ	33,00
Lõigatud seib 1" [51]	12	120	McMaster-Carr	173,29
Ümar nupp [52]	6	60	McMaster-Carr	72,76
Maksumus kokku				51 799,50
Maksumusööriista kohta				5179,95

Omahinna arvutusest selgub, et praeguse disaini juures oleks kümne tööriista koostu tootmise maksumus ca 52 000 € ehk ühe tööriista hind ca 5200 €. Selline maksumus ei ole liialt kõrge ning on ettevõttele vastuvõetav. Koostude arvu suurenemisel alaneb ka hind ühe tööriista kohta.

Küll aga tuleb arvestada, et maksumuses ei ole arvesse võetud tööjõukulusid, mis on vajalikud tööriista disainimiseks, detailide hankimiseks, koostamiseks, turunduseks jne. Samuti ei arvestata kulusid transpordile. On eeldatud, et täiendavat töötlemist komponendid ei vaja. Hinnad on ilma käibemaksuta.

Kõige suurem mõju tööriista omahinnale on korpusel ja vahelülil, mida on praeguse disaini juures küllaltki keerukas ja kallis toota. Autor mainib, et tööriista järgmistes versioonides tuleks leida lahendusi, kuidas antud komponentide tootmist lihtsustada ning sellega maksumust vähendada. Selleks võib näiteks jagada neid komponente omakorda detailideks või leida viise, kuidas klambreid korpuse külge lihtsamini kinnitada.

Samuti tasub märkida, et mitmed koostu komponendid tuleks hetkel tellida välismaalt, kuna selliseid komponente sobilike parameetritega autor Eesti pakkujatelt ei leidnud. Ka seda tuleks tulevaste tööriista versioonide juures arvestada, et võimalusel hankida kõik komponendid Eestist, et vähendada transpordikulusid ja tarneaega ning maandada ka tarnetõrgete riski.

8. EDASINE ARENDUS

Kuna parandustööriista puhul on tegemist toote esimese versiooniga, lähtus autor põhimõttest, et esmalt on mõistlik disainida esialgne konstruktsioon, mis lubaks toote katsetamist ja kasutamist. Peale seda saab kaardistada disainitud toote probleemkohad ning iteratiivselt neid uutes toote versioonides parendada. See tähendab seda, et toote praegune versioon ei sisalda paljusid lisafunktsioone ja -komponente, mida lansseeritav lõpptoode võiks sisaldada. Siinkohal soovibki töö autor välja tuua mõned ideed, mida edasises tootearenduses võiks rakendada.

Autor on tööriista disaininud täismehaaniliselt ehk tööriist toimib elektroonikakomponentideta. Kasutades lisaaajameid ja ülekandeid, saaks tööriistale juurde anda erinevaid funktsioone. Näiteks võiks lappide magasin asuda roboti all, mis potentsiaalselt lubaks parandada hüdrodünaamikat ning annaks võimaluse suurendada magasinini mahtuvate võrgulappide arvu. Kui töös toodud disain eeldab vaid ühe suurusega võrgulappide kasutamist, siis lisaaajamitega saaks lisada ka funktsionaalsuse kasutada erinevaid lapi suurusi, mis muudaks tööriista universaalsemaks.

Tööriista kinnitustoru on disainitud nii, et selle külge saaks kinnitada erinevaid tööriistu, samuti on see seest õõnes, mis lubaks toru seest vedada ka toite- ja/või andmesidekaableid, kui tööriist seda funktsioneerimiseks vajaks. Toru otsa saaks kinnitada näiteks lisakaamera või haaratsi.

Üheks Unsinkable Robotics OÜ eesmärgiks on see, et robot oleks kaugjuhitav üle 4G või 5G võrgu. Kuna veekeskonnas mobiilsides kasutatavad mikrolained ei levi, siis kasutatakse signaali vastuvõtmiseks ujuvat majakat, mille külge robot kaabliga siiski ühendatud oleks [53]. Sellise lahenduse puhul ei oleks operaatoril vajalik roboti läheduses olla. See tähendab seda, et tööriista peab olema võimalik ka kaugelt juhtides võrgulappidega täita. Selleks, et tööriista saaks ilma inimese füüsilise abita täita, peaks tööriist olema lihtsasti täidetav eestpoolt, praegune lahendus seda ei võimalda.

KOKKUVÕTE

Antud magistritöö ülesanneteks oli kaardistada Unsinkable Robotics OÜ teise allveeroboti versiooni peamised kitsaskohad ning leida optimaalne lahendus ühele nendest probleemidest. Lahendit soovitakse rakendada roboti kolmanda versiooni välja töötamisel.

Töö tulemusena tuvastati roboti teisel versioonil mitmeid kitsaskohti, näiteks mootorite liiga tihe omavaheline paigutus või ebaefektiivne akuvahetuse protsess, kuid põhjalikumaks lahendamiseks valiti kalakasvanduste kalavõrkude parandamise tööriista disainimine.

Antud tööriist on ette nähtud selleks, et allveerobotile anda võimekus parandada Norra kalakasvanduste, kes on ettevõtte üks peamisi sihtkliente, kalavõrkudesse tekkinud auke. Teema valiti põhjusel, et sellise tööriista puudumine on ettevõttele hetkel üks suurimaid takistusi kliendibaasi laiendamiseks ning seega vajalik praeguses arenguetapis esmajärjekorras lahendada. Samuti, kuna ettevõtte üheks eesmärgiks on roboti modulaarsuse suurendamine, siis ühe lisatööriista olemasolu aitab sellele oluliselt kaasa.

Autor püstitas tööriista disainimiseks selge lähteülesande, mis seab lahendile peamised nõuded ja piirid. Üheks olulisemaks eesmärgiks oli, et tööriist peaks ühe sukeldumisega olema võimeline parandama vähemalt viis võrguauku, mis muudaks protsessi oluliselt efektiivsemaks. Toote disainimise etapis loodi 3D mudel, viidi läbi insenertehnilised arvutused, leiti toote omahind ning koostati joonised. Klambri kui ühe toote kriitilisema detaili disainimiseks toodeti ka kihtlisandusmeetodiga prototüübid, mida sai pidevalt katsetada ning sellest tulenevalt disaini parandada. Tööriista komponendid on peamiselt valmistatud HDPE plastist, mis on veele lähedase tihedusega ning mida kasutatakse mitmetes merega seotud rakendustes, seega on materjal sobiv antud ülesandeks.

Autori hinnangul said töö eesmärgid täidetud ning autor leiab, et koostatud magistritöö aitab Unsinkable Robotics OÜ meeskonda tootearendusprotsessis edusamme teha. Kuna tegemist on tööriista esimese versiooniga, tuleb kindlasti reaalsete testimiste alusel disaini parandada ning täiustada. Töö lõpus on antud ka kokkuvõtte edasistest arendusideedest, mida autori hinnangul on järgmistes versioonides mõistlik kaaluda.

SUMMARY

The objectives of this master's thesis were to identify the main bottlenecks of the second version of the Unsinkable Robotics OÜ underwater drone and to find the optimal solution to one of these problems. The solution can be applied during the development of the third version of the drone.

As a result of the work, several bottlenecks were identified in the second version of the robot, such as too close arrangement of the motors or inefficient battery replacement process. However, designing of the tool for repairing fish cage nets in fish farms was chosen as the topic of the thesis.

The tool is intended to give the underwater drone the ability to repair holes in the fishing cage nets of Norwegian fish farms which are one of the company's main target clients. The topic was chosen because the lack of such a tool is currently one of the biggest obstacles for the company to expand its client base and therefore is required to be addressed as a matter of priority at this stage of development. Also, since one of the company's goals is to increase the modularity of the robot, the existence of one additional modular tool contributes significantly to this.

The author formed a clear initial task for the design of the tool, setting the main requirements and boundaries for the solution. One of the most important goals was to design a tool which would be able to repair at least five net holes in one dive, making the process significantly more efficient. During the product design phase, a 3D model was created, engineering calculations were performed, the net cost of the product was found and drawings were made. In order to design the clamp as one of the most critical components of the product, prototypes were also produced, which could be continuously tested and improved. The tool components are mainly made of HDPE plastic. As the material has a density close to the density of water and is used in many marine applications, the material is suitable for this task.

In author's opinion, the goals of this thesis were met and the prepared work helps the team of Unsinkable Robotics OÜ to make progress in the product development process. As this is the first version of the tool, it is necessary to improve and refine the design based on real tests. At the end of the work, a summary of further development ideas is given, which the author thinks are reasonable to consider in the following versions.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] BlueROV2. Blue Robotics. [Online] <https://bluerobotics.com/store/rov/bluerov2/>
- [2] The Salmon Lifecycle. Norwegian Seafood Council. [Online] <https://salmon.fromnorway.com/sustainable-aquaculture/the-salmon-lifecycle/>
- [3] Salmon Farming Industry Handbook 2020. Mowi. [Online] <https://mowi.com/it/wp-content/uploads/sites/16/2020/06/Mowi-Salmon-Farming-Industry-Handbook-2020.pdf>
- [4] Salmon Farming Industry Handbook 2019. Mowi. [Online] <https://ml.globenewswire.com/Resource/Download/1766f220-c83b-499a-a46e-3941577e038b>
- [5] Causal analysis of escape of Atlantic salmon and rainbow trout from Norwegian fish farms during 2010–2018. Føre, H. M., Thorvaldsen, T. *Aquaculture*, 2021.
- [6] Escapes of fish from Norwegian sea-cage aquaculture: causes, consequences, and prevention. Jensen, Ø., Dempster, T., Thorstad, E. B., Fredheim, A. *Aquaculture Environment Interactions*, 2010.
- [7] Risk assessment of the environmental impact of Norwegian Atlantic salmon farming. Taranger, G. L., Karlsen, Ø. *ICES Journal of Marine Science*, 2015.
- [8] Rømmingsstatistikk. Directorate of Fisheries. [Online] <https://www.fiskeridir.no/Akvakultur/Tall-og-analyse/Roemningsstatistikk>
- [9] Fish Pool Index Price History. Fish Pool. [Online] <https://fishpool.eu/price-information/spot-prices/history/>
- [10] 11,500 fish escaped from SalMar site last month. Drønen, O. A. 2020. [Online] <https://www.fishfarmingexpert.com/article/11500-fish-escaped-from-salmar-site-last-month/>
- [11] 49,000 salmon escape from Norwegian farm. *Fishfarmingexpert*. 2019. [Online] <https://www.fishfarmingexpert.com/article/49000-salmon-escape-from-norwegian-farm/>
- [12] Norwegian farm suffers escape of 6-kilo salmon. Nygård, A. E. D. 2020. [Online] <https://www.intrafish.com/salmon/norwegian-farm-suffers-escape-of-6-kilo-salmon/2-1-792320>
- [13] Fish farming in Norway. Dyrevern. 2019. [Online] <https://dyrevern.no/dyrevern/fish-farming-in-norway/>
- [14] NET PATCH KIT - DTG3. Deep Trekker. [Online] <https://www.deeptrekker.com/shop/products/net-patch-kit-dtg3>
- [15] 4 Ways Deep Trekker ROVs Save Fish Farms Money. Doornekamp, R. 2020. [Online] <https://www.deeptrekker.com/news/4-ways-deep-trekker-rovs-save-fish-farms-money>

- [16] [roVee]. Roboteknik. [Online] <http://www.roboteknik.com/products/product-information>
- [17] Subsee Services Ltd kodulehekülg. [Online] <http://www.subseeservices.com/>
- [18] Underwater net mender launched. Soltveit, T. 2018. [Online] <https://www.fishfarmingexpert.com/article/underwater-net-mender-launched/>
- [19] FISH NET SEWING MACHINE. Sperre. [Online] <https://sperre-as.com/portfolio/fish-net-sewing-machine/>
- [20] Method and device to handle a tear in a netting (WO2015147650A1). [Online] <https://patents.google.com/patent/WO2015147650A1/en>
- [21] Net patching devices (US8615851B2). [Online] <https://patents.google.com/patent/US8615851B2/en?q=US8615851B2>
- [22] Aquaculture operations in floating HDPE cages. A field handbook. Food and Agriculture Organization of the United Nations. [Online] <http://www.fao.org/3/i4508e/i4508e.pdf>
- [23] Window Door Screen Repair Roll Tape Netting Mesh Net Hole Tear Patch Universal. Ebayshopkorea. [Online] <https://www.ebayshopkorea.com/main/view?itemID=201687507844>
- [24] ¿Cómo reparar rotura de Red? Nudos y técnicas | Net mending. NES QUIN. 2017. [Online] https://www.youtube.com/watch?v=hHdWLAN-oiQ&ab_channel=NESQUIN
- [25] How to repair a trampoline safety net. Conceicao, B. 2016. [Online] https://www.youtube.com/watch?v=YfWXjI3vhtY&t=16s&ab_channel=BrianConceicao
- [26] 316 Stainless Steel, annealed. MatWeb. [Online] <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=dfced4f11d63459e8ef8733d1c7c1ad2&ckck=1>
- [27] Grade 316 Stainless Steel: Properties, Fabrication and Applications. AZO Materials. 2015. [Online] <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=2868>
- [28] Aluminum 6061-T6; 6061-T651. MatWeb. [Online] http://www.matweb.com/search/datasheet_print.aspx?matguid=1b8c06d0ca7c456694c7777d9e10be5b
- [29] All About 6061 Aluminum (Properties, Strength and Uses). Cavallo, C. [Online] <https://www.thomasnet.com/articles/metals-metal-products/6061-aluminum/>
- [30] Overview of materials for High Density Polyethylene (HDPE), Injection Molded. MatWeb. [Online] <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=fce23f90005d4fbe8e12a1bce53ebdc8>
- [31] Thermoplastic Materials – Cost Comparison. Dielectric Manufacturing. 2021. [Online] <https://dielectricmfg.com/knowledge-base/thermoplastic-materials-cost-comparison/>

- [32] Average monthly resin prices. PlasticPortal. 2021. [Online] <https://www.plasticportal.eu/en/polymer-prices/lm/14/>
- [33] Overview of materials for Acrylic, Cast. MatWeb. [Online] <http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?bassnum=01303>
- [34] GRP (Glass Reinforced Plastic) ACO material information. ACO. [Online] https://www.aco.hr/fileadmin/standard/aco_hr/Brosure/ACO_-_GRP_Material_Brochure.pdf
- [35] High-Tech Fibers for Marine Applications. Eric Greene Associates, Inc. [Online] http://www.ericgreeneassociates.com/images/High_Tech_Materials.pdf
- [36] Some Commonly Used Marine Materials. Handbook of Oceanographic Materials. Dexter, S.C. 1985.
- [37] MARINE APPLICATIONS. HDPE, Inc. [Online] <https://hdpeinc.com/hdpe-marine-applications/>
- [38] Netting Materials for Fishing Gear with Special Reference to Resource Conservation and Energy Saving. Saly, N. T., Sandhya, K. M. 2019. [Online] https://krishi.icar.gov.in/jspui/bitstream/123456789/30998/2/03_Netting%20Material%20for%20Fishing%20Gear.pdf
- [39] Prediction of size-dependent risk of salmon smolt (*Salmo salar*) escape through fish farm nets. Sistiaga, M., Herrmann, B., Foras, E., Frank, K., Sune, L. M. Aquacultural Engineering, 2020.
- [40] Cage Farming Aquaculture. AKVA Group. [Online] https://www.akvagroup.com/Downloads/CAGE%20EN%2011_08%202017.pdf
- [41] Salinization in a stratified aquifer induced by heat transfer from well casings. Van Lopik, J. H., Hartog, N., Zaadnoordijk, W. J., Cirkel, D. G., Raoof, A. Advances in Water Resources, 2015.
- [42] Overview of materials for Polylactic Acid (PLA) Biopolymer. MatWeb. [Online] <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=ab96a4c0655c4018a8785ac4031b9278>
- [43] Mehaanikainseneri käsiraamat, üldtoimetaja P. Kulu. Tallinn: TTÜ Kirjastus, 2012.
- [44] D22840-X: Round Wire Compression Springs. Associated Spring Raymond. [Online] <https://www.asraymond.com/round-wire-compression-springs/D22840X>
- [45] ISO 10642 A4. Baltic Bolt. [Online] <https://www.balticbolt.ee/Products/IndexByGroup?groupId=61>
- [46] DIN 912 A4-80. Baltic Bolt. [Online] <https://www.balticbolt.ee/Products/IndexByGroup?groupId=21>
- [47] DIN 985 Nylock A4-80. Baltic Bolt. [Online] <https://www.balticbolt.ee/Products/IndexByGroup?groupId=3195>

- [48] Stainless Steel Wing-Head Thumb Screw. McMaster-Carr. [Online]
<https://www.mcmaster.com/92625A418/>
- [49] Stainless Steel Wing-Head Thumb Screw. McMaster-Carr. [Online]
<https://www.mcmaster.com/92625A135/>
- [50] 316 Stainless Steel Wing Nut. McMaster-Carr. [Online]
<https://www.mcmaster.com/94543A420/>
- [51] Oversized Clipped Washer McMaster-Carr. [Online]
<https://www.mcmaster.com/93409A113/>
- [52] Plastic-Head Thumb Screws. McMaster-Carr. [Online]
<https://www.mcmaster.com/96016A578/>
- [53] Allveedrooni ülekandepoi elektroonika ja süsteemid. Erbsen, T. TalTech, 2020.

LISA 1. TÖÖRIISTAPOOLSE KINNITUSE JOONIS

LISA 2. KINNITUSTORU JOONIS

LISA 3. VAHELÜLI JOONIS

LISA 4. KAITSEKORPUSE JOONIS

LISA 5. KLAMBRI ALUMISE OSA JOONIS

LISA 6. TÖÖRIISTA KOOSTEJONIS (leht 1/3)

LISA 6. TÖÖRIISTA KOOSTEJONIS (leht 2/3)

LISA 6. TÖÖRIISTA KOOSTEJONIS (leht 3/3)