



**TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL**  
EESTI MEREAKADEEMIA  
Merenduskeskus

Ilona Pogodina

**LAEVAKERE PUHASTAMISEKS MÕELDUD KAUGJUHTIVA  
ROBOTTEHNOLOOGIA KASUTUSELEVÕTT EESTI  
SADAMATES**

Magistritöö

Juhendaja: Doktorant-nooremteadur Dan Heering

Tallinn 2022

Olen koostanud töö iseseisvalt.

Töö koostamisel kasutatud kõigile teiste autorite töödele, olulistele seisukohtadele ja andmetele on viidatud.

Ilona Pogodina

.....

(allkiri, kuupäev)

Üliõpilase kood: 204209VAAM

Üliõpilase e-posti aadress: ilpogo@ttu.ee

Juhendaja doktorant-nooremteadur Dan Heering:

Töö vastab lõputööle esitatud nõuetele

.....

(allkiri, kuupäev)

Kaitsmiskomisjoni esimees: Itella Logistics OÜ juhatuse esimees, Meelike Paalberg

Lubatud kaitsmisele

.....

(ametikoht, nimi, allkiri, kuupäev)

# Sisukord

Annotatsioon.....	7
Lühendite loetelu .....	8
Sissejuhatus .....	9
1 Tänapäeva meretööstuse probleemid ja nende lahendamine.....	12
1.1 Probleemid.....	12
1.1.1 CO <sub>2</sub> heitkoguste probleemid.....	12
1.1.2 Laevakere kattumine bioloogiliste organismidega .....	14
1.1.3 Biosaaste mõju laevade efektiivsusele .....	15
1.2 Olemasolevad lahendused .....	17
1.2.1 Tuukriettevõtte Subsea Global Solutions .....	17
1.2.2 Tuukriettevõtte DG- Diving Group Oy .....	18
1.2.3 Tööstuslikud standardid laevakere veealuse puhastamiseks .....	18
1.3 Roboti kasutuselevõtt .....	19
1.4 Robotid laevakere puhastamiseks.....	21
1.4.1 Fleet Cleaner.....	22
1.4.2 Jotun Hull Scating Solutions .....	23
1.4.3 HullWiper robot.....	24
1.4.4 Laevakerede transiidipuhastusrobot ITCH.....	25
1.4.5 Ettevõtte Greensea Systems, Inc .....	27
2 Uurimistöö metoodika .....	30
2.1 Uurimisstrateegia valik.....	30
2.2 Valim .....	30
2.3 Uurimistööks vajalike andmete kogumise viisid.....	31
2.3.1 Küsitlus robotitehnoloogia tootjatele.....	31
2.3.2 Küsitlus Eesti asuvatele sadamatele .....	32
2.3.3 Küsitlus laevandusettevõtetele .....	33
2.3.4 Küsitlus teistele organisatsioonidele .....	33
2.3.5 Kirjalike allikate analüüs .....	34
3 Analüüsiv osa .....	35
3.1 Laevakere puhastamiseks mõeldud robotite võrdlusanalüüs.....	35
3.2 Laevandusettevõtte kriteeriumid laevakere puhastusrobotite kasutuselevõtuks .....	36

3.3 Laevakere puhastamise kalkulatsioon ja võrdlus tuukrite ja roboti abil puhastamise kuludele TS Laevade OÜ näitel .....	38
3.3.1 Kulude analüüs ilma laevakere puhastamiseta .....	39
3.3.2 Kulude analüüs laevakere puhastamiseks tuukritega .....	40
3.3.3 Tasuvusanalüüs robotite kasutuselevõtuks viieks aastaks.....	41
3.3.4 Kulude analüüs laevakere puhastamiseks <i>ITCH</i> robotiga .....	43
3.4 Roboti eelised laevakere puhastamisel .....	44
3.5 Tulemuste analüüs .....	44
Kokkuvõte .....	46
Summary.....	48
Viidatud allikad .....	51
Lisa 1. HullWiper roboti andmed .....	56
Lisa 2. Armach roboti andmed .....	58
Lisa 3. Tootjate ettevõtjate nimekiri.....	59
Lisa 4 Robotite võrdlusanalüüs .....	61
Lisa 5 Küsimustik.....	63

## Jooniste loetelu

Joonis 1. Laevakere puhastuse protsess „ <i>EnviroHull</i> “-i abil. Puhastamine, filtreerimine, utiliseerimine .....	17
Joonis 2. Fleet Cleaner robot .....	22
Joonis 3. HSS robot. Roboti paigaldamine meeskonna poolt, järelevalve Jotuni spetsialistide poolt, laevakere puhastamine .....	23
Joonis 4. HullWiper robot .....	24
Joonis 5. ITCH robot .....	25
Joonis 6. ITCH robot laeva veealuse töö režiimis .....	26
Joonis 7. Armach robot kasutusel.....	28

## **Tabelite loetelu**

Tabel 1. Sadamate nimekiri küsimustik .....	32
Tabel 2. Küsimustik laevandusfirmale .....	33
Tabel 3. Muud organisatsioonid, mille esitati küsimustik.....	34
Tabel 4. Kulude prognoos viieks aastaks ilma laevakere puhastamiseta .....	40
Tabel 5. Kulude prognoos viieks aastaks puhastamine tuukritega.....	41
Tabel 6. Kulude robotite võrdlusanalüüs.....	42
Tabel 7. Kulude prognoos viie aastaks laevakere puhastamiseks „ITCH“ robotitega .....	43

## Annotatsioon

Laevakerede biosaaste kujutab endast ohtu keskkonnale. Bioloogiline laevakere veealune kasvumine ei toimi mitte ainult vees elavate võõrliikide leviku soodustajana, vaid suurendab ka kere takistust ja vähendab propelleri efektiivsust, mis toob kaasa suurema kütusekulu ja õhuheitmete suurenemise. Laevakerelt saaste eemaldamisel esinevad riskid on erosiooni või katte kahjustamine ning võõrliikide sattumine kohalikku merekeskkonda. Kahjulike heitkoguste vähendamiseks on Rahvusvaheline Mereorganisatsioon (*IMO*) teinud koostööd erinevate sidusrühmadega eeskirjade ning tehniliste ja operatiivsete meetmete väljatöötamise. Erinevad laevandussektorid on *IMO* egiidi all välja töötanud kaks meetet energiatõhususe parandamiseks. Töötati välja energiatõhususe projekteerimisindeks (*EEDI*), et parandada uute laevade energiatõhusust ning laevade energiatõhususe juhtimise kava (*SEEMP*). *SEEMP*-i kohaselt on parimaks meetodiks kütuse tõhusa käitlemise jaoks laevakere hooldus. Kui tuukrid puhastavad laeva, siis kaasnevad sellega mitmed puudused nagu suur töömaht, madal tõhusus, piiratud tööaeg ja vigastuste võimalus. Seega on veealused kerepuhastusrobotid saanud parimaks lahenduseks tuukrite asendamiseks laevakere puhastamisel.

Magistritöö analüüsib, kas oleks võimalik võtta Eesti sadamates laevakere puhastamiseks kasutusele kaugjuhitav robottehnoloogia ning kas see on võrreldes tuukrite kasutamisega ka efektiivsem ja kulutõhusam.

Märksõnad: *SEEMP, kaugjuhitav robot, laevakere puhastamine, CO<sub>2</sub> heitkogused, biosaaste*

## Lühendite loetelu

BIMCO Balti ja Rahvusvaheline Merendusnõukogu (The Baltic and International Maritime Council)

CO<sub>2</sub> Süsidioksiid (Carbon dioxide)

DCS Andmete kogumise süsteem (Data Collection System)

DOF Vabadusaste (Degrees of Freedom)

DWT Laeva täielik kandevõime (Deadweight)

EEDI Uute laevade energiatõhususe indeks (Energy Efficiency Design Index)

EL Euroopa Liit (European Union)

GHG Kasvuhoonegaasid (Greenhouse Gas)

ICS Rahvusvaheline Laevanduskoda (International Chamber of shipping)

IMO Rahvusvaheline Mereorganisatsioon (International Maritime Organization)

MEPC Merekeskkonnakaitse komitee (Marine Environment Protection Committee)

MGO Laevagaasiõli (Marine Gas Oil)

MRV Seire, Aruandlus ja Kontroll (Monitoring, Reporting and Verification)

ROV Kaugjuhitav veealune sõiduk (Remotely Operated Underwater Vehicle)

SEEMP Laevade energiatõhususe juhtimiskava (Ship Energy Efficiency Management Plan)

USA Ameerika Ühendriigid (The United States of America)



## Sissejuhatus

Tänapäeva maailm on kiires tehnoloogilises muutumises. Üha rohkem kasutatakse erinevates majanduse valdkondades tehisintellekti ja robotikat, samas toimub digitaliseerimine ja automatiseerimine. Suureks väljakutseks maailmas on rohepööre, järjest rohkem sektoreid arvestab oma tegevustes ja arengutes kliimasäästlike meetmeid. Sarnased muutused toimuvad ka merenduses, näiteks autonoomsete kaugjuhitavate tehnoloogiate kasutamine laevanduses. Praeguste uuenduste peamiseks põhjuseks merenduses on meremeeste ohutuse tagamine robottehnoloogiat kasutades ning suunatud keskkonna säästmiseks. Lisaks saab selle abil tõsta laeva energiatõhusust, vähendades kütusekulusid, mis omakorda vähendab kasvuhoonegaaside teket. Roboteid kasutatakse merenduses mitmel otstarbel, alates puhastamisest ja hooldamisest kuni täielikult autonoomsete laevade, millel ei ole kaptenit ega meeskonda, juhtimiseni.

Laevandussektoril on surve parandada oma jätkusuutlikkust, suurendada tõhusust ja vähendada keskkonnamõjusid. Regulatsioonid, kütusekulude tõus ning prahtijate ja kaubasaatjate surve tarneahela jätkusuutlikkuse parandamiseks on laevaomanike ja operaatorite töö tõhususe suurendamise peamised tegurid. Ülemaailmne merenduskoogukond on pühendunud keskkonnasäästlikumate ja puhtama veega sadamate ehitamisele, kohaliku õhusaaste vähendamisele ning laevandus- ja sadamakogukonna panuse suurendamisele kliimamuutuste eesmärkide saavutamisel. Laevakere seisukord mängib olulist rolli selle tõhususe ja üldise jõudluse suurendamisel. Puhta kerega laev tarbib vähem kütust ja toodab vähem kasvuhoonegaaside heitkoguseid. Traditsiooniliselt teostavad veealust kerepuhastust plastik- või traatharjadega varustatud tuukrid. Kuigi see meetod on laialt levinud, tekitab see mitmeid probleeme, sealhulgas ohutusprobleeme, saastumisvastaseid kahjustusi ja piiranguid puhastuskohtadele laevakere puhastamisele seatud keskkonnapiirangute tõttu (Bertram 2020, 4-6). Kõige suurem probleem on keskkonnamõju, kuna puhastusprotsess toob tavaliselt kaasa selle, et eemaldatud aine ladestub merepõhja või jääb vette triivima. Sellel võib olla kahjulik mõju kohalikule ökosüsteemile. Nüüdne maailm on suunanud oma tegevused ülalkirjeldatud probleemide lahendamisele, mistõttu käesoleva magistritöö teema on aktuaalne.

Veealuse laevakere puhastamise eesmärk on eemaldada bioloogiline karedus või saastumine, samuti aitab see vähendada võõrliikide levimise riski (Curran *et al.*, 2016, 15). Laevakere kattumine bioloogiliste organismidega mõjutab negatiivselt laeva hüdrodünaamilisi parameetreid, mis viib laeva liikumisomaduste halvenemiseni. See vähendab laevade kiirust ja suurendab

tegevuskulusid. Kütusekulu moodustab umbes 80% laeva ekspluatatsioonikuludest, seega on “puhas” kere oluline tegur laeva ökonoomsel töötamisel (Vaab 2020, 15-17). Puhta veeluse pinnaga laev võib potentsiaalselt säästa kütusekuludelt üle 5% (Lee *et al.*, 2021, 1).

Robotpuhastus on üks viis laevakerede puhastamiseks ja seda kasutatakse maailmas üha enam, kusjuures esile kerkivad erinevad lahendused. Seda arengut juhivad mitmed tegurid, mille eesmärk on tõhustada traditsioonilisi veeluseid puhastusviise, kasutades lisaks tuukritele ka robotlahenduste abi, mille peamine suund on inimeste tervisele ohtlike või potentsiaalselt ohtlike olukordade likvideerimine, töökoormuse vähendamine ja efektiivsuse suurendamine. Kui tuukrid puhastavad laevakere, siis on sellel puudusi nagu suur töömahukus, madal efektiivsus, piiratud tööaeg ja võimalikud potentsiaalsed isikukahjustused (Song & Cui 2020, 8). Uus ennetav puhastusmeetod on konstrueeritud selliselt, et see hoiaks kere alati saastumata võrreldes tavapärase puhastusmeetoditega. Käesoleva magistritöö teema uudsus seisneb selles, et Eestis ei ole robottehnoloogiat veel rakendatud ning laevakere puhastamine toimub veel traditsioonilisel meetodil tuukrite abil.

Käesoleva magistritöö eesmärk on analüüsida rahvusvahelisel turul kättesaadavat laevakere puhastamiseks mõeldud kaugjuhitavat robottehnoloogiat, ning selle kasutamise võimalusi Eesti sadamates. Eesmärgi saavutamiseks otsib autor vastust järgnevatele uurimisküsimustele:

1. Kas sadamatel on huvi pakkuda laevakere roboti abil puhastamise teenust?
2. Kas tootjad rendivad, müüvad või pakuvad ise puhastusteenust ettevõttele?
3. Millised on laevaomaniku kulud tuukritööde puhul ning kui palju maksab robottehnoloogia?
4. Kuidas teostatakse roboti hooldust?
5. Kuidas teostatakse koolitust ja väljaõpet roboti kasutamiseks?
6. Kui palju kulub aega laevakorpuse puhastamiseks tuukrite abil ja robotiga?
7. Millistel tingimustel oleks laevandusettevõtted huvitatud robottehnoloogia abil teenuse kasutamisest?
8. Millised on robottehnoloogiaga laevakere puhastamise eelised võrreldes traditsioonilise puhastusviisiga?

Magistritöö autor püstitas töös hüpoteesi, et laevakere puhastamine robottehnoloogia abil on soodsam ja efektiivsem kui puhastamine tuukrite abil.

Käesolev magistritöö koosneb kolmest peatükist. Esimeses peatükis antakse ülevaade olemasolevate biosaaste ja CO<sub>2</sub> heitkoguste probleemide kohta ja pakutakse nende lahendamise meetmed.

Käsitletakse ka erinevaid laevakorpuse puhastamise meetodeid. Magistritöö teises peatükis tutvustatakse valitud metoodikat ehk uurimisstrateegiat. Tuuakse välja kasutatud kvalitatiivsete andmete kogumise meetodid, milleks on struktureeritud küsitlus ja kvantitatiivsete andmete kogumise meetodid, milleks on hindav uuring. Laevaomaniku kütuse- ja laevakere puhastamiseks kulude analüüs ning järeldused leiavad kajastamist kolmandas peatükis.

# 1 Tänapäeva meretööstuse probleemid ja nende lahendamine

Antud peatükis kirjeldatakse kasvuhoonegaaside keskkonda paiskamisest tulenevaid probleeme ja laevade saastumise probleemi, mis toob kaasa täiendava kütusekulu. Kirjeldatakse ka meetmeid probleemide lahendamiseks. Peatükis kirjeldatakse ka robottehnoloogia uuendusi, mis on maailmas kasutusele võetud laevakere puhastamiseks. Peatüki viimases osas antakse ülevaade erinevates riikides kasutusel olevatest kerepuhastusrobotitest.

## 1.1 Probleemid

Järgnevas alapeatükis annab autor ülevaate tänapäeva meretööstuse probleemidele, mis on seotud  $CO_2$  heitkoguste ja laevakere kattumine bioloogiliste organismidega.

### 1.1.1 $CO_2$ heitkoguste probleemid

Kasvuhoonegaaside heitkoguste tagajärjel toimuv globaalne soojenemine on praegu pakiline küsimus. Neid heitkoguseid tekitavad mitmed tööstusharud, eriti transporditööstus. Laevandus moodustab umbes 90% kogu maailma transporditegevusest, kusjuures umbes 80 000 kaubalaeva teostab iga päev kaubaveooperatsioone kogu maailmas ja laevandus põhjustas 2008. aastal umbes 870 miljonit tonni ehk 2,8% maailma  $CO_2$ -heitest (International Chamber of Shipping 2019, 16). Seetõttu tuleb tähelepanu pöörata energia majandamisele, mis on sageli seotud erinevate kütuse liikide tarbimisega. Ratsionaalne kütusehaldus aitab oluliselt kaasa saasteainete heitkoguste vähendamisele, vähendades seeläbi mõju keskkonnale ja majandusele (World Energy Council 2016).

Kahjulike heitkoguste vähendamiseks on Rahvusvaheline Mereorganisatsioon (*IMO*) teinud koostööd erinevate sidusrühmadega eeskirjade ning tehniliste ja operatiivsete meetmete väljatöötamiseks. Järgnevad jõupingutused on parandanud energiatõhusust merendussektoris. Erinevad laevandussektorid on *IMO* egiidi all välja töötanud kaks meetet energiatõhususe parandamiseks. Töötati välja energiatõhususe projekteerimisindeks (*EEDI*), et parandada uute laevade energiatõhusust ja laevade energiatõhususe juhtimise kava. Laeva energiatõhususe juhtimiskava (*SEEMP*) on kõikide laevade, sealhulgas olemasolevate laevade, energiahalduse vahend (*IMO* 2018). Samuti on asjakohane märkida, et mõned osapooled on piirkondlikul tasandil välja töötanud meetmed merendussektori kasvuhoonegaaside heitkoguste vähendamiseks (*IMO* 2009). Näiteks seire, aruandlus ja kontroll (*MRV-Monitoring, Reporting and Verification*). Kõik Euroopa Liidu

(EL) sadamates tegutsevad kauba- või reisilaevad, mille kogumahutavus on üle 5000 brutotonni, peavad esitama andmed kütusekulu kohta (European Parliament 2015). Need andmed avaldati ja tehti avalikult kättesaadavaks 2019. aasta juulis (EMSA 2019). *MRV* eesmärk on jälgida ja parandada laevade kasvuhoonegaaside (*GHG*) heitkoguste ja leevendustehnoloogiate mõju ning läbipaistvust (Dietrich & Mert 2017,7). *MRV*-d kasutatakse ELi meetmete kontekstis kliimamuutust ja säästvat majandusarengut mõjutavate heitkoguste vähendamiseks (LECB Programme i.a.).

Mitmete eesmärkide saavutamiseks võttis *IMO* merekeskkonnakaitse komitee (*MEPC*) siiski 2018. aasta aprillis vastu esialgse strateegia laevanduse kasvuhoonegaaside heitkoguste vähendamiseks. Vastavalt *IMO* teisele uuringule kasvuhoonegaaside heitkoguste kohta võib see suhe suureneda võrreldes 2007. aastaga kaks kuni kolm korda tihenunud laevaliikluse tõttu. *IMO* loodab vähendada laevandussektori aastaseid kasvuhoonegaaside koguheitmeid 2050. aastaks vähemalt 50% võrra võrreldes 2008. aastaga, enne kui jõutakse järk-järgult süsinikdioksiidi heitkoguste vähendamise etapini. (*IMO* 2019)

*SEEMP* koosneb kahest osast. Esimese osa eesmärk on juhtida ettevõtte poolt kasutatavate laevade keskkonnategevuse tulemuslikkust, et parandada laevade tõhusust. Esimese osa neli olulist sammu võib kokku võtta järgmiselt: planeerimine, rakendamine, järelevalve ning lõpuks enesehindamine ja täiustamine. Teine osa on laeva kütuse tarbimise andmete kogumissüsteem. See hõlmab laevaspetsiifilist meetodit laevaandmete kogumiseks, koondamiseks ja aruandluseks aastase kütuse tarbimise, läbitud vahemaa, sõidutundide ja muude andmete kohta, mis tuleb esitada. Nagu *MRV* puhul, on ka andmete kogumissüsteemi *DCS* eesmärk koguda ja esitada andmeid laevade kohta, eelkõige iga-aastase kütusekulu, töötundide ja reisi vahemaade kohta. (*IMO* 2016) Laevakere hooldamine kuulub *SEEMP*-i kütusesäästu parimate tavade hulka energiatõhususeks. Soovitatav on regulaarselt kontrollida laevakere seisukorda vees.

*IMO* 2011. aasta uuring näitab selgelt, et *EEDI* ja *SEEMP* rakendamine võib kaasa tuua iga-aastase süsinikuemissiooni vähenemise, mis tähendab 2030. aastaks keskmiselt umbes 14% vähenemist. Vähenemise suurendatakse ligikaudu 330 miljoni tonni süsinikdioksiidi võrra aastas ja keskmine vähenemine on tavapärase määraga võrreldes ligikaudu 23%. Majanduslikust vaatenurgast vaadatuna säästavad meetmed süsinikdioksiidi heitkoguste vähendamiseks laevanduses kütusekulusid. Iga aastane kütusekulude kokkuhoiu prognoos annab hinnanguliselt keskmiselt 50 miljardit USA dollarit. Hinnanguliselt on kokkuhoid 2030. aastaks umbes 200 miljardit dollarit. (*IMO* 2011) Kere hooldamine kuulub *SEEMP*-i kütusesäästu parimate tavade hulka. Kere hooldus

on oluline, et vältida bioloogilist saastumist. Reostuse kontrollimine võib olla tõhus vahend energiatõhususe parandamiseks ja laevade õhuheitmete vähendamiseks. Seda on tunnustanud Rahvusvaheline Mereorganisatsioon ja see on selgelt kajastatud *SEEMP*-i suunistes (IMO 2016).

### 1.1.2 Laevakere kattumine bioloogiliste organismidega

*SEEMP*-i parimaks meetmeks kütuse tõhusaks käitlemiseks on laevakere hooldus. Laevakere hävimise on põhjustatud biosaastumisest. Bioloogiline saastumine on veeorganismide, näiteks lima, vetikate ja merekarpide kogunemine laeva veealustele pindadele. Selle biosaaste kogunemine laevakerele on probleemiks mitte ainult võõrliikide ülekandumisele teise merekeskkonda, vaid ka õhusaastele, kütusekulu suurenemisele ja laeva konstruktsioonide kareduse suurenemisele. Isegi kere kareduse väike suurenemine mõjutab negatiivselt kere hõõrdetakistust. See toob kaasa vajaduse täiendava võimsuse rakendamise ja täiendava kütusekulu järele laeva kiiruse säilitamiseks. Pideva võimsuse säilitamine toob kaasa laeva kiiruse vähenemise ja sõiduaja pikenemise. (Bader-Eldin 2008, 3-6)

Kütusekulu suurenemine ei ole väike. Eeldades, et laev vajab 100 tonni kütust päevas, võib sama laev mõne kuu pärast sama kiiruse säilitamiseks vajada 115 tonni kütust, mis on tingitud reostuskahi kogumisest laevakeresse, eriti nišipiirkond (Hakim *et al.*, 2018). Sellegipoolest on IMO 2011. aasta juulis vastu võetud resolutsioonis *MEPC.207(62)* välja töötanud laevakere reostuse kontrollimise ja haldamise suunised. Suunised on vabatahtlikud ja nende eesmärk on käsitleda biosaaste majandamist ülemaailmselt ühtse lähenemisviisi abil (IMO 2011).

Resolutsioon *MEPC.207(62)* soovib omada pardal biosaaste logiraamatut (*Biofouling Record Book*), mis peaks sisaldama laevaspetsiifilist biosaaste ohjamise strateegiat. Samuti on selles soovitusel kohaldada kaasaegseid antisaaste leevendamistehnoloogiaid, nagu saastumisvastane kate ja laevakere kattumise vältimise süsteem. Käsiraamatus nõutakse laevakere kontrollimist ja puhastamist, kui laev on pikemat aega ankrus või kai ääres. Lisaks soovib IMO järgida tavapäraseid majandamistavasid ja kanda andmed biosaaste logiraamatusse. Suunistes rõhutatatakse, et biosaaste kontroll ja haldamine parandab energiatõhusust ja vähendab laeva heitkoguseid. (*Ibid*)

Kõikidel laevadel esineb teatud määral bioloogilist saastumist. Bioloogilise saastumise protsess algab esimestest tundidest pärast laeva vette laskmist. Bioloogilise saastumise esinemist laevakerel mõjutavad paljud tegurid nagu konstruktsioon ja ehitus, eriti süvistatud alad, nende asukoht ja ehitus, eranditult Kingstoni kast, võõritõukur, laevakere väljaulatuvad osad, eendused ja muud.

Hoolduskuupäevad on väga olulised laevakere biosaastega kattumise vältimiseks, samuti lagunemisvastaste süsteemide ja puhastusmeetodite toimimine, kuivdokkimine, laeva kiirus ning sildunud või ankrus oleva laeva lagunemisvastase katte tüüp, vanus ja seisund. Sealhulgas mõjutavad biosaastega kattumist ka kaubateed ja tööpiirkond, näiteks vee soolsus ja temperatuur. Biosaaste kontrolli ja tõhusate majandamisviiside kasutuselevõtt aitab oluliselt vähendada laevakere biosaastega kattumist. Seega võivad sellised tavad parandada laeva hüdrodünaamilisi omadusi. (Swain 2017)

Uuringus, milles uuriti reostuse üldist mõju Ameerika Ühendriikide (USA) mereväe laevadele, leiti, et suurenenud hõõrdetakistus suurendas kütusekulu 10% võrra. Keskkonna seisukohalt tähendab see täiendavat 10%  $CO_2$ -heitkogust. Lisaks näitas uuring, et laevakere reostumisega seotud kulud, mis tulenevad täiendavast kütusekulust, on 1,15 miljonit USA dollarit aastas laeva kohta. Üldiselt peaks kogu USA keskmise suurusega hävitajate klassi laevade puhul saastumisega seotud kulud, sealhulgas kõik tööd nagu laevakere puhastamine, kere katmine, katte pealekandmine ja eemaldamine, olema kokku 56 miljonit dollarit aastas või 1,0 miljardit dollarit 15 aasta jooksul. (Schultz *et al.*, 2010) Näiteks 100 000-tonnise mahutavusega tankeri kere mõõduka bioloogilise saastatuse põhjustatud 30%-line tõmbetakistuse suurenemine suurendaks laeva kütusekulu kuni 12 tonni võrra päevas, põhjustades laeva tegevuskulude ja heitkoguste suurenemist (Song & Cui 2020, 1).

Kaks peamist keskkonnakahju, mida biosaaste laevakerel põhjustab, on laevade kütusekulu suurenemine, mis toob kaasa täiendava  $CO_2$ -heite ning võõrliikide ülekandmine. Laeva biosaaste ja suurenenud heitgaaside probleemide lahenduseks võib olla pidev laevakere puhastamine, mis omakorda on laevaomanikele kulukas protsess. Tuukrite abil puhastamine on kulukas ja sellega kaasneb õnnetuste oht. (Nassiraei *et al.*, 2012, 1)

### **1.1.3 Biosaaste mõju laevade efektiivsusele**

Biosaaste mõjutab negatiivselt laeva hüdrodünaamilisi omadusi, mis toob kaasa selle sõiduomaduste halvenemise, kiiruse vähenemise, tegevuskulude suurenemise ja kasvuhoonegaaside heitkoguste suurenemise. Kere saastumise tase ja kasvukiirus erineb laevade lõikes ning vastavalt merede ja ookeanide soolsuse tasemele. Madala soolsusega vesi põhjustab vähem bioloogilist saastumist, samas kui kõrge soolsusega saastumise määr suureneb. (Erol *et al.*, 2020, 1-2). Iga laev on eraldi juhtum, mille majanduslikku mõju kütusekulule tuleb analüüsida. Kerede perioodilise puhastamise abil vähendatakse igapäevast kütusekulu ligikaudu 9–17% (Adland *et al.*, 2018).

Biokile või lima moodustumise algstaadiumis jäetakse saastumise mõju tavaliselt tähelepanuta, kuid parvlaevade saastumise algusaastatel võib kütusekulu suurenedagi kuni 20% (Erol *et al.*, 2020, 1-2).

Laeva reostuskiiruse pikaajaliste vaatluste tulemusena selle töö algusest peale laevakere veealuse osa täielikku puhastamist selgus, et näiteks *Panamax*-tüüpi (mis on suurusklassis 50 000 – 80 000 DWT ja suudab läbida *Panama* kanalit) laevade puhul vähenes laevade kiirus keskmiselt 0,5 sõlme aastas. Laeva veealuse osa kareduse suurenemine vaid 15  $\mu\text{m}^1$  (mikromeeter) võrra suurendab selle liikumistakistust 1% võrra ning 20–30 mm suuruste rannakarpidega saastumine põhjustab kiiruse kaotust 4 sõlme võrra ja kütuse märkimisväärselt suurenenud kulu. Laevakere veealuse pinna kareduse edasine suurenemine suurendab kütusekulu kuni 10% iga 100  $\mu\text{m}$  saastumise kohta. (Kulchin *et al.*, 2015, 1–2)

Iga 10  $\mu\text{m}$  värskelt värvitud kere karedus üle 165  $\mu\text{m}$  suurendab kere takistust või nõutavat laeva võimsust etteantud kiiruse saavutamiseks 1% võrra. Kui karedus on üle 230 mikromeetri, nõuab selle suurendamine iga 10 mikromeetri kohta võimsuse suurendamist 0,5%. Korrosioon ja värvi hävimine vähendab laevade kiirust, suurendab vajalikku võimsust ja suurendab kütusekulu. Värvilagu lagunemise ja korrosiooni tõttu väheneb sõidukiirus keskmiselt 10-25%. (Mihhailov & Tkachuk 1971, 6)

Keskmine päevane kiiruse kadu olenevalt laevakere saastumise astmest, sõlme/päevas (*Ibid*):

- nõrga saastumisega 0,00014 - 0,0009.
- mõõduka saastumisega 0,001 - 0,0017.
- tugeva määrdumisega 0,0019 – 0,0023.

Laevakere puhastustoiminguid viiakse läbi kahel moodusel. Kõige kiirem ja odavam on veealune kerepuhastus, kus elektriliste harjadega varustatud tuukrid eemaldavad mehaaniliselt mööda laevakere merekasvu. See saab toimuda ainult siis, kui laev seisab sadamas, mis võimaldab laevakere puhastada ja kus reederil on juurdepääs usaldusväärsetele teenusepakkujatele. Teist tüüpi puhastusprotsess toimub siis, kui laev on spetsiaalseks ülevaatuseks viidud kuivdokki, mis

---

<sup>1</sup> 1  $\mu\text{m}$  (mikromeeter) =  $10^{-6}$  m = 0,000001 m = 0,001 mm



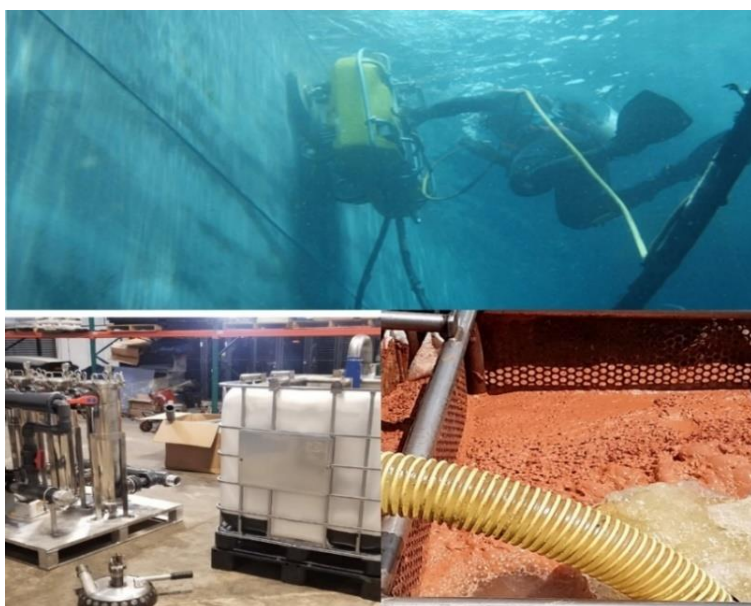
toimub umbes iga viie aasta tagant. Kuivdokkimise kogumaksumus on märkimisväärne, ulatudes tankerite puhul 1,2–1,6 miljoni dollarini, olenevalt laeva suuruselt. (Adland *et al.*, 2018)

## 1.2 Olemasolevad lahendused

Järgnevalt annab autor ülevaate erinevatest ettevõtetest, mis pakuvad keskkonnasõbralikku laevakere puhastusteenust.

### 1.2.1 Tuukriettevõtte Subsea Global Solutions

Ettevõtte *Subsea Global Solutions*, alustas tegevust 2008. aastal Norras “*EnviroHull*” filtreerimissüsteemi väljatöötamisega. *EnviroHull* on mitmeastmeline filtreerimissüsteem, mis on võimeline töötama pidevalt kere puhastamise, süvendite puhastamise või propellerite poleerimise ajal (Subsea Global Solutions 2022). Joonisel 1 (vt Joonis 1) on toodud ära puhastustehnoloogia koos filtreerimissüsteemiga.



Joonis 1. Laevakere puhastuse protsess „*Whale Shark*“-i abil. Puhastamine, filtreerimine, utiliseerimine

Allikas: (Subsea Global Solutions 2022)

*SGS Whale Shark (Remora)* veealune puhastusvahend on varustatud kolme pöörleva harjaga, mis eemaldavad laevakerelt prahti. Harja tegevus tekitab oma piirkonnas turbulentsu voolu, mis eemaldab veeorganismid (nt biokile, niitvetikad, kõrvitsad, toruussid, kahepoolmelised) ja väikese koguse aluspinnase värvi, kui esineb kõrvitse, toruusse, kahepoolmelisi või muid kasvukohad, mis nõuavad mehaanilist kontakti *Remora* harja ja laevakere katte vahel. Spetsiaalselt konstrueeritud kate/rattasüsteem hõlbustab prahi kogumist, mis liigub läbi voolikutoru pinnafiltreerimissüsteemi

(*Whale Shark*). Imemist hõlbustab voolu sisselaskeava, millel on piisav vooluhulk harjapeade juures, et tagada minimaalne või olematu saaste eraldumine keskkonda ja *Remora* kleepumine kere külge. Selle tulemuseks on kere prahi kõrge püüdmise efektiivsus. *Remora* käru juhib mööda laevakere tuuker/tehnika. (Tamburri 2019, 6)

Ettevõtte *Subsea Global Solutions* pakub keskkonnasõbraliku laevakere puhastusteenust Ameerikas, Euroopas ja Aasias (Subsea Global Solutions 2022).

### **1.2.2 Tuukriettevõtte DG- Diving Group Oy**

*DG-Diving Group Oy* on 1982. aastal asutatud tuntud tänapäevane tuukriettevõtte, mis tegutseb Läänemere piirkonnas ning mille kontorid asuvad Turus ja Helsingis. Ettevõtte põhitegevusalaks on laevade veealune hooldamine, remont- ja kontrolltööd. Ettevõtte *DG-Diving Group* on välja töötanud täiustatud jäätmete filtreerimismehhanismi laevakere puhastamisel. *DG-Green* puhastusmasin kasutab spetsiaalselt valitud harju, mis suudavad tõhusalt puhastada veealuseid laevakere pindu. Erinevate värvide/värvisüsteemide jaoks võib kasutada eri tüüpi harju. *DG-Diving Group* on heaks kiidetud isegi silikooniga värvitud pindade puhastamiseks. *DG-Green Cleaning* masinat saab kasutada nii tasastel kui ka kumeratel pindadel. (DG-Diving Group 2020)

Ühe tunni puhastustöö tulemusena saab üks tuuker puhastada täielikult 500-1000 ruutmeetrit veealuseid kerekonstruktsioone. Tuukrimeeskond kontrollib puhastusprotsessi ja selle tulemusi. Süsteem on keskkonnasõbralik, puhastatud osakesed pumbatakse läbi puhastusprotsessi, enne kui vesi merre tagasi suunatakse. Kõik puhastusprotsessi käigus tekkivad jäätmel utiliseeritakse keskkonnasõbralikul viisil. (*Ibid*)

17.05.2021 aastal teavitas Tallinna Sadam, et alates 2021. aasta maist tohib nende sadamavaldustes teha laevakere veealuste pindade puhastust ja muid töid ainult sel juhul, kui sealt tulevad jäätmel kokku kogutakse. Antud otsus on järjekordne samm Tallinna Sadama kestliku arengu strateegias muutumaks Läänemere kõige keskkonnasõbralikumaks sadamaks. Oma valmisolekust pakkuda Tallinna Sadama valdustes kerepuhastusteenust on andnud teada sama Soome ettevõtte *DG-Diving Group*. (AS Tallinna Sadam i.a.)

### **1.2.3 Tööstuslikud standardid laevakere veealuse puhastamiseks**

Laeva peal kasvavad organismid suurendavad selle veetakistust ja võivad vähendada laeva kütuse säästlikkust kuni 35%, mille tulemusel suurenevad kütusekulud ja  $CO_2$  heitkogused (BIMCO 2021). Seetõttu on oluline bioloogilise saaste eemaldamine. Laeva veealuste osade puhastamine

biosaastest ja muudest kasvajatest, kui laev on vees, võib põhjustada võõrliikide sattumist kohalikku merekeskkonda, kui laeva ei puhastata nõuetekohaselt ja prahti ei koguta kokku. Selle probleemiga võitlemiseks ning laevaomanikele, sadamatele ja riigiasutustele selguse ja kvaliteedi tagamise tagamiseks on *BIMCO* ja Rahvusvaheline Merenduskode (*ICS*) avaldanud esimese tööstusharu standardi laevade vees puhastamiseks. (*BIMCO & ICS 2021, 7*)

See on üks kahest eraldi dokumendist, milles sätestatakse tulemuspõhised nõuded laevakere, propelleri ja süvendite veealade puhastamiseks, mille käigus eemaldatakse mittevajalik materjal:

- Veepuhastusettevõtete tunnustamise menetlus
- Tööstuse standard vee puhastamiseks koos korjega

Standard sisaldab ka järgmist:

- Merre tagasi pumbatava vee puhtusekriteeriumid
- Meetodid, mis aitavad laevaomanikel tegutseda enne, kui biosaaste kasv ja katvus muutuvad tõsiseks
- Puhastusfirmade kooskõlastamise kord
- Aruandluse miinimumnõuded
- Inspekteerimis-, hooldus- ja puhastusaruannete miinimumnõuded

*BIMCO* peasekretäri David Loosley sõnul aitab see standard kaitsta keskkonda sadamas. See aitab organisatsioone ja ettevõtteid, tõstes puhastamise miinimumstandardit paari astme võrra kõrgemale ja tagades, et lõpptulemuseks on nii puhas laev, kui ka ohutud töövõtted. (*BIMCO 2021*)

### **1.3 Roboti kasutuselevõtt**

Kasutatav laevakere puhastustehnika on lootusetult ajale jalgu jäänud. Traditsioonilist puhastust, mis põhineb käeshoitavatel puhastusseadmetel või veealuste harjakärudega puhastamisel, kasutatakse endiselt paljudes kohtades aga ilma saastekogumissüsteemideta, mis toob kaasa riskid nii keskkonnale, kui ka inimestele. Traditsiooniliste meetoditega puhastatakse saaste veealuselt alalt ja lastakse erituda merekeskkonda. Lisaks tähendab plastharjade kasutamine seda, et harjased eritavad veesambasse mikroplasti. Laevakere puhastustööstust on kritiseeritud oma tervise- ja

ohutusalase olukkora üle, kuna harjakärude käitamine võib tuukrite elu tõsiselt ohustada. Kaugjuhitav veealune sõiduk (*ROV*) vähendab oluliselt tervise- ja ohutusrisiki. (Bertram 2020, 6)

Kui tuukrid puhastavad laeva vees, kaasnevad sellega probleemid nagu suur töömaht, madal tõhusus, piiratud tööaeg ja vigastuste võimalus. Seega on veealused kerepuhastusrobotid saanud parimaks lahenduseks tuukrite asendamiseks laevakere puhastamisel. Laevade veealuse osa puhastamise nõuete täitmiseks peab robot jõudma kerele piisavalt lähedale, ilma seda kahjustamata.

Robot vajab kuue vabadusastme (*DOF*) liikumist ja sentimeetri täpsust. Veealuse puhastusroboti kõige olulisem funktsionaalne nõue on säilitada pidev adsorptsioonivõime, mis tuleneb laeva järsust ja ebahõltselise pinnast, samuti voolu, lainetuse ja tuule mõjust. (Song & Cui 2020, 8)

2003. aastal muutus laevakere puhastamine *ROV*-iga arvestatavaks võimaluseks, kui kaubandusliku laevanduse jaoks võeti kasutusele esimene kaugjuhitav robot, mis oli varustatud mere-saaste korje tehnoloogiaga. Kuigi esialgu oli selle kasutamine piiratud, oli 2020. aastal juba kuus teadaolevat kaubanduslikult elujõulist *ROV*-kerepuhastusteenuse pakkujat ning vähemalt viis ettevõtet arendas ja katsetas seda. Laevakere puhastamine meresaaste püüdmise süsteemidega on juba olemas. Mõne süsteemi kasutamiseks ei ole vaja tuukreid. Need on autonoomsed *ROV*-aparaadid, mis on kulutasuvad ja keskkonnasõbralikud variandid. Enamasti on need varustatud veepihustitega ja on kavandatud puhastama laevakere pinda kuni 1500 m<sup>2</sup> tunnis, kasutades puhastusvahendina soolast vett - looduslikku abrasiiv- ja määrdeainet - muutuva rõhu all. (Bertram 2020, 6)

Kaugjuhitav veealune puhastusrobot kogub laeva veealustest osadest eemaldatud saaste-ained, et neid keskkonnasõbralikult kaldal kõrvaldada. Kuna tuukreid ei kasutata, saavad nad laevu puhastada lastimis- ja lossimisoperatsioonide ajal, mis säästab laevade jaoks väärtuslikku aega. *ROV* koos reostuskogumissüsteemiga võib saada loa laevade puhastamiseks sadamates, kus traditsiooniline puhastamine on keelatud. (*Ibid*, 7)

*Emma Maersk*, 397 meetri pikkune konteinerlaev, kulutab hinnanguliselt umbes 20 000 dollarit (umbes 18 921,5 EUR<sup>2</sup>) päevas biosaaste tõttu kaduma läinud mootorikütusele. Reostuse majanduslik mõju tuleneb ka kulukatest tavapäraestest puhastus- ja haldamistegevustest. USA rannavalve poolt tellitud 2016. aastal tellitud uuringu põhjal selgus, et kerge biosaaste eemal-

---

<sup>2</sup> 1 EUR = 1,0570 USD seisuga 06.05.2022 (Eesti Pank i.a.)

damine laevakerelt maksab 0,33 dollarit ruutjala kohta (ligikaudu 3,55 dollarit ruutmeetri kohta). Selle hinnangu põhjal maksaks USA mereväe *Arleigh Burke* klassi hävitajalt *USS Arleigh Burke DDG-51* täieliku biosaaste eemaldamine üle 10 000 dollari ja *Panamax* - klassi konteinerlaevalt, mis on suurusklassis 50 000–80 000 DWT ja suudab läbida Panama kanalit, biosaaste eemaldamise kulud oleksid rohkem kui 98 000 dollarit. Need hinnangud on antud seoses traditsiooniliste puhastus-meetoditega, mis hävitavad katlakivikihti, mida kasutatakse kaitseks reostuse eest, mille tulemusel tuleb kuivdokk iga paari aasta tagant uuesti katta. Suure laeva kuivdokkimine võib maksta 1–2 miljonit dollarit. (Maritime Reporter & Engineering News 2019)

Võime olla uue mehaanilise puhastamise ajastu alguses (koos robotitega) (Bertram 2020). Vee- puhastusroboteid on mitmesuguseid ning need on tavaliselt ainulaadsed tooted. Selline killustatud lähenemisviis koos standardiseerimise puudustega on iseloomulik noortele tööstusharudele.

Veepuhastusrobotite klassifitseerimiseks on palju võimalusi (Albitar *et al.*, 2016); (Curran *et al.*, 2016); (Song & Cui 2020) nendeks on:

- Puhastustehnoloogia (harjad, kõrgsurve- või kavitatsioonivee joad, laser jne).
- Liimimistehnoloogia (magnetiline, vaakum (negatiivne rõhk), tõukurid jne).
- Autonoomsuse tase (tuukrite abil juhitud, kaugjuhitav, autonoomne).
- Piirkond/riik (USA, Euroopa, Jaapan, jt).
- Turg (lõbusõidulaevad, kaubalaevad, mereväe kasutuses olevad laevad, jt).

Igal aastal ilmuvad uued laevakere puhastamiseks mõeldud robotid, mis erinevad üksteisest mitte ainult välimuselt, vaid ka puhastussüsteemilt. Hetkel pole veel kehtestatud robottehnoloogia ühiseid standardeid. Kõikidel tootjatel on sarnane eesmärk tuua turule sellist robottehnoloogiat, mis suudab teostada puhastamist sama efektiivselt nagu tuukrite abil. Samas eesmärgiga säästa kütusekulu ja vähendada  $CO_2$  heitkoguseid, et lahendada probleemid, mis on seotud keskkonna mõjuga ja laeva biosaastega.

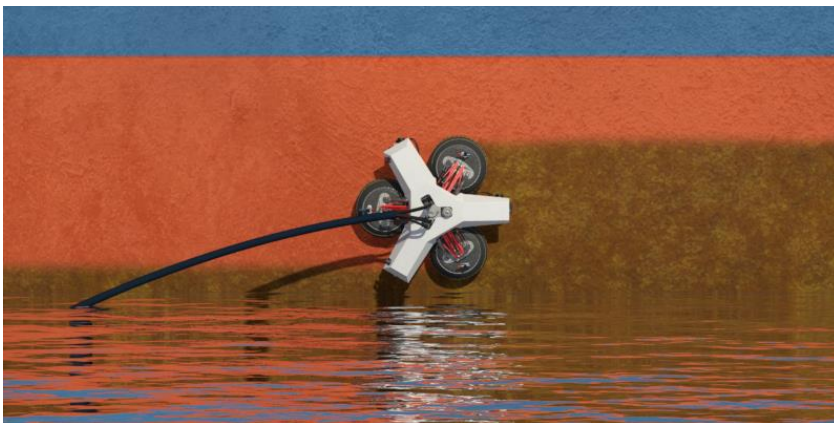
## 1.4 Robotid laevakere puhastamiseks

Järgnevas alapeatükis annab autor ülevaate erinevatest laevakere puhastamiseks mõeldud robottehnoloogiast, mida kasutatakse välismaal.

### 1.4.1 Fleet Cleaner

Hollandi ettevõtte *Fleet Cleaner* on arendanud oma robotpuhastuslahendust alates 2011. aastast. 2016. aasta detsembris lõpetas *Fleet Cleaner* edukalt oma esimese laevakere puhastamise katse, puhastades Hollandi Kuningliku mereväe suurima laeva *HNLMS Karel Doorman*. Hollandi *Den Helder*-is sadamas eemaldas firma *Fleet Cleaner* laevakere bioaaste oma uuendusliku laevakere puhastuse roboti abil. Operatsioon oli ainulaadne, kuna nii veealust kui ka veepealset puhastust teostas robot. Järgnevatel aastatel laiendati teenust kõigile Hollandi sadamatele ja hiljem ka Belgia sadamatele. (Fleet Cleaner 2021)

Ettevõtte robot, mis on toodud alloleval joonisel (vt Joonis 2) kasutab magnetilist kinnitust ja puhastab kõrgsurve veepihustiga. Selle konstruktsioon on suhteliselt kompaktne (pikkus 2,0 m x laius 1,8 m x kõrgus 0,6 m). Tavaliselt kulub laeva puhastamiseks selle tehnoloogia abil umbes kümme tundi, sõltuvalt laeva pikkusest ja laevakere bioaastest. *Fleet Cleaner* robot kogub eemaldatud prahi selle nõuetekohaseks kõrvaldamiseks. Selle robotiga on võimalus puhastada ilma nähtavuseta tingimustel. Laevakerelt bioaaste eemaldamisega säästavad laevad 5-10% kütusekulu ja kahjulikke heitmeid. *Fleet Cleaner* pakub puhastuse teenust Hollandi sadamates (*Groningeni* meresadamad, Amsterdami sadam, *Den Helderi* sadam, *IJmuideni* sadam, Rotterdami sadam, Zeelandi meresadamad) ja Belgia sadamates (*Ghent* sadam, *Antwerpen-i* sadam, *Zeebrugge* sadam). (Ibid)



Joonis 2. Fleet Cleaner robot

Allikas: (Fleet Cleaner 2021)

*Fleet Cleaner*-i direktor Alex Noordstrand-i sõnul, võib keskmise, 200 meetri pikkuse, konteinerlaeva puhul võib roboti abil puhastamine säästa kuni 300 000 eurot aastas kütuselt (NL News 2016).

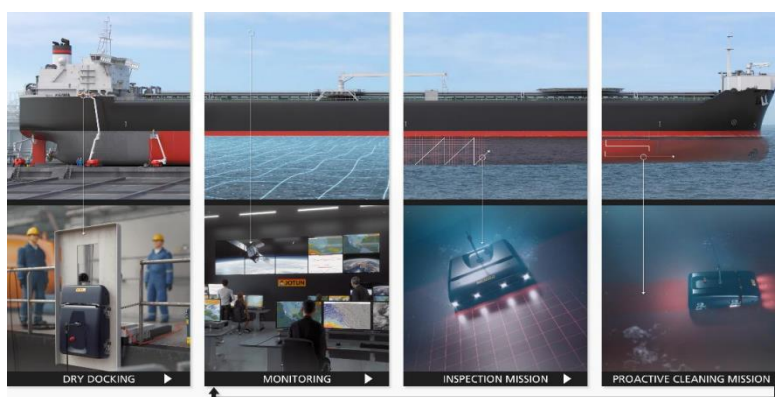


## 1.4.2 Jotun Hull Scating Solutions

2020. aasta märtsis käivitas Norras asuv ettevõtte *Jotun* koostöös *Kongsbergi*, *Semconi*, *Telenori*, *DNV GL* ja *Wallenius Wilhelmseniga* lahenduse *Hull Skating Solutions (HSS)*, mille eesmärk on hoida laevakere "alati puhtana", eemaldades bakterid ja biokile enne, kui makrosaaste jõuab kinnituda. (International Shippers 2021, 35-37)

Ettevõtte *Jotun Hull Skating Solution (HSS)* on välja töötatud lahenduse keeruka ehitusega laevadele tagamaks veealuste kereosade (v.a. süvendid) puhtuse. Lahenduses on ühendatud suure jõudlusega kere kate, reaajas saastehoiatused, mis põhinevad töö- ja keskkonnaandmete kombinatsioonil, ning ennetav puhastamine veealuse puhastusvahendiga. Robotitehnoloogia asub laeva pardal, kuid seda tuleb juhtida juhtimiskeskusest (toimub juhtimine eemalt tootjaettevõtte poolt) ning jõudlus- ja teenindustase on garanteeritud. *HullSkater* on magnet roomiksõiduk, millel on neli kõrge eraldusvõimega navigatsiooni- ja ülevaatuskaamerat ning 900 mm laiune hari, mis on loodud spetsiaalselt suure jõudlusega katte aktiivseks puhastamiseks ilma kahjustamata või erodeerimata. Tavaliselt töötab see kiirusega umbes 0,5 m/s. (Tamburri 2020, 7)

Kere kõigi piirkondade kontrollimine ja ennetav puhastamine võtab tavaliselt aega 2-8 tundi, sõltuvalt laeva suuruselt ja saastatuse tasemest. Puhastusprotsess on toodud kolmandal joonisel (vt Joonis 3), kus veealune puhastusrobot on laeva pardal ja see lastakse alla laeva tekil asuva kaldtee kaudu. (SEMCOM 1996-2022)



Joonis 3. HSS robot. Roboti paigaldamine meeskonna poolt, järelevalve Jotuni spetsialistide poolt, laevakere puhastamine

Allikas: (*Jotun* 2022)

Voolik ühendab sõiduki pardakommunikatsiooniliidestega, mille kaudu turvaline võrk võimaldab juhtimist kaldal asuvast juhtimiskeskusest. *HullSkater* on suhteliselt väike (selle laius on 1,6 m x pikkus 1,0 m x kõrgus ~0,5 m) ja kerge (kaaluga 200 kg). Laeva (pikkusega 150 m) puhastamiseks

kulub umbes 4-5 tundi. Neli kaamerat ja reaaliajajas toimuv andmeanalüüs annavad operaatorile teavet laevakere navigeerimiseks ja reostuse dokumenteerimiseks. Sõiduk on vooliku kaudu ühendatud operaatori juhtimiskeskusega ja seda saab kaugjuhtida kõikjal maailmas, kus on 4G leviala. (*Ibid*)

*Jotun's Hull Skating Solutions* annab mõõdetavaid tulemusi kulude ja tegevuse kokkuhoiu osas. Tööstuse mõõdukate parameetrite alusel oli kokkuhoid 3 207 600 USA dollarit (3 034 626 EUR)<sup>3</sup> ja 25 000 tonni CO<sub>2</sub>. See CO<sub>2</sub>-sääst on võrdne 2500 sõiduki heitkogustega 5 aasta jooksul. (Jotun 2022)

### 1.4.3 HullWiper robot

*HullWiper*, mis on toodud järgneval joonisel (vt Joonis 4), on robottehnoloogia, mille on välja töötanud GAC Dubaist ja Norra leiutaja Robert Andersen Notoddenist. Valmistatud Norras Norra avamere standardite järgi. *HullWiper* kogub laevakeredelt eemaldatud merekasvu. Kogutud jäägid pumbatakse filtri süsteemi ja asetatakse seejärel kaldale spetsiaalsesse tünnesse, mille kogub kokku kohalikul tunnustatud keskkonnajäätmete käitlusettevõtte. (*HullWiper* 2022)



Joonis 4. HullWiper robot

Allikas: (*HullWiper* 2022)

*HullWiper* pihustab kontrollitud kõrgsurve merevee jugasid otse laeva kerele väga suurel kiirusel, eemaldades prahi ilma puhastusvahendeid, tugevaid kemikaale või traditsiooniliste meetoditega nõutavaid abrasiive kasutamata. Erinevalt traditsioonilisest harjastamisest kasutab *Hullwiper*

<sup>3</sup> 1 EUR = 1,0570 USD seisuga 06.05.2022 (Eesti Pank i.a.)



puhastamiseks kõrgsurvejugasid, mis jätavad kallid mittesäilivad pinnad siledaks, terveks ja kahjustamata. (*Ibid*)

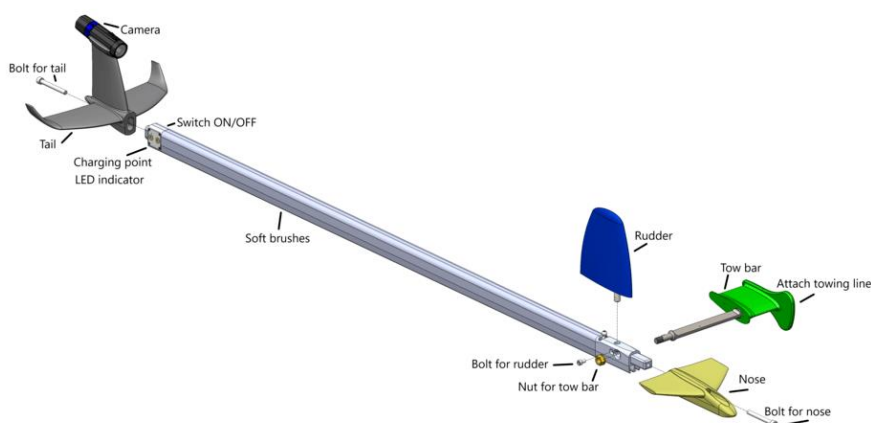
Proaktiivne hooldus hoiab ära kere saastumise, tagab maksimaalse tõhususe ja parandab pidevalt jõudlust, mis on roboti eelis. Puhastuse kiirus on umbes 2000 m<sup>2</sup> tunnis, mis on toodud tabelis (vt Lisa 1). *HullWiper* roboti saab kasutusele võtta mõne minutiga - kiiresti ja ohutult, mis annab eelise, et tiheda ajakavaga laevad võivad teha osalist puhastust planeeritud rotatsiooni korras. Samas kruisilaevu ja superjahte saab puhastada *HullWiper*-i abil igas peatuses, ilma et see häiriks sõiduplaane või tekitaks ebamugavusi reisijatele. (*HullWiper 2022*)

*HullWiper* on lõpetanud viieaastased pehmete silikoonkattematerjalide katsetused koos simuleeritud igapäevase hooldusega. Tulemused on positiivsed: kate on siledam kui enne töötlemist. Seda kinnitab sõltumatu saksa laboratoorium *LimnoMar* Hamburgis. (*Ibid*)

Keskonnasõbraliku kruisilaeva käitamine võib säästa hinnanguliselt 1 miljon dollarit aastas kütusekuludelt ja aidata vähendada kasvuhooonegaaside heitkoguseid. (*Ibid*)

#### 1.4.4 Laevakerede transiidipuhastusrobot ITCH

Norra firma *Shipshave* on välja töötanud poolautonoomse laevakere puhastussüsteemi, mis on mõeldud laevakere puhtana hoidmiseks ja toob selle turule 2022. aastal. *ITCH* (*In Transit Cleaning of Hulls*) eemaldab igasuguse biosaaste. Süsteem on näha järgneval joonisel (vt Joonis 5).

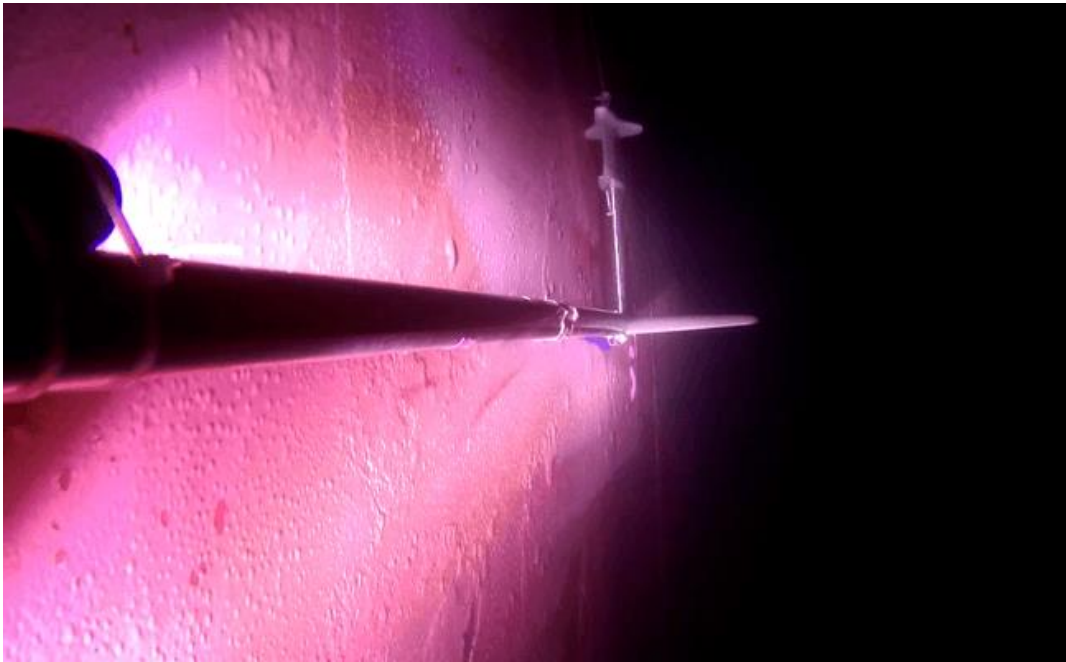


Joonis 5. ITCH robot

Allikas: (*Shipshave* i.a.)

Kontrollitult kasutatud jõud ja pehmed harjad põhjustavad saastumisvastase värvi minimaalset kulumist, võimaldades kere sagedasemat puhastamist. Laeva meeskond peab kõigepealt *ITCH*-rakenduse abil reguleerima roboti ülemise ja alumise sügavuse seaded. Seejärel saavad nad kerge

*ITCH* roboti, mis on näha alloleval joonisel (vt Joonis 6), vintsiga merre lasta ja oodata laeva külje puhastamist. Kui *ITCH*-robot saab ülesandega valmis, võetakse see veest välja ja meeskonnaliige saab muuta roboti seadistusi vasak- ja parempoolse külje vahel ning korrata operatsiooni teisel pool laevakere. Sisseehitatud videokaamerat saab kasutada roboti puhastustegevuse dokumenteerimiseks. See lihtne protsess võimaldab meeskonnal puhastada laevakere mõne tunniga, sõites samal ajal järgmisesse sihtkohta.



Joonis 6. *ITCH* robot laeva veetaluse töö režiimis

Allikas: (*Shiphave* i.a.)

Katsed viidi edukalt lõpule paljudel laevadel pikkusega 60–200 m ja kiirustel 9–14,5 sõlme. Testimise eesmärk oli kontrollida esialgseid tulemusi, tagada toote kõigi elementide koostoitimine ja dokumenteerida puhastustulemused. Robotit katsetati laeval kiirusel 9,2 sõlme. Kere oli vees 30 kuud ilma puhastamiseta, valdavalt madalas sadamas üle 95% ajast. Pärast katsetamist tõsteti paat reelingutega ellingle ja vaadati üle. Leiti, et peaaegu kõik vetikad ja pehme mustus eemaldati harjaga. Värvikahjustusi ei täheldatud. (Bertram 2020, 48-49)

Üks katse viidi läbi 8-aastase 5000 *DWT*-ga avamere varustuslaevaga, mis on toodud joonisel 6 (vt Joonis 6). Laeval oli 3-aastase vahelduva kasutamise tõttu parasvõotme vetes raske vetikatega saastet, mis kattis täielikult laevakere pinna. Kere nihkus musta ja roheline vahel. *ITCH*-roboti kasutati vöörast ahtrini. Funktsionaalsus on tõestatud ja pühkimiskiiruse vahemik kinnitati. Kohtades, kus *ITCH* roboti oli korduvalt kasutatud, puhastas see laevakere täielikult. Peamine

õpetus oli see, et arenenud saastumine nõuab suuremat arvu pühkimisi kui lihtsalt hooldamine. (*Ibid*, 49)

Kerge kaal ja hüdrodünaamiline efektiivsus muudavad *ITCH*-i kasutuselevõtu ohutuks. *ITCH* ei ulatu oma konstruktsiooni tõttu propellerini. Väike kaal tähendab, et isegi otsene löök ei mõjuta propellerit. Tavaliselt saab katta umbes 80–90% kere pindalast. *Shipshave*'i klientide poolt puhastatud suurimad laevad on 238 meetri pikkused ja süvisega kuni 10,5 meetri. (*Shipshave AS i.a.*)

Tehnoloogia projektijuhi (Jan Opedal) sõnul: „*See on kerge ja kulutõhus “ühenda ja tööta” süsteem, millel on sisseehitatud kaamera edusammude jälgimiseks. See ei säästa mitte ainult käsitsi tehtavate hooldusülevaatuste ja puhastamise tasusid, vaid ka aega ja kütust, kuna seda tehakse laeva liikumise ajal. See tähendab, et alust saab palju sagedamini puhastada – tehes seda sõites. Tavapäraseid laevakere puhastusmeetodeid on sageli keeruline korraldada ja nõudlus peatub ankrukohas või kuivdokis, varastades aega, mida oleks võinud paremini kulutada meie klientide jaoks lasti teisaldamiseks*“. (*Zulkiflee 2021*)

#### **1.4.5 Ettevõtte Greensea Systems, Inc**

2022. aasta märtsis käivitas meretarkvaraettevõtte *Greensea Systems* tütarettevõtte *Armach Robotics* lahenduse, et pakkuda autonoomiat, intelligentsust ja andmefusiooni kasutavat tellimuspõhist robotkorpuse puhastussüsteemi (*Greensea Systems i.a.*). Lahendus tagab 100% kerepinna katvuse, välja arvatud süvendid, ja vähendab kütusekulu kuni 10%, vähendades laeva ja vee vahelist takistust (*VPO Global 2020*). Kere robotpuhastuslahendus kasutab tõestatud harjade süsteemi, mis ei kahjusta laevakere kattedkihti ja väldib tuukrite kaasamist. Süsteem säästab kulusid, edastades laevaomanikule väärtuslikku teavet, luues iga kord, kui laevakere puhastatakse, tõhusa ülevaate laevakere seisukorrast. Roboti kaamerad ja andurid tuvastavad eelnevalt kõik kahjustused või korrosiooni - nii saab otsustada, kas vajalik on parandus või piisab pidevast jälgimisest. Puhastusrobotil on väike platvorm, mis võimaldab tal pääseda kere kitsastesse kohtadesse. Tänu oma suurusele ja tehnilise omadustele, mis on toodud tabelis (vt Lisa 2), on see ka kaasaskantav.

*Armach Robotics*'i arenduse ja strateegia asepresidendi Rob Howardi sõnul on tänu loodud navigatsioonilahendusele optimeeritud roboti marsruut läbi korpuse mõne sentimeetri täpsusega, mis tagab, et ükski ala ei jää vahele ja seega on teenus kiire ja tõhus (*Ibid*).

Joonisel 7 (vt Joonis 7) on kujutatud *Greensea Crawler* robotit. Madalrõhu imemisega haardumise ja kummist roomikute abil saab *Greensea Crawleri*-ga varustatud *ROV* liikuda ohutult ümber laevakerede, mahutite seinte või muude kõvade pindade, et teostada inspekteerimis- ja sekkumisülesandeid. Säilitades vabalt liikumise ja roomamise võimalused ning mittemagnetilise kinnitusemeetodi, pakub see tehnoloogia suuremat paindlikkust ülesannete täitmiseks, võimaldades seda kasutada alumiiniumist pindadel, betoonseintel või polükarbonaadist mahutitel, samuti võimaldab see kiiret liikumist nende vahel. *Greensea* järeleproovitud juhtimistehnoloogia võimaldab operaatoril sõidukit vajalikule positsioonile viia ja laevakere külge kinnitada. Veealused inspektorid saavad kuivdokki paigutamise asemel jäädvustada kvaliteetsemat videot, mille eeliseks on "fikseeritud" kaamera positsioon, mida ei mõjuta hoovused. Insenerid saavad teha täpseid mõõtmisi, kasutades 3D laserskaneerimist, olles kindlad, et nende andurid ei liigu (*Greensea Systems* i.a.).



Joonis 7. Armach robot kasutusel

Allikas: (*Greensea Systems* i.a.)

Kokkuvõtvalt järeltab magistritöö autor, et robottehnoloogia kasutuselevõtt laevakere puhastamiseks võimaldab laevaomanikel vähendada kütusekulu ning vastavalt ka  $CO_2$  heitkoguseid, mis säästab keskkonda ja mereökosüsteemi. Kõik robotid omavad filtreerimis-süsteemi, mis kogub puhastamise käigus saasteained kokku ja seejärel utiliseeritakse. Tulenevalt sellest, et roboti

kasutamisel tuukrit ei kasutata, välditakse võimalikku ohtu inimestele. Kuna tuukrit ei kasutata, saab laevakere puhastada laadimise/ lossimise ajal, säästes aega ning võimaldades laevaomanikul paremini ja kiiremini planeerida laeva sõiduplaani.

## 2 Uurimistöö metoodika

Käesoleva magistr töö eesmärk on analüüsida laevakere puhastamiseks kaugjuhitava robottehnoloogia kasutuselevõttu Eesti sadamates ning kas see oleks võrreldes tuukrite kasutamisega ka efektiivsem ja kulutõhusam.

Vastavalt eesmärgile püstitas magistr töö autor järgmised uurimisküsimused:

1. Kas sadamatel on huvi pakkuda laevakere roboti abil puhastamise teenust?
2. Kas tootjad rendivad, müüvad või pakuvad ise puhastusteenust ettevõttele?
3. Millised on laevaomaniku kulud tuukritööde puhul ning kui palju maksab robottehnoloogia?
4. Kuidas teostatakse roboti hooldust?
5. Kuidas teostatakse koolitust ja väljaõpet roboti kasutamiseks?
6. Kui palju kulub aega laevakorpuse puhastamiseks tuukrite abil ja robotiga?
7. Millistel tingimustel oleks laevandusettevõtted huvitatud robottehnoloogia abil teenuse kasutamisest?
8. Millised on robottehnoloogiaga laevakere puhastamise eelised võrreldes traditsioonilise puhastusviisiga?

### 2.1 Uurimisstrateegia valik

Käesoleva magistr töö metoodikaks on kvalitatiivse ja kvantitatiivse uurimisstrateegiate kombineeritud kooslus. Uurimistöös kasutati andmete kogumiseks kvalitatiivset uurimismeetodit küsitlusi. Kvantitatiivsetest uurimisstrateegiatest on kasutatud hindav uuring. Hindava uuringu eesmärk on koguda ja hinnata informatsiooni, millega saab anda tagasisidet objektide (robotid) kohta hinnates nende kasu või väärtust.

### 2.2 Valim

Valimi määratlemise aluseks on eelkõige uuringu eesmärk. Kvalitatiivse uuringu valimi liikmeteks olid tootjaettevõtete esindajad, kes pakuvad turule laevakorpuse puhastamiseks roboteid, ehk siis vastava valdkonna spetsialistid, kes omavad vajalikke kogemusi ja teadmisi. Valimi üheks osa-

pooleks olid ka Eesti sadamate esindajad, ehk sadamakaptenid, kes saaksid tulevikus laevakere puhastamiseks roboti abil teenust pakkuda. Lisaks sadamatele kuulusid valimisse ka Eesti laevandusettevõtted.

Valimi moodustasid:

- 22 robottehnoloogiat pakkuvat tootjat, kes asuvad erinevates riikides. Tootjate loetelu on toodud eraldi tabelis (vt Lisa 3)
- 3 sadamat, mis asuvad Eestis (vt Tabel 1): AS Tallinna Sadam; Sillamäe sadam; Kunda sadam
- 8 laevandusfirmat (vt Tabel 2): AS Tallink Grupp; TS Laevad OÜ; Tschudi Ship Management AS; AS Kihnu Veeteed; Hansa Shipping AS; Amisco AS; KT Ship AS; Viking Line
- 2 firmat, kes pakuvad laevakere puhastamisteenust (vt Tabel 3): BLRT Grupp AS; Tuukritööde OÜ

## **2.3 Uurimistööks vajalike andmete kogumise viisid**

Järgnevas alapeatükis autor annab ülevaate andmete kogumise meetoditest. Tuuakse välja kasutatud kvalitatiiivsete andmete kogumise meetodid, milleks on struktureeritud küsitlus ja kvantitatiivsete andmete kogumise meetodid, milleks on hindav uuring.

### **2.3.1 Küsitlus robottehnoloogia tootjatele**

Autor saatis e-kirjaga küsitluse 22 tootjale, mis sisaldas magistrandi tutvustust ja kontaktandmeid, uuringu eesmärgi ja lühikirjeldust, valimi selgitust, vastamisele kuluvat orienteeruvat aega ja uurimisküsimusi. Magistrant planeeris esialgu saada vastused küsitlustele 01.02.2022. Paar päeva enne tähtaega saatis magistrant veelkord meeldetuletuskirja. Uurimistöö käigus õnnestus magistritöö autoril osaleda kahel veebiseminaril, mis olid korraldatud robotitootjate poolt, 03.02.2022 ja 23.03.2022. Peale seminari saatis magistritöö autor kahele roboteid tootvale ettevõttele uurimusküsimused vastamistähtajaga 30.03.2022. 22 roboteid tootva ettevõtte nimekiri, organisatsioonide asukohad ja muu informatsioon on lisatud magistritöö lisa (vt Lisa 3). Küsitlusele vastas neli ettevõtet.

Alljärgnevalt ülevaade küsimustikust. Uurimisküsimused koostas magistritöö autor iseseisvalt, võttes aluseks lähtuvalt eesmärgi saavutamiseks püstitatud uurimisküsimused. Küsimused on eraldi välja toodud inglise keeles (vt Lisa 5). Esimese küsimusega soovis magistrant saada vastuste küsimustele, kas kliendid kasutavad sadamates viibides teenindusettevõtte kaudu renditavate

robotitega kerepuhastusteenust või on mõnel kliendil kerepuhastusrobot ka laeva pardal? See on vajalik info selgitamiseks välja, kas tootjaettevõtted müüvad või annavad roboteid rendiks. Teine ja kolmas küsimus puudutasid roboti hinda ja hooldamist. Nende küsimuste eesmärk oli määratleda, kui palju maksab laeva korpuse puhastamiseks robot ja kuidas seda hooldatakse, et arvutada laevandusettevõtete jaoks selle kasumlikkust. Neljas küsimus käsitles väljaõpet. Magistrant soovis teada, kas laevameeskond peab korraldama erialaseid kursuseid, et kasutada laeva pardal robotit. See annab informatsiooni, kas on vajadus täiendavate koolituskulude jaoks. Viienda küsimusega sooviti teada, mis kriteeriumitele peab vastama laevaomanik, et tehnoloogiat omada.

### 2.3.2 Küsitlus Eesti asuvatele sadamatele

Sadama küsimustiku eesmärk oli uurida, kas nendel on huvi võtta kasutusele robottehnoloogia laevakorpuse puhastamise teenuse pakkumiseks sadamates. Tabelis 1 (vt Tabel 1) on toodud sadamate nimekiri, kellele magistrant küsimused esitas. AS Tallinna Sadam koosseisu kuuluvad Vanasadam, Muuga sadam, Paljassaare sadam, Paldiski Lõunasadam, Saaremaa sadam. Kokku vastas kolmest sadamast vaid üks.

Tabel 1. Sadamate nimekiri küsimustik

	<b>Sadam</b>	<b>E-post</b>	<b>Ametikoht</b>
1	Sillamäe Sadam	r.sirol@silport.ee	Sadamakapten
2	Kunda Sadam	eiki.orgmets@kundasadam.ee	Sadamakapten
3	AS Tallinna Sadam	a.klaus@ts.ee	Peakapten

Allikas: (autori koostatud)

Alljärgnevalt ülevaade küsimustikust. Esimese küsimusega soovis magistrant saada vastuse küsimustele, kas Eesti sadamaid külastavad laevad kasutavad laevakere puhastamise teenust? Teise küsimusega autor soovis uurida, kas sadamas pakutakse laevakorpuse puhastamise teenust tuukrite abil? Kolmas ja neljas küsimus puudutasid roboti rakendamist. Nende küsimuste eesmärk oli määratleda, kas sadamatel on huvi robottehnoloogia kasutamiseks ja millistel tingimustel nad oleks huvitatud roboti abil teenuse pakkumisest. See on vajalik info selgitamiseks välja, kas laevakere puhastamine robotiga on odavam kui tuukritega.



### 2.3.3 Küsitlus laevandusettevõtetele

Laevandusfirmade seas (vt Tabel 2) viis magistritöö autor läbi küsitluse, et selgitada välja nende huvi roboti kasutamise vastu laevakere puhastamisel ja nende praegused kulud laevakere puhastamisel tuukrite abil. Kokku vastas kaheksast kaks laevandusettevõtet.

Tabel 2. Küsimustik laevandusfirmale

	<b>Laevandusfirma</b>	<b>E-mail</b>	<b>Ametikoht</b>
1	AS Tallink Grupp	Paavo.Nogene@tallink.ee	Juhatuse esimees
2	TS Laevad OÜ	guldar.kivro@tslaevad.ee	Juhatuse liige
3	Tschudi Ship Management AS	mr@tschudishipmanagement.com	Tegevdirektor
4	AS Kihnu Veeteed	andres.laasma@veeteed.com	Tegevjuht
5	Hansa Shipping AS	andres.vahi@hansashipping.ee	Tegevjuht
6	Amisco AS	allan.noor@amisco.ee	Tegevjuht
7	KT Ship AS	ktship@ktship.ee	Ettevõtte info email
8	Viking Line	info@vikingline.ee	Ettevõtte info email

Allikas: (autori koostatud)

Alljärgnevalt ülevaade küsimustikust. Esimese küsimusega soovis magistrant saada vastuse küsimustele, mitu laeva on ettevõttel kokku. Teise küsimusega autor soovis uurida, mis sadamas teostatakse laevakere puhastamine. Kolmas ja neljas küsimused puudutasid roboti rakendamist. Nende küsimuste eesmärk oli määratleda, kas laevandusettevõtetel on huvitatud robotitehnoloogia kasutamisest ja millistel tingimustel oleksid nad huvitatud roboti kasutamisest. Viies, kuues ja seitsmes küsimused puudutasid laevakere puhastamist. Nende küsimuste eesmärk oli määratleda, kui palju ettevõtte igal aastal kulutab ja mitu tundi kulub laevakere puhastamiseks tuukrite abiga ning kui tihti aasta jooksul tellitakse puhastuse teenust.

### 2.3.4 Küsitlus teistele organisatsioonidele

Neile organisatsioonidele (vt Tabel 3) saatis magistritöö autor küsitluse eesmärgiga uurida nende huvi ja tingimusi, millega nad on nõus laevakere puhastusroboti kasutusele võtma.

Alljärgnevalt on toodud küsimused, mis esitas magistrant organisatsioonidele:

1. Kas Eesti sadamaid külastavad laevad kasutavad laevakere puhastamise teenust?

2. Kas Teie ettevõttel on huvi pakkuda tulevikus laevakere puhastamise teenust tuukritööde asemel robottehnoloogia kasutades?
3. Millistel tingimustel oleks Teie ettevõtte huvitatud robottehnoloogia abil teenuse pakkumisest?
4. Kui palju maksab laevakere puhastamine tuukri abil?

Tabel 3. Muud organisatsioonid, mille esitati küsimustik

	<b>Organisatsiooni nimi</b>	<b>Email</b>
1	BLRT Grupp AS	blrt@blrt.ee
2	Tuukritööde OÜ	tuuker@tuuker.ee

Allikas: (autori koostatud)

Nende küsimuste eesmärk oli määratleda, kas ja millistel tingimustel organisatsioonidel on huvitatud robottehnoloogia kasutamisest.

### **2.3.5 Kirjalike allikate analüüs**

Ettevalmistav etapp ja magistr töö teoreetilise osa koostamine kestis 2021. aasta novembrist kuni 2022. aasta märtsi lõpuni.

Kirjanduse analüüs oli magistr töö koostamise üks olulisemaid osi. See aitas saada ülevaate laevakere puhastamiseks mõeldud robotite kasutamisest ja nende võimekustest. Lisaks andis olemasolev dokumentatsioon ja teaduslik kirjandus ülevaate aktuaalsest probleemidest, nagu laevakere bioloogiline veealune kasvamine, kasvuhoonegaaside heitkogused ja merereostus.

Analüüsitud kirjandus sisaldab uurimis- ja teadustöid laevakere puhastusrobotite teemal,  $CO_2$  heitmete ja laeva biosaaste probleemide kohta. Osa kirjalikku informatsiooni laekus failidena, mis oli saadetud e-kirjade teel tootjate poolt. Teiste autorite magistr töid magistrant oma uurimistöo teemal ei leidnud.

### 3 Analüüsiv osa

Käesoleva magistritöö eesmärk on analüüsida laevakere puhastamiseks mõeldud kaugjuhitava robottehnoloogia kasutuselevõttu Eesti sadamates ning kas see oleks võrreldes tuukrite kasutamisega efektiivsem ja kulutõhusam. Eesmärgist lähtuvalt analüüsiti ettevõtteid, mis pakuvad laevakere puhastamiseks robottehnoloogiat, ning uuriti Eesti sadamate ja laevandus-ettevõtete huvi selle tehnoloogia vastu. Töö hüpoteesist lähtuvalt analüüsis magistritöö autor teadusallikaid ja läbiviidud uuringu küsitluste vastuseid, et leida hüpoteesile kinnitust. Hüpoteesiks oli, et laevakere puhastamine roboteid kasutades on soodsam ja efektiivsem, kui selle puhastamine tuukrite abil.

#### 3.1 Laevakere puhastamiseks mõeldud robotite võrdlusanalüüs

Käesolevas alapeatükis võrdleb magistritöö autor laevakere puhastusroboteid, analüüsib erinevad teadusallikad ja tootjate poolt saadetud andmeid.

Autori iseseisvalt koostatud tabelis (vt Lisa 4) on toodud viie roboti võrdlus. Uuringud näitavad, et roboteid saab klassifitseerida erinevalt. Tootjaettevõtted on erinevates asukohtades ja erinevates sadamates kasutatakse robottehnoloogiat kere puhastamiseks. 2011 aastal kasutusele võetud *Fleet Cleaner* robot oli magnetilise adhesiooni süsteemiga. Peale seda, 2013 aastal tuli turule *HullWiper* robot, mis oli juba varustatud vaakumsüsteemiga. 2022. aastal väljastas *Shipshave* ettevõtte turule uue roboti versiooni, mis puhastab laevakere sõidu ajal. Robotid arenevad iga aastaga. Nende kaal, puhastussüsteem ja puhastuse kiirus muutuvad ja erinevad omavahel. Tänapäeval ei ole veel robotitel ühiseid standardeid kehtestatud.

Tootjad müüvad või pakuvad rendiks robottehnoloogiaid ning nende hinnad on erinevad. Iga laevaomanik võib valida enda jaoks sobivama ja soodsama roboti. Tootjate sõnul saadetakse komplektne roboti hinnapakumine vaid potentsiaalsete ostjatele. Tabelis (vt Lisa 4) on toodud hinnavahe, mida tootjad olid nõus jagama. *Armach* roboti kuu renditasu sisaldab roboti rendi hinda koos hooldusega. Kuu renditasu hinnavahe on 18 921 – 28 382 EUR. *ITCH* roboti kohta, tabelis (vt Lisa 4) on toodud ostuhind, kuna roboteid ainult müüakse. *ITCH* roboti ostuhind on 47 304 – 56 764 EUR. Tavaliselt teostab roboti hooldust tootja, *ITCH* roboti puhul teeb seda laevameeskond (laevamehaanik ja laevaelektrik). Roboti kasutamiseks ei ole vaja täiendava koolitust. *HullWiper* robot antakse rendiks 5, 7 või 10 aastaks. Kuu renditasu on 15 970 EUR. Peale iga neli puhastamist on vaja osta varuosad, mis võrdub 1 514 EUR.

Tootjate andmetel keskmiselt võtab laevakere puhastus robotiga aega 2-8 tundi. Tööaeg sõltub laevakere kattumisest bioloogiliste organismidega ja laeva veealusest pindalast. Laevandus-ettevõtete andmetel võtab puhastus tuukritega keskmiselt samuti aega 2-8 tundi.

Kõik robotid on varustatud filtreerimissüsteemiga ning puhastusjääd kogutakse puhastamise käigus kokku. Robotid on suunatud keskkonna ja mereökosüsteemi säilitamisele.

*HullWiper* roboti keskmine hoolduse kiirus on 1 500 m<sup>3</sup> tunni jooksul ning *Fleet Cleaner* puhastab umbes 1 200 m<sup>3</sup> tunni jooksul.

Antud alapeatükis esitas autor enda koostatud tabeli (vt Lisa 4), mille abil on võimalus robot-tehnoloogiat omavahel võrrelda. Järgmises peatükis annab magistrant ülevaate laevandus-ettevõtete kriteeriumist, mis tingimustel on ettevõtted nõus roboteid kasutusele võtma.

### **3.2 Laevandusettevõtte kriteeriumid laevakere puhastusrobotite kasutuselevõtuks**

Autor sai kaheksast pöördumisest kaks vastust laevandusettevõtete poolt, milles vastajad kirjeldasid, millistel tingimustel on ettevõtted nõus roboteid kasutusele võtma. Nende ettevõtete jaoks seisneb peamine tähtsus selles, et laevakere puhastamiseks kasutatavad robotid oleksid efektiivsed ja keskkonnasõbralikud koos filtreerimissüsteemiga, mis korjab sademeid puhastamise ajal. See tingimus pärineb Eesti sadamate eeskirjast (AS Tallinna Sadama eeskiri 01.02.2022 seisuga) punktist 4.3.3, on järgnev: „*Laeva pesemine kemikaalidega, vana värvi eemaldamine, laevakere puhastamine roostest, samuti laevakere veealuse osa puhastamine on sadamas keelatud. Erandina ja ainult laevaliikluse vahetuse ülema loal on lubatud värviparanduste tegemine laevadele ja reisilaevade laevakere veealuse osa puhastamine tingimusel, et puhastusjääd kogutakse kokku, vältimaks nende sattumist merekeskkonda*“. Magistritöö alapeatüki 1.4 andmete alusel on mõnedel robotitel olemas filtreerimissüsteem, mis annab võimaluse laevakere puhastamise ajal korjata saastet. Seetõttu saab väida, et robot vastab sellele tingimustele.

Teiseks kriteeriumiks on roboti tööaeg, see peab puhastama sama kiirelt või kiiremini võrreldes tuukritega. Magistritöö alapeatükis 3.1 oli mainitud, et puhastamine robotiga võtab keskmiselt 2-8 tundi, see on sama nagu tuukritega. Magistritöö alapeatükis 1.1.2 oli mainitud, et tuukriettevõtte *DG-Diving Group*-i sõnul, tuukrid suudavad puhastada laevakere pindala umbes 500 – 1 000 m<sup>3</sup>

ühe tunni jooksul ning roboti abil saab puhastada samal ajal 1 200 – 1 500 m<sup>3</sup>. Töötunnid robotiga puhastamiseks vastavad laevandusettevõtte kriteeriumile.

Kolmas tingimus koosneb roboti hinnast. Laevandusettevõtete jaoks on tähtis hoida kulud võimalikult madalad. Nad on nõus maksma roboti eest rohkem võrreldes tuukritöödega, kuid see ei tohiks olla märkimisväärselt kallim (nt poole kallim). Ettevõtetel on ootus, et robot on odavam. Magistrant analüüsib ja kirjeldab roboti vastavust sellele kriteeriumile magistritöö alapeatükis 3.3.4.

Neljandaks kriteeriumiks on raport, milles kirjeldatakse olukorda enne ja peale puhastamist robotiga. Raporti osaks peavad olema fotod, vajadusel videomaterjal. Igal robotil on integreeritud videokaamera, mille abil saab dokumenteerida robotite puhastustulemusi. Integreeritud andme-hõivesüsteem salvestab robotite puhastuskatte, mida saab hinnata *ITCH*-rakenduse abil. Magistritöö alapeatüki 1.4 alusel on *HSS*-i robotil neli kaamerat ja reaajas andmeanalüüs, mis annavad roboti operaatorile navigeerimiseks ja kere saastumise dokumenteerimiseks infot, mis vastab neljandale laevandusettevõtte kriteeriumile.

Viiendaks kriteeriumiks nimetasid laevandusettevõtted, et puhastusseadmed ei tohiks olla tundlikud lainetuse ja vee läbipaistvuse suhtes. „*Fleet Cleaner*“-i sõnul, tänu magnetkinnitus-süsteemile haakub robot kindlalt laeva külge ja on võimeline puhastama igasugustes keskkonna-tingimustes. Isegi tugeva hoovuse, laine või tuulega ei piira see robotteenuste kasutamist. Uuringud näitavad, et robotid vastavad selle kriteeriumile.

*Shipshave*-i sõnul, ettevõtete motivatsioon „*ITCH*“ robotit osta ja kasutada on erinev, kuid peamine tegur on säilitada terve kere tõhusus ning seeläbi vähendada kütusekulu, õhku ja vette eralduvat heidet. Samas sellele võõrliikide leviku tõkestamine. *Shipshave*-i müügi- ja turundus-juht, Eirik Eide, ütles, et kõigil ostjatel on ühine eesmärk, et ületarbimise vähendamisest saadav kasu on väiksem, kui *ITCH* ostmise investeering. Tänapäeva laevaomanike jaoks on tähtis näidata, et nad väärtustavad jätkusuutlikku tegevust ja teevad kõik endast oleneva, et muutuda „rohelisemaks“.

Antud alapeatükis analüüsis magistritöö autor laevandusettevõtete kriteeriumeid robotite kasutuselevõtuks. Uuringud näitavad, et robot vastab ettevõtete ootustele.

### 3.3 Laevakere puhastamise kalkulatsioon ja võrdlus tuukrite ja roboti abil puhastamise kuludele TS Laevade OÜ näitel

Järgnevas peatükis teostab magistritöö autor tasuvusanalüüsi, mille abil on võimalik võrrelda laevandusettevõtte kulusid laevakere puhastamiseks juhul, kui seda tehakse tuukritega ja juhul, kui puhastus teostatakse robotiga. Analüüs annab hinnangu kriteeriumitele vastavusele, mis on toodud magistritöö alapeatükis 3.2. Uuringus võttis autor andmed TS Laevade OÜ laevade näitel. Ettevõtte korraldab alates 2016. aasta oktoobrist Eesti suursaarte (Hiiumaa, Saaremaa) ja mandri vahelist laevaliiklust. Parvlaevad väljuvad Kuivastu, Virtsu, Heltermaa ja Rohuküla sadamatest. Virtsu - Kuivastu liini teenindavad reisijaid reisiparvlaevad Töll ja Piret, Rohuküla-Heltermaa liini reisiparvlaevad Leiger ja Tiiu. Varulaevaks on reisiparvlaev Regula. (TS Laevad OÜ i.a.)

Neli laevad (Töll, Piret, Tiiu ja Leiger) on sarnased. Nende pikkus on 114 meetrit, laius on 19,7 meetrit ja süvis võrdub 4,0 meetrit. Need laevad mahutavad umbes 150 autot ja 700 reisijat. Varulaeva Regula pikkus on 71,2 meetrit, laius on 16,3 meetrit ning süvis on 4,2 meetrit. Sõidukite mahutavus võrdub 65 ning reisijate mahutavus on 400. (*Ibid*)

2020. aastal ehitati parvlaev Töll ümber hübriidreisilaevaks, mille akupangad võimaldavad sõita osaliselt elektril, vähendades sellega diiselkütuse tarbimist 20% ning jätavad sellega õhku paiskamata 1 600 tonni vähem  $CO_2$  aastas (*Ibid*).

TS Laevade OÜ andmetel tegid ettevõtte laevad 2021. aastal kokku 21 518 reisi Saaremaa ja Hiiumaa liinil. Keskmiselt, arvestamata ilmastikutingimusi ja laevade täituvust, võrdub kütusekulu umbes 130 liitrit ühe reisi kohta. Diislikütuse tihedus temperatuuril  $15^{\circ}C$  võrdub  $800 - 845 \text{ kg/m}^3$  (ehk mitu kilogrammi kaalub 1 000 l diislikütust  $15^{\circ}C$  juures). Autor võttis liitritest tonnideks teisendamiseks arvesse valemit ( $\text{Mass} = \text{Tihedus} \times \text{Kogus}$ ) ning võttis keskmise erikaalu  $[(800 + 845) / 2 = 822,5 \text{ kg/m}^3$  (0,82 t)]. Seega saame, et laev tarbib umbes  $130 \times 0,82 = 106,6 \text{ kg}$  (0,107 t) tonni kütust ühe reisi kohta. Ärisaladuse hoidmise huvides ei avalda ettevõtte kütuse ostuhinda, sel põhjusel leidis magistritöö autor alternatiivse lahenduse. Autor võttis arvestamisel aluseks maailma keskmise laevagaasiõli  $MGO^4$  (*Marine Gas Oil*) hinda perioodil 01.01-30.12.2021, mis oli 659 USD/t (623,5 EUR)<sup>5</sup> (Ship & Bunker 2022).

---

<sup>4</sup>  $MGO$  (*Marine Gas Oil*) - Meregaasiõli on roheline värvi destillaat. Laevagaasiõli kasutatakse laeva diiselmootorite kütusena. (Bunker Oil AS i.a.)

<sup>5</sup> 1 EUR = 1,0570 USD seisuga 06.05.2022 (Eesti Pank i.a.)

2021. aastal oli kokku umbes  $21\,518 \times 0,107 \text{ t} = 2\,302 \text{ t}$  kütusekulu. Kütusekulu maksumus võrdub  $2\,302 \text{ t} \times 623,5 \text{ EUR} = 1\,435\,297 \text{ EUR}$  aastas.

Ühe tonni kulutatud kütuse kohta paiskub õhku keskmiselt 3,17 kg  $CO_2$  (0,00317 tonni)<sup>6</sup>. Vähendades laevakiirust 10% vähendab see  $CO_2$  kogust 10-15%. (Harik 2021, 25)

Ühe aasta jooksul siis saame  $2\,302 \text{ t} \times 0,00317 \text{ CO}_2 = 7,3$  tonni  $CO_2$ .

TS Laevade OÜ andmetel, puhastati kõiki viite laeva 2021. aastal tuukritega 17 korda ning tuukritööde kulud olid 33 800 EUR.

Edasistes arvutustes võtab autor aluseks, et reise arv jääb samaks, ehk 21 518. Laeva kütusekulu keskmiselt on 0,107 t ühe reisi kohta ja kütusehind on 623,5 EUR/t. Tuukritööde kulud kokku on 33 800 EUR aastas.

### **3.3.1 Kulude analüüs ilma laevakere puhastamiseta**

Järgnevas tabelis (vt Tabel 4) on magistritöö autori poolt koostatud arvutused viieks aastaks olukorras, kus laevakere nendel aastatel ei puhastata. Magistritöö alapeatükis 1.1.2 on toodud, et eeldades, kui laev vajab 100 tonni kütust päevas, võib sama laev mõne kuu pärast sama kiiruse säilitamiseks vajada 115 tonni kütust, mis on tingitud reostuskihi kogunemisest laevakeresse. Kütusekulu suureneb siis 15%. Seoses sellega, autor pakkus, kui ei puhasta laevakere, siis kütusekulu suureneb 15% ühe reisi kohta. Saame, et kütusekulu ühe reisi kohta on 149,5 liitrit ehk umbes 0,123 tonni.

Mida rohkem on laevakerel bioloogilist veealust saastet, seda rohkem laev tarbib kütust ja paiskub õhku  $CO_2$ . Autori prognoosi kohaselt, kui kütusekulu suureneb biosaastest, sellega saame, et viie aasta jooksul kütusekulu moodustab 8 252 025 euro. Viie aasta jooksul kulutatud kütuse kohta paiskub keskmiselt õhku umbes 42 tonni  $CO_2$ .

---

<sup>6</sup> 1 kg = 0,001 tonni

Tabel 4. Kulude prognoos viieks aastaks ilma laevakere puhastamiseta

Andmed	2021	2022	2023	2024	2025	2026
Keskmine kütusekulu ühe reisi kohta (t)	0,107	0,123	0,123	0,123	0,123	0,123
Kütusekulu aasta jooksul (t)	2 302	2 647	2 647	2 647	2 647	2 647
0,00317 t CO <sub>2</sub>	7,3	8,4	8,4	8,4	8,4	8,4
Kütuse hind (EUR)	1 435 297	1 650 405	1 650 405	1 650 405	1 650 405	1 650 405
Korpuse puhastuse ei teostanud	33 800	0	0	0	0	0
Aasta kulud kokku (EUR)	1 469 097	1 650 405	1 650 405	1 650 405	1 650 405	1 650 405
Kulud viie aasta jooksul kokku ilma puhastamiseta (EUR)	8 252 025					

Allikas: (autori koostatud)

Nii rahalise kokkuhoiu kui ka *IMO* kütusesäästlikkuse eesmärkide saavutamiseks tuleb edaspidi puhastada laevakere tihedamini, eriti neid, mis sõidavad kõrge reostussurvega piirkondades. Enamik veepuhastusi käivitatakse tänapäeval siis, kui rahuldav kütusesäästlikkus või lepinguline kiirus ei ole enam saavutatav. Läbiviidud uuringute tulemused näitavad, et laevakere puhastamine on vajalik.

Nagu magistritöö punktis 1.1.2 juba mainitud, on laevakere puhastamine on hädavajalik, et vöidelda bioloogilise saastumise vastu, mis omakorda suurendab kütusekulu ja seega täiendavad CO<sub>2</sub> heitkogust ja võõrliikide edasikandumist.

### 3.3.2 Kulude analüüs laevakere puhastamiseks tuukritega

Tabelis 5 (vt Tabel 5) on toodud arvutused, kus laevakere puhastamiseks kasutatakse traditsioonilist meetodit tuukrite abil. TS Laevade OÜ andmetel puhastati kõiki viiete laeva 2021. aastal tuukritega 17 korda ning kulud kokku olid 33 800 EUR. Nelja laeva puhastati neli korda ja ühe varulaeva üks kord.



Tabel 5. Kulude prognoos viieks aastaks puhastamine tuukritega

Andmed	2021	2022	2023	2024	2025	2026
Keskmine kütusekulu ühe reisi kohta (t)	0,107	0,107	0,107	0,107	0,107	0,107
Kütusekulu (t)	2 302	2 302	2 302	2 302	2 302	2 302
0,00317 t CO <sub>2</sub>	7,3	7,3	7,3	7,3	7,3	7,3
Kütuse hind (EUR)	1 435 297	1 435 297	1 435 297	1 435 297	1 435 297	1 435 297
Korpuse puhastuse hind tuukritega (EUR)	33 800	33 800	33 800	33 800	33 800	33 800
Aasta kulud kokku (EUR)	1 469 097	1 469 097	1 469 097	1 469 097	1 469 097	1 469 097
Kulud 5 aasta jooksul kokku (EUR)	7 345 485					

Allikas: (autori koostatud)

Kui pakkuda, et tuukritööde ja kütuse hinnad jäävad samaks ja reise arv (21 518) ühe aasta jooksul kokku jääb ka samaks, siis saame, 7 176 485 EUR (1 435 297 EUR × 5) viie aasta jooksul kütusekuludeks ja umbes 36,5 (7,3 × 5) tonni CO<sub>2</sub>. Analüüs näitab, et kulud kütusele kokku on kerehooldust teostataval perioodil 13,03% väiksem võrreldes kalkulatsiooniga, kui puhastamist ei teostata viie aasta jooksul. Viie aasta jooksul, kui laevakere puhastuste ei teostata, paisatakse kulutatud kütuse kohta õhku 15,07% rohkem CO<sub>2</sub> võrreldes kalkulatsiooniga, kui puhastamine toimub tuukrite abil.

### 3.3.3 Tasuvusanalüüs robotite kasutuselevõtuks viieks aastaks

Järgnevas alapeatükis teostab magistr töö autor robotite tasuvusanalüüsi eesmärgiga leida kõige soodsam robot laevakere puhastamiseks. Autor võtab arvesse robotite hinnad, mis on toodud tabelis (vt Lisa 4). Robotite soetamise tingimused on erinevad. Mõnda robotit saab rentida, mõnda saab ainult osta. Tabelis 6 (vt Tabel 6) on toodud robotite finantsvõrdlus, kus robotid võetakse kasutusele viieks aastaks. Tootjate sõnul väheneb roboti abil kütusekulu 10%, sellega saame, et

ühe reisi kohta laev tarbib umbes 117 liitrit kütust ehk 0,096 tonni. Aasta jooksul saame 2 066 t ( $21\,518 \times 0,096$ ). Kütuse hind aasta jooksul võrdub  $2\,066\text{ t} \times 623,5\text{ EUR} = 1\,288\,151\text{ EUR}$ .

Tabel 6. Kulude robotite võrdlusanalüüs

<b>Andmed 5 aastaks</b>	<i>Armach Robotics</i>	<i>ITCH</i>	<i>HullWiper</i>
Roboti hind (EUR)	1 702 920	56 764	989 994
Kütuse hind (EUR)	6 440 755	6 440 755	6 440 755
Kulud kokku (EUR)	8 143 675	6 497 519	7 430 749
Puhastuse arv	Piiramatu	Piiramatu	84 korda

Allikas: (autori koostatud)

*HullWiper* robot antakse rendiks ning kuu renditasu on 15 970 EUR. Peale iga neli puhastamist on vaja osta varuosad, mis maksavad 1 514 EUR. Viie aasta jooksul kuu renditasu võrdub 958 200 EUR ( $15\,970 \times 12 \times 5$ ). Autor arvestas, et viie aasta jooksul laevakere puhastamine teostatakse 84 korda (umbes sama korda tuukrite abil viie aasta jooksul), mis tähendab, et varuosadeks makstakse 31 794 EUR ( $1\,514 \times 21$ ). Roboti kulud moodustavad 989 994 EUR ( $958\,200 + 31\,794$ ) viie aasta jooksul.

*Armach* roboti puhul, kuu renditasu võrdub 18 921 – 28 382 EUR. Lõplik hind määratakse potentsiaalsete ostjate jaoks. Seoses sellega, autor võttis arvutuse käigul kõige kõrgema hinda (28 382 EUR). Viie aasta jooksul roboti kulud on 1 702 920 EUR ( $28\,382 \times 12 \times 5$ ).

*ITCH* robot ainult müüakse ning ostuhinna vahemik on 47 304 – 56 764 EUR. Autor võttis arvesse kõige kõrgema hinda, mis on 56 764 EUR.

Analüüsi tulemused näitavad, et arvestades kütuse- ja roboti kulud kokku, siis kõige odavam on *ITCH* roboti kasutuselevõtt. Teisele kohale jääb *HullWiper* robot, on 14,36% kallim, kui *ITCH* robot. Kõige kulukamaks robotiks osutus *Armach Robotics*, mille kütuse- ja roboti kulud on 25,34% võrra suuremad võrreldes *ITCH* robotiga. Arvutused on toodud *HullWiper*-i kohta, et laevakere puhastus teostatakse 84 korda kokku viie aasta jooksul. Sama ajal, *ITCH* ja *Armach* robotitega saab puhastada piiramatu arv kordi.

Järgnevas alapeatükis analüüsib autor kulud laevakere puhastamist *ITCH* robotiga võrreldes tuukritega, ning analüüsib ka kriteeriumitele vastavust vastavalt magistritöö peatükis 3.2 toodule.

### 3.3.4 Kulude analüüs laevakere puhastamiseks *ITCH* robotiga

Laevakere puhastamine robottehnoloogia abil väheneb 10% kütusekulu. Autor võttis arvesse andmed, mis on toodud alapeatükis 3.3.3, keskmine kütusekulu on 2 066 t aasta jooksul. Tabelis 7 (vt Tabel 7) on toodud arvutused, kus autor pakkus välja „*ITCH*” roboti kasutamist.

Tabel 7. Kulude prognoos viie aastaks laevakere puhastamiseks „*ITCH*“ robotitega

Andmed	2021	2022	2023	2024	2025	2026
Kütusekulu (t)	2 302	2 066	2 066	2 066	2 066	2 066
0,00317 t CO <sub>2</sub>	7,3	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5
Kütuse hind (EUR)	1 435 297	1 288 151	1 288 151	1 288 151	1 288 151	1 288 151
Korpuse puhastuse hind roboti „ <i>ITCH</i> “ abil (EUR)	33 800	56 764	0	0	0	0
Aasta kulud kokku (EUR)	1 469 097	1 344 915	1 288 151	1 288 151	1 288 151	1 288 151
Kulud 5 aasta jooksul kokku (EUR)	6 497 519					

Allikas: (autor koostatud)

*ITCH* robotit ainult müüakse ning hinnavahe on, mis on toodud tabelis (vt Lisa 4) on 47 304 – 56 764 EUR. Lõplik hind sõltub eripakkumisest otse ostajatele. Autor võttis arvesse arvutuse käigus kõige kõrgemat hinda, mis on 56 764 EUR. Võtame arvesse, et kütuse hind ja reise arv jäävad samaks. Robot „*ITCH*“ asub laeva pardal ja saab korpuste puhastada piiramatu arvu kordi ning sõidu ajal. Viie aasta jooksul saame, et õhku paiskub umbes 32,5 tonni CO<sub>2</sub>. Kütuse- ja roboti kulud kokku viie aasta jooksul on 6 497 519 EUR.

Analüüsi tulemused näitavad, et *ITCH* roboti abil saab vähendada kütusekulu ja sellega CO<sub>2</sub> heitkoguseid. Tulemused, mis on toodud magistritöö alapeatükis 3.3.2 näitavad, et kütuse ja tuukritööde kulud on 7 345 485 EUR viie aasta jooksul, kui puhastamine teostatakse tuukrite abil. Tulemused näitavad, et robot vastab peatükis 3.2 toodud kolmandale laevandusettevõtte kriteeriumile. Puhastamine *ITCH* roboti abil viie aasta jooksul kulud kokku 11,54% vähem võrreldes puhastamisega tuukrite abil.

Kuna kütusekulu väheneb roboti abil, sellega väheneb 10,96% paisatud õhku  $CO_2$  heitkoguseid võrreldes puhastamisega tuukrite abil. Laevakere puhastus roboti abil saab teostada pidevalt, puhastades seeläbi kere enne, kui see kattub biosaastega.

### **3.4 Roboti eelised laevakere puhastamisel**

Proaktiivne hooldus hoiab ära kere saastumise, tagab maksimaalse tõhususe ja parandab pidevalt jõudlust. Laevakere puhastamist saab teostada pidevalt kuna robot asub laeva pardal ning ka laadimise/ lossimise ajal. *ITCH* robotiga puhastus teostatakse sõidu ajal. Robotil on pikem kasutusiga kui pehmetel katetel (umbes 10 aastat vs. 5 aastat), mille tulemuseks on lühem kuivdoki aeg ja kulukate remonditööde vältimine. Puhastamine roboti abil vähendab 10% kütusekulu ja 10-15%  $CO_2$  heitkoguseid.

Nagu magistritöö alapeatükis 3.2 juba mainitud, et mõnedel sadamatel, näiteks AS Tallinna Sadama sadamatel tänapäeval kehtivad ranged reeglid, mis on kirjutatud sadama eeskirjas punktis 4.3.3, kus veealuse osa puhastamine lubatakse tingimusel, et puhastusjäädid kogutakse kokku, vältimaks nende sattumist merekeskkonda. Robotid omavad filtreerimissüsteemi, mis kogub laeva veealustest osadest eemaldatud saasteained, mis annab robotile eelise.

Kõigil robotitel on kaamerad, see võimaldab kere seisukorda ja biosaaste olemasolu jälgida reaalajas.

Magistritöö alapeatükist 3.3.4 analüüsi tulemused näitavad, et võttes kasutusele *ITCH* robottehnoloogia, saab kulusid vähendada viie aasta jooksul 11,54%.

### **3.5 Tulemuste analüüs**

Magistritöö alapeatükis 3.2 oli mainitud, et laevakere puhastamine sadamas on keelatud. Erandina ja ainult laevaliikluse vahetuse ülema loal on lubatud värviparanduste tegemine laevadele ja reisilaevade laevakere veealuse osa puhastamine tingimusel, et puhastusjäädid kogutakse kokku, vältimaks nende sattumist merekeskkonda (AS Tallinna Sadama eeskiri 2022). Autorile teadaolevalt ei ole Eestis kasutatud robottehnoloogiat laevade puhastamiseks. Uurimused näitavad, et robottehnoloogia saab lahendada tänapäeva probleemid, mis on seotud heitgaasidega ja biosaastega. Robotid omavad filtreerimissüsteemi, mis korjab puhastusjäädid kokku ja peale puhastamist neid utiliseeritakse.

Magistritöö alapeatükis 1.1.2 oli välja toodud, et bioloogilise saastumise kogunemine laevakerele on probleemiks mitte ainult võõrliikide ülekandumise tõttu, vaid ka õhusaaste, kütusekulu suurenemise ja laeva konstruktsioonide kareduse suurenemise tõttu. Isegi kere kareduse väike suurenemine mõjutab negatiivselt kere hõõrdetakistust. See toob kaasa vajaduse täiendava võimsuse ja täiendava kütusekulu järele, et säilitada laeva kiirus, mis tähendab täiendavaid  $CO_2$  heitkoguseid. Laeva biosaaste ja suurenenud heitgaaside probleemide lahenduseks võib olla pidev laevakere puhastamine, mis omakorda on laevaomanikele kulukas protsess. Tuukrite abil puhastamisega kaasneb õnnetuste oht ja puhastuse protsess tuukritega on kulukas.

Analüüsi tulemused näitavad, et robottehnoloogia vastab laevandusettevõtete kriteeriumile. *ITCH* roboti kasutamine laevakere puhastamiseks on kasumlikum, kui tuukritega. Kuna puhastamist teostatakse kaugjuhitava robottehnoloogia abil, siis välditakse ohtu inimestele. Kõik robotid on keskkonnasõbralikud, omavad filtreerimissüsteemi, mis puhastamise ajal korjab puhastusjäätgid kokku ning sellega säästavad mereökosüsteemi. Kokku kulud (roboti- ja kütuse hind) *ITCH* robotiga on 11,54% vähem võrreldes tuukritega. Nagu eelnevalt mainitud, robotiga laevakere puhastus vähendab 10% kütusekulu ning 10-15%  $CO_2$ . Puhastamine *ITCH* roboti abil, paiskub õhku umbes 10,96% vähem  $CO_2$  heitkoguseid võrreldes puhastamisega tuukrite abil. *HullWiper* roboti puhul kulud kokku 1,16% suurem võrreldes tuukritega. *Armach* roboti kulud on 10,87% suurem võrreldes tuukrite kuludega. Magistritöö peatükis 3.2 oli mainitud, et laevandusettevõtte on nõus maksma roboti eest rohkem võrreldes tuukritöödega, kuid see ei tohiks olla märkimisväärselt kallim (nt poole kallim). Robotid vastavad kriteeriumile. Puhastamine roboti abil kestab umbes 2-8 tundi, sama nagu tuukrite abil. Puhastamine roboti abil toimub kiiremini võrreldes tuukritega. Robotid suudavad puhastada 1 200 – 1 500 m<sup>3</sup> ühe tunni jooksul ning tuuker sama ajal puhastab 500 – 1 000 m<sup>3</sup>. Mõned robotid, näiteks *HSS* ja *ITCH*, asuvad laeva pardal, neid saab kasutada piiramatu arv kordi laevakere puhastamiseks ning tuukritega teostatakse puhastust tavaliselt 2-4 korda aastas ühe laeva kohta. Kõikidel robotidel on olemas kaamerat, mille abil saab jälgida laevakere seisund ning biosaaste. Samas on võimalik dokumenteerida andmed.

Tulemused näitavad robotite efektiivsust. Teema on perspektiivne ja nõuab täiendavad uurimisi ning täpsemaid andmed tootjatelt (hind, kulud) ning laevaomanikult (tegelikud kulud kütusele, kütuse hind). Uurimise käigus oli uuringu puudused seoses ebapiisava vastajate arvuga. Edasised uuringud võiksid uurida sadamate ja tuukriettevõtete valmisolekut robottehnoloogia rakendamiseks.

## Kokkuvõte

Ülemaailmne merenduskogukond on pühendunud keskkonnasäästlikumate ja puhtama veega sadamate ehitamisele, kohaliku õhusaaste vähendamisele ning laevandus- ja sadamakogukonna panuse suurendamisele kliimamuutuste eesmärkide saavutamisel. Saaste eemaldamisel esinevad riskid on erosiooni või katte kahjustamine ning vees elavate võõrliikide sattumine kohaliku merekeskkonda. Laevakere seisukord mängib olulist rolli selle tõhususe ja üldise jõudluse suurendamisel. Puhta kerega laev tarbib vähem kütust ja toodab vähem kasvuhoonegaaside heitkoguseid. Kahjulike heitkoguste vähendamiseks on Rahvusvaheline Mereorganisatsioon (*IMO*) teinud koostööd erinevate sidusrühmadega eeskirjade ning tehniliste ja operatiivsete meetmete väljatöötamiseks selle tõsise probleemi lahendamiseks. Laeva energiatõhususe juhtimiskava *SEEMP*-i parimaks tavaks kütuse tõhusaks käitlemiseks on laevakere hooldus. Kere puhastamine tuukrite abil toob kaasa ka ohutusega seotud probleemid, kõige suurem probleem on keskkonnamõju, kuna puhastusprotsess toob tavaliselt kaasa selle, et eemaldatud aine ladestub merepõhja või jääb triivima vette. Sellel võib olla kahjulik mõju kohalikele ökosüsteemidele. Samas kaasnevad sellega puudused, nagu suur töömaht, madal tõhusus, piiratud tööaeg ja vigastuste võimalus. Seega on veealused kerepuhastusrobotid saanud parimaks lahenduseks tuukrite asendamiseks laevakere puhastamisel. Puhastamine robotitehnoloogia abil vähendab kütusekulu kuni 10%, vähendades laeva ja vee vahelist takistust, mis vähendab omakorda 10-15%  $CO_2$ .

Antud magistritöö eesmärgiks oli analüüsida laevakere puhastamiseks mõeldud kaugjuhitava robotitehnoloogia kasutuselevõttu Eesti sadamates ning kas see oleks võrreldes tuukrite kasutamiselega ka efektiivsem ja kulutõhusam.

Autor seadis töö kirjutamisel hüpoteesi, et laevakere puhastamine robotite abil on soodsam ja efektiivsem, kui selle puhastamine tuukrite abil. Uuringu läbiviimisel kasutas autor küsitlusuuringut. Valimisse kuulusid roboteid tootvad ettevõtted, Eestis tegutsevad laevandusettevõtted, sadamad ja teised organisatsioonid, kes puhastusteenust pakuvad. Kvantitatiivsetest uurimisstrategiatest oli kasutatud hindav uuring. Hindava uuringu eesmärk oli koguda ja hinnata informatsiooni, millega saab anda tagasisidet objektide (robotid) kohta hinnates nende kasu või väärtust.

Töö esimeses osas andis autor kokkuvõtliku ülevaate probleemidest ja olemasolevatest lähenlustest ning lühiülevaade erinevatest robotitest. Teises peatükis keskendus autor Eesti laevandusettevõtete, teiste laevade puhastusteenust pakkuvate organisatsioonide, sadamate ja robotite tootja-

ettevõtete seas läbi viidud küsitlustele. Kolmandas peatükis tõi magistr töö autor välja finantsanalüüsi ja tulemused, kuidas ja kui palju säästavad laevandusettevõtted, võttes kasutusele robotid.

Läbiviidud küsitluse tulemuste põhjal ja dokumentatsioonianalüüsi tulemusel selgus, et püstitatud hüpotees leidis selle töö käigus kinnitust *ITCH* roboti puhul. Peatüki arvutuste käigus selgus, et laevakere puhastamine *ITCH* roboti abil, kütuse- ja roboti kulud on 11,54% vähem võrreldes kütuse- ja tuukritööde kuludega. *HullWiper* roboti puhul kulud kokku 1,16% suurem ning *Armach* roboti kulud on 10,87% suurem võrreldes tuukrite kuludega. Uuringu käigus selgus, et robotitehnoloogia võrreldes tuukrite kasutamisega on efektiivsem. Robotiga saab puhastada piiramatut arvu kordi, mis annab võimaluse laevaomanikele säästa kütusekulu 10% ning sellega 10-15% vähendada  $CO_2$  heitkoguseid.

Magistr töö uurimistulemused näitavad, et laevandusettevõtete tingimused, mille alusel nad on nõus laevakere puhastamiseks roboti kasutusele võtma, vastavad robotitehnoloogia nõuetele. Roboti abil puhastamine kestab 2-8 tundi, sõltuvalt laeva pikkusest ja kerel olevast biosaastest, aeg on sama nagu tuukritega. Puhastamine roboti abil toimub kiiremini võrreldes tuukritega. Robotid suudavad puhastada 1 200 – 1 500 m<sup>3</sup> ühe tunni jooksul ning tuuker sama ajal puhastab 500 – 1 000 m<sup>3</sup>.

Analüüsides sadamate eeskirjasid selgub, et tänapäeval laeva pesemine kemikaalidega, vana värvi eemaldamine, laevakere puhastamine roostest, samuti laevakere veealuse osa puhastamine on sadamas keelatud. Erandina ja ainult laevaliikluse vahetuse ülema loal on lubatud värviparanduste tegemine laevadele ja reisilaevade laevakere veealuse osa puhastamine tingimusel, et puhastusjäätgid kogutakse kokku, vältimaks nende sattumist merekeskkonda. Seoses sellega, väidab autor, et roboti kasutuselevõtt annab laevandusettevõtetele võimalust täita sadamate reegleid, kuna robotid omavad filtreerimissüsteemi, mis korjab puhastamise ajal saastet ning ei mõju negatiivselt mereökosüsteemile.

Kokkuvõtteks järeltab autor, et teema on perspektiivne ja nõuab täiendavat uurimist ning täpsemaid andmeid tootjatelt (hind, kulud) ning laevaomanikult (tegelikud kulud kütusele, kütuse hind). Roboti kasutuselevõtt annab võimaluse lahendada tänapäeva probleemid ja järgida reegleid. Uurimise käigus oli uuringu puudused seoses madala vastajate arvuga. Edasised uuringud võiksid uurida sadamate ja tuukriettevõtete valmisolekut robotitehnoloogia rakendamiseks.

## Summary

**Title of Master Thesis:** Introduction of remote-controlled robot technology intended for ship hull cleaning in Estonian ports

**Author:** Ilona Pogodina

**Language:** Estonian

**Keywords:** SEEMP, ship hull cleaning, ROV, CO<sub>2</sub> emissions, biofouling

**Volume:** total 64 pages, from title to the end of the references 55 pages; cited sources 56; 5 appendices

The global maritime community is committed to build sustainable and cleaner ports, reducing local air pollution and increasing the contribution of the shipping and port community to achieve climate change goals. Risks of ship's hull cleaning include damage to marine environment or damage to ship's hull and release of invasive aquatic species into the local marine environment. The condition of the ship's hull plays an important role in increasing and decreasing the ship's efficiency and overall performance. Ship with a clean hull consumes less fuel and emits less greenhouse gases. In order to reduce harmful emissions, the International Maritime Organisation (IMO) has worked with various stakeholders to develop rules, technical and operational measures to address this serious problem. The best practice in SEEMP for a ship's energy efficiency management plan is hull maintenance. Cleaning the ship's hull with divers poses safety problems, the biggest problem being the environmental impact, as the cleaning process usually results in the removed substance being deposited on the seabed or directly into the water. This can have a detrimental effect on local ecosystems. Using divers has its disadvantages such as high workload, low efficiency, limited working hours and the possibility of injuries. Thus, underwater hull cleaning robots have become the best solution to replace divers. Using robotic cleaning technologies reduces fuel consumption by up to 10% by reducing the barrier between the ship and the water, which reduces CO<sub>2</sub> by 10-15%.

The aim of this master's thesis "Introduction of remote-controlled robot technology intended for ship hull cleaning in Estonian ports" was to analyse the remote-controlled robot technology for hull cleaning in Estonian ports and whether it would be more efficient and cost - effective than the use of divers.



While writing the thesis, the author hypothesised that using robots to clean the ship's hull is cheaper and more efficient than cleaning with divers. The author used a survey as a research method. The sample included companies of robot manufacturers, shipping companies operating in Estonia, ports and other organisations. An evaluative study of quantitative research strategies has been used. The aim of the study was to collect and evaluate information that can be used to provide feedback on objects (cleaning robots) by assessing their benefits or value.

In the first part of the thesis, the author gives a concise overview of the problems and the solutions made, as well as a brief overview of different robots. In the second part, the author focuses on surveys conducted among Estonian shipping companies, other organisations, ports and robot companies, and in the third chapter, the financial analysis and results of how and how much shipping companies save by using robot cleaning technologies. The results of the survey and the analysis of the documentation show that the hypotheses were confirmed in the case of the ITCH robot for the sample of this work. The calculations in the chapter show that the cost of cleaning the hull with an ITCH robot, fuel and robot is 11.54% lower than the cost of fuel and diving. The HullWiper robot costs a total of 1.16% higher and the Armach robot costs 10.87% more than divers. The calculations in the chapter showed that cleaning the hull with a robot is more effective than using divers. Robots can be used to clean the ship's hull multiple times thus saving shipowner's 10% in fuel consumption and reducing CO<sub>2</sub> by 10%.

The research questions posed for the master's thesis were partially achieved and the results of the study show that the conditions under which shipping companies agree to use the robot for hull cleaning meet the requirements. Robotic cleaning takes 2-8 hours, depending on the length of the ship and amount of the biofouling, approximately the same time cost by using the divers. Cleaning with robot is faster than diving. The robots can clean 1 200 – 1 500 m<sup>3</sup> in one hour, while the diver cleans 500 – 1 000 m<sup>3</sup> at the same time.

Looking at the regulations of the ports, it turns out that nowadays it is forbidden to wash the ship with chemicals, remove old paint, clean the hull from rust, as well as clean the underwater part of the hull in the port. Only with the permission of the master of the vessel traffic, colour corrections and cleaning of the underwater part of the hull of passenger ships shall be permitted, provided that the cleaning residues are collected to prevent their release into the marine environment. Considering this, the author argues that the introduction of the robot will allow shipping companies to comply with port rules, as robots have a filtration system that collects any residues during cleaning.

In conclusion, the author came to the conclusion that the topic of the master's thesis is promising and requires further research and more detailed information from the producers (price, costs) and the shipowner (actual fuel costs, fuel price). The introduction of the robot technology provides an opportunity to solve today's problems and follow the rules. The topic requires further investigation, as there were shortcomings in the research related to the insufficient number of respondents. Further research could examine the readiness of ports and diving companies to adopt robotic technology.

## Viidatud allikad

Adland, R.; Cariou, P.; Jia, H.; Wolff, F.C. (2018, March 20). The energy efficiency effects of periodic ship hull cleaning. *Journal of Cleaner Production*, Volume 178, pp. 1-13. Allikas: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.247> (14.02.2022)

Albitar, H.; Dandan, K.; Ananiev, A.; Kalaykov, I. (2016, January 1). *Underwater Robotics: Surface Cleaning Technics, Adhesion and Locomotion Systems*. *International Journal of Advanced Robotic Systems* 13(1). Allikas: <https://doi.org/10.5772%2F62060> (14.02.2022)

Armach Robotics, Inc. (2022). *Koduleht*. Allikas: <https://www.armachrobotics.com/> (30.03.2022)

Bader-Eldin, M. (2008, January 1). *Hull roughness and antifouling paint*. Allikas: [https://www.aast.edu/pheed/staffadminview/pdf\\_retreive.php?url=5285\\_49\\_11\\_Hull\\_roughness\\_and\\_antifouling\\_paint\\_review.pdf&stafftype=staffpdf](https://www.aast.edu/pheed/staffadminview/pdf_retreive.php?url=5285_49_11_Hull_roughness_and_antifouling_paint_review.pdf&stafftype=staffpdf) (25.02.2022)

Bertram, V. (2020, September 14-15). *1<sup>st</sup> Port In-Water Cleaning Conference, PortPIC`20*. Hamburg. Allikas: [http://data.hullpic.info/PortPIC2020\\_Hamburg.pdf](http://data.hullpic.info/PortPIC2020_Hamburg.pdf) (27.02.2022)

BIMCO & International Chamber of Shipping. (BIMCO & ICS). (2021). *Industry standard on in-water cleaning with capture, Version 1.01*. BIMCO koduleht. Allikas: <https://www.bimco.org/about-us-and-our-members/publications/industry-standard-on-in-water-cleaning-with-capture> (28.02.2022)

BIMCO. (2021, February 04). *Shipping industry takes new step to protect marine environments*. BIMCO koduleht. Allikas: <https://www.bimco.org/news/priority-news/20210402-shipping-industry-takes-new-step-to-protect-marine-environments> (28.03.2022)

Bunker Oil AS. (kuupäev puudub). *Koduleht*. Allikas: <https://www.bunkeroil.no/en/category/mgo> (10.05.2022)

Curran, A. P.; O'Connor, B. W.; Lowe, C. M.; King, E. F. (2016, December 14). *Analyzing the Current Market of Hull Cleaning Robots*. Worcester Polytechnic Institute. Allikas: [https://digital.wpi.edu/concern/student\\_works/ws859f89n?locale=en](https://digital.wpi.edu/concern/student_works/ws859f89n?locale=en) (16.02.2022)

DG-Diving Group Underwater Specialists. (2020). *Koduleht*. Allikas: <https://dg.fi/site/services/underwatercleaning/> (25.03.2022)

Dietrich, K & Mert, E. (2017, November). MRV in practice. Experience in Turkey with designing and implementing a system for monitoring, reporting and verification of GHG emissions. Republic of Turkey Ministry of Environment and Urbanisation. Allikas: [https://www.giz.de/en/downloads/MRV\\_in\\_Practice\\_Booklet\\_2017.pdf](https://www.giz.de/en/downloads/MRV_in_Practice_Booklet_2017.pdf) (19.02.2022)

Eesti Pank. (kuupäev puudub). *Koduleht*. Allikas: <https://www.eestipank.ee/> (10.05.2022)

EMSA. (2019, 06 02). *THESIS-MRV*. CO2 emissions report. Allikas: <https://mrv.emsa.europa.eu/#public/emission-report> (19.02.2022)

- Enström, A.; Oftedahl, G. A. (2020). *Proactive Cleaning and the Jotun Hull Skating Solution*, 1st PortPIC`20 Conference, pp. 66-71. Allikas: [http://data.hullpic.info/PortPIC2020\\_Hamburg.pdf](http://data.hullpic.info/PortPIC2020_Hamburg.pdf) (03.03.2022)
- Erol, E.; Cansoy, C. E; Aybar, O. Ö. (2020, December). *Assessment of the impact of fouling on vessel energy efficiency by analyzing ship automation data*. Applied Ocean Research, Volume 105, 102418. Science Direct. Allikas: <https://doi.org/10.1016/j.apor.2020.102418> (15.05.2022)
- European Parliament. (2015, 04 29). *Acces to Euopen Eunion Law*. Allikas: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:02015R0757-20161216> (19.02.2022)
- Fleet Cleaner. (2021). *Koduleht*. Allikas: <https://www.fleetcleaner.com/> (28.03.2022)
- Freyer, R.; Eide, E. (2020). In-Transit Cleaning of Hulls, 5 th HullPIC Conference, pp. 120- 125. Hamburg. Allikas: [http://data.hullpic.info/HullPIC2020\\_Hamburg.pdf](http://data.hullpic.info/HullPIC2020_Hamburg.pdf) (05.03.2022)
- Greensea Systems, Inc. (kuupäev puudub). *Koduleht*. Allikas: <https://greensea.com/> (30.03.2022)
- Hakim, M. L.; Utama, I K. A. P.; Nugroho, B.; Yusim, A. K.; Baithal, M. S.; Suastika, I K. (2018, May). *Review of correlation between marine fouling and fuel consumption on a ship*. Researchgate, Allikas: [https://www.researchgate.net/publication/325263376\\_REVIEW\\_OF\\_CORRELATION\\_BETWEEN\\_MARINE\\_FOULING\\_AND\\_FUEL\\_CONSUMPTION\\_ON\\_A\\_SHIP](https://www.researchgate.net/publication/325263376_REVIEW_OF_CORRELATION_BETWEEN_MARINE_FOULING_AND_FUEL_CONSUMPTION_ON_A_SHIP)
- Harik, E. (2021). *Laeva heitgaasides CO<sub>2</sub> vähendamise lühi- ja pikaajalised strateegiad 2021-2050*. Magistritöö TalTech Eesti Mereakadeemia. Tallinn. Allikas: <https://digikogu.taltech.ee/en/Download/78f429d9-ab2c-43fc-a6e7-d74d138a6213> (25.03.2022)
- HullWiper. (2022). *Koduleht*. Allikas: <https://www.hullwiper.co/> (29.03.2022)
- IMO. (2009). *Second IMO GHG Study 2009*. London: International Maritime Organization. Allikas: <https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/SecondIMOGHGStudy2009.pdf> (20.02.2022)
- IMO. (2011, July). Resolution MEPC.207(62), 2011 Guidelines for the control and management of ships' biofouling to minimize the transfer of invasive aquatic species. IMO org. Allikas: <https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/RESOLUTION%20MEPC.207%5b62%5d.pdf> (20.02.2022)
- IMO. (2011, November). Technical and operational measures to improve the energy efficiency of international shipping and assessment of their effect on future emissions. Allikas: [https://seors.unfccc.int/applications/seors/attachments/get\\_attachment?code=MOE2AHKBQJAJLFCWO8EAVIYFKOE25OT4](https://seors.unfccc.int/applications/seors/attachments/get_attachment?code=MOE2AHKBQJAJLFCWO8EAVIYFKOE25OT4) (20.02.2022)
- IMO. (2016, October 28). *Resolution mepc.282(70), 2016 GUIDELINES FOR THE DEVELOPMENT OF A SHIP ENERGY EFFICIENCY MANAGEMENT PLAN (SEEMP)*.

International Maritime Organization. Allikas: [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.282\(70\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.282(70).pdf) (20.02.2022)

IMO. (2018, 04 13). *INITIAL IMO STRATEGY ON REDUCTION OF GHG EMISSIONS FROM SHIPS. Resolution MEPC.304(72)*. London: International Maritime Organization. Allikas: [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.304\(72\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.304(72).pdf)

IMO. (2019). *Reducing GHG from ships - the IMO initial GHG strategy*. International Maritime Organization. Allikas: <https://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/Pages/Reducing-greenhouse-gas-emissions-from-ships.aspx#:~:text=The%20initial%20GHG%20strategy%20envisages,that%20total%20annual%20GHG%20emissions>

Iborra, A.; Pastor, J. A.; Alonso, D.; Alvarez, B.; Ortiz, F. J.; Navarro, P. J.; Fernández, C. & Suardiaz, J. (2010, May). *A cost – effective robotic solution for the cleaning of ship's hulls*. Robotica, Volume 28, Issue 3, pp. 453-464. Cambridge University Press. Allikas: <https://doi.org/10.1017/S0263574709005797> (05.03.2022)

International Chamber of Shipping. (2019, June). *Annual Review 2019*. International Chamber of Shipping. Allikas: <https://www.ics-shipping.org/wp-content/uploads/2019/06/ics-annual-review-2019-min.pdf>

Jotun. (2022). *Koduleht*. Allikas: <https://www.jotun.com/ww-en/about-jotun/> (29.03.2022)

Kulchin, Yu N.; Zvyagintsev A. Yu; Subbotin, E. P.; Maslennikov, S. I.; Begun, A. A. (2015). *Perspectives and technical – economic aspects of elaboration of new methods of controlling biofouling on the maritime transport*. Cyberleninka. Allikas: <https://cyberleninka.ru/article/n/perspektivy-i-tehniko-ekonomicheskie-aspekty-razrabotki-novyh-metodov-kontrolya-bioobrastaniya-na-morskom-transporte/viewer> (15.05.2022)

Lee, M. H.; Park, Y. D.; Park, H. G.; Park, W. C.; Hong, S.; Lee, K.S.; Chun, H. H. (2012, December). *Hydrodynamic design of an underwater hull cleaning robot and its evaluation*. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, Volume 4, Issue 4, pp. 335-352. Allikas: <https://doi.org/10.2478/IJNAOE-2013-0101> (06.03.2022)

LOW EMISSION CAPACITY BUILDING PROGRAMME. (LECB Programme). (kuupäev puudub). *Measurement, reporting and verification (MRV) technical paper*. The One UN Climate Change Learning Partnership. Allikas: <https://www.uncclearn.org/wp-content/uploads/library/undp-lecb-measurement-reporting-mrv-technical-paper-201x.pdf> (06.03.2022)

Maritime Reporter & Engineering News. (2019, March). *The Future of Autonomous Robotic Hull Grooming*. The World's Largest Circulation Marine Industry Publication, Number 3, Volume 81. Allikas: [https://greensea.com/pdfs/hull\\_grooming\\_article.pdf](https://greensea.com/pdfs/hull_grooming_article.pdf) (07.03.2022)

- Mihhailov, V. N & Tkachuk, G. N. (1971). *Влияние шероховатости корпуса судна на сопротивление воды*. Судостроение. (15.05.2022)
- Nassiraei, A. A. F.; Sonoda, T.; Ishii, K. (2012). *Development of Ship Hull Cleaning Underwater Robot*. 2012 Fifth International Conference on Emerging Trends in Engineering and Technology, Japan. Allikas: <https://doi.org/10.1109/ICETET.2012.74> (10.04.2022)
- NL Netherlands News. (2016, January 20). *WIS Award 2016 won by Fleet Cleaner for cleaning ship hulls in harbours*. Allikas: <https://www.dutchwatersector.com/news/wis-award-2016-won-by-fleet-cleaner-for-cleaning-ship-hulls-in-harbours> (09.05.2022)
- Schultz, M. P.; Bendick, J. A.; Holm, E. R. & Hertel, W. M. (2010, October 7). *Biofouling. Economic impact of biofouling on a naval surface ship*, 87–98. Allikas: <https://doi.org/10.1080/08927014.2010.542809> (10.04.2022)
- SEMCOM. (1996-2022). *New robotic technology for cleaning of ships*. SEMCOM koduleht. Allikas: <https://semcon.com/uk/jotunhullskater/> (28.03.2022)
- SHIP & BUNKER. (2022). *Koduleht*. Allikas: [https://shipandbunker.com/prices/av/global/av-glb-global-average-bunker-price?fbclid=IwAR3KJQqubzYMf2IFPsd6DoUOQZY-6P\\_Krf\\_HGE9Gq5EhN65ekuP\\_-jqPoZ4#MGO](https://shipandbunker.com/prices/av/global/av-glb-global-average-bunker-price?fbclid=IwAR3KJQqubzYMf2IFPsd6DoUOQZY-6P_Krf_HGE9Gq5EhN65ekuP_-jqPoZ4#MGO) (10.05.2022)
- Shipshave AS. (kuupäev puudub). *Koduleht*. Allikas: <https://shipshave.no/> (29.03.2022)
- Song, C.; Cui, W. (2020). *Review of underwater ship hull cleaning technologies*. Journal of Marine Science and Application. Allikas: <https://doi.org/10.1007/s11804-020-00157-z>
- Stoichev, K. (2018). *MEANS TO ENSURE SECURITY OF PORT INFRASTRUCTURES UNDER WATER*. International Scientific Journal „Security & Future”. Allikas: <https://stumejournals.com/journals/confsec/2018/2/87.full.pdf>
- Subsea Global Solutions (SGS). (2022). *Koduleht*. Allikas: <https://www.subseaglobalsolutions.com/> (20.03.2022)
- Swain, G. (2017, May 30). *Biofouling Risk and Biofouling Management*. Florida Institute of Technology. Green-marine. Allikas: <https://www.green-marine.org/wp-content/uploads/2017/06/Geoffrey-Swain.pdf>
- Zulkiflee, Z. (2021, June 06). *Shaving carbon emissions through new technologies*. Odfjell Customer Portal. Allikas: <https://www.odfjell.com/about/our-stories/shaving-carbon-emissions-through-new-technologies/> (29.03.2022)
- Tallinna Sadam AS. (kuupäev puudub). AS Tallinna Sadama eeskiri. Kehtib alates 01.02.2022. Punkt 4.3.3, lk. 17. Allikas: [https://www.ts.ee/wp-content/uploads/2021/12/2021-12-10\\_sadama\\_eeskiri\\_kehtib-alates-01.02.2022.pdf](https://www.ts.ee/wp-content/uploads/2021/12/2021-12-10_sadama_eeskiri_kehtib-alates-01.02.2022.pdf) (02.04.2022)
- Tallinna Sadam AS. (kuupäev puudub). *Koduleht*. Allikas: <https://www.ts.ee/tallinna-sadam-karmistab-sadamaalade-keskkonnameetmeid/> (27.03.2022)

Tamburri, M. (2019, April 3). *Evaluation of Subsea Global Solutions In-Water Cleaning and Capture Technology for Ships*. ACT/MERC IWCC Evaluation Report ER01-19. Allikas: [https://www.maritime-enviro.org/Downloads/Reports/MERC\\_Inwater/ACT\\_MERC\\_SGS\\_IWCC\\_Evaluation\\_Report.pdf](https://www.maritime-enviro.org/Downloads/Reports/MERC_Inwater/ACT_MERC_SGS_IWCC_Evaluation_Report.pdf) (20.02.2022)

Tamburri, M. (2020, August 4). ACT/MERC Test Plan for Evaluations of the Jotun Hull Skating Solution A Proactive Biofouling In-Water Cleaning Solution. ACT/MERC Test Plan EP20-1. Allikas: [https://www.maritime-enviro.org/Downloads/Other\\_Publications/ACT\\_MERC\\_Jotun\\_Proactive\\_IWC\\_Test\\_Plan\\_5Aug2020\\_signed.pdf](https://www.maritime-enviro.org/Downloads/Other_Publications/ACT_MERC_Jotun_Proactive_IWC_Test_Plan_5Aug2020_signed.pdf) (20.02.2022)

The Official Journal of the International Shippers & Services Association. (International Shippers). (2021). *The Shipsupplier*. Issue 88, pp. 33-37. Allikas: <http://www.theshipsupplier.com/wp-content/uploads/2021/06/tss88.pdf> (15.03.2022)

TS Laevad OÜ. (kuupäev puudub). Koduleht. Allikas: <https://www.praamid.ee/meie-ettevottest/> (30.03.2022)

Vaab, A. (2020). *Laeva kütuse- ja energiakulu vähendamise võimalused Silja Europa näitel*. (Magistritöö) TalTech Eesti Mereakadeemia. Tallinn. Allikas: <https://digikogu.taltech.ee/et/Download/b4da9505-2472-4ad5-9448-a78de8beefdb>

Vessel Performance Optimisation Global. (VPO Global). (2020). *Greensea launches new robotic hull cleaning solution*, 10 March 2022. Allikas: <https://vpoglobal.com/2022/03/10/greensea-launches-new-robotic-hull-cleaning-solution/> (29.03.2022)

World Energy Council. (2016). *World Energy Resources / 2016*. World Energy Council, Allikas: <https://www.worldenergy.org/assets/images/imported/2016/10/World-Energy-Resources-Full-report-2016.10.03.pdf>

## Lisa 1. HullWiper roboti andmed

Järgnevasse tabelisse on toodud *HullWiper* roboti tehnilised omadused.

Tabel. Roboti tehnilised andmed

Mõõtmed	330 cm (pikkus) x 170 cm (laius) x 85 cm (kõrgus)
Raam	Roostevabast terasest, torukujuline konstruktsioon
Kaal	1,275 kg
Max sügavus	40 m
Ujuvus	Tahke rakustruktuur
Sisendvõimsus	690 V AC, 3 faasi, 60 Hz, 37 kW
Õlimahuti	40 liitrit
Hüdrauliline võimsus	Vooluhulk 195 l/min 130 baari, mida kompenseerib 0,5 baari ülerõhk
Tõukur	8 hüdraulilist tõukejõudu 3 hobujõuga
Vesipump	Võimsus kuni 635 liitrit minutis
Veesurve	50-450 baari, 80 liitrit minutis
Kiirus	Horisontaalne: 2,0 sõlme Vertikaalne: 0,7 sõlme Pööre xyz: 360 kraadi
Valgustus	2 LED-i igaüks 250 W 1 x 36W LED pirn
Andurid	Sügavusandur 4 baari Õlirõhumõõtur 160 bar Magnetiline 5-tasemeline õliandur automaatse väljalülitusega (õlitase 25%) Kõrge veesurve andur 600 bar



Kaamera	CMOS-sensor resolutsiooniga 1280 x 800 Eemaldatav IR-filter päevaseks ja öiseks kasutamiseks Sissehitatud IR-valgustid, efektiivsed kuni 15m Adaptiivne voogesitus dünaamilise kaadrisageduse juhtimiseks Autoriseerimata muudatuste tuvastamine Sissehitatud microSD/SDHC-kaardipesa sisemälu jaoks
Muud	Automaatne sügavus Automaatkursus Tõukejõu digitaalne juhtumine Kiirus 2000 m <sup>2</sup> /tunnis

Allikas: (HullWiper 2022)

## Lisa 2. Armach roboti andmed

Järgnevasse tabelisse on toodud *Armach* roboti tehnilised omadused.

Tabel. Roboti tehnilised andmed

Sügavuse määramine	30 m
Mõõtmed	6,35 m x 5,46 m x 1,52 m
Kaal (õhk)	18 kg
Ujuvus (soolases vees)	3,2 kg
Väikseim kiirus	3 cm/s
Suurim kiirus	36 cm/s
Atraktiivne jõud	114 N
Kliirens	23 mm
Lasti mõõtmed	0,84 m x 0,71 m x 0,43 m
Lasti kaal	37,2 kg
Pöörde raadius ja manööverdamisvõime:	0-raadiuse võimekus
Töötemperatuur	2° - 25° C (35,6° - 77° F)
Integreerimine ROV-iga	4 poldi, 2 elektriühendust ja 6 naela ballasti
Hinnanguline teenindusaeg	Iga 50 tunni järel
Maksimaalne voolutugevus	1,5 sõlme

Allikas: (Greensea Systems i.a.)

### Lisa 3. Tootjate ettevõtjate nimekiri

Järgnevasse tabelisse on toodud 22 tootjate ettevõtjate andmed.

Tabel. Roboti tootjate nimetus, e-mail ja koduleht

Ettevõtte nimi	E-mail	Koduleht
Cliin Robotics	info@cliin.dk	<a href="https://cliin.dk/robotic-antifouling">https://cliin.dk/robotic-antifouling</a>
Commercial Diving Services	info@commercialdiving.com.au	<a href="https://commercialdiving.com.au/underwater-remote-operated-vehicles-rov/">https://commercialdiving.com.au/underwater-remote-operated-vehicles-rov/</a>
Cybernetix	web.sales@cybernetix.fr	<a href="https://www.cybernetix.fr/contact-us">https://www.cybernetix.fr/contact-us</a>
DG-Diving Group	jarno@dg.fi	<a href="https://dg.fi/site/">https://dg.fi/site/</a>
Ecosubsea AS	info@ecosubsea.com	<a href="https://ecosubsea.com/">https://ecosubsea.com/</a>
Fleet Cleaner	info@fleetcleaner.com	<a href="https://www.fleetcleaner.com/contact/">https://www.fleetcleaner.com/contact/</a>
Greensea Systems, INC.	info@greensea.com	<a href="https://greensea.com/">https://greensea.com/</a>
HullWiper Ltd	enquiries@hullwiper.co	<a href="https://www.hullwiper.co/contact-us">https://www.hullwiper.co/contact-us</a>
Jotun	koduleht	<a href="https://jointherevhullution.com/#-">https://jointherevhullution.com/#-</a>
Kongsberg Maritime	km.sales@km.kongsberg.com	<a href="https://www.kongsberg.com/contact/">https://www.kongsberg.com/contact/</a>
Maxon Motor UK ltd	sales.uk@maxongroup.com	<a href="https://www.maxongroup.co.uk/maxon/view/content/contact_details">https://www.maxongroup.co.uk/maxon/view/content/contact_details</a>
Neptune Robotics	koduleht	<a href="https://neptune-robotics.com/#/">https://neptune-robotics.com/#/</a>
Ocean Robotics International AB	info@ocean-robotics.com	<a href="https://ocean-robotics.com/contact/">https://ocean-robotics.com/contact/</a>
SeaBadger Hydro Hull Cleaning	rsk@hhcleaning.dk	<a href="https://www.hhcleaning.dk/index.php/contact-2/">https://www.hhcleaning.dk/index.php/contact-2/</a>
SeaRobotics Corporation	info@searobotics.com	<a href="https://www.searobotics.com/contact">https://www.searobotics.com/contact</a>
Semcon	koduleht	<a href="https://semcon.com/contact/">https://semcon.com/contact/</a>
Shipshave AS	eirik.eide@shipshave.no	<a href="https://shipshave.no/">https://shipshave.no/</a>
SLM Global	yj.park@slm-global.co.kr	<a href="http://www.slm-global.com/company/?ckattempt=1">http://www.slm-global.com/company/?ckattempt=1</a>

Sperre AS	aasmund@sperre-as.com	<a href="https://sperre-as.com/contact">https://sperre-as.com/contact</a>
SRN Group	info@srngroup.be	<a href="https://srngroup.be/underwater-hull-cleaning/">https://srngroup.be/underwater-hull-cleaning/</a>
TAS GLOBAL CO., LTD	tasglobal@usmtas.com	<a href="http://usmtas.kr/en/mail/mail.php">http://usmtas.kr/en/mail/mail.php</a>
UDW Hull Cleaning CO, Ltd	sales@udwhullcleaning.com	<a href="http://www.udwhullcleaning.com/contacts">http://www.udwhullcleaning.com/contacts</a>

Allikas: (autori koostatud)

## Lisa 4 Robotite võrdlusanalüüs

Järgnevasse tabelisse on toodud viie robotite andmed.

Tabel. Robotite nimetus, robotite andmed ja hind

<b>Andmed</b>	<i>Armach Robotics</i>	<i>ITCH</i>	<i>Jotun HullScater</i>	<i>HullWiper</i>	<i>Fleet Cleaner</i>
Riik	Ameerika Ühendriigid	Norra	Norra	AÜE	Holland
Aasta	2022	2022	2020	2013	2011
Kaal	30 kg	50 kg	200 kg	1275 kg	Teadmata
Puhastus meetod	Sadamas / ankrus	Sõidu ajal	Sadamas/ ankrus	Sadamas	Sadamas
Hoolduse kiirus keskmine (tundides)	Teadmata	Teadmata	Teadmata	1 500 m <sup>3</sup>	1 200 m <sup>3</sup>
Adhesiooni süsteem	Teadmata	Laeva voolu väli	Magneetiline	Vaakum	Magneetiline
Puhastus süsteem	Teadmata	Pehmed harjad	Harja	Kõrgsurve veejuga	Kõrgsurve veejuga
Hind <sup>7</sup>	20 000 – 30 000 USD (18 921 – 28 382 EUR) / rent kuus	50 000 – 60 000 USD (47 304 – 56 764EUR) / ostuhind	Teadmata	Liising – 16 880USD (15 970 EUR) + Varuosad – 1 600 USD (1 514 EUR), 4 puhastust	Teadmata
Tehingu liik	Rent	Müük	Rent	Rent (5, 7 või 10 aastaks)	Rent
Võrk	4G	-	4G	-	Teadmata

<sup>7</sup> 1 EUR = 1,0570 USD seisuga 06.05.2022 (Eesti Pank i.a.)

Hooldus	<i>Armachi</i> operatiiv- meeskond/ spetsialistid	Laevameeskond (mehaanik, elektri- mehaanik)	<i>Jotun</i> operatiiv - meeskond/ spetsialistid	<i>HullWiper</i> operatiivmeeskond/ spetsialistid	Teadmata
Täiendõpe/ kursused	Ei ole vaja	Ei ole vaja	Ei ole vaja	Ei ole vaja	Teadmata
Puhastuse aeg (tundides)	Teadmata	Teadmata	2-8	2-8	10

Allikas: autori koostatud)

## Lisa 5 Küsimustik

Järgnevasse tabelisse on toodud uurimisküsimused inglise keeles, mis oli saadud tootjaettevõtetele.

Tabel. Uurimisküsimused tootjaettevõtetele

<b>Jrk. nr.</b>	<b>Küsimus</b>
1	Does Your clients use the hull cleaning service with robots through the service company while staying in ports or do some clients have the hull cleaning robot also on board the ship?
2	How is the robot maintained?
3	How much does this service cost and how much does the robot cost?
4	When on board, does the ship's crew receive any training for operating the robot?
5	What are the shipowner's criteria for acquiring the technology?

Allikas: (autori koostatud)

## **Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks<sup>8</sup>**

Mina, **Iiona Pogodina**

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „**Laevakere puhastamiseks mõeldud kaugjuhitava robotitehnoloogia kasutuselevõtt Eesti sadamates**“,

*(lõputöö pealkiri)*

mille juhendaja on **Dan Heering**,

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.

21.05.2022

---

<sup>8</sup> Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal vastavalt üliõpilase taotlusele lõputööle juurdepääsupiirangu kehtestamiseks, mis on allkirjastatud teaduskonna dekaani poolt, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil. Kui lõputöö on loonud kaks või enam isikut oma ühise loomingu tegevusega ning lõputöö kaas- või ühisautor(id) ei ole andnud lõputööd kaitsvale üliõpilasele kindlaksmääratud tähtajaks nõusolekut lõputöö reprodutseerimiseks ja avalikustamiseks vastavalt lihtlitsentsi punktidele 1.1. ja 1.2, siis lihtlitsents nimetatud tähtaja jooksul ei kehti.