



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
EESTI MEREAKADEEMIA
Transporditeenused

Alger Paalberg

AUTONOOMSED LAEVAD HÜDROGRAAFIAS

Lõputöö

Juhendaja: Allan Prommik

Tallinn 2023

Olen koostanud töö iseseisvalt.

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

Alger Paalberg

(allkirjastatud digitaalselt, kuupäev digiallkirjas)

Üliõpilase kood: 178304VDVR

Üliõpilase e-posti aadress: algerpaalberg@gmail.com

Juhendaja: Allan Prommik

Töö vastab lõputööle esitatud nõuetele

(allkirjastatud digitaalselt, kuupäev digiallkirjas)

Kaitsmiskomisjoni esimees Inga Zaitseva-Pärnaste

Lubatud kaitsmisele

(allkirjastatud digitaalselt, kuupäev digiallkirjas)

Sisukord

Annotatsioon.....	5
Kasutatud lühendid.....	6
Sissejuhatus	7
1 Hüdrograafia.....	8
1.1 Hüdrograafia ülesanded.....	8
1.2 Hüdrograafiliste tööde eesmärk.....	8
1.3 Hüdrograafiliste tööde sisu.....	9
2 Esimene autonoomne hüdrograafiline uuring	11
3 Autonoomsus.....	12
3.1 Autonoomsuse, keskkonna ja jälgitavuse tasemed.....	12
3.1.1 Autonoomsuse tasemed.....	12
3.1.2 Keskkond.....	13
3.1.3 Jälgitavus	14
3.2 Pinnasõiduki värvid, tuled ja signaalid.....	15
3.3 Ohutus.....	15
3.4 Autonoomsete laevade kindlustamine	16
3.5 COLREG reeglid	18
3.6 Autonoomse pinnasõiduki mõõdistusprotsess.....	20
3.7 Autonoomsete laevade kasutamise plussid ja miinused	22
3.7.1 Järeldused	23
4 Näited autonoomsetest pinnavesõidukitest.....	24
4.1 Phoenix 5	24
4.1.1 Autonoomsus ja olukorrateadlikus	25
4.1.2 Ohutus ja usaldusväarsus.....	25
4.1.3 Uuringutoimingud	25
4.1.4 Seadme kasutajakogemus	25
4.2 OceanAlpha SL40.....	26
4.2.1 Seadme kasutajakogemus	27
4.3 XOCEAN.....	27
4.4 Võrdlev tabel näidete põhjal.....	29
5 Autonoomsete laevade sobivus Eesti tingimustesse.....	31
5.1 Soome laht	31

5.2 Väinameri	32
5.3 Autonoomsete laevade sobivus Eesti tingimustesse.....	32
5.3.1 Järeldused ja ettepanekud	33
Kokkuvõte	34
Summary.....	36
Viidatud allikad	38

Annotatsioon

Lõputöö teemaks on „Autonoomsed laevad hüdrograafias“. Teema valikul lähtus autor isiklikust huvist autonoomsete sõidukite vastu. Samuti ei ole autorile teadaolevalt Eestis varem uuringuid autonoomsete laevade kasutamise kohta hüdrograafias tehtud. Lõputöö on teostatud temaatilise kirjanduse läbitöötamisega ning analüüsimisega.

Lõputöö eesmärgiks oli uurida ja välja selgitada, milliseid autonoomseid laevu kasutatakse hüdrograafilistel mõõdistustöödel ning milliseid kasutegureid nende kasutamine endaga kaasa toob. Lisaks oli eesmärgiks veel uurida, kuidas sobivad autonoomsed laevad Eesti vealade tingimustega.

Analüüsisdes autonoomsete laevade eripärasid ja Eesti vealade tingimusi, leiti, et laevad on sobilikud ka Eestis kasutamiseks.

Töö koosneb 40 leheküljest, 3 joonisest, 3 pildist ning kahest tabelist.

Võtmesõnad: hüdrograafia, mehitamata pinnalveesõiduk, ohutus

Sissejuhatus

Elektroonika ja arvutipõhiste süsteemide areng on viimaste aastate jooksul teinud kiire hüppe. Samuti on ka autonoomsete sõidukite kasutamine hüdrograafias muutunud aina populaarsemaks (Vennikas, 2022).

Siinses töös uuritakse erinevaid autonoomseid pinnasõidukeid ja nende kasutegureid. Samuti uurib autor, kas autonoomsete laevade kasutamine hüdrograafias sobib ka Eesti tingimustesse. Autonoomsete laevade kasutamine hüdrograafias on maailmas tehnoloogia arengu tõttu muutunud aina populaarsemaks kuid hetkel ei ole teada, et Eestis need kasutusel oleks.

Uurimistöö **eesmärgiks** on välja selgitada, milliseid autonoomseid laevu kasutatakse hüdrograafilistel mõõdistustöödel, milliseid kasutegureid nende kasutamine endaga kaasa toob ning kuidas sobivad autonoomsed laevad Eesti tingimustesse.

Lähtuvalt uurimisprobleemist püstitas autor kolm peamist **uurimisküsimust**:

- Millised autonoomsed laevad on hüdrograafias kasutusel?
- Milliseid kasutegureid toob autonoomsete laevade kasutamine?
- Kuidas sobivad autonoomsed laevad Eesti tingimustesse?

Lõputöö uurimismeetodiks on kasutatud temaatilise kirjanduse läbitöötamist ning on jagatud kuueks osaks. Esimeses peatükis antakse ülevaade hüdrograafia olemusest ja selle mõõdistustööde sisust. Teine peatükk tutvustab autonoomsete laevade ajalugu. Kolmandas peatükis on kirjeldatud autonoomsuse tasemeid ning toodud välja autonoomsete laevade kasutamise plussid ja miinused. Neljas peatükk kirjeldab hüdrograafilistel töödel kasutuses olevaid autonoomseid pinnasõidukeid. Viies peatükk annab ülevaate Eesti vetest ning analüüsib, kas autonoomsed laevad sobivad nendesse tingimustesse. Kuues peatükk kirjeldab uurimistöö tulemusi ning järeldusi.

1 Hüdograafia

Mõistel „hüdograafia“ on mitmeid erinevaid seletusi, kuid põhiliselt eristatakse kahte. Hüdograafia on rakendusteaduste haru, mille tegevusaladeks on merede, nende rannaalade ja suurte siseveekogude omaduste mõõdistamine ja kirjeldamine. See on oluline navigatsiooniks kuid ka erinevate uurimuste ja prognooside tarbeks. Samuti võib selgitada terminit „hüdograafia“ kui teadusharu, mis kirjeldab ja uurib suuremaid siseveekogusid (Kala, 2018, lk 19).

1.1 Hüdograafia ülesanded

Veekogude põhjareljeef ning selle veetaseme kõrgus on peamised uurimisobjektid hüdograafilistel uuringutel. Põhjareljeefiks loetakse maakoore osa, mis on kaetud veekoguga-näiteks maailmameri, järved ja jõed. (Kala, 2018, lk 31).

Hüdograafia ülesandeks on tagada meresõidu ohutus, sest laevasõidu üks peamisi ohtusid on just põhjareljeefi omadused. Hüdograafilised uuringud näitavad selgelt, millised on merepõhja kuju, suurus ning kuidas pinnavormid paiknevad. Hüdograafilised uuringud on aluseks navigatsioonikaartide loomisel. Navigatsioonikaardid on kasutusel põhipunktide valimisel näiteks kalapüügiks ja maavarade geoloogilistel uuringutel (Kala, 2018, lk 31).

1.2 Hüdograafiliste tööde eesmärk

Hüdograafiliste tööde tegemisel mõõdetakse esmalt veekogude sügavusi ning tutvutakse teiste veekogudega seotud nähtustega. Tehtavate uuringute sisu määrab vajatav teabehulk, mis on mitmetel erialadel erinev. Vajatav teabehulk on erinev näiteks meresõidul, kalapüügil ning ka rannamajanduses (Kala, 2018, lk 50).

Hüdograafiliste tööde käigus vaadeldakse põhiliselt viite erinevat põhielementi. Nendeks on:

1. Merepõhja pinnamood ja navigatsiooniohud;
2. Mererannad ja infrastruktuuri objektid;
3. Merepõhja pinnas;
4. Hoovused, vee temperatuur ja soolsus;

5. Maa raskusjõud ja magnetism (Kala, 2018, lk 50).

Kui merepõhja uuringud on tehtud, siis salvestatakse kogu info andmepankadesse. Andmepankades salvestatakse teave digitaalselt. Samas pole merekaardile alternatiivset võimalust, kui tegemist on inimese poolt vastu võetud teabega. Merekaart on hüdrograafiliste tööde väljundiks ning on asendamatu hüdrograafilise info allikaks maailma vete kohta (Kala, 2018, lk 50).

1.3 Hüdrograafiliste tööde sisu

Merekaartide koostamise aluseks on mõõdistamise täpsus. Mida rohkem on keskendutud merepõhja sügavuse mõõtmisele, seda selgemini tuleb välja, milline on pinnamood. Kui mõõdistustöid on tehtud korrektselt on merekaardid täpsed ja navigeerimine ohutum. Veevälja mõõdistamisel liigub masin ühest punktist teise, mistõttu tuleks mõõdistustöid teha võimalikult kiiresti. Seejuures on oluline, et enne tööde alustamist oleks teekond ja eesmärgid etteplaneeritud (Kala, 2018, lk 50-51).

Merepõhja sügavuse määramise saab jagada viieks erinevaks etapiks:

1. Mõõdistava seadme kandja ehk aluse valik ja seadistamine;
2. Sügavuse mõõtmiseks seadeldise valimine;
3. Plaani loomine uuritava veevälja asukoha määramiseks Maa pinnal;
4. Seadmete valik punktide määramiseks mõõtmiste ajal;
5. Mõõtmistulemuste analüüsimine (Kala, 2018, lk 51).

Kokkuvõtvalt võib hüdrograafiliste tööde ülesanded jagada viieks. Nendeks on:

1. Tööpiirkonna geodeetiline ettevalmistus;
2. Nullsügavuste määramine;
3. Pinnamoe mõõdistamine;
4. Ranniku topograafiline kaardistamine;

5. Andmete kogumine (Kala, 2018, lk 52).

2 Esimene autonoomne hüdrograafiline uuring

Maailma esimene autonoomne hüdrograafiline uuring viidi läbi 2017 aasta septembris. Autonoomne ei tähendanud kaugjuhtimispuldi abil, vaid autonoomne pinnasõiduk kasutas mõõdistustarkvara juhiseid, et jälgida etteplaneeritud uuringujooni või automaatselt genereeritud liine, mis põhinevad sonari kattuvusel. *Channel Coastal Observatory* (CCO) tellis 4D *Oceani* hüdrograafilise uuringu Hurst Spitis, lääne Solentis. Hüdrograafilisteks töödeks kasutati *SeaRobotics* ASV 2.5 autonoomset mõõdistuslaeva. Pilootuuringut toetasid mere- ja rannavalveamet (MCA) ja Ühendkuningriigi hüdrograafiaamet (UKHO) (Hydro International, World's First Fully Autonomous Hydrographic Survey, 2018).

Uurimiskohaks valiti Lääne-Solenti osariigi Hurst Spiti avamere põhi, sest seal valitseb tugevate loodete ja hoovustega kliima, ning seda pole varem uuritud mitmekiirelise kajaloodiga. Lisaks on see koht oluline barjäärirand, mis vajab uurimist, et hallata ja vähendada erosiooni- ja üleujutusohu (Hydro International, World's First Fully Autonomous Hydrographic Survey, 2018).

Channel Coastal Observatory säilitab ja kogub ranniku-uuringute andmeid kogu Inglismaal. Nende uuringute eesmärgiks on siduda topograafilised ja hüdrograafilised uuringud omavahel (Hydro International, World's First Fully Autonomous Hydrographic Survey, 2018).

SeaRobotics ASV 2.5 on suurepärase mõõtmetega laev ning seda saab vedada järelhaagisega tavalise auto või maasturi taga. Üks ASV paljudest eelistest on see, et seda ei pea laskma vette sadamast, kus on eraldi slipp selle jaoks. ASV-d saab lasta vette peaaegu kõigist kohtadest, kuhu pääseb järelhaagisega ning vee sügavus on piisav laeva süvise jaoks (Hydro International, World's First Fully Autonomous Hydrographic Survey, 2018).

Samuti on laeval vints, millega saab kas missiooni osana või manuaalselt käivitada AML Base X SVP sondi. Käsud sondi käivitamiseks käsivad ASV-l saata sond teatud sügavusele või kaugusele põhjast. Kui sond on laevale tagasi jõudnud, edastatakse andmed Wi-Fi kaudu arvutisse (Hydro International, World's First Fully Autonomous Hydrographic Survey, 2018).

3 Autonoomsus

Aina enam hakkavad erinevad hüdrograafiaga tegelevad ettevõtted kasutama robot-, mehitamata ja autonoomseid pinnasõidukeid, et viia läbi süstemaatilisi merepõhjauuringuid. Süstemaatilised merepõhjauuringud on olulised näiteks merekaartide loomisel. Mõiste „autonoomne sõiduk“ hõlmab endas erinevaid sõidukeid, mis võivad olla näiteks kaugjuhitavad- mehitatud või mehitamata, kuid ka sõidukid, millel võib olla autopiloodi võimalus. Samuti suudavad osad sõidukid reageerida ümberringi olevale keskkonnale optimeerides samal ajal andmete kogumist (Kottayil, 2021).

3.1 Autonoomsuse, keskkonna ja jälgitavuse tasemed

Kaugtoimingute areng ja innovatsioon on aidanud kiirendada autonoomsete ja mehitamata platvormide arengut. Platvormid võivad olla erinevad- autonoomsed allveelaevad (AUV), autonoomsed pinnasõidukid (USV) ning mehitamata õhusõidukid (UAV). Kuigi platvormid on erinevad, siis neil kõigil on sarnased tehnoloogilised eesmärgid (Elias & Alderton, 2021, lk 251).

Autonoomne veepinnal liikuv sõiduk on mehitamata laev, mis töötab merepinnal ilma operaatori sisendi või juhtimiseta. Ette planeeritud mõõdistamise teekond edastatakse autonoomsele laevale ning kuna USV on pinnal, suudab see pidevalt saada GPS signaale (Elias & Alderton, 2021, lk 251).

Mehitamata veepinnal liikuv sõiduk võib ulatuda väikestest platvormidest, millel on vaid üks andur, kuni suurte, üle kümne meetri pikkuste laevadeni, mis hõlmab endas kõikvõimalike andureid. Samuti kasutavad sõidukid erinevaid ressursse liikumiseks- tuul, laetavad akud või kütus (Elias & Alderton, 2021, lk 251).

3.1.1 Autonoomsuse tasemed

2015.aastal Riikliku Ookeani- ja Atmosfäärivalitsuse (NOAA) Hüdrograafiliste süsteemide ja tehnoloogiate osakonna (HSTB) poolt korraldatud seminaril uuriti, kuidas hinnata autonoomsete süsteemide taset. Leiti, et autonoomsusel on viis erinevat taset:

Esimene tase ehk kaugjuhtimine (*Remote Piloting*). See on käsitsi juhtimise toiming, kus laevaga saadakse kontakt telemeetriaühenduse kaudu. Esimene tase ei hõlma endas autonoomset käitumist. Telemeetria on automatiseeritud sideprotsess, mille abil tehakse mõõtmisi ja kogutakse muid

andmeid kauges või ligipääsmatutes kohtades ning edastatakse vastuvõtuseadmele jälgimiseks, kuvamiseks ja salvestamiseks (Das & Young, 2013).

Teine tase ehk tava-autonoomsus (*Basic Autonomy*). Antud tase hõlmab võimalust järgida eelnevalt planeeritud ja fikseeritud tööülesannet. See koosneb järjestikusest teekonnapunktidest, joontest, kõrvalekaldumispunktidest ja nende kombinatsioonidest ilma operaatori sekkumiseta. Operaator sekkub vaid siis, kui sisestatakse laeva asukoht, kurss ning soovitud lõpp-punkt (Organization International Hydrographic, 2020, lk 191-192).

Kolmas ehk keskmine autonoomsuse (*Intermediate Autonomy*) tase hõlmab võimalust kohandada etteplaneeritud tööloiku vastavalt vajadusele. Näiteks, kui tuleb vältida madalikke, teisi navigatsiooni ohtusid või keelatud alasid (Organization International Hydrographic, 2020).

Neljas tase on täiustatud autonoomia (*Advanced Autonomy*). Tase hõlmab endas võimet kohandada etteplaneeritud tööloiku vajaduse järgi dünaamiliselt tajutavate tingimustega. Näiteks tuvastada ja vältida tundmatute poide asukohti, järgida ja/või jälgida teisi laevu, ankurdamata ja sildumata muuli ääres, ilma et selleks oleks vaja operaatorit (Organization International Hydrographic, 2020).

Viimaseks, ehk viiendaks tasemeks on planeeritud autonoomsus (*Planning*). Planeerimine hõlmab autonoomse pinnasõiduki võimet teha suuri muudatusi või luua täielikult uus tööülesanne. Uue tööülesande loomisel võtab autonoomne laev arvesse eesmärke ning oma võimekust. Lisaks sellele tajub laev oma andureid ning muid parameetreid (Organization International Hydrographic, 2020).

3.1.2 Keskkond

Autonoomsete laevade tööpiirkonnad ulatuvad sadamaaladest kaugemate piirkondadeni. Sadamaalades võivad laeva teele sattuda erinevad meresõiduohud, püügivahendid ning ka teised laevad. Kaugemates piirkondades on ebatõenäoline, et autonoomne laev kohtab takistusi või teisi laevu. Samuti võib laev sattuda suure vooluga alasse, mis nõuab omaette kaalutlusi, sest hoovused võivad autonoomse laeva lükata madalikule. Selleks, et saavutada vajalik autonoomsus tuleb hinnata, millise riskitasemesse keskkond kuulub. Riskitasemeid on kokku kolm:

1. Madala riskiga keskkond
2. Keskmise riskiga keskkond

3. Kõrge riskiga keskkond.

Madala riskiga keskkond on selline, kus ümbruskonnas tõenäoliselt ei esine teisi laevu. Samuti puuduvad keskkonnast erinevad püügivahendid (võrk) ja navigatsiooniohud (kivid, vetikad). Ilmastikuolud on head ja meri on rahulik (Organization International Hydrographic, 2020, lk 190).

Keskmise riskiga keskkonnas võib kohata teisi laevu, kuid on ebatõenäoline, et piirkonnas esineks harrastuspaadisõitjad ja püügivahendeid. Ette võib tulla navigatsioonitakistusi kuid teekonna hoolikal planeerimisel on võimalik neid vältida. Ilm võib hõlmata tuult kuni 25 sõlme (12,86 m/s) (Organization International Hydrographic, 2020, lk 190).

Kõrge riskiga keskkond on ala, kus tõenäoliselt kohtab teisi laevu, püügivahendeid ning samuti ka harrastuspaadisõitjaid. Kõrge riskiga ala on näiteks sadamaala (Organization International Hydrographic, 2020, lk 191).

3.1.3 Jälgitavus

Esimene järelvalve tase ehk pidev jälgimine hõlmab endas autonoomse sõiduki pidevat järelvalvet inimeste poolt, kes on suutelised ja valmis tegutsema, mistahes laeva soovimatu tegevuse korral. Näiteks autonoomsuse esimene tase ehk kaugjuhtimine on antud jälgitavuse operatsioon. Siiski võib antud jälgitavuse tase olla osa mistahes autonoomsuse tasemes (Ashkan & Elham, 2017, lk 128).

Teine jälgitavuse tase on monitoorimine. Tase hõlmab sõiduki pealiskaudset järelvalvet, mis annab operaatorile võimaluse keskenduda ka teistele tööülesannetele. Monitoorimine tagab tavapärase tööritmi, kui jälgimine toimub regulaarselt. Operaator toetub teatud määral sõiduki hoiatustele ja häiretele. Monitoorimine nõuab vähemalt autonoomsuse teist taset, kus sõidukil on võime järgida planeeritud teekonda (Ashkan & Elham, 2017, lk 129).

Sõltumatu toimimine hõlmab endas vähesel määral sõiduki otsest järelvalvet. Iseseisev toimimine nõuab täielikku tööplaani, mis koosneb järjestikusest loendist missiooni eesmärkidest ja laeva käitumisest erinevatest tingimustes. Sõltumatu toimimine nõuab vähemalt autonoomsuse teist taset (Ashkan & Elham, 2017, lk 129).

3.2 Pinnasõiduki värvid, tuled ja signaalid

Rahvusvahelise laevakokkupõrgete vältimise eeskirjas ehk COLREGSis (*International Regulations for Preventing Collisions at Sea*) ei ole välja toodud selgeid juhiseid mehitamata süsteemide jaoks. *International Hydrographic Organizations* ehk IHO on toonud välja tavapärased lähenemised autonoomsetele laevade eristamisele, mille eesmärgiks on võimaluse korral järgida olemasolevaid juhiseid ja muul viisil riske maandada.

Esiteks, autonoomne pinnasõiduk peaks olema selgelt märgitud erekollase, oranži või punase värviga. Sellised värvid on teiste laevade jaoks ebatavalised ja muudavad autonoomse sõiduki selgelt nähtavaks ning seda on lihtsam teistest eristada (Organization International Hydrographic, 2020, lk 193).

Teiseks, sõiduk ASV peaks kasutama navigatsioonitulesid nii päeval kui ka öösel. Kuigi navigatsioonitulede kasutamine ei ole nõutud päikesetõusust kuni – loojanguni, võib mõne autonoomse laeva kuju erineda tavalisest mehitatud laevast nii palju, et nende vööri ja ahtrit võib olla raske eristada. Navigatsioonitulede kasutamine võib aidata teistel meresõitjatel sõiduki suuna ära tunda (Organization International Hydrographic, 2020, lk 193).

Kolmandaks tuleks pardal alati kasutada vaheldumisi vilkuvat punast ja kollast valgussignaali, mis asub selliselt, et see ei segaks teisi navigatsioonitulesid. Selline ebatavaline tulede vilkumine annab selgelt märku teistele laevadele autonoomsest sõidukist. Vaheldumisi vilkuvat punast ja kollast tuld pole rahvusvahelistes reeglites olemas, sest on ebatõenäoline, et need teiste tuledega segamini aetakse (Organization International Hydrographic, 2020, lk 193).

3.3 Ohutus

Sõnal „ohutus“ on mitu tähendust, kuid üldiselt määratletakse ohutust, kui vahendit, mis on ette nähtud tahtmatu või ohtliku olukorra tekkimise vältimiseks (Dictionary, 2022).

Samuti on ka mehitamata pinnasõidukil määratud peamised ohutusfunktsioonid. Esiteks tuleks paigutada operaatori töökoha vahetusse lähedusse hädaseiskamisnupp. Juhtimissüsteemi ebatõenäolise rikke korral, on oluline, et masin omaks turvamehhanismi, mis suudaks koheselt tagada mehitamata pinnasõiduki mootorite seiskamise (Organization International Hydrographic, 2020, lk 199).

Teiseks on oluline, et operaatore kasutajaliides võimaldaks võimalikult kiiresti masinat vabakäigule lülitada. Mida vähem peab operaatore tegema lisaliigutusi, seda suurem on autonoomse sõiduki töötamise ohutus. Vabakäigule lülitamine on oluline just siis, kui tegemist võib olla ohtliku navigeerimisolukorraga. Kiire ümberlülitus aitab operaaloril keskenduda pigem olukorra lahendamisele või teiste süsteemide ümberseadistamisele (Organization International Hydrographic, 2020, lk 199).

Kolmandaks on ohutuse paremaks tagamiseks ja kiiremaks infoliikumiseks kasutada näiteks operaalori laevasillal integreeritud ekraane. Mõnikord peavad operaalorid jagama omavahel keerulist teavet läbi raadioside. Teavet on võimalik jagada üsna kiirelt läbi raadioside, kuid see võib olla äärmiselt keeruline. Seetõttu oleks suureks eeliseks, kui operaaloritel oleks võimalus kasutada nii-öelda näost-näku arutelusid, et informatsiooni jagada (Organization International Hydrographic, 2020, lk 199).

Integreeritud ekraanil võib olla veel erinevaid funktsioone. Näiteks:

1. Autonoomse pinnasõiduki asendi ja suuna tuvastamine ja kuvamine
2. Operaalorjaama asukoha ja suuna tuvastamine. Operaalorlaeva kursi kuvamine on oluline, sest see võimaldab autonoomse pinnasõiduki suhtelise suuna kiiresti tuvastada.
3. Merekaart ja muu taustainfo kuvamine. Muu taustainfo võib olla näiteks navigatsiooniohud ja nende paiknemine.
4. Autonoomse pinnasõiduki üldise oleku ja eeldatava teekonna kuvamine.
5. Võimalike hädaolukordade tekkimise tuvastamine. See võimaldab sillal autonoomse sõiduki tegevust ette näha ja mõista, millal ja miks ohtlik olukord tekkida võib (Organization International Hydrographic, 2020, lk 199-200).

3.4 Autonoomsete laevade kindlustamine

Transpordivaldkonnas on autonoomsete laevade üle arutletud ja arutatakse endiselt vägagi intensiivselt. Tehniliste arengute puhul tuleb arvestada ka nendega kaasnevaid riske. Kindlustusandja vaatenurgast on tegemist uue valdkonnaga ning neid uusi riske on raske hinnata ja hoomata. (Schröder, 2023)

Autonoomne laevandus on suhteliselt uus valdkond ning algelises punktis. Ameerika Ühendriikide P&I (*Protection and Indemnity*) kindlustusklubi advokaadi Muge Anber-Kontakis sõnul peavad mehitamata laevaomanikud arvestama, et kindlustamine võib olla keerukas erinevate riskide tõttu. (Argus Media, 2023)

Laevameeskonna puudumise korral on suurem risk, et autonoomne sõiduk varastatakse. Kaldal olev operaator ei ole võimeline vargust ära hoidma ning reageerima, sest asub ise sõidukist kaugemal. (Argus Media, 2023)

Ohutu autonoomne töö sõltub lõpuks ka pardaseadmete tööst, vajalikest ühendustest kaldajaamadega ja arvutiprogrammide stabiilsusest. Arvestada tuleb ka side- ja küberturvalisusega seotud riskidega. (Schröder, 2023)

Samas näeb Anber-Kontakis autonoomsete laevade kindlustuseandja seisukohast ka plusse. Umbes 25%–35% Ameerika P&I Klubisse laekuvatest kindlustusavaldustest ühe aasta jooksul on seotud meeskonna vigastuste, haiguste või surmaga. Mehitamata laev kõrvaldab nendega seotud avaldused. (Argus Media, 2023)

Rolls-Royce on autonoomsete laevade kontseptsioonide väljatöötamisse investeerinud palju aega ja vaeva. Kindlustusfirma AXA Corporate Solutions on alustanud koostööd Rolls-Royce merenduse osakonnaga, et välja töötada kindlustus, mis kataks mehitamata pinnasõiduki õnnetuste riskid. (Wingrove, 2023)

Shipowner's Club on vastastikune kindlustusühing, mis pakub kaitse- ja kahjukindlustust (P&I). See on vastutuskindlustus, mis pakub peaaegu kõigi laeva käitamisega seotud merevastutusriskide hüvitamist (Pickering, The Shipowner's Club, 2022).

Samuti pakub ühing ka autonoomsete laevade omanike ja operaatorite vastutuskindlustust. See töötati välja selleks, et rahuldada autonoomsete ja kaugjuhitavate laevade omanike ja operaatorite vastutuskindlustuse vajadusi. Seda kindlustust saab pakkuda mitut tüüpi autonoomsete laevade jaoks. Sealhulgas vaatlus-ja abilaevad, puksiirlaevad, reisilaevad, tööpaadid, siseveelaevad ja kaubaveolaevad (Pickering, The Shipowner's Club, 2022).

3.5 COLREG reeglid

Laevanduses on toimunud märkimisväärne arutelu selle üle, kas mehitamata või täielikult tehisintellektiga varustatud laevad suudavad järgida COLREG-i sätteid. Sealhulgas reeglit 2 (Vastutus), reeglit 8 (Vältida kokkupõrkeid), reeglit 5 (Vaatlus) ning reeglit 18 (Laevadevahelised kohustused).

Reegel 2- Vastutus

- Mitte miski nendes reeglites ei vabasta ühtegi laeva ega selle omanikku, kaptenit ega meeskonda tagajärgedest, mis tulenevad käesolevate reeglite täitmata jätmisest või mis tahes ettevaatusabinõude eiramisest, mida meremeeste tavapärase tegevus võib nõuda, või juhtumise erilistest asjaoludest (e-COLREGs, 2022).
- Nende reeglite tõlgendamisel ja järgimisel tuleb nõuetekohaselt arvesse võtta kõiki navigeerimise ja kokkupõrke ohte ning mis tahes erilisi asjaolusid, sealhulgas asjassepuutuvate laevade piiranguid, mis võivad muuta nendest reeglitest kõrvalekaldumise vahetu ohu vältimise vajalikuks (e-COLREGs, 2022).

Reegel 8- Vältida kokkupõrkeid

- Kõik kokkupõrke vältimiseks võetavad meetmeid tuleb võtta vastavalt käesoleva osa reeglitele ja juhul, kui juhtumi asjaolud seda lubavad, need peavad olema positiivsed, tehtud õigeaegselt ja võttes nõuetekohaselt arvesse head meresõidu taset (e-COLREGs, 2022).
- Kõik kursi ja/või kiiruse muudatused kokkupõrke vältimiseks peavad, kui juhtumi asjaolud seda lubavad, peavad olema suured, et olla nähtavad teistele visuaalselt või radari abil jälgivale laevale. Tuleks vältida järjestikuseid väikeseid kursi ja/või kiiruse muudatusi (e-COLREGs, 2022).
- Kui mereruumi on piisavalt, võib lähisituatsiooni vältimiseks olla kõige tõhusam tegevus ainuüksi kursi muutmine eeliselt, et see tehakse õigeaegselt, on oluline, ega too kaasa uut lähisituatsiooni (e-COLREGs, 2022).

- Teise laevaga kokkupõrke vältimiseks võetavad meetmed peavad lõppema ohutust kaugusest möödumisega. Toimingu tõhustust tuleb hoolikalt kontrollida, kuni teine laev on lõpuks möödas (e-COLREGs, 2022).
- Kui on vaja kokkupõrke vältimiseks või olukorra hindamiseks rohkem aega, peab laev oma kiirust vähendama (e-COLREGs, 2022).
- Laev, mille läbisõitu ei tohi takistada, on täielikult kohustatud järgima käesoleva osa Reeglid, kui kaks laeva lähenevad üksteisele kokkupõrkeohu tõttu (e-COLREGs, 2022).

Reegel 5- Vaatlus

- Iga laeval peab alati olema korralik vaade ja kuulmine ning kasutama kõiki olemasolevaid olusid ja tingimusi arvestades sobivaid vahendeid, et anda olukorrale ja/või kokkupõrkeohule täielik hinnang (e-COLREGs, 2022).

Reegel 18- Laevadevahelised kohustused

- Liikluses olev mootorlaev peab hoiduma teelt:
 - Laevast, mis ei allu juhile;
 - Laevast, mille manööverdamisvõime on piiratud;
 - Kalapüügiga tegelevast laevast;
 - Purjelaevast (e-COLREGs, 2022).
- Liikluses olev purjelaev peab hoiduma teelt:
 - Laevast, mis ei allu juhile;
 - Laevast, mille manööverdamisevõime on piiratud;
 - Kalapüügiga tegelevast laevast (e-COLREGs, 2022).
- Püügil olev laev peab võimaluse korral hoidma eemale:

- Laevast, mis ei allu juhile;
- Laevast, mille manööverdamisvõime on piiratud (e-COLREGs, 2022).
- Iga laev, välja arvatud juhtimata või mille manööverdamisvõime on piiratud, peab vältima süvisest piiratud laeva ohutu läbimise takistamist, näidates välja Reeglis 28 sätestatud signaale. Laev, mille süvis on piiratud, peab navigeerima erilise ettevaatusega, võttes täielikult arvesse oma eriseisundit (e-COLREGs, 2022).
- Veos olev vesilennuk peab üldiselt hoiduma kõikidest laevadest eemale ja vältima nende navigeerimise takistamist. Kui aga kokkupõrkeoht on olemas, peab ta järgima selle osa reegleid (e-COLREGs, 2022).

Mitmed 2019. aasta jooksul läbi viidud uuringud on väidetavalt näidanud, et autonoomsed laevad suudavad täita kehtivaid COLREG-i kokkupõrke vältimise reegleid ja eeskirju. Roll's Royce'i projekt MAXCMAS (Machine Executable Collision Regulations for Marine Autonomous Systems) koostöös Lloyd's Registeriga väidab, et on välja töötanud algoritmi võimaldava tehisintellektil põhineva navigatsioonisüsteemi COLREG-reeglite tõhusamaks järgimiseks (Roche, 2020).

Mereõiguse kohaselt põhineb vastutus kokkupõrke tekitatud kahju eest riskipõhimõttel: kokkupõrkega laev ei vastuta teisele laevale või fikseeritud objektile, näiteks sillale, kaile või sadamasillale tekitatud kahjude eest. Välja arvatud juhul, kui kokkupõrke on tekkinud laeva navigaatorite hooletuse või tahtliku teo tõttu (Healy, 2022).

Kui kaks autonoomset laeva kokku põrkavad on võimalik kulusid jagada proportsionaalselt, lähtudes navigatsioonireeglitest (COLREG) ja vea tasemetest. Isegi kui algpõhjuseks on tehniline rike, võidakse objektiivselt valesi käitunud laeva süüdi lugeda. See aga eeldab seadusandjate tegevust kokkupõrke reeglite muutmiseks või täiendamiseks (Westgard, Hauge, & Rygh, 2021).

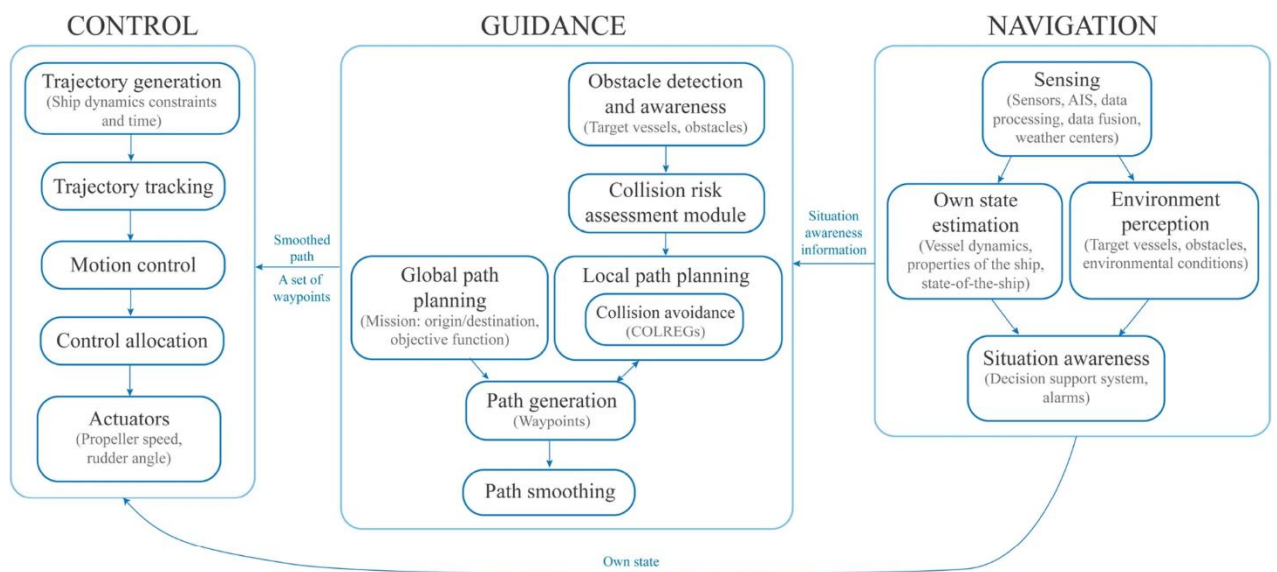
3.6 Autonoomse pinnasõiduki mõõdistusprotsess

Mehitamata pinnasõidukid võivad olla varustatud erinevate andurite ja täiturmehhanismidega. Täiturmehhanism ehk aktuaator on seade, mis muudab juhtsignaali mehaaniliseks liikumiseks (Zupan, Ashby, & Fleck, 2002).

Selleks, et pinnasõidukid töotaksid autonoomselt vajavad nad ühist põhinavigatsioonisüsteemi, mis võimaldaks neil navigeerida ühest punktist teise. Thor I. Fossen on oma raamatus *Marine Control Systems: Guidance, Navigation and Control of Ships, Rigs and Underwater Vehicles* jaganud navigatsioonisüsteemi kolmeks mooduliks. Pardaarvutid ja tarkvara vastutavad kogu autonoomse pinnasõiduki süsteemi haldamise eest seetõttu peetakse neid sõiduki kõige olulisemateks osadeks (Fossen, 2002).

Anastasios M. Lekkas on oma uurimuses „*Guidance and Path-Planning Systems for Autonomous Vehicles*“ välja toonud juhtimissüsteemi ehituses alternatiivse viisi. Lekkas määratleb teekonnaplaneerimise moodulit eraldi osana ning seetõttu koosneb Lekkase teooria neljast põhimoodulist (Lekkas, 2014).

Artiklis „*Path Planning and Collision Avoidance for Autonomous Surface Vehicles I: a Review*“ (Vagale, Oucheikh, Bye, Osen, & Fossen, 2021) on kombineeritud Fosseni ja Lekkase teooriad. Joonisel 1 on näha kombineeritud moodulite ülesehitust.



Joonis 1. Kombineeritud navigatsioonisüsteemi moodulid.

Allikas: (Vagale, Oucheikh, Bye, Osen, & Fossen, 2021)

Juhendmoodul (*Guidance*) loob teekonna, mida laev peab järgima oma ülesannete täitmiseks alustades sõiduki praegusest asukohast kuni määratletud lõppasendini. Juhendmoodul saab sisendi navigatsioonimoodulilt (*Navigation*). Sisendiks on teave keskkonna ja laeva oleku kohta. Navigatsioonimoodul vastutab soovitud teekonna loomise ja pideva värskendamise eest. Saadud

teekond edastatakse juhendmoodulile teekonnapunktide näol (Vagale, Oucheikh, Bye, Osen, & Fossen, 2021).

Juhtmoodul (Control) määrab kindlaks vajaminevad jõud, et laev järgiks juhendmooduli poolt määratud teekonda võttes arvesse navigatsioonisüsteemi poolt määratud laeva olekut. Juhtmooduli sisendiks võib olla teekonnapunktide kogum või juba planeeritud teekond. Juhtmooduli ülesandeks on teha kindlaks, et teekonnapunktide kogum oleks laeva juhtimispiirangutega seoses teostatav. Üks peamisi ülesandeid on trajektoori järgimine minimaalse hälbega. Ülesande sisendiks on täiturmehhanismide juhtsignaalid (Vagale, Oucheikh, Bye, Osen, & Fossen, 2021).

3.7 Autonoomsete laevade kasutamise plussid ja miinused

Autonoomsete laevade kasutamisel on omad plussid ja miinused. Kuigi esmapilgul võib arvata, et autonoomsusel on ainult plussid, siis tegelikult see päris nii ei ole.

Esimene suur pluss autonoomse laeva kasutamisel on see, et meeskonnaga seotud kulud vähenevad. Kuna personalikulud võivad olla üsna suured, siis autonoomse laeva kasutamisel läheb vaja parimal juhul ainult ühte operaatorit. Seetõttu vähenevad ka meeskonnaga seotud kulud. Teiseks aitab autonoomse sõiduki kasutamine välistada inimlikke eksitusi ja vigasid ning samuti suureneb inimeste ohutus. Autonoomse sõiduki projekteerimisel saab ruumikasutust tõhustamiseks muuta. Samuti on olulisel kohal ka kütuse suureks plussiks on mehitamata sõidukil selle tõhusam kütusekasutus. MUNIN (*Maritime Unmanned Navigation through Intelligence in Networks*) viis läbi kolmeaastase uurimisprojekti, kus ennustati, et 25-aastase perioodi jooksul suudab autonoomne laev säästa kuni seitse miljonit dollarit kütusekulu, meeskonna varude ning palkade pealt (O'Brien, 2018).

Autonoomsete laevade kasutamisel on ka omad miinused. Esiteks, esmasel investeerimiskulud on väga suured. Investeerimiskulud ei puuduta ainult laeva vaid ka kaldal toimuvat tegevust laevastiku liikumise jälgimiseks. Meeskonna puudumine muudab mehaanika hooldamise pikkadel reisidel väga keeruliseks. Hooldamata mehaanika võib tekitada rikkeid, mis omakorda tekitavad viivitusi efektiivses töös (O'Brien, 2018).

Tabelis 1 on toodud kokkuvõtte autonoomsete laevade kasutamise plussidest ja miinustest.

Tabel 1. Autonoomsete laevade kasutamise plussid ja miinused

Autonoomsete laevade kasutamine	
Plussid	Miinused
Meeskonnaga seotud kulud vähenevad	Keeruline hooldada
Välistab inimlikke eksitusi/vigasid	
Suureneb inimelude ohutus	Võimalikud vastuolud mereinfrastruktuuri ja USV vahel
Tõhusam ruumikasutus projekteerimisel	
Tõhusam kütusekasutus	

3.7.1 Järeldused

Analüüsid, millised on autonoomsete laevade kasutamise plussid ja miinused on näha, et pigem on sellel rohkem kasutegureid kui miinuseid. Peamised plussid on ASV kasutamisel kulude kokkuhoid. Analüüsid artikleid, võib järeldada, et kuigi esmased investeerimiskulud on suured, tasub see ennast ikkagi pikemaajaliselt ära. Analüüsid Tabelit 1 võib järeldada, et suurimad kuluartiklid on personaliga seotud kulutused ning ebatõhus kütusekasutus.

Kuna mehitamata pinnasõidukil on operaator, kes juhib automaatse pinnasõiduki tööprotsesse peamiselt kaldal asuvast juhtimistornist, võib järeldada, et tööprotsess on palju ohutum. Analüüsid Tabelit 1, võib arvata, et mehitamata pinnasõiduki kasutamine aitab ära hoida inimlikke vigasid, mis võivad mehitatud laevadel juhtuda. Sellega kaasneb ka suurenenud inimelude ohutus, sest õnnetuse korral, ei viibi sõidukis kedagi, sest operaator on üldiselt ikkagi maismaal.

Kolmas kasutegur on see, et edaspidi on uute pinnasõidukite projekteerimisel võimalus kasutada tõhusamat ruumikasutust. Autonoomse pinnasõiduki ehitus ei ole eriti keeruline, sest peamised sensorid ja andurid lisatakse masinale hiljem liidesena juurde. Võib arvata, et tulevikus on autonoomsed pinnasõidukid veelgi kompaktsemad kui praegu.

4 Näited autonoomsetest pinnaveesõidukitest

4.1 Phoenix 5

Phoenix 5 on alumiiniumist monokerega stabiilne pinnaveesõiduk, mida saab kasutada batümeetrilisteks uuringuteks, põhjaprofilide koostamiseks, tsiviilehituskonstruktsioonide kontrollimiseks, ohutuse ja turvalisuse järelvalveks ning veekvaliteedi jälgimiseks. Phoenix 5 kasutusala jaoks on siseveekogud, sadamad ja rannikulähedased alad. Pinnaveesõiduki pikkuseks on viis meetrit, laiust kaks meetrit ning süvist 0.55 meetrit ning sellega opereerimiseks läheb tarvis ühte operaatorit. Laeva toiteallikaks on liitumioonakud ning liikumiseks kaks kanaliga sõukruvi, mida käitavad elektrimootorid. Elektrimootorite võimsus on 8-20 kW, kuid see oleneb juba mudelist.

Phoenix 5 mudelid:

1. E: standardne mudel, mis suudab töötada kuni 20 tundi;
2. EP: suurema akumahutavusega mudel, et oleks võimalik töötada suurematel kiirustel;
3. HP: diisलगeneraatoriga hübriidmudel mitme päeva pikkuste uuringute jaoks (Phoenix 5: A Versatile, Stable Survey ASV, 2022).

Pilt 1. Phoenix 5. (BV, 2022)



4.1.1 Autonoomsus ja olukorratedlikus

Autonoomne töö põhineb kõrgetasemelisel süsteemil, mis omakorda saab sisendit radarilt, lidarilt, ettepoole suunatud sonarilt, videokaameratelt ja AIS-vastuvõtjalt. Positsioneerimine põhineb GNSS-RTK baasil, mis tagab ligikaudu kahe sentimeetri täpsusega õige asukohta. Kaldal või lähedal asuval laeval on operaatoril kuva hüdrograafiliste andmete ja laeva juhtimise ning oleku kohta. Aquatic Drones pakuvad ka pilvelahendust, et operaatori baasis töötavad inimesed saaksid kogutud andmetele ligi kõikjal maailmas (Phoenix 5: A Versatile, Stable Survey ASV, 2022).

4.1.2 Ohutus ja usaldusväärus

Phoenix 5 on varustatud automaatse tulekustutussüsteemi, pilsipumba ja varutoitega. Oluliste juhtimis-, jõu- ja roolisüsteemide info koondamine tagab ohutuse komponendi rikke korral. Kaugoperaator saab alati jälgida süsteemide korrasolu, vajadusel sekkuda ning laeva käsitsi juhtida. Kui sideühendus peaks millegi tõttu katkema, siis jääb ta sellesse asukohta või liigub eelnevalt määratud kodupunkti (Phoenix 5: A Versatile, Stable Survey ASV, 2022).

4.1.3 Uuringutoimingud

Phoenixi peamisi rakendusi on batümeetriliste uuringute läbiviimine mitmekiirelise kajaloodiga. Laeva kõrge stabiilsus ja andurite asendid minimeerivad lainete ja teiste laevade mõju uuringutele. Uuringuala määrab pinnalsõiduki operaator, misjärel määrab Phoenixi juhtimissüsteem optimaalse uuringuvõrgu ja marsruudi piirkonda. Andmete kogumise ajal viimistletakse automaatselt mõõdistusliini pikkust ja vahet vastavalt vee sügavuse ja põhjaprofiili järgi. Kui andmete hankimist häirivad välisjõud, siis läheb laev automaatselt tagasi ja skaneerib ala uuesti (Phoenix 5: A Versatile, Stable Survey ASV, 2022).

Phoenix 5 saab varustada mitmesuguste anduritega nagu näiteks ühe- või mitmekiireliste kajaloodiga, külgskaneeerimis kajaloodiga, hägusus ja toitainanduritega. Laeval on olemas ka pardavints, mille abil langetatakse erinevaid andureid nagu näiteks helikiiruse sond (Phoenix 5: A Versatile, Stable Survey ASV, 2022).

4.1.4 Seadme kasutajakogemus

Lõputöö autor luges ajakirjast „*Hydro-international*“ artiklit „*Phoenix 5: A versatile, Stable Survey ASV*“ ning seal on kirjutatud, kuidas Phoenix 5-ga mõõdistati IJsseli jõesängi morfoloogiat Hollandis. Phoenixi stabiilne platvorm tagas suurepärase korratavuse mõõtmistele. Lisaks

parandas elektrimootori madal müra ja vibratsioon oluliselt mitmekiirelise kajaloodi töövoimekust. Alandmed nõudsid vähest järeltöötlust, vaid üksikud järskude nõlvadega seotud kõrvalekallete korrigeerimist. Puhastatud andmestik oli saadaval tund aega peale uuringu lõpetamist. Uuringuid teostati erinevate ilmastikuoludega ning andmed olid alati puhtad siis võib väita, et Phoenix 5 on stabiilne selliste uuringute jaoks (Phoenix 5: A Versatile, Stable Survey ASV, 2022).

4.2 OceanAlpha SL40

OceanAlpha SL 40 on jugakäituriga süsinikkiust kerega trimaraan, mille kaaluks on 17 kg ning maksimum kiiruseks on 6 m/s. ASV pikkuseks on 160 cm, laiuseks 70 cm ja kõrgust on 40 cm. Laeva kasutaja saab juhtida sõidukit nii manuaalselt kaugjuhtimispuldi abil või autonoomselt. SL 40 on varustatu radarianduritega, tänu millele suudab see tuvastada takistusi ja vältida kokkupõrkeid. Manuaalselt juhtimise ajal saab laeva operaator jälgida tänu laeval asetsevale kaamerale reaajas pilti, et navigeerida ohutult. Kuna laeva liigutab edasi veejoaga käitur, siis ei jää see veetaimede ega prahi sisse kinni (Canadian Lidar and Mapping, 2022).



Pilt 2. OceanAlpha SL40 (OceanAlpha Group, 2022)

4.2.1 Seadme kasutajakogemus

Lõputöö autor luges ajakirjast „Hydro-International“ artiklit „*Employing a USV for a Wide-swath Bathymetric River Survey*“ ning seal on kirjeldatud, kuidas viidi läbi topograafilisi ja batümeetrilisi uuringuid Aire jõel, Newlay külas, Ühendkuningriigis. Uuringuid teostati, et koguda infot kohalike varade taastamise töödeks. Uuringuteks kasutati OceanAlpha SL40 ASV-d, mis oli varustatud GeoSwath4 Interferometric sonariga ja SBG Ekinox IMU-ga (Hydro International, Hydro International, 2021).

Uuritud 250 meetrine lõik Aire jõel hõlmas Newlay paisu, jõekaldaid, eeskaldaid ja üleujutuskaitse uuringut. Mõõdistamine sujus ilma probleemideta tänu ASV madalale süvisele ja sonari laiiale mõõdistusribale, mis suutis tõhusalt uurida ka jõekallast (Hydro International, Hydro International, 2021).

Jõeuringutele lisaks tehti ka topograafiline uuring, milleks kasutati Trimble SX10 laserskännerit. Topograafiliste ja batümeetriliste uuringute tulemused liideti kokku ning saadi 3D mudel, mille abil saavad insenerid paisu veetaseme ja vooluhulga arvutamiseks kasutada erinevatel sademeperioodide jaoks (Hydro International, Hydro International, 2021).

4.3 XOCEAN

XOCEAN on mehitamata pinnalveelaev , mis on loodud tõhusaks kalavarude uurimiseks ja batümeetriliste uuringute tarbeks. Laeval on pikkust 4.5 meetrit, laiust 2.2 meetrit, kõrgust 2.2 meetrit ning kaalub see alus 750 kilogrammi (XOCEAN, 2020).



Pilt 3. XOCEAN pinnalveesõiduk (Offshore Energy, 2022)

Satelliitsidet kasutav laev saadab iga ASV reaalajas info koos pildiga XOCEAN-i operaatorkeskusesse, kus kvalifitseeritud ASV operaatorite meeskond saab alust jälgida ööpäevaringselt. Kokkupõrgete vältimise eest vastutavad XOCEAN-i operaatorid. Süsteem töötab globaalselt, ehk seadme töötamise ajal ei pea olema kedagi ASV läheduses ei maa ega teise laeva peal. ASV on varustatud täielikult automatiseeritud hübriidelektrijaamaga, mis hõlmab endast päikesepaneeli, liitiumioonakut ning abi mikrodiisलगeneraatorit. Laevasüsteemi ja andurite toiteks on saadaval pidev elektriline koormusvõimsus 1050 W, mis tagab 18 päevase kasuliku koormuse. XOCEAN-i hübriidjõusüsteemi tõttu on laeval 1000 korda väiksem süsihappegaasi (CO₂) saasteallikate atmosfääri paisatava aine hulk kui tavalistel vaatluslaevadel ja 1300 korda väiksem süsiniku jalajälg. *Ireland's National Ocean Test Facility* viis läbi XOcen-i lainepaakide testimise, mille käigus selgus, et laev on väga stabiilne erinevate lainete puhul (XOCEAN, 2020).

XOCEAN-i juhtimiseks määrab operaator marsruudi, mis koosneb teekonnapunktidest ning see laetakse satelliitide abil ASV-sse. Kui piloot on täielikult veendunud teekonna ohutuses, lülitab ta sisse autopiloodi ja ASV jälgib etteantud marsruuti. ASV jälgimisvõime halsi korral on väga suure täpsusega, mis tavaliselt on +/- 0,6 meetrit. Kui operaator näeb põhjust ASV teekonnal muudatuste vajalikkust, siis läbi juhtimisprogrammi saab ta igal ajahetkel sõiduki kurssi muuta. XOCEAN on varustatud ka mitmete funktsioonidega, mis muudavad selle teistele merekasutajatele nähtavaks. ASV-1 on navigatsioonituled, helisignaalid, aktiivne radari sihtmärgi võimendaja ja automaatne identifitseerimissüsteem AIS (XOCEAN, 2020).

100 kg kandevõimega XOCEAN suudab pardale võtta mitmeid andureid, sealhulgas mitmekiireline kajalood, kalapüügi uuringuks sonarid ja akustilised modemid. XOCEAN-i CyberDeck pakub üliturvalist pilvepõhist keskkonda ASV jälgimiseks ja juhtimiseks. See hõlmab jälgimist reaajas kogutavate andmete kvaliteedist ja keskkonnast, kus andurite parameetreid saab vastavalt vajadustele korrigeerida (XOCEAN, 2020).

4.4 Võrdlev tabel näidete põhjal

Tabel 2. Võrdlev tabel autonoomsetest laevadest

Näitajad	Autonoomsed laevad		
	Phoenix 5	OceanAlpha SL-40	XOCEAN
Kasutus- võimalused	<ul style="list-style-type: none"> • Batümeerilised uuringud • Põhjaprofiilide koostamine • Tsiiviilehituskonstruktsioonide kontrollimine • Ohutuse ja turvalisuse järelvalve • Veekvaliteedi uuringud 	<ul style="list-style-type: none"> • Topograafilised uuringud • Batümeetrilised uuringud 	<ul style="list-style-type: none"> • Kalavarude uuringud • Batümeetrilised uuringud
Uuringualad	<ul style="list-style-type: none"> • Siseveekogud • Sadamad • Rannikualad 	<ul style="list-style-type: none"> • Siseveekogud • Jõed 	<ul style="list-style-type: none"> • Rannikualad • Avameri
Mõõtmed	<ul style="list-style-type: none"> • Pikkus- 5 m • Laius- 2 m • Süvis- 0,55 m 	<ul style="list-style-type: none"> • Pikkus- 1,6 m • Laius- 0,7 m • Kõrgus- 0,4 m 	<ul style="list-style-type: none"> • Pikkus- 4,5 m • Laius- 2,2 m • Kõrgus- 2,2 m

		<ul style="list-style-type: none"> • Kaal- 17 kg 	<ul style="list-style-type: none"> • Kaal 750 kg
Jõuallikas	<ul style="list-style-type: none"> • Liitiumioonakud • Elektrimootor 	<ul style="list-style-type: none"> • Veejoakäitur 	<ul style="list-style-type: none"> • Liitiumioonakud • Mikrodiiseldiiselmootor
Võimsus	<ul style="list-style-type: none"> • 8-20 kW 	<ul style="list-style-type: none"> • Max. kiirus 6 m/s 	<ul style="list-style-type: none"> • 1050 kW
Varustus	<ul style="list-style-type: none"> • AIS- vastuvõtja • Videokaamera • Sonar • Automaatne tulekustutus-süsteem • Pilsipump • Kajalood • Hägusus-ja toitainandur 	<ul style="list-style-type: none"> • Radariandurid • Sonar 	<ul style="list-style-type: none"> • Hübriidelektrijaam • Päikesepaneelid • Navigatsioonituled • Helisignaalid • Radari sihtmärgi võimendaja • Sonar
Autonoomsuse tasemed	<ul style="list-style-type: none"> • Tase 2- tava-autonoomsus 	<ul style="list-style-type: none"> • Tase 1- kaugjuhtimine • Tase 5- planeeritud autonoomsus 	<ul style="list-style-type: none"> • Tase 4- täiustatud autonoomia

5 Autonoomsete laevade sobivus Eesti tingimustesse

Lõputöö autor jagas Eesti veealad kaheks osaks- Soome laht ja Väinameri. Järgnevalt on kirjeldatud kahe vee ala omadusi ning analüüsitud, kuidas autonoomsed pinnasõidukid sobivad nendesse tingimustesse.

5.1 Soome laht

Läänemere idapoolseimaks laheks on Soome laht. Soome lahte ümbritsevad Eesti, Soome ja Venemaa. Soome lahe läänepiiriks loetakse Eestis Põösaspea ja Soomes Hanko neeme vahelist ala. Soome lahe pindala on ligikaudu 30 000 km². Joonisel 2 on Soome laht (Estonica, ESTONICA, 2009).

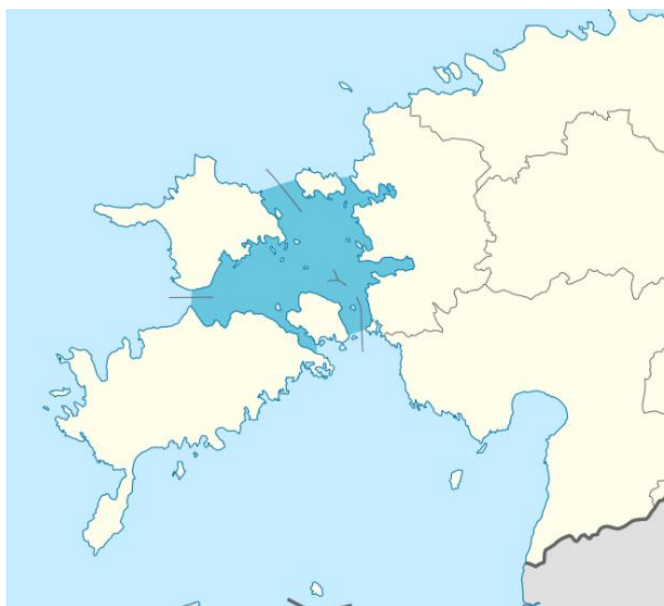


Joonis 2. Soome laht (Ershova, 2018).

Soome laht on üsna madal- keskmiselt 36-40 meetrit. Samas on lahe põhjareljeef üsna vahelduv. Lahe keskosas ulatub vee sügavus vaid mõne meetrini, kuid samas võib ka mõnes teises kohas sügavus ulatuda kuni 100- meetrini. Soome lahe veestik on Läänemere üks magedamaid (Estonica, ESTONICA, 2009).

5.2 Väinameri

Väinameri on mereosa, mis paikneb Lääne-Eesti saarte ning mandri vahel. Joonisel 3 on mereosa märgitud tumesinise värviga. Lääne-Eesti saared on Saaremaa, Hiiumaa, Muhu ja Vormsi. Väinamere pindalaks on ligikaudu 2200 km². Suure pindala sisse jääb mitu väina. Nendeks on Voosi kurk, Hari kurk, Soela väin, Väike ja Suur väin (Estonica, ESTONICA, 2009).



Joonis 3. Väinameri. (Digar, 2022)

Väinamere madal põhjareljeef ei ole suurematele laevadele sobiv. Mere keskmine sügavus on vaid viis meetrit ning ainult Suures väinas ulatub sügavus kuni 24 meetrini. Mere hüdroloogilised tingimused on vägagi erinevad võrreldes saartest lääne poole jääva mereosaga. Väinamerel on väiksem lainetus ja suuremad temperatuuri kõikumised. Mereosa on vähem soolasem ning vähem läbipaistev (ESTONICA, 2009).

5.3 Autonoomsete laevade sobivus Eesti tingimustesse.

Väinameri on oma põhjareljeefi poolest üsna madalad, mistõttu sobivad autonoomsed pinnasõidukid nendesse tingimustesse vägagi hästi. Neljandas peatükis väljatoodud laevad on samuti on süvise poolest üsna madalad. Näiteks PHOENIX5 süvis on vaid 0,55 meetrit sügav.

Soome lahe vesikond on üks suurimaid Läänemeres, millesse suubuvad mitmed erinevad jõed. Jõed kannavad nii maismaalt, kui ka rannikulähedastelt aladelt vette palju toitaineid, mille meri kõik vastu võtab ning hakkab toimuma eutrofeerumine (Lennart, 2014). Eutrofeerumine on

protsess, mis tekib siis, kui veekogusse on jõudnud liigselt toitaineid. Eutrofeerumine põhjustab vetikaliikide vohamist ja võimalikku veekogude kinnikasvamist (Fond, 2012). Neljandas peatükis väljatoodud laeva OceanAlpha SL40 liigutab edasi veejoaga käitur, siis suudab see ka liikuda läbi veetaimede ega jää nende sisse kinni.

Nii Soome laht kui ka Väinameri on oma laevaliikluse poolest tiheda liiklusega alad. Seetõttu võib nad liigitada kõrge riskitasemega keskkonnaks. Kõrge riskiga keskkonnas kohtab suure tõenäosusega teisi laevu, püügivahendeid ning ka harrastuspaadisõitjaid. OceanAlpha SL40 on varustatud radarianduritega, mis aitab sellel tuvastada planeeritud teekonnale ettejäävaid takistusi ning vältida ka kokkupõrkeid. Autonoomse pinnasõiduki Phoenix5 on kõrge stabiilsusega ning andurid on paigutatud nii, et need minimeeriks lainete ja teiste laevade mõju uuringuprotsessile.

5.3.1 Järeldused ja ettepanekud

Uurides Eesti veealade seisukordi ning erinevate pinnasõidukite omadusi, võib arvata, et Eesti veealade tingimused on täielikult sobilikud autonoomsete pinnasõidukite kasutamiseks. Autor leiab, et näidetenä välja toodud Phoenix5 ning OceanAlpha SL40 on just sobilikud Eesti tingimustesse. Kuigi andmeid põhjalikuks analüüsiks on vähe arvab lõputöö autor, et andmed on piisavad.

Eestis ei ole teadaolevalt hüdrograafiliste mõõdistustööde jaoks kasutusele võetud autonoomseid pinnasõidukeid. Kuigi esimesed kulud on ASV soetamiseks suured, arvab autor, et pikemas perspektiivis on masinasse investeerimine kasumlik. Lõputöö autor teeb Transpordiametile ettepaneku hakata katsetama hüdrograafiliste mõõdistustööde tegemiseks autonoomseid pinnasõidukeid. Tulevikus, kui katsetused on edukad ning veendunud on projekti kasumlikkuses, võiks Transpordiamet teha pikaajalise investeeringu, soetades omale autonoomne pinnasõiduk.

Kokkuvõte

Lõputöö teema valikul lähtus autor sellest, et autonoomsete laevade kasutamine hüdrograafias on tehnoloogia arengu tõttu muutunud aina populaarsemaks. Hetkel ei ole teada, et Eestis oleks tehtud kokkuvõtvat uuringut autonoomsete laevade kohta.

Lõputöö eesmärgiks oli välja selgitada, milliseid autonoomseid laevu kasutatakse hüdrograafilistel mõõdistustöödel, milliseid kasutegureid nende kasutamine endaga kaasa toob ning kuidas sobivad autonoomsed laevad Eesti tingimustesse.

Eesmärgi täitmiseks püstitas autor kolm **uurimisküsimust**:

1. Millised autonoomsed laevad on hüdrograafias kasutusel?
2. Milliseid kasutegureid toob autonoomsete laevade kasutamine?
3. Kuidas sobivad autonoomsed laevad Eesti tingimustesse?

Esimese uurimisküsimuse vastuse leidmiseks uuris autor erinevaid autonoomseid laevu. Lõputöö autor tõi välja nendest kolm: Phoenix 5, Ocean Alpha SL-40 ning XOCEAN. Uuringu käigus selgusid autonoomsete laevade omadused, võimalused ning samuti koostas autor ka leitud andmete põhjal võrdleva tabeli.

Teine uurimisküsimus uuris, et milliseid kasutegureid toob autonoomsete laevade kasutamine. Autor koostas tabeli, kus tõi välja autonoomsete laevade plussid ja miinused. Analüüsi käigus selgus, et peamisteks kasuteguriteks on meeskonnaga seotud kulude vähenemine, inimlike eksituste ja vigade tõenäosuse vähenemine ning samuti ka tõhusam kütusekasutus.

Kolmas uurimisküsimus uuris, kuidas autonoomsed laevad sobivad Eesti tingimustesse. Lõputöö autor jagas Eesti vee-alad kahte osasse: Soome laht ja Väinameri. Analüüsides Eesti vee-alade põhjareljeefe ja omadusi selgus, et esimeses uurimisküsimuses leitud autonoomsed laevad sobiksid ka Eesti tingimustesse hästi. Laevade madalad süvised on sobilikud mõõdistamiseks rannikualadel kui ka kaugemal. Samuti laevadel olev varustus on pigem sobilik Eesti tingimustesse.

Lõputöö uurimismeetodiks kasutatud temaatilise kirjanduse läbitöötamine võimaldas üldjoontes tutvuda autonoomsete laevade ning nende kasutusvõimalustega. Praeguse uurimuse põhjal ei pruugi kõik kasutegurid veel välja toodud olla.

Selleks, et teada saada, kas autonoomsetesse laevadesse investeerimine on pikas perspektiivis kasulik või mitte, tuleks järgmistes uurimustes teha põhjalik kasumianalüüs. Kuna autonoomsetesse laevadesse investeerimine võib olla riskantne, soovitab autor järgmistes uuringutes teha ka SWOT-analüüsi.

Summary

AUTONOMOUS VESSELS IN HYDROGRAPHY

Alger Paalberg

When choosing the theme of the thesis, the author assumed that due to the development of technology, the use of autonomous vessels in hydrography has become more and more popular. Currently, there has been made no summary for autonomous vessels in Estonia.

The aim of the theses is to find out what kind of autonomous vessels are used in hydrographic works, what benefits their use brings and how autonomous vessels are suitable for Estonian conditions.

To achieve this goal, the author raised three research questions:

1. What kind of autonomous ships are used in hydrography?
2. What are the benefits of using autonomous vessels?
3. How will the autonomous ships integrate into Estonian conditions?

To find the answer for the first thesis question, the author studied various autonomous vessels. The author of the thesis pointed out three of them: Phoenix 5, Ocean Alpha SL-40 and XOCEAN. During the study, the characteristics and possibilities of autonomous vessels became clear, and the author also compiled a comparative table based on the data found.

The second research question examined the benefits of using autonomous vessels. The author compiled a table outlining the pros and cons of autonomous vessels. The analysis revealed that the main benefits are a reduction in crew costs, a reduction in human error, and more efficient fuel use.

The third research question examined how autonomous vessels fit into Estonian conditions. The author of the dissertation divided the Estonian waters into two parts: the Gulf of Finland and Väinameri. Analyzing the reliefs and characteristics of Estonian water bottoms, it became clear to the author that the autonomous vessels found in the first research question would also be well suited to Estonian conditions. The shallow draft of vessels is suitable for surveying in coastal areas. The equipment on board is also suitable for Estonian conditions.

When processing the thematic literature, that was used as a research method for this thesis, it was possible to get familiar with autonomous vessels and their uses. Based on this current study, not all benefits may be identified.

In order to find out whether or not investing in autonomous vessels is beneficial in the long run, a thorough profit analysis should be carried out in following studies. As investing in autonomous vessels can be risky, the author recommends a SWOT analysis in the studies coming up.

Viidatud allikad

- Argus Media*. (21. mai 2023. a.). Allikas: <https://www.argusmedia.com/en/news/1842732-autonomous-ships-raise-insurance-concerns>
- Ashkan, M., & Elham, O. (June 2017. a.). Experimental Evaluation of Hydrography Surface Vehicle in Four Navigation Modes. *Journal of Ocean Engineering and Science*.
- BV, A. D. (2022). *Geo Matching*. Allikas: <https://geo-matching.com/usvs-unmanned-surface-vehicles/phoenix-5-p5>
- Canadian Lidar and Mapping. (aprill 2022. a.). Allikas: Canadian Lidar and Mapping: <https://canadianlidar.ca/asv>
- Das, D., & Young, G. (25. Aprill 2013. a.). Encyclopedia Britannica. Kasutamise kuupäev: 11. aprill 2022. a., allikas <https://www.britannica.com/technology/telemetry>
- Dictionary, C. (aprill 2022. a.). *Cambridge Dictionary*. Allikas: <https://dictionary.cambridge.org/dictionary/english/safety>
- Digar. (2022). Allikas: <https://www.digar.ee/viewer/et/nlib-digar:342297>
- e-COLREGs*. (mai 2022. a.). Allikas: https://www.ecolregs.com/index.php?option=com_k2&view=item&layout=item&id=45&Itemid=505&lang=en
- e-COLREGs*. (2022). Allikas: https://www.ecolregs.com/index.php?option=com_k2&view=item&layout=item&id=51&Itemid=383&lang=en
- e-COLREGs*. (2022). Allikas: https://www.ecolregs.com/index.php?option=com_k2&view=item&layout=item&id=48&Itemid=505&lang=en
- e-COLREGs*. (2022). Allikas: https://www.ecolregs.com/index.php?option=com_k2&view=item&layout=item&id=58&Itemid=391&lang=en
- Elias, S., & Alderton, D. (2021). *Encyclopedia of Geology, Second Edition*.
- Ershova, A. (juuni 2018. a.). Allikas: https://www.researchgate.net/figure/The-Gulf-of-Finland_fig1_330940218
- Estonica. (oktoober 2009. a.). Allikas: ESTONICA: <http://stage.estonica.ee/et/Loodus/L%C3%A4%C3%A4nemeril/V%C3%A4inameril/>

- Estonica. (oktoober 2009. a.). *ESTONICA*. Allikas: http://www.estonica.org/et/Loodus/Soome_laht_ja_P%C3%B5hja-Eesti_rannikumadalik/Soome_laht/
- Fond, E. L. (2012). Eutrofeerumine.
- Fossen, T. (2002). *Marine Control Systems: Guidance, Navigation and Control of Ships, Rigs and Underwater Vehicles*. Springer.
- Healy, N. J. (2022). *Britannica*. Allikas: <https://www.britannica.com/topic/maritime-law/Marine-insurance>
- Hydro International. (13. Veebruar 2018. a.). World's First Fully Autonomous Hydrographic Survey. *Hydro International*.
- Hydro International. (13. juuli 2021. a.). *Hydro International*. Allikas: <https://www.hydro-international.com/content/news/employing-a-usv-for-a-wide-swath-bathymetric-river-survey>
- Kala, V. (2018). *Hüdrograafia alused*. Tallinn: TTÜ kirjastus.
- Kottayil, N. K. (august 2021. a.). Allikas: <https://www.techopedia.com/definition/30056/autonomous-vehicle>
- Lekkas, A. (2014). *Guidance and Path-Planning Systems for Autonomous Vehicles*. Norwegian University of Science and Technology.
- Lennart, L. (16. juuli 2014. a.). Soome lahe tervis. *Sirp*.
- O'Brien, C. (september 2018. a.). Key Advantages and Disadvantages of Ship Autonomy. Allikas: <https://safety4sea.com/key-advantages-and-disadvantages-of-ship-autonomy/>
- OceanAlpha Group. (mai 2022. a.). *OceanAlpha*. Allikas: <https://www.oceanalpha.com/product-item/sl40/>
- Offshore Energy*. (jaanuar 2022. a.). Allikas: <https://www.offshore-energy.biz/oxocean-launches-new-unmanned-surface-vehicle/>
- Organization International Hydrographic. (november 2020. a.). The International Hydrographic Review. *Publication P-1*.
- Phoenix 5: A Versatile, Stable Survey ASV. (Aprill 2022. a.). *Hydro International*.
- Pickering, G. (2022). *The Shipowner's Club*. Allikas: https://www.shipownersclub.com/media/2018/07/MAV-Liability-Insurance-Brochure_061118-1.pdf
- Pickering, G. (2022). *The Shipowner's Club*. Allikas: <https://www.shipownersclub.com/insurance/autonomous/>

- Roche, P. (Juuli 2020. a.). *The Collision Regulations and Autonomous Shipping*. Allikas: Norton Rose Fulbright: https://www.nortonrosefulbright.com/en/knowledge/publications/5fedab67/the-collision-regulations-and-autonomous-shipping?fbclid=IwAR1wgHn6qGwAw4LiiFjrHYrK4cfkO3z1_Q_WX2wjqoT6hF1YY52DTsYyb4s
- Schröder, T. (21. mai 2023. a.). *If-insurance*. Allikas: <https://www.if-insurance.com/large-enterprises/insight/risk-consulting-magazine/risk-consulting-2017-1/autonomous-ships-fact-or-fiction>
- Zupan, M., Ashby, M., & Fleck, N. (2002). Actuator Classification and Selection- The Development of a Database. *Advanced Engineering Materials*, 895-951.
- Vagale, A., Oucheikh, R., Bye, R., Osen, O., & Fossen, T. (2021). Path Planning and Collision Avoidance for Autonomous Surface Vehicles I: a Review. *Journal of Marine Science and Technology*, lk 1292-1306.
- Vennikas, H. (veebruari 2022. a.). *Transpordiamet*. Allikas: <https://transpordiamet.ee/maa-vee-ohusoiduk/soiduk/juhiabisusteemid>
- Westgard, A. M., Hauge, C., & Rygh, K. E. (16. veebruar 2021. a.). Liability for Damage Caused by Autonomous ships – a Norwegian Perspective.
- Wingrove, M. (21. mai 2023. a.). *Riviera*. Allikas: <https://www.rivieramm.com/news-content-hub/news-content-hub/insurance-for-an-autonomous-vessel-future-24728>
- XOCEAN. (juuni 2020. a.). *XOCEAN FAQs*. Allikas: <https://xocean.com/wp-content/uploads/2020/05/XOCEAN-FAQs-June-2020.pdf>

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina, Alger Paalberg

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „Autonoomsed laevad hüdrograafias“, mille juhendaja on Allan Prommik.

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.

21.05.2023

¹ Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal vastavalt üliõpilase taotlusele lõputööle juurdepääsupiirangu kehtestamiseks, mis on allkirjastatud teaduskonna dekaani poolt, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil. Kui lõputöö on loonud kaks või enam isikut oma ühise loomingulise tegevusega ning lõputöö kaas- või ühisautor(id) ei ole andnud lõputööd kaitsvale üliõpilasele kindlaksmääratud tähtajaks nõusolekut lõputöö reprodutseerimiseks ja avalikustamiseks vastavalt lihtlitsentsi punktidele 1.1. ja 1.2, siis lihtlitsents nimetatud tähtaja jooksul ei kehti.