



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
EESTI MEREAKADEEMIA
Merehariduskeskus

Ilja Koudelka

Akustiliste seadmete ja meetodite võrdlus vrakkide uurimiseks

Lõputöö

Juhendaja: Allan Prommik
Kaasjuhendaja: Peeter Väling

Tallinn 2023

Olen koostanud töö iseseisvalt.

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

Ilja Koudelka

(allkirjastatud digitaalselt, kuupäev digiallkirjas)

Üliõpilase kood: 193051

Üliõpilase e-posti aadress: ilja.koudelka@gmail.com

Juhendaja: Allan Prommik

Töö vastab lõputööle esitatud nõuetele

(allkirjastatud digitaalselt, kuupäev digiallkirjas)

Kaitsmiskomisjoni esimees Inga Zaitseva-Pärnaste, programmijuht, merenduskeskuse dotsent.

Lubatud kaitsmisele

(allkirjastatud digitaalselt, kuupäev digiallkirjas)

Sisukord

Jooniste loetelu	5
Tabelite loetelu	6
Annotatsioon.....	7
Kasutatud lühendid	8
Sissejuhatus	9
1 Teooria.....	11
1.1 Hüdrograafia tähtsus maailmas	11
1.1.1 IHO	11
1.1.2 Vrakkid ning muud objektid.....	11
1.1.3 Hüdrograafia arenemine	13
1.2 Akustilised seadmed vrakkide leidmiseks ja uurimiseks	13
2 Metoodika.....	15
3 Akustilised seadmed	17
3.1 Seadmed vrakkide leidmiseks	17
3.1.1 Ühekiireline kajalood	17
3.1.2 Mitmekiireline kajalood	18
3.1.3 Ühe- ja mitmekiirelise kajaloodi peamised mõjutavad omadused	19
3.1.4 Veesamba info vajalikkus.....	21
3.1.5 Tagasipeegeldumisandmete täpsuse võrdlus Austraalias	22
3.1.6 Külgvaatesonar	23
3.1.7 AUV	24
3.1.8 ROV.....	26
4 Seadmete hinnang vrakkide leidmiseks.....	28
4.1 Andmete kogumine ning töötlemine	28
4.1.1 MS Excel 2023	28
4.2 Mitmekiireliste kajaloodide võrdlevad analüüsid.....	29
4.2.1 Reson SeaBat T-50R	29
4.2.2 R2Sonic 2022	31
4.2.3 Baywei M5	32
4.2.4 Norbit Winghead i80s.....	33
4.2.5 Laeva kiiruste valimine	35
4.2.6 Maksimaalne võimalik töösagedus mitmekiirelisel kajaloodil	36

4.2.7 Punktide vahe arvutus liikumissuunas.....	37
4.2.8 Punktide vahe arvutus ristsuunas.....	37
4.2.9 Punktide arvu arvutamine 1 m ² suuruses alas.....	38
4.2.10 Mitmekiireliste kajaloodide võrdlus 120 kraadise lehviku laiuse korral.....	39
4.2.11 Lehviku nurgad on vähendatud	41
4.2.12 Objektide suurused	43
4.2.13 Mitmekiireliste kajaloodide lisafunktsiooni võrdlev analüüs.....	44
4.3 Ühekiirelise kajaloodi analüüs vrakkide leidmiseks	45
4.3.1 Kiire jälje arvutus merepõhjas.....	45
4.3.2 Punktide arv 1 m ² suuruses alas ühekiirelise kajaloodi korral.....	47
5 Külgvaatesonarite analüüs.....	48
6 Tulemused	51
6.1 Mitmekiireliste kajaloodide võrdlevate analüüside tulemused	51
6.2 Ühekiirelise kajaloodi analüüsi tulemused	53
6.3 Külgvaatesonarite võrdleva analüüsi tulemused	54
Kokkuvõte	55
Summary.....	58
Viidatud allikad	60
Lisa 1. Mitmekiireliste kajaloodide võimekuse hinnang objektide või vrakkide tuvastamiseks ..	64
Lisa 2. Mõõdistusriba laius reguleerides lehviku nurka nii, et saada minimaalselt 3 sügavuspunkti 1m ² kohta.....	65
Lisa 3. Objekt 3x3 mõõtmed	66

Jooniste loetelu

Joonis 1. Teise maailmasõja laevavrakkide kaart.....	12
Joonis 2. Ühekiireline kajalood	17
Joonis 3. Mitmekiireline kajalood	19
Joonis 4. Vraki masti avastamise kasutades veesamba info.....	21
Joonis 5. Külgvaatesonar	24
Joonis 6. Autonoomne veealune sõiduk Fetch Karibi mere vetes.....	25
Joonis 7. ROV platvorm	27
Joonis 8. MS Exceli põhifunktsioonid ja tööruum	28
Joonis 9. Mitmekiireline kajalood Reson SeaBat T-50R	29
Joonis 10. Mitmekiireline kajalood R2Sonic 202	31
Joonis 11. Mitmekiireline kajalood Baywei M5	32
Joonis 12. Mitmekiireline kajalood Norbit Winghead i80s.....	34
Joonis 13. Üks sõlm teistes mõõtühikutes	35
Joonis 14. 3x3 sügavuspunktiga leitava objekti mõõtmed traaversi suunas.....	43
Joonis 15. Teoreetiline horisontaalne lahutus ühekanalise kajaloodi korral	46
Joonis 16. Külgvaatesonar Shark-150D	48
Joonis 17. Külgvaatesonar EdgeTech 2050-DSS	49
Joonis 18. Mõõdistusriba laius reguleerides lehviku nurka nii, et saada minimaalselt 3 sügavuspunkti 1m2 kohta.....	65

Tabelite loetelu

Tabel 1. Mitmekiire batümeetria ja mitmekiirelise veesamba väikseima sügavuse võrdlus	22
Tabel 2. Klassifikatsiooni täpsuse kokkuvõte	23
Tabel 3. AUV-de jaoks saadavad seadmed ja andurid	26
Tabel 4. Reson SeaBat T50-R tehnilised näitajad	30
Tabel 5. R2Sonic 2022 tehnilised näitajad	31
Tabel 6. Baywei M5 tehnilised näitajad	33
Tabel 7. Norbit Winghead i80s tehnilised näitajad	34
Tabel 8. Laeva kiirused erinevates mõõtühikutes	36
Tabel 9. Punktide vahe liikumissuunas erinevatel laeva kiirustel ning erinevatega töösagedusega ehk ping rate	37
Tabel 10. Reson T50-R sügavuspunktide arv 1 m ² (256 kanaleid ning lehviku laius 120 kraadi).....	39
Tabel 11. R2Sonic 2022 sügavuspunktide arv 1 m ² (256 kanaleid ning lehviku laius 120 kraadi).....	40
Tabel 12. Baywei M5 sügavuspunktide arv 1 m ² (256 kanaleid ning lehviku laius 120 kraadi).....	40
Tabel 13. Norbit Winghead i80s sügavuspunktide arv 1 m ² (256 kanaleid ning lehviku laius 120 kraadi)	40
Tabel 14. Kiirte arvu mõju riba laiusele ning sügavuspunktidele	41
Tabel 15. Max sügavused, kus saavutatakse 3 sügavuspunkti 1m ² kohta 130 kraadi lehviku laiuse ja sonari maksimaalse kiirtearvu korral	42
Tabel 16. Mitmekiireliste kajaloodide tehniliste parameetrite võrdlus	44
Tabel 17. Kiire jälje läbimõõdud merepõhjas	46
Tabel 18. Punktide arv 1 m ² suurusel alal 3, 5 ja 10 kraadi kiire laiuse korral	47
Tabel 19. Külgvaatesonari Shark-S150D tehnilised näitajad.....	49
Tabel 20. Tabel 30. Külgvaatesonari EdgeTech 2050-DSS tehnilised näitajad.....	50
Tabel 21. Jälje suurusest tulenev resolutsioonid külgvaatesonaritel	50
Tabel 22. Mitmekiireliste kajaloodide võimekuse hinnang objektide või vrakkide tuvastamiseks.....	64
Tabel 23. Objekt 3x3 mõõtmed	66

Annotatsioon

Maailma ookeanipõhjas leidub üle 3 miljoni avastamata laevavrakki ning veel rohkem teisi tuvastamata veealuseid objekte ja uuritud on vähem kui 1% neist vrakkidest, objektidest. Teiseks probleemiks on see, et hetkeseisuga on kaardistatud 25% maailma ookeanidest. Samal ajal sonarite ja arvutustehnoloogia areng toimub väga aktiivselt ning lubab leida ja uurida vrakke ning muid objekte palju lihtsamalt ja kiiremalt.

Käesoleva lõputöö eesmärk on analüüsida ja võrrelda omavahel akustilisi seadmeid vrakkide ja muude objektide otsimiseks ning uurimiseks. Lõputöö eesmärgi saavutamiseks on vaja leida avalikutest allikatest ning Transpordiametist andmeid, teha arvutusi ning viia läbi võrdlevad analüüsid.

Lõpptulemusena on arvatud vajalikud andmed ning võrreldud omavahel erinevate sonarite mudeleid ning koostatud vastavad järeldused.

Antud töö on hea sisend sonari valimise jaoks.

Märksõnad: Sonar, mitmekiireline kajalood, ühekiireline kajalood, külvaatesonar, hüdrograafia.

Kasutatud lühendid

IHO	International Hydrographic Organization
AUV	Autonomous Underwater vehicle
ROV	Remotely operated vehicle
SBES	Single Beam Echo Sounder
MBES	Multi Beam Echo Sounder
SSS	Side Scan Sonar
m	Meeter
cm	Sentimeeter
GIS	Geographic information systems
NMEA	National Marine Electronics Association
s	Sõlm
km/h	Kilomeeter tunnis
m/s	Meeter sekundis
Hz	Herts
kHz	Kiloherts
CW	Continuous Wave
FM	Frequency modulated signals
RSP	Rack-mounted Sonar Processor
μs	Micro second
INS	Inertial Navigation System

Sissejuhatus

Rahvusvahelise Hüdrograafiaorganisatsiooni peaesmärk on laevaliikluse ohutuse tagamine, ohualade või kaitse planeerimine. Hüdrograafia arenemine on üks olulisematest suundadest merenduses kaasaegses maailmas. Hüdrograafia aitab lahendada mitmeid probleeme: üks nendest probleemidest on tuvastamata vrakkid ja objektid, mis võivad ohustada laevaliiklust. Hetkeseisuga on kaardistatud umbes 25% maailma ookeanidest ning üle 3 miljoni laevavrakki on tuvastamata, siia võib lisada ka muid veeluseid objekte.

Lähtudes sellest probleemist lõputöö peamine eesmärk on võrrelda omavahel ja anda ülevaade erinevatest akustilistest seadmetest vrakkide otsimiseks. Eesmärgi täitmiseks püstitas autor järgmised ülesanded: andmete kogumine, võrdleva analüüsi teostamine, tehniliste omaduste võrdlemine omavahel ning vrakkide või objektide otsimiseks peamiste mõjutavate parameetrite täpsustamine. Autor määras uurimisküsimused teema süvendamise uuringuks:

- Millised on peamised parameetrid, mis mõjutavad vrakkide või objektide leidmise tõenäosust?
- Milliseid akustilisi seadmeid on parem kasutada vrakkide või objektide tuvastamiseks ja uurimiseks?
- Kuidas muutuvad tööparameetrid sonaritel töötades erinevates režiimides?
- Kui suur peab olema objekt, et tuvastada seda erinevatel sügavustel?

Lõputöö koosneb kolmest osast. Lõputöö põhiosa koosneb teooriast, metoodikast, saadud tulemustest ja autori poolt koostatud järeldustest. Teoorias käsitletakse hüdrograafia tähtsust ja arenemist, Rahvusvahelise Hüdrograafiaorganisatsiooni ülesannet ning vrakkide ja akustiliste seadmete tutvustamist.

Praktiline osa on jagatud kaheks põhiteemaks. Esimene teema kirjeldab erinevaid akustilisi seadmeid vrakkide leidmiseks ning uurimiseks. Teemas käsitletakse seadmeid vrakkide otsimiseks, nagu mitmekiirelised kajaloodid, ühekiireline kajalood ning seadmed vrakkide uurimiseks, nagu külgvaatesonar, AUV ning ROV platvormid. Seal

kirjeldatakse nende tööpõhimõtteid, põhilisi töövõimalusi ning tööülesandeid ja peamisi tehnilisi parameetreid. Teises osas on tehtud kuus võrdlevat analüüsi: mitmekiirelise kajaloodi vahel, ühekiirelise kajaloodi näitajate vahel ning külgyaatesonarite vahel. On ka välja toodud tulemused ja järeldused vastavalt võrdlevatele analüüsidele.

1 Teooria

1.1 Hüdrograafia tähtsus maailmas

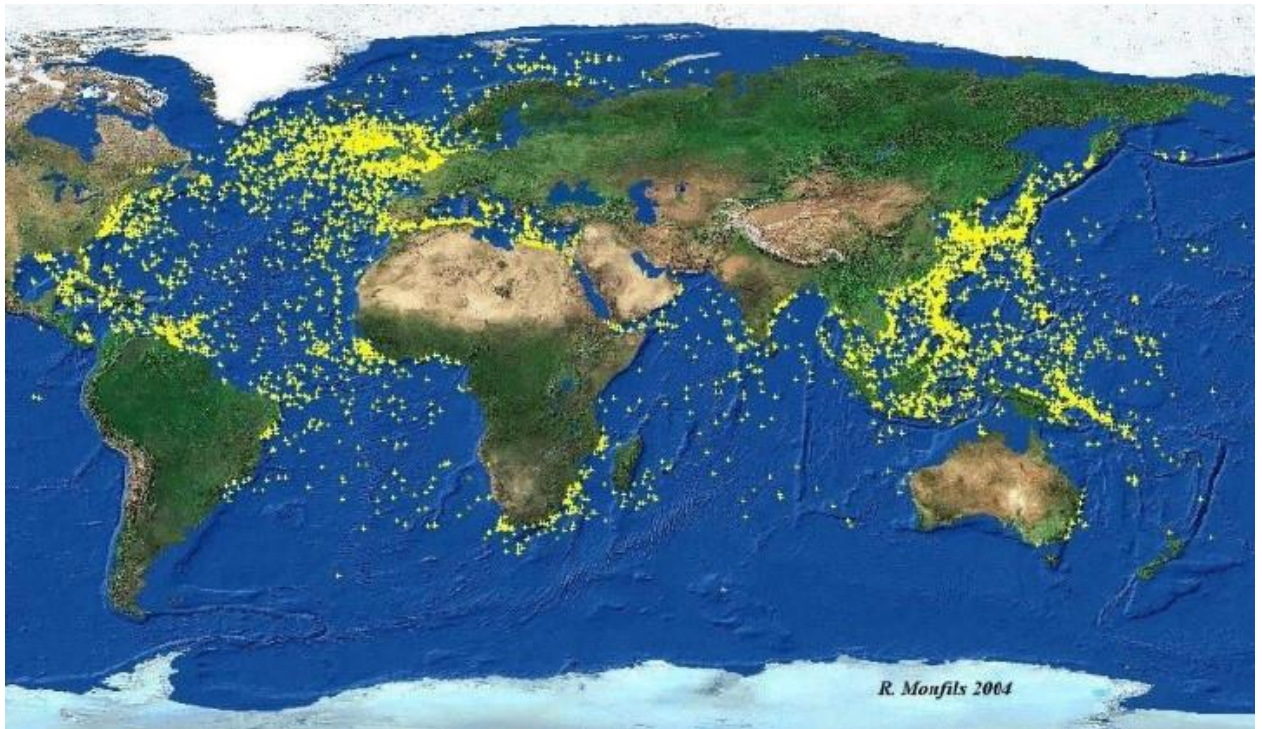
Rahvusvahelise Hüdrograafiaorganisatsiooni (IHO) iseloomustuse kohaselt on hüdrograafia rakendusteaduste haru, mis tegeleb ookeanide, merede, rannikualade, järvede ja jõgede füüsiliste omaduste mõõtmise ja kirjeldamisega. Samuti prognoosib IHO nende veekogude muutumist aja jooksul. Hüdrograafia peamine eesmärk on meresõiduohutus ja toetus teistele merendustegevustele, sealhulgas majanduse arengut, julgeolekut ja kaitset, teadusuuringuid ja keskkonnakaitset (*Importance of Hydrography*, 2022). Täpne teadmine veealuse topograafia ja objektide kuju ja muutumise kohta on aluseks mitmesugustele sotsiaalmajanduslikele ja ökoloogilistele teemadele. Esimeste hulka kuuluvad laevaliikluse ohutus, üleujutusriski hindamine, ohualade ja kaitse planeerimine ning viimaste hulka kuuluvad ranniku- ja kaldaalade taastamine, nende seisundi ja muutuste jälgimine ning vastavate mõjude hindamine vee-elupaikadele. (Mandlbürger, 2022).

1.1.1 IHO

Rahvusvaheline Hüdrograafiaorganisatsioon on valitsustevaheline organisatsioon, mille eesmärk on tagada kõigi maailma merede, ookeanide ja laevatatavate veekogude mõõdistamine ja kaardistamine. Organisatsioon on asutatud 1921. aastal, see koordineerib riiklike hüdrograafiaametite tegevust ning edendab merekaartide ja dokumentide ühtlust. IHO loob ja väljastab head tavad uuringute tegemisel, annab juhiseid hüdrograafiliste uuringuandmete kasutamise maksimeerimiseks ja arendab liikmesriikides hüdrograafilisi võimalusi. (*About the IHO*, 2021)

1.1.2 Vrakid ning muud objektid

Hinnanguliselt leidub planeedi ookeanipõhjas üle 3 miljoni avastamata laevavraki. Näiteks loetleb Merekatastroofide kogumik 12 542 purjelaeva ja sõjalaeva, mis kaotati merel ainuüksi aastatel 1824–1962. (The UNESCO Convention on the Protection of the Underwater Cultural Heritage, 2007: 4). Uuritud on vähem kui 1% neist vrakkidest. Mõnda vrakki otsitakse aktiivselt, kuid paljud leitakse juhuslikult. (*Shipwrecks* , 2022).



Joonis 1. Teise maailmasõja laevavrakkide kaart

Allikas (Monfils, 2023)

Ülaltoodud kaart (vt. Joonis 1) näitab Teise maailmasõja ajal uppunud laevu. Kaart ühendab Vaikse ookeani Aasia osa laevavrakkide Geoinfosüsteemi (GIS) andmebaasi ja Atlandi ookeani, Vahemere ja India ookeani Teise maailmasõja laevavrakkide andmebaasi (Monfils, 2023).

Probleem seisneb selles, et hetkeseisuga on kaardistatud vaid 25% maailma ookeanidest, mis tähendab, et suur osa merekeskkonnast, sealhulgas laevahuku paigad, on ikka veel uurimata. Läänemere piirkonnas on kõige rohkem registreeritud vrakke Rootsi vetes. Arvukad merepõhjas paiknevad laevavrakid on pärit sõdadest, ägedatest tormidest ja kaptenite valearvestustest. Neid objekte peetakse kultuuripärandi oluliseks osaks ja need on osa ajaloost. (Grządziel, 2022: 1). Tänapäeval muutuvad laevavrakid üha kättesaadavamaks. Kuigi veealuste tööde tegemiseks on endiselt vaja professionaalset varustust ja kõrgetasemelist väljaõpet, ei ole sellised kohad enam aardeküttide käeulatuses väljas. Sonarite ja arvutustehnoloogia areng on viimastel aastakümnetel toonud kaasa suuri edusamme ookeanide uurimisel (Martí et al., 2022: 1; The UNESCO Convention on the Protection of the Underwater Cultural Heritage, 2007: 5).

1.1.3 Hüdrograafia arenemine

Kaasaegne hüdrograafia koosneb üldkaardistusest erinevatel eesmärkidel: sadamate hooldamisest ja ehitamisest, ohutu meresõidu tagamisest, nafta- ja gaasitööstuse geodeetilistest töödest, rannikukaitse abi- ja meretöödest. Tehnoloogia arenguga suureneb võimalus hüdrograafiat rakendada, näiteks torustike paigaldamisel ja jälgimisel, tehissaarte ja merelennujaamade loomisel. (Berlijn, 2008).

Veealune topograafia on oluline merendusliku taristu, näiteks torujuhtmete, meresadamate ning merede ja järvede lainemurdjate projekteerimisel ja rakendamisel. Allvee topograafia uurimine on batümeetria, selle mõõtmisprotsessi nimetatakse hüdrograafiliseks mõõdistamiseks. Veealuseid kaardistamistehnikaid nimetatakse tavaliselt mõõtmiseks kasutatavate seadmete järgi, nagu latid, tross- ja traatlöödid. Neid tehnikaid on kasutatud sügavuste mõõtmiseks veealuse kaardistamise jaoks, viidatud batümeetriliste andmetena. Praegune tehnoloogia kasutab akustilisi helisid. Kuigi batümeetrilised mõõtmised mitmekiireliste kajaloodidega on veealuse kaardistamise jaoks kiiremad ja tundlikumad, on ühekiirelised kajaloodid odavamad. Seetõttu eelistavad praktikud tavaliselt kasutada ühekiirelisi kajaloode. (Kartal et al., 2022: 1).

1.2 Akustilised seadmed vrakkide leidmiseks ja uurimiseks

Selles töös käsitleb autor vrakkide ja muude objektide tuvastamiseks ainult akustilisi instrumente. Akustilisteks instrumentideks nimetatakse sonareid, mis on kasutusel tänapäeval merepõhja kaardistamiseks, võimalike ohtude tuvastamiseks ning vrakkide ja nende lastide asukoha kindlaks tegemiseks. Neid süsteeme võib liigitada kolme põhikategooriasse: ühekiireline kajalood (*Single Beam Echo Sounder – SBES*), mitmekiireline kajalood (*Multibeam Echo Sounder – MBES*) ja külgvaatesonar (*Side-Scan Sonar – SSS*). (*Single-Beam Echo Sounders*, 2022). Lisaks on tarvis arvestada sellega, et vrakkid võivad olla väga erinevaid. Selleks, et neid kindlasti tuvastada on vaja teada soovitatavalt 5 – 6, minimaalselt 3 sügavuspunkti 1 m² kohta. Teatud sügavustel pole seda enam ka MBES-iga võimalik teha kui see aparaat on pealveelaeval. Siit tuleb juurde vajadus kasutada vrakkide leidmiseks ROV või AUV-i, mille külge on MBES kinnitatud. Need saavad minna merepõhjale lähemale.

Autonoomsed allveesõidukid (AUV) ja kaugjuhitavad sõidukid (ROV) on kahte tüüpi mehitamata veealused süsteemid, mida tavaliselt kasutatakse mitmesugustes rakendustes, nagu allveeuuringud, uurimine ja ülevaatus. Need süsteemid kasutavad kõrge eraldusvõimega pildistamise ja andmete kogumise võimaluste pakkumiseks kõrgtehnoloogiaid, nagu sünteesapertuuriga sonar (SAS) ja mitme apertuuriga sonar (MAS). (Hansen, 2011)

2 Metoodika

Lõputöö on koostatud empiirilise ehk rakenduslikku metoodikat kasutades. Empiirilise töö eesmärgiks on objektidega seonduvate probleemide väljaselgitamine ja lahenduste otsimine, olemasolevate teoreetiliste ja empiiriliste allikate analüüsimine, empiirilise uuringu teostamine, tulemuste analüüsimine ning hinnangu andmine. (*Eesti Mereakadeemia Lõputööde Koostamise Ja Vormistamise Juhend*, 2017).

Lõputöös uuritavaks probleemiks on leida veealuste objektide, näiteks vrakid, uurimiseks ja otsimiseks sobivate omadustega akustiline seade. Oluliste objektide hulka kuuluvad ka torustikud, kaablid ja muud meresõiduohutust mõjutavad objektid. Samal ajal on olemas enam kui 3 miljonit tuvastamata laevavrakki. Mõned vrakid on pärit sõdadest, halbade ilmastikutingimustest (nagu tugevad tormid) ja navigeerimisvigadest. Neid objekte peetakse ajaloo ja kultuuripärandi oluliseks osaks.

Lähtudes sellest olukorrast ning probleemist lõputöö peamine eesmärk on võrrelda omavahel erinevaid akustilisi seadmeid vrakkide otsimiseks ja uurimiseks ning anda nende kohta ülevaade. Eesmärgi täitmiseks püstitas autor järgmised ülesanded: andmete kogumine, võrdleva analüüsi teostamine, akustiliste seadmete võrdlemine omavahel ning vrakkide või objektide otsimiseks peamiste mõjutavate parameetrite täpsustamine. Autor määras uurimisküsimused teema süvendamise uuringuks:

- Millised peamised parameetrid mõjutavad vrakkide või objektide leidmise tõenäosust?
- Milliseid akustilisi seadmeid on parem kasutada vrakkide või objektide tuvastamiseks ja uurimiseks?
- Kuidas muutuvad tööparameetrid sonaritel töötades erinevates režiimides?
- Kui suur peab olema vrakk, et seda erinevatel sügavustel tuvastada?

Metoodika on jagatud kolmeks osaks: mitmekiireliste kajaloodide ja külgvaatesonarite võrdlevad analüüsid, ühekiirelise kajaloodi analüüs. Mitmekiireliste kajaloodide esimeses analüüsis on vaja välja arvutada, kui palju sügavuspunkte annab iga sonar 1 m² kohta erinevatel sügavustel töötades samades tingimustes ehk sama lehviku laiusega ja

sama kiirte arvuga. Teises analüüsis käsitletakse olukorra, kus mitmekiirelistel kajaloodidel lehviku nurgad on vähendatud. Sellise analüüsi korral uuritakse, kui palju on sügavuse suurenedes vaja vähendada lehviku nurka selleks, et saada minimaalselt vajaliku hulga sügavuspunktide arvu vrakkide ja muude veealuste objektide leidmiseks ja uurimiseks erinevatel sügavustel, arvestades maksimaalse lubatud töösügavusega iga sonari jaoks.

Kolmandas analüüsis arvutatakse ning seejärel hinnatakse, kui suurt objekti on võimalik leida erinevate sonaritega erinevatel sügavustel. Neljandas analüüsis võrreldakse omavahel mitmekiireliste kajaloodide lisafunktsioone ja võimalusi.

Ühekiirelise kajaloodi analüüsis kontrollitakse, millised tehnilised omadused mõjutavad tõenäosust vrakkide ning objektide leidmiseks ning uuritakse, kuidas on võimalik kasutada ühekiirelist kajaloodi vealuste objektide otsimiseks.

Külgvaatesonarite analüüsis uuritakse resolutsiooni liikumissuunas, mis omakorda mõjutab saadud pildi kvaliteeti.

Tulemuste osas kirjeldatakse võrdlevate analüüside saadud tulemusi ning autori poolt koostatud järeldusi.

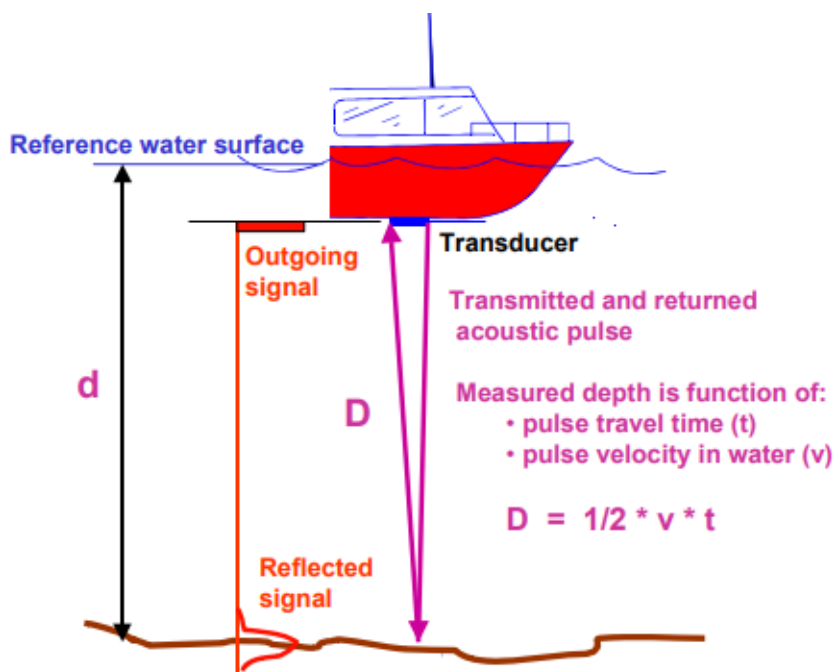
3 Akustilised seadmed

Sonareid kasutatakse merepõhja kaardistamiseks, võimalike ohtude tuvastamiseks ning vrakkide ja nende lastide asukoha kindlaks tegemiseks. Neid süsteeme võib liigitada kahte põhikategooriasse: seadmed vrakkide leidmiseks: ühekiireline kajalood, mitmekiireline kajalood ning seadmed vrakkide uurimiseks: külgvaatesonar ning AUV ja ROV platvormid (*Single-Beam Echo Sounders*, 2022).

3.1 Seadmed vrakkide leidmiseks

3.1.1 Ühekiireline kajalood

SBESid (vt. Joonis 2) on algelised ja lihtsamad akustilised merepõhja kaardistamise süsteemid. Need koosnevad andurist, mis on paigaldatud kas paadi kerele või külje peale, juhust ja kuvasüsteemist. Iga helisignaali pingiga annab juht andurile pinget, tekitades vees impulsi, mis on suunatud allapoole. Peegeldunud energia tuleb tagasi andurisse, kus see ergastab vastuvõtjat ning see tuvastatakse ja kuvatakse. Sügavus arvutatakse liikumisaja ja vees helikiiruse järgi (*Single Beam Echosounder Samples*, 2013).



Joonis 2. Ühekiireline kajalood

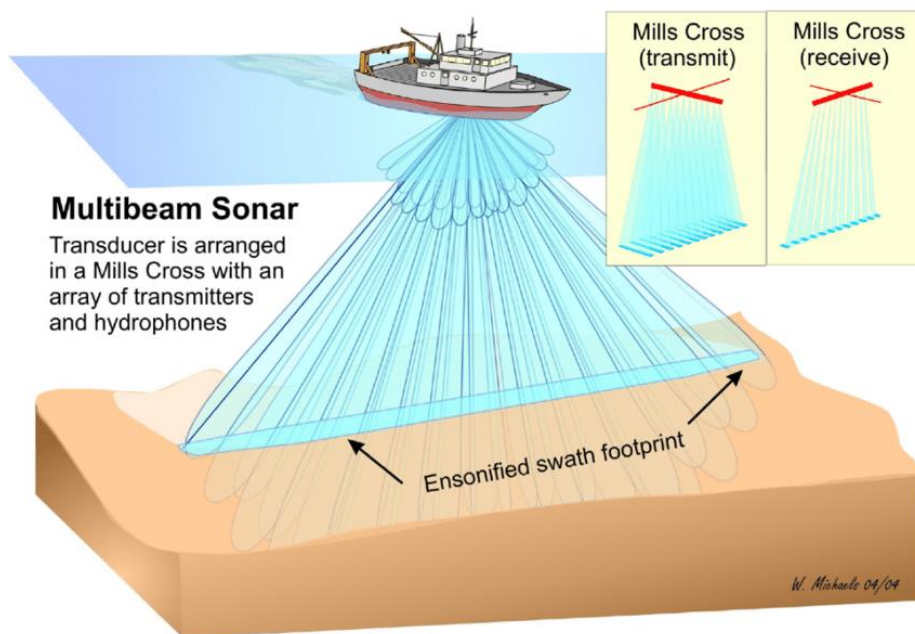
Allikas (Abdulrahman et al., 2017: 6)

Sonari energia peegeldub kõiges, mis võib heli teel olla – kalad, praht, veetaimestik ja hõljuv sete. Hüdrograafilise mõõdistusastmega ühekiirelised kajaloodid on võimelised tagama täpse põhjasügavuse, eristades tegelikku põhja tagasitulevas kajas olevatest valesignaalist. Tõelised mõõdistuskvaliteediga hüdrograafilised ühekiirelised kajaloodid salvestavad digitaalse veesamba kajagrammi või kajaümbriku, mis annab tagasituleva kaja graafilise esituse. Ajalooliselt esitati see teave paberkaartide salvestil, kasutades termopaberit, et anda vahendeid sondeerimise täpsuse kvalifitseerimiseks. (*Single Beam Echo Sounders*, 2021).

Sonarit iseloomustab helilaine edastamise sagedus. Madal sagedus annab suurema ulatuse, kuid väiksema eraldusvõime. Kõrge sagedus annab väiksema leviala, kuid suurema eraldusvõime. SBES võib kasutada erinevad sonari sagedusi; tavaliselt kasutatakse madalas vees, alla 100 meetri, 200 kHz-list sagedust. Kuna madalamatel sagedustel heli sumbumine vees väheneb, kasutatakse sügavamates veeuringutes tavaliselt 24-33 kHz-list sagedust. Sageli kombineeritakse kaks sagedust mugavuse huvides üheks kahesageduslikuks anduriks, nt 33/200 kHz. Andureid saab valida erineva kiire laiusega, mis määrab pingi jalajälje suuruse põhjas. Kitsama kiirega andurid tagavad väiksema sondeeritud ala ja seetõttu annavad sügavuse mõõtmise mõõtmisanuma all diskreetsema punkti. Veepõhja täpse asukoha määramiseks on soovitatav kasutada kitsama kiire laiusega andurit. Odavad kajaloodid võivad pakkuda väga suurt helivihu laiust, mis annab väikese potentsiaali täpseks sügavuse mõõtmiseks. (Dhabban, 2021; *Single Beam Echo Sounders*, 2021).

3.1.2 Mitmekiireline kajalood

Mitmekiirelised kajaloodid kasutavad järgmist põhimõtet: projektor tekitab helilaineid ja vastuvõtja ehk hüdrofon võtab vastu kaja. Kui saatja suudab nii helilaineid tekitada kui ka vastu võtta, nimetatakse seda anduriks. (vt. Joonis 3). Tekkinud vöödi pikkus on iga pinnasel oleva joone laius ja seda saab väljendada pikkusena meetrites või nurgana (kraadides), mille all see moodustatakse. Mõõdistusriba laius on vahe äärmiste kiirte vahel, mida väljendatakse distantsina meetrites mere põhjas, või lehviku nurgana kraadides. Andur mõõdab kiirataivate ja peegeldunud helilainete aja ja intensiivsuse erinevust. Selle tulemusena saab määrata merepõhja vastava sügavuse ja omadused. Ühtlaselt kõvalt pinnalt peegeldub rohkem laineid kui ebatasaselt aluspinnalt. (*Multibeam Sonar*, 2022).



Joonis 3. Mitmekiireline kajalood

Allikas (Boulay, 2012)

Mitmekiireliselt kajaloodilt saadud andmed võimaldavad “ehitada” pinnapõhja kolmemõõtmelise kõrge eraldusvõimega punktipilve ning visualiseerida uuringu käigus tuvastatud objekte. MBESi suureks eeliseks on kindlaksmääratud uuringuala täieliku andmekatte võimalus, st merepõhja täielik akustiline helindamine (Grządziel, 2022: 3). MBES suudab igas sügavusprofiilis hankida kuni 512 (*Ultra High Density* - UHD puhul kuni 1024) eraldi sondeerimist. See annab eraldusvõime, mis ületab SBESi oma. (Dhabban, 2021).

Lisaks batümeetrilistele ja merepõhja peegelduvuse andmetele on mitmekiireline kajalood nüüd võimeline salvestama veesammast. See uus kaardistamisvõimalus on kasutusele võtnud uued mereuuringute tehnikad, sealhulgas kalaparvede, gaasi imbumise või muude veesamba keskmiste sihtmärkide otsese kaardistamise. Mõned MBESid toetavad isegi mitme sagedusega andmete kogumist koos veesamba andmetega, suurendades seega nende tuvastamisvõimet. (Martí et al., 2022: 1).

3.1.3 Ühe- ja mitmekiirelise kajaloodi peamised mõjutavad omadused

Ühekiireliste ja mitmekiireliste sonarisüsteemide tõhusus vrakkide leidmisel sõltub mitmest tegurist:

- **Valitavad signaali kandevasagedused (*Selectable Frequencies*)** – Võimalus valida mõõdistustöö tingimustele sobivaim kandevasagedus. Madalad sagedused (90kHz või 100kHz), sellega saab mõõta 600–700 meetri sügavusele või sügavamale. Väga kõrgetel sagedusel (700 kHz) mõõdistamine võimaldab ülikõrget eraldusvõimet.
- **Minimaalne kandevasageduse muutus (*Minimum frequency change*)** – Minimaalne sageduse muutmise samm, väike samm annab suurema paindlikkuse sobiva sageduse leidmisel
- **Kiire laius (*Beamwidth*)** – Mida väiksem on kiire laius, seda väiksem on merepõhja pind, mille see kiir katab, seda suurem on resolutsioon. Mida väiksem on kiirega kaetav merepõhja ala, seda täpsem tulemus.
- **Kiirte arv arv (*Beam number*)** – Mida suurem on kiirte arv sonari lehvikus, seda tihedam sügavuspunktide kogum saadakse.
- **Heliimpulsside väljastamise sagedus (*ping rate*)** – See on sekundis väljastatavate heliimpulsside arv. Suurema pingisagedusega kiiratakse rohkem helilaineid, mille tulemuseks on tihedam sügavuspunktide kogum.
- **Suurim töösügavus (*Sounding depth*)** – Sonari süsteemi suurim vahemaa andurist (võib olla paigaldatud ka AUV-le ja ROV-le) põhjani, mille jooksul see suudab merepõhja tabada.
- **Lehvikulaius (*Swath*)** – Nurk lehviksonari äärmiste kaldkiirte vahel. Suurem lehvikulaius võimaldab katta rohkem maad lühema ajaga, mis vähendab otsimiseks kuluvat aega.
- **Impulsi pikkus (*Pulse length*)** – Mida lühem on impulsi pikkus, seda suurem on vertikaalne eraldusvõime, kuna see annab võimaluse eristada kahte lähedal olevat sihtmärki üksteisest.
- **Impulsi tüüp (*Pulse type*)** – Erinevad mitmekiirelised kajaloodid kasutavad erinevat tüüpi modulatsiooni akustilise signaali vette edastamiseks.

CW (Continuous Wave) on ühe sagedusega sinusoidane laine. Tavaliselt on see suure võimsusega signaal, mis on suhteliselt lühikese kestusega (pulse).

FM (Frequency Modulated) lainekuju on sinusoidne signaal, mille sagedus suureneb või väheneb aja jooksul ja ühtlase kiirusega. FM-signaalid on pikema kestusega, madalas vees võivad põhjustada rohkelt taustamüra.

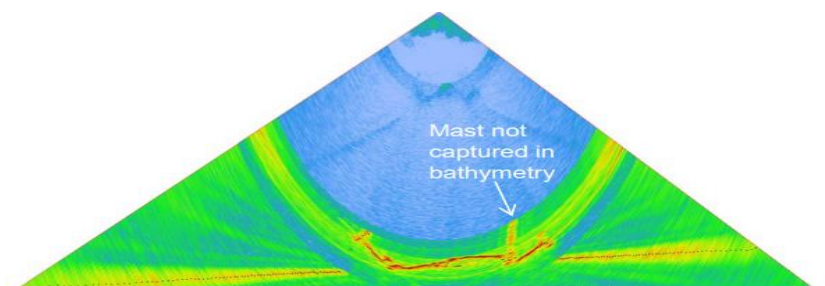
- **Piki ja külgekõikumise stabiliseerimine (*Pitch and roll stabilized beams*)** – Stabiliseerimine on sonari lehvikul juhtimine nii, et keskmine kiir oleks vertikaalselt alla suunatud, sõltumata laeva õõtsumisest.
- **Topeltandurid (*Dual head*)** – Sonari võime kasutada samaaegselt kahte andurit heliimpulsside väljastamiseks ja vastuvõtuks. Paigaldatakse paraleelselt eri

parrastele või laeva põhja alla teine teisele poole kiilu. Nende kiirelevikud võivad olla suunatud väljapoole, et suurendada mõõdistusriba laiust. Või olla suunatud sissepoole, et saada eriti tihe sügavuspunktide kogumik kiilu alla jäävast merepõhjast ja objektidest. Viimase juhu paremaks kasutamiseks võib sonari juhttarkvarasse olla sisse programmeeritud niinimetatud torurežiim, nimetus tuleb sellest, et seda režiimi kasutatakse tihti veealuste torude (ja muu taristu) seisundi kontrollimiseks.

- **Veesamba info salvestamise võimekus (*Water column data*)** – See võimaldab MBES-il salvestada paljusid peegeldusi ja seeläbi luua veesambas olevate objektide 3D-kujutisi (või näha põhja läbi näiteks taimestiku). Mõned tootjad toetavad isegi mitut sagedust koos veesamba andmetega, mis võimaldab tuvastada veelgi rohkem objekte.
- **Signaali tagasipeegeldumisinfo (*Backscatter*)** – Tagasipeegeldumine on põhjast tagasi peegeldunud signaali hulk. Sõltuvalt signaali tagasipeegeldava materjali (põhjapinnas, laevakere materjal) tüübist peegeldub tagasi suurem või vähem osa signaali energiast, mis võimaldab objekti ja põhja pinnase klassifitseerimist. Enamikul kaasaegsetel MBES-süsteemidel on võimalus vastu võtta tagasihajumise andmeid koos sügavuse teabega ja näidata SSS-i sarnast pilti. (*Focus on What Matters to You When Reviewing a Spec Sheet, 2022; Lekkerkerk, 2020*)

3.1.4 Veesamba info vajalikkus

Kaasaegsed mitmekiirelised sonarid suudavad lisaks merepõhja kaardistamisele salvestada ka iga kiire kõik tagasipeegeldumised, mida nimetatakse veesamba andmeteks. Mitmekiirelise batümeetria põhjatuvastusalgoritmid ei suuda tuvastada vraki masti, mis ilmneb mitmekiirelise veesamba andmetes. Mõned hüdrograafiaametid on alustanud vraki uurimise käigus mitmekiirelise veesamba salvestamist (vt. Joonis 4). Mitmekiirelise batümeetria ja veesamba väikseima sügavuse võrdlus seitsme NOAA juhtumiuuringu ja Troydoni kolme eraldi andmekogumi puhul on kokku võetud tabelis 1 (vt. Tabel 1) (Wyllie et al., 2015).



Joonis 4. Vraki masti avastamine kasutades veesamba info

Allikas (Wyllie et al., 2015)

Tabel 1. Mitmekiirelise batümeetria ja mitmekiirelise veesamba abil leitud vähima sügavuse võrdlus
Allikas (Wyllie et al., 2015)

Wreck ID	NOAA Vessel	Multibeam Sonar	Bathymetry Least depth (m)	Water Column Least Depth (m)	Difference (m)
<i>Troydon</i>	<i>Thomas Jefferson</i>	Reson 7125	28.96	28.74	0.22
<i>Troydon</i>	<i>Ferdinand Hassler</i>	Reson 7125	29.20	28.60	0.60
<i>Troydon</i>	<i>Henry Bigelow</i>	Simrad ME70	34.30	28.85	5.45
Women's Bay	<i>Fairweather</i>	Reson 7125	7.62	7.60	0.02
San Pedro	<i>Fairweather</i>	Reson 7125	20.97	20.83	0.14
Long Branch	<i>Ferdinand Hassler</i>	Reson 7125	24.95	24.77	0.18
Long Beach	<i>Fairweather</i>	Reson 7125	13.40	13.18	0.22
<i>Lady Cecilia</i>	<i>Rainier</i>	Kongsberg EM710	110.60	104.92	5.68
<i>Bow Mariner</i>	<i>Thomas Jefferson</i>	Reson 7125	36.60		4.85
	<i>Ferdinand Hassler</i>	Reson 7125		31.75	
<i>Montana</i>	NRT 4	Kongsberg EM3002	11.56		0.01
	<i>Storm</i>	Kongsberg 2040C		11.55	

3.1.5 Tagasipeegeldumisandmete täpsuse võrdlus Austraalias

2014. aastal avaldati artikkel, kus 2006. aasta aprilli lõpust kuni mai keskpaigani kogus andmeid Austraalia mereteaduste instituudi laev Cape Ferguson. Ühekiireliseks kajaloodiks oli valitud Simrad EQ60 sonar, mis töötas sagedustel 38 ja 200 kHz, lehviksonariks oli valitud Reson Seabat 8101 sonarisüsteemi, mis töötas sagedusel 240 kHz. Tagasipeegeldumise andmed klassifitseeriti olemas oleva klassifikatsiooni abil 3 klassi: rodoliit, liiv, segatud (vt Tabel 2). Tulemuste täpsust hinnati antud ala videosalvestistega võrdlemise teel. Selles uuringus leiti, lehviksonari poolt tagasihajumisest koostatud elupaiga kaart oli 90% täpne ja õhekiirelise kajaloodi poolt koostatud elupaiga kaart oli ligikaudu 80% ja 70% täpne vastavalt sagedustele 200 kHz ja 38 kHz. MBES poolt koostatud kaardil oli vale klassifikatsioon kõrgeim heterogeensete või piirialade vahel. SBES tagasihajumisest toodetud elupaigakaartide vale klassifikatsioon oli peamiselt tingitud interpolatsiooni vigadest. Ehkki tihedam reavahe oleks tõenäoliselt parandanud SBES tulemuste täpsust, näitavad erinevate klasside tagasihajumisandmete jaotused, et MBES andmed on paremini eristatavad kui SBES andmed.(Parnum et al., 2014).

Tabel 2. Klassifikatsiooni täpsuse kokkuvõte

Allikas (Parnum et al., 2014)

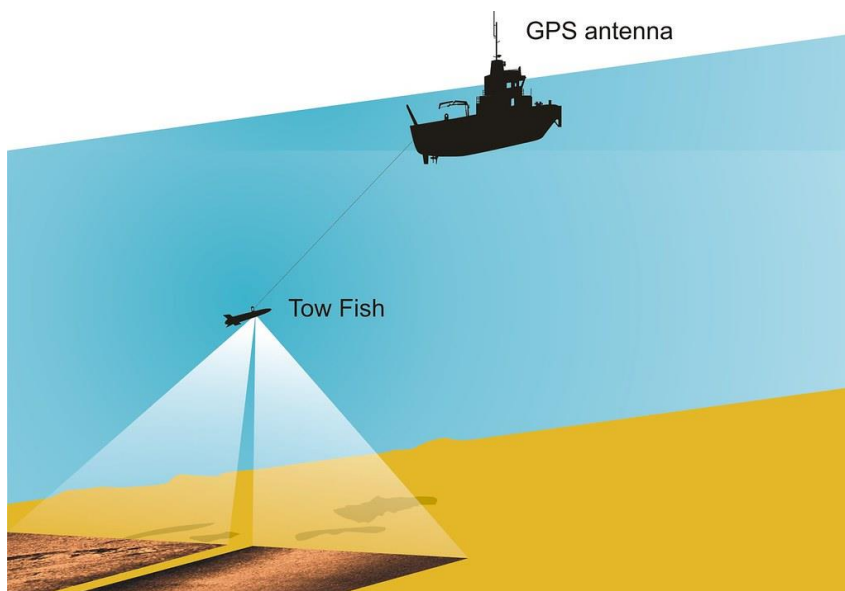
System	Classification accuracy (%)			
	Overall	User's		
		rhodolith	mixed	Sand
SBS 38kHz	69	68	82	57
SBS 200kHz	84	93	92	67
MBS 240kHz	91	93	80	100

3.1.6 Külgvaatesonar

Külgvaatesonar on aktiivsete sonarisüsteemide kategooriasse kuuluv seade, mida kasutatakse merepõhjas olevate objektide tuvastamiseks ja kaardistamiseks (Side-Scan Sonar, 2022). Külgvaatesonarid on suurema eraldusvõimega mitme otstarbelised seadmed, mida kasutatakse laialdaselt ookeanides, järvedes ja muudes veekogudes ning need on praegu ühed peamised seadmed veealuste objektide tuvastamiseks. Nad suudavad kiiresti saada ulatusliku pindala ja kõrge eraldusvõimega akustilisi kujutisi merepõhjust. Koos merepõhja kujutiste andmetega väikesest arvust proovivõtukohtadest saavad teadlased külgskaneerimisel tehtud sonaripiltide põhjal eristada merepõhja erinevaid objekte (Ge et al., 2021). Külgvaatesonar on seade, mis suudab vaadelda ja näidata kahemõõtmelisi pinnapilte merepõhja, topograafia ja sihtmärgi loenduri abil üheaegselt. See instrument suudab eristada merepõhja struktuuri väikeseid osakesi, nagu kivid, muda, liiv ja kruus. Seda sonarit kasutatakse mitmesuguste eesmärkide jaoks, nagu torujuhtmete ja merekaablite tuvastamine, madala merepõhja struktuuri tuvastamine, süvendustööde teostamine, keskkonnauuringud, sõjaajalugu, arheoloogia, kalandus ja kaevandus. (Lubis, 2017: 1).

Külgvaatesonaril on olemas kaks operatsiooni: pukseeritav ja kerele paigaldatav. Eelistatakse kasutada esimest operatsioonitüüpi, kuna teine toiming võib halvendada sonari tagasihajumise pildikvaliteeti mõõdistusprotsessis põhjustatud platvormi liikumiste tõttu. Pukseerimisel veetakse sonarit kaabli abil mõõdistuslaeva taga (vt. Joonis 5). Selline toiming võib minimeerida platvormi liikumise mõju sonari tagasihajumise kujutistele. Veelgi olulisem on see, et kuna sonar on merepõhja lähedal, saab seda kasutada süvamerepõhja vaatlemiseks (Shang et al., 2019: 1). Sonar salvestab

andmeid erinevatel helisagedustel, olenevalt uuringu eesmärkidest: madalam sagedus (50 kHz – 100 kHz) võib katta suuri merepõhja piirkondi madala kujutise eraldusvõimega. Kõrgema sagedusega impulsid (500 kHz- 1 MHz) salvestavad väiksemaid alasid, kuid palju detailsemalt (Side-Scan Sonar, 2022).



Joonis 5. Külgvaatesonar

Allikas (Side-Scan Sonar, 2022)

3.1.7 AUV

Põhimõtteliselt on autonoomsed allveesõidukid lihtsalt arvutiga juhitud süsteemid, mis töötavad mere all (vt. Joonis 6). Neid peetakse autonoomseteks, kuna neil puudub füüsiline side oma operaatoriga, kes võib olla kaldal või laeva pardal. Need on isejuhtivad ja iseliikuvad sõidukid. Alles lähiminekis nägid AUV-d välja ja töötasid nagu torpeedod: need olid pikad silindrid pidevas liikumises. Tehnoloogia arenedes on AUV-d muutunud keerukamaks, võttes kasutusele mitmeid uusi vorme ja funktsioone. Nüüd saavad AUV-d libiseda merepinnalt ookeani sügavustesse ja tagasi. Teised seadmed võivad vaid peatuda, hõljuda ja liikuda nagu helikopterid. Päikeseenergial töötavad AUV-d võivad veeta osa ajast veepinnal, muutes veealuste ja veepealsete aparatuuride erinevuse häguseks. (Crimmins & Manley, 2008).



Joonis 6. Autonoomne veelune sõiduk Fetch Karibi mere vetes

Allikas (*What Is an AUV?* , 2023)

Sõltuvalt nende eesmärgist ja kandevõimest, võivad AUV-d töötada väga erinevatel aegadega – ühed ainult mõned tunnid, teised mitme päeva kaupa. Nad kasutavad erinevat tüüpi akusid – mõned on isegi päikesepatareidel laetud, et toita erinevat tüüpi momente või tõukejõude. Enne veeskamist programmeeritakse need pinnal ja nad töötavad iseseisvalt, kuni uuring on lõpule viidud. Laeva pardal olevad insenerid määravad AUV pinnaletõusmise asukoha. Seejärel läheb meeskond tööpaadiga AUV juurde ja tõstab selle tagasi uurimislaeva pardale. Kui AUV on tagasi pardal, saavad insenerid ja teadlased laadida AUV andmed otse laeva pardal asuvasse arvutitesse. Andmed on algelised ja vajavad töötlemist, kuid neid saab kasutada nii kiiresti kui vaja. Uuringu lõpus programmeeritakse AUV tavaliselt pinnale tõusma (*Autonomous Underwater Vehicle* , 2023).

AUV-d saab varustada mitmesuguste anduritega, näiteks võib kasutada sõidukil olevat rõhuandurit, et välja selgitada AUV sügavus (vt. Tabel 3).

Tabel 3. AUV-de jaoks saadavad seadmed ja andurid

Allikas: (Hwang et al., 2019)

Marine Phenomena	Detection Parameter	Sensing Instruments
Thermocline, Internal waves, River plume	Temperature, Conductivity, Pressure	Conductivity, Temperature and Depth (CTD) sensor
Upwelling	Temperature, Salinity, Chlorophyll-a fluorescence	CTD sensor, Fluorometer, Backscatter sensor
Harmful algal bloom, Phytoplankton	Chlorophyll-a fluorescence	Fluorometer, Backscatter sensor, Fibre Optic Fluorometer, Optical plankton discriminator
Chemical plume, Produced water	Salinity, Turbidity, Dissolved O ₂ concentration	CTD sensor, Wet chemical analyser, Mass spectrometer (MS)
Hydrothermal vent plume	Temperature, Particle contents, Current velocity, Bathymetry, Chemical components.	CTD sensor, Optical sensors, eH (redox potential), ADCP, Side scan sonar (SSS), Multibeam sonar
Hydrocarbon plume	Salinity, Turbidity, Dissolved O ₂ and CO ₂ , CDOM fluorescence, Particle size, Polycyclic aromatic hydrocarbons	Optical light scatter, CDOM fluorometer (CF), Electro chemical sensor, Mass spectrometer (MS), Laser in-situ scattering and transmissometry (LISST) sensor, Fibre optic chemical sensor (FOCs)

Tabel 3 põhjal saab järeldada, et AUV-sid saab varustada mitmesuguste anduritega, näiteks võib kasutada sõidukil olevat rõhuandurit, et välja selgitada AUV sügavus. Video- või fotokaamerad, sonar, magnetomeetrid, lahustunud hapniku andurid, juhtivuse, temperatuuri ja sügavuse andurid (CTD), pH-andurid ja hägususandurid (sette kontsentratsioon) võivad kõik kuuluda andurite komplekti. Kuna raadiolained ei saa liikuda läbi vee, on AUV-d võimelised merepinnal olles GPS-signaali hankima. (Tillin et al., 2018)

3.1.8 ROV

Neid veealuseid masinaid juhib inimene, kes on tavaliselt pinnapeal. Kaablite rühm ehk lõõg ühendab ROV-i laevaga, saates operaatori ja sõiduki vahel elektrilisi signaale edasi-tagasi. Enamik ROV-iseid on varustatud vähemalt fotokaamera, videokaamera ja tuledega, mis tähendab, et nad saavad pilte ja videoid laevale tagasi saata. Sõidukitele võib proovide võtmiseks lisada ka lisaseadmeid, nagu manipulaator või lõikevars, veeproovid ja seadmed, mis mõõdavad selliseid parameetreid nagu vee selgus ja temperatuur. Algselt tööstuslikuks otstarbeks, näiteks veealuste torujuhtmete sise- ja väliskontrolliks ning avamereplatvormide konstruktsiooni testimiseks välja töötatud ROV-e rakendatakse nüüd paljudes valdkondades, millest suurem osa on teaduslikud. Need on osutunud ookeanide uurimisel äärmiselt väärtuslikuks ning neid kasutatakse ka akvaariumi

haridusprogrammide jaoks ja teadusekspeditsioonide loomiseks Interneti kaudu. (*What Is an ROV?*, 2022).

ROV-ide suurus võib varieeruda, ulatudes kingakarbist kuni suure kaubikuni, olenevalt missiooni tüübist, mida nad täitma peavad (vt. Joonis 7). Inimest, kes juhib ROV-d, nimetatakse piloodiks. Juhtpilot on alati olemas, kuid kui on vaja käega manipuleerida, aitab kaaspilot. Kaaspilot hoiab silma peal ka sõiduki asukohal. Samuti on mitu teadlast, kes istuvad koos pilootidega mitme ekraaniga kontrollruumis. Nad teevad märkmeid, et täiendada salvestatud andmeid ja filmimaterjali, vaadata videovoogu ja teha otsuseid, sealhulgas liikumissuund ja näidisproovid. Enne ja pärast iga sukeldumist kontrollitakse ROV-i süsteeme põhjalikult ja hooldatakse. (*ROV FAQs*, 2023).



Joonis 7. ROV platvorm

Allikas (*ROV FAQs*, 2023)

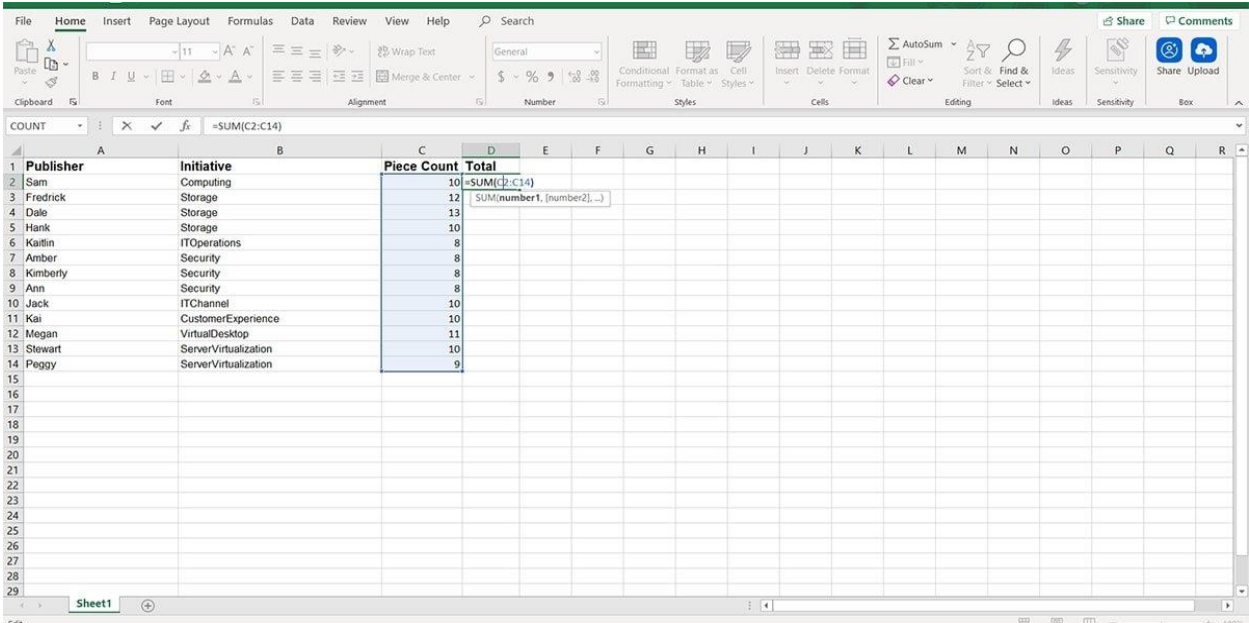
4 Seadmete hinnang vrakkide leidmiseks

4.1 Andmete kogumine ning töötlemine

Esimese etapi realiseerimiseks vajalikud andmed on saadud nii Transpordiametist kui ka avalikest allikatest. Andmete töötlemine toimub Microsoft Excel 2023 tarkvaraga.

4.1.1 MS Excel 2023

MS Excel on kommertslik tabelarvutusprogramm, mida toodab ja levitab Microsoft Mac OS ja Microsoft Windows operatsioonisüsteemidele. See programm võimaldab teha põhilisi arvutusi, kasutada graafilisi vahendeid, luua pöördtabeleid ja makrosid. (What Is Microsoft Excel?, 2020). MS Excelit kasutatakse näiteks ärianalüüsis, personalijuhtimises, tegevuste juhtimises ja tulemuslikkuse aruandluses. Programm kasutab andmete organiseerimiseks ja manipuleerimiseks ning matemaatiliste funktsioonide lahendamiseks vormindatud lahtrite kogumikku (vt. Joonis 8). (Gillis, 2021).



The screenshot shows the Microsoft Excel 2023 interface. The ribbon is set to 'Home'. The active cell is D2, containing the formula `=SUM(C2:C14)`. The data table is as follows:

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
1	Publisher	Initiative	Piece Count	Total														
2	Sam	Computing	10	<code>=SUM(C2:C14)</code>														
3	Fredrick	Storage	12	<code>SUM(number1, [number2], ...)</code>														
4	Dale	Storage	13															
5	Hank	Storage	10															
6	Kaitlin	ITOperations	8															
7	Amber	Security	8															
8	Kimberly	Security	8															
9	Aim	Security	8															
10	Jack	ITChannel	10															
11	Kai	CustomerExperience	10															
12	Megan	VirtualDesktop	11															
13	Stewart	ServerVirtualization	10															
14	Peggy	ServerVirtualization	9															
15																		
16																		
17																		
18																		
19																		
20																		
21																		
22																		
23																		
24																		
25																		
26																		
27																		
28																		
29																		

Joonis 8. MS Exceli põhifunktsioonid ja tööruum

Allikas (Gillis, 2021).

4.2 Mitmekiireliste kajaloodide võrdlevad analüüsid

Antud lõputöö raames mitmekiirelisi kajaloode võrdlevate analüüside koostamiseks on vaja teada peamisi mõjutavaid tegureid: laeva kiirus, sonarite lehviku laius, sügavus, kiirte hulk, helikiirus. Teades neid tegureid, on võimalik arvutada, kui palju sügavuspunkte on 1 m² kohta merepõhjal erinevatel sügavustel. Antud töö raames on kasutatud 4 erinevat sonarit: Reson SeaBat T-50R, R2Sonic 2022, Baywei M5, Norbit Winghead i80s.

4.2.1 Reson SeaBat T-50R

Esimene sonar, mis on valitud analüüsimise jaoks, on Reson SeaBat T-50R (vt. Joonis 9). See sonar on SeaBat T tootesarjast. Sonari tehnilised parameetrid on kirjeldatud tabelis 2. (vt. Tabel 4). Reson SeaBat T-50R ligikaudne hind on 165 000 eurot.



Joonis 9. Mitmekiireline kajalood Reson SeaBat T-50R

Allikas (*SeaBat T50-R*, 2022).

Tabel 4. Reson SeaBat T50-R tehnilised näitajad

Allikas (SeaBat T50-R, 2022).

Reson SeaBat T50-R		
Maksimaalne ping rate	50	
Kiirte hulk	10 - 1024	
Lehviku nurga reguleerimise võimalused	10°-150° võrdne kaugus, 10°-165° võrdne nurk	
Signaali kandevasagedused	190 - 420 kHz	
Duubelandurid	Jah	
Veesamba info	Jah	
Signaali tagasipeegeldumisinfo	Jah	
Maksimaalne töösügavus	Standardne projektor (TC2181) - 575 m	Suurendatud sügavusega projektor (TC2187) - 900 m
Kiire laius ristsuunas ja liikumissuunas	0.5° x 1° - 400kHz 1° x 2° - 200kHz	0.5° x 0.5° - 400kHz 1° x 1° - 200kHz
Töötemperatuur	-5°C kuni +45°C	

SeaBat T50-R kombineerituna väga kompaktses *Rack-mounted Sonar Processoriga (RSP)* toodab sonar puhtaid andmeid. Sonaril on olemas valikulised lisafunktsioonid:

- Teledyne Reson helikiiruse sondid;
- liikumis- ja positsioneerimisandurid;
- kiire paigaldamine igat tüüpi mõõdistuslaevadele;
- väike ruumivajadus (SeaBat T50-R, 2020; SeaBat T50-R, 2022b).

4.2.2 R2Sonic 2022

Teiseks sonariks, mille kohta viidi läbi võrdlev analüüs on mitmekiireline kajalood R2Sonic 2022 (vt. Joonis 10). R2Sonic 2022 mitmekiirelise kajaloodi tehnilised parameetrid on näidatud tabelis 3. Mitmekiirelise kajaloodi ligikaudne hind on 120 000 eurot. (vt. Tabel 5).



Joonis 10. Mitmekiireline kajalood R2Sonic 2022

Allikas (Sonic 2022, 2023).

Tabel 5. R2Sonic 2022 tehnilised näitajad

R2Sonic 2022		
Maksimaalne <i>ping rate</i>	60	
Kiirte hulk	10 - 1024	
Lehviku nurga reguleerimise võimalused	10°-160°	
Signaali kandevsagedused	170 - 450 kHz (700 kHz valikuline)	
Duubelandurid	Jah	
Veesamba info	Jah	
Signaali tagasipeegeldumisinfo	Jah	
Maksimaalne töösügavus	400 m	Sukeldumise võimalused - 4000 m

Kiire laius ristsuunas ja liikumissuunas	0.6° x 0.6° - 700kHz (valikuline); 0.9° x 0.9° - 450kHz; 2° x 2° - 200kHz
Töötemperatuur	-10°C - 50°C

See mitmekiireline kajalood töötab koos mitme tarkvaraga, näiteks *HYPACK*, *Quinsy*, *SonarWiz 7*, *Fledermaus GeoCoder*. Sonaril olemas olevad muud omadused:

- Torustikurežiim: 2 sagedust, mis nõuab UHR (700 kHz);
- Helikiiruse andurid
- Väike energiatarve
- olemas I2NS™ (integreeritud inertsiaalne navigatsioonisüsteem). Saadaval on 3 tüüpi, mis tagavad erineva täpsuse pööramise/kalde ja suuna osas (Multibeam Echosounder Specifications, 2020: 1).

4.2.3 Baywei M5

Baywei M5 mitmekiireline kajalood on tiptasemel seade, mis pakub kvaliteetset veevalust pildistamist koos täpsete sügavusmõõtmistega. (vt. Joonis 11). (Baywei, 2023).



Joonis 11. Mitmekiireline kajalood Baywei M5

Allikas (Bathymetry Survey Sonar – M5, 2023)

Baywei M5 on väga mitmekülgne ja kõrge eraldusvõimega mitmekiireline kajalood, mida on ka äärmiselt lihtne kasutada ja paigaldada. Tihedalt ühendatud GNSS INS muudab selle integreerimise hõlpsaks isegi üliväikestele sõidukitele ja väga kiiresti mobiliseeritavaks. See mitmekiireline kajalood töötab koos mitme tarkvaraga, näiteks *Qinsy*, *HYPACK*, *EIVA* ning teistega. Sonaril puuduvad võimalused veesamba ja tagasipeegeldumis infot kätte saada. Baywei M5 ligikaudne hind on 70 000 eurot. (vt. Tabel 6) (Bathymetry Survey Sonar – M5, 2023).

Tabel 6. Baywei M5 tehnilised näitajad

Allikas (*M5 Integrated Multibeam Sonar*, 2021)

Baywei M5	
Maksimaalne <i>ping rate</i>	50
Kiirte hulk	256
Lehviku nurga reguleerimise võimalused	0 - 130°
Signaali kandevsagedused	400 - 550 kHz
Duubelandurid	Ei
Veesamba info	Ei
Signaali tagasipeegeldumisinfo	Ei
Maksimaalne töösügavus	200 m ja sukeldumise võimalused - 100 m
Kiire laius	1.45° x 1.0°
Töötemperatuur	Puudub informatsioon

4.2.4 Norbit Winghead i80s

Norbit Winghead i80S on kompaktne ülikõrge eraldusvõimega mitmekiireline sonar, mis on loodud kasutamiseks kõige nõudlikumates töökeskkondades. Norbit Winghead i80s ligikaudne hind on vahemikus 55 000 – 200 000 eurot, see sõltub mudelist ning sonari võimalustest (vt. Joonis 12) (vt. Tabel 7).



Joonis 12. Mitmekiireline kajalood Norbit Winghead i80s

Allikas (*NORBIT Subsea WINGHEAD I80S*, 2022).

Tabel 7. Norbit Winghead i80s tehnilised näitajad

Allikas (Norbit Winghead I80S, 2022).

Norbit Winghead i80s	
Maksimaalne <i>ping rate</i>	60
Kiirte hulk	(256, 512, 1024) (2048 - valikuline)
Lehvi nurga reguleerimise võimalused	5 - 210° (Madalas vees IHO SPECIAL klass >155°)
Signaali kande sagedused	200 - 700 kHz (Nominaalne sagedus 400 kHz)
Duubelandurid	Jah
Veesamba info	Jah
Signaali tagasipeegeldumisinfo	Jah
Maksimaalne töösügavus	0.2 m kuni >300 m
Kiire laius ristsuunas ja liikumissuunas	STANDARD: 0.5° X 0.9° - 400kHz, 0.3°x 0.5° - 700kHz
Töötemperatuur	- 4°C to +40°C

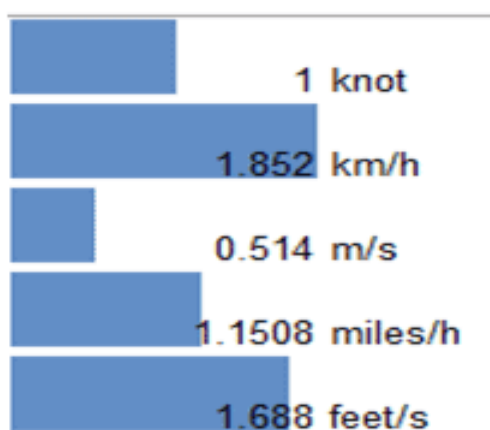
Norbit Winghead i80s sonaril on olemas muid lisafunktsioone:

- Torustiku režiim
- Võimalus kasutada 2048 kiirt
- See mitmekiireline kajalood töötab koos mitme tarkvaraga, näiteks: *NORBIT DCT*, *HYPACK*, *Qinsy*, *EIVA*, *CARIS*, *beamworX* jt.

4.2.5 Laeva kiiruste valimine

Laeva kiirust tuleb hinnata vastavalt eeldatavale sügavusvahemikule uuringupiirkonnas ja kasutatavale sonari tüübile. Andmete kogumise ajal tuleb arvestada laevade kiirust ühel põhjusel. Andurid, mis on paigaldatud ahtripeedlile võivad kiirema kiiruse korral anduri ümber tekkiva suurema turbulentsi tõttu välja lülituda. Kui vähendada laeva kiirust, vähendatakse sügavussignaalide kadumist (Levec & Skinner, 2004: 18).

Võrdlusanalüüsis on kasutatud laevade kiirusi vahemikus 2-20 sõlme, et muuta võrdlustulemused täpsemaks ja ulatuslikumaks. Edasiste arvutuste tegemiseks teisendatakse mõõtühikud (vt. Joonis 123). Sõlmede teisendamiseks on vaja sõlmed korrutada 1,852 km/h ning selleks, et km/h teisendada m/s on vaja korrutada km/h 1000 meetriga ning jagada 3600 sekundiga. Tulemuseks on koostatud uus tabel, mis näitab laeva kiirust erinevates mõõtühikutes (vt. Tabel 8).



Joonis 13. Üks sõlm teistes mõõtühikutes

Allikas (Why Is Airspeed Measured In Knots? Why Airplanes Use Knots!, 2023).

Tabel 8. Laeva kiirused erinevates mõõtühikutes

Laeva kiirus											
Sõlme		2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
km/h		3.704	7.408	11.112	14.816	18.520	22.224	25.928	29.632	33.336	37.040
m/s		1.03	2.06	3.09	4.12	5.14	6.17	7.20	8.23	9.26	10.29

4.2.6 Maksimaalne võimalik töösagedus mitmekiirelisel kajaloodil

Enamikel mitmekiirelistel kajaloodidel on tegelik maksimaalne töösagedus, ehk pingide väljastamise sagedus, on piiratud 50 kuni 60 pingi sekundis vahemikus. Arvestades, et sonari maksimaalne töösagedus (*ping rate*) 50-60 pingi sekundis ainult madalas vees sügavuse suurenedes töösagedus väheneb, kuna helisignaali peab põhjani ja tagasi jõudma. Enne järgmise signaali välja saatmist peab sonar ära ootama kuni ka kõige pikema teekonna läbinud helisignaali on tagasi jõudnud. Selleks on vaja arvutada äärmise kaldkiire teekonna pikkust. Trigonomeetriline valem: kus on teada täisnurkse kolmnurga kaatet ehk sügavus ning selle kaateti ja hüpotenuusi vaheline nurk, ja on vaja leida hüpotenuusi mis on kaldkiire teekonna pikkus, tuleb välja valem 1.

Kaldkiire pikkus otsitakse valem 1 abil:

$$\text{Valem kaldkiire pikkus} = \frac{\text{Sügavus}}{\cos(\text{lehviku laius} \div 2)} \quad (1)$$

Maksimaalne võimalik töösagedus ehk *ping rate* leitakse valem 2 abil:

$$\text{Valem Maksimaalne võimalik töösagedus} = \frac{1}{(2 * \text{kiireteekonna pikkus}) \div \text{helikiirus}} \quad (2)$$

Sonari töösagedus sekundis sõltub sellest mitu korda jõuab helisignaali sekundi jooksul põhjani ja tagasi. See aeg sõltub ainult helikiirusest ja kiireteekonna pikkusest. Antud töö puhul kasutab autor helikiiruse vees väärtuse 1450 m/s, see on keskmine väärtus Läänemeres suvel ning lihtsuse huvides piirdub autor Läänemere sügavustega. Mida suurem sügavus, seda väiksem on tegelik maksimaalne mitmekiirelise kajaloodi töösagedus. Kui maksimaalne võimalik teoreetiline *ping rate* ületab mitmekiirelise kajaloodi enda maksimaalse *ping rate* i, sellel juhul kasutas autor edaspidistes arvutustes mitmekiirelise kajaloodi tegelikku maksimaalset *ping rate* i, mitte arvutatud maksimaalset *ping rate* i.

4.2.7 Punktide vahe arvutus liikumissuunas

Teades, millise vahemaa tagant sonari järgmine signaal merepõhja jõuab, sõltuvalt laeva liikumise kiirusest ja töösagedusest, saab hinnata mitu sügavuspunkti 1 m² kohta mahub laeva liikumissuunas. Punktide vahe liikumissuunas leitakse valemi 3 abil:

$$\text{Valem Punktide vahe liikumissuunas} = \frac{\text{Laeva ühes sekundis läbitud teekonna pikkus}}{\text{ping rate}} \quad (3)$$

Lõpptulemuseks on järgmine tabel (vt. Tabel 9).

Tabel 9. Punktide vahe liikumissuunas erinevatel laeva kiirustel ning erinevatega töösagedusega ehk ping rate

Laeva kiirus		2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
Sõlme											
km/h		3.704	7.408	11.112	14.816	18.520	22.224	25.928	29.632	33.336	37.040
m/s		1.03	2.06	3.09	4.12	5.14	6.17	7.20	8.23	9.26	10.29
punktide vahe liikumissuunas m, ping rate 60 Hz		0.02	0.03	0.05	0.07	0.09	0.10	0.12	0.14	0.15	0.17
punktide vahe liikumissuunas m, ping rate 50 Hz		0.02	0.04	0.06	0.08	0.10	0.12	0.14	0.16	0.19	0.21
punktide vahe liikumissuunas m, ping rate 25 Hz		0.04	0.08	0.12	0.16	0.21	0.25	0.29	0.33	0.37	0.41
punktide vahe liikumissuunas m, ping rate 10 Hz		0.10	0.21	0.31	0.41	0.51	0.62	0.72	0.82	0.93	1.03
punktide vahe liikumissuunas m, ping rate 5 Hz		0.21	0.41	0.62	0.82	1.03	1.23	1.44	1.65	1.85	2.06
punktide vahe liikumissuunas m, ping rate 2 Hz		0.51	1.03	1.54	2.06	2.57	3.09	3.60	4.12	4.63	5.14

Tabelis 9 on välja toodud erinevad laeva kiirused vahemikul 2 kuni 20 sõlme. Samal ajal on olemas erinevad sonarite töösagedused ehk *ping rate* vahemikul 2 kuni 60 Hz. Tabelis 7 on näha, et mida madalam on laeva kiirus ning suurem on mitmekiirelise kajaloodi *ping rate*, seda tihedam tuleb punktide vahe liikumissuunas. See tähendab, et tulemuseks on tihedam punktipilv, mis annab paremat pilti mõõdistustöö ajal. Lõplik andmetihedus määratakse kindlaks kiirte arvu ja töösageduse järgi.

4.2.8 Punktide vahe arvutus ristsuunas

Mitmekiirelistel kajaloodidel on 2 töörežiimi: *equiangular* (EA) ning *equidistant* (ED). Reson pakub mitmekiireliste kajaloodide SeaBatrange'is nii võrdnurkseid (EA) kui ka võrdse kaugusega (ED) kiirte režiime. EA-režiimis on kiire naaberkiirte nurkade vahe kogu mõõdistusriba laiuses konstantne ja ED-režiimis muudetakse kiirtevahelisi nurki nii,

et säilitada merepõhjas olevate sügavuspunktide vahel võrdne horisontaalne traaversi suunaline vahemaa, eeldades, et põhi on tasane. Seda režiimi soovitatakse kasutada üldistes mõõdistustöödel, kus on kriitiline nõue saavutada konkreetne sondeerimisarv lahtri kohta ristlõikes või kui merepõhi on üldiselt tasane. Märkimisväärse reljeefiga piirkondades ja eriti selliste objektide mõõdistamisel nagu vrakkide ja vertikaalsete konstruktsioonide (nt sadamaseinad) puhul tuleks ED-režiimi asemel eelistada EA-režiimi (*Reson SeaBat 7125 ROV Operator'S Manual*, 2011).

Arvutamise lihtsustamiseks, eeldatakse et mitmekiireline kajalood töötab ED režiimis.

Punktide vahe rist-suunas arvutamiseks, on vaja teada ribalaius ning mitmekiirelise kajaloodi kiirte arvu; nende andmetega saab hinnata mitu sügavuspunkti mahub 1 m² sisse.

Ribalaius leitakse valemi 4 abil:

$$\text{Valem } Ribalaius = 2 \times \text{sügavus} \times \tan\left(\frac{\text{lehviku laius}}{2}\right) \quad (4)$$

Punktide vahe rist-suunas otsitakse valemi 5 abil:

$$\text{Valem } \text{Punktide vahe rist-suunas} = \frac{Ribalaius}{\text{Sügavuspunktide arv} - 1} \quad (5)$$

Tabeli 8 koostamisel kasutati Reson T50-R lehviku laiust 120 kraadi ning kiirtehulk oli 256. Tabeli 8 põhjal saab järeldada, et mida suurem on sügavus, seda suurem punktide vahe rist-suunas, seega kui mõõdistustööd tehakse suurematel sügavustel (100 meetrit ja rohkem), peab kiirtehulk olema suurem.

4.2.9 Punktide arvu arvutamine 1 m² suuruses alas

Vrakid võivad olla väga erinevad ning nende kindlaks tuvastamiseks on vaja soovitatavalt 5 – 6 sügavuspunkti 1 m² kohta. Suurematel sügavustel kipub mitmekiireliste kajaloodide puhul tulema üsna vähe punkte, selle tõttu tõmmatakse vrakkide avastamiseks uus väiksem piir – 3 punkti 1 m² kohta. Samal ajal eeldatakse, et mitmekiirelise kajaloodiga mõõdistuse protsessis tekib ülekate, mis on 50% ehk kahekordne. Ülekate tähendab, et mingi osa mitmekiirelise kajaloodi tekitatud ribast merepõhjas katab eelmise mõõdistusliiniga kaetud riba ning kui see kaetus on 50%, siis piltlikult mõõdistatakse põhi

üle kahekordselt. Sel juhul on võimalus objekte leida 2 korda suurem ja seega piirid on vähendatud veel vähemaks – 2 punkti 1 m² kohta.

Punktide arvu arvutamiseks 1 m² kohta suuruses alas on vaja teada laeva kiirus, sonari lehviku laius, sügavus, kiirte hulk, helikiirus, punktide vahe ristsuunas ning mitmekiirelise kajaloodi maksimaalne tegelik töösagedus ehk *ping rate*, selleks kasutatakse valem 6:

$$\text{Valem Sügavuspunktide arv} = \left(\frac{1}{\text{punktide vahe ristsuunas}} + 1 \right) \times \left(\frac{\text{tegelik ping rate}}{\text{laeva kiirus}} \right) \quad (6)$$

Kasutades valemit 6 võib arvutada kui palju mahub sügavuspunkte 1m² kohta, selle järgi saab vaadata kas sügavuspunktide arv 1m² kohta on piisav vrakkide tuvastamiseks erinevatel sügavustel, erinevate kanalite režiimides.

4.2.10 Mitmekiireliste kajaloodide võrdlus 120 kraadise lehviku laiuse korral

Tabel 10. Reson T50-R sügavuspunktide arv 1 m² (256 kanaleid ning lehviku laius 120 kraadi)

kanaleid 256			Punktide arv m ² suuruses alas, lehviku laius 120 kraadi (RESON T-50R alusel)												Max võimalik ping rate, helikiirus 1450 m/s	Tegelik max ping rate, helikiirus 1450 m/s	Ribalaius
2	4.00	0.03	1837	919	612	459	367	306	262	230	204	184	181.25	50	6.93		
5	10.00	0.07	1100	550	367	275	220	183	157	138	122	110	72.50	72	17.32		
10	20.00	0.14	293	146	98	73	59	49	42	37	33	29	36.25	36	34.64		
20	40.00	0.27	82	41	27	20	16	14	12	10	9	8	18.13	18	69.28		
30	60.00	0.41	40	20	13	10	8	7	6	5	4	4	12.08	12	103.92		
40	80.00	0.54	25	12	8	6	5	4	4	3	3	2	9.06	9	138.56		
50	100.00	0.68	17	8	6	4	3	3	2	2	2	2	7.25	7	173.21		
60	120.00	0.82	13	6	4	3	3	2	2	2	1	1	6.04	6	207.85		
70	140.00	0.95	10	5	3	2	2	2	1	1	1	1	5.18	5	242.49		
80	160.00	1.09	7	4	2	2	1	1	1	1	1	1	4.53	4	277.13		
90	180.00	1.22	7	4	2	2	1	1	1	1	1	1	4.03	4	311.77		
100	200.00	1.36	5	3	2	1	1	1	1	1	1	1	3.63	3	346.41		
110	220.00	1.49	5	2	2	1	1	1	1	1	1	1	3.30	3	381.05		
120	240.00	1.63	5	2	2	1	1	1	1	1	1	0	3.02	3	415.69		
130	260.00	1.77	3	2	1	1	1	1	0	0	0	0	2.79	2	450.33		
140	280.00	1.90	3	1	1	1	1	0	0	0	0	0	2.59	2	484.97		
150	300.00	2.04	3	1	1	1	0	0	0	0	0	0	2.42	2	519.62		
160	320.00	2.17	3	1	1	1	0	0	0	0	0	0	2.27	2	554.26		
170	340.00	2.31	3	1	1	1	0	0	0	0	0	0	2.13	2	588.90		
180	360.00	2.45	3	1	1	1	0	0	0	0	0	0	2.01	2	623.54		
190	380.00	2.58	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1.91	1	658.18		
200	400.00	2.72	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1.81	1	692.82		
210	420.00	2.85	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1.73	1	727.46		
220	440.00	2.99	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1.65	1	762.10		
230	460.00	3.12	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1.58	1	796.74		
240	480.00	3.26	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1.51	1	831.38		
250	500.00	3.40	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1.45	1	866.03		
260	520.00	3.53	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1.39	1	900.67		
270	540.00	3.67	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1.34	1	935.31		
280	560.00	3.80	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1.29	1	969.95		
290	580.00	3.94	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1.25	1	1004.59		
300	600.00	4.08	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1.21	1	1039.23		

Tabel 11. R2Sonic 2022 sügavuspunktide arv 1 m² (256 kanaleid ning lehviku laius 120 kraadi)

Sügavus (m)	Kalkiire pikkus	punktide vahe ristruunas m	1 m ² suuruse ala punktide hulk, lehviku laius 120 kraadi (R2Sonic 2022 alusel)										Max võimalik ping rate, helikiirus 1450 m/s	Tegelik max ping rate, helikiirus 1450 m/s	Ribalauis		
			1,03 m/s	2,06 m/s	3,09 m/s	4,12 m/s	5,14 m/s	6,17 m/s	7,20 m/s	8,23 m/s	9,26 m/s	10,29 m/s					
kanaleid 256																	
2	4.00	0.03	2205	1102	735	551	441	367	315	276	245	220	181.25	60	6.93		
5	10.00	0.07	917	458	306	229	183	153	131	115	102	92	72.50	60	17.32		
10	20.00	0.14	293	146	98	73	59	49	42	37	33	29	36.25	36	34.64		
20	40.00	0.27	82	41	27	20	16	14	12	10	9	8	18.13	18	69.28		
30	60.00	0.41	40	20	13	10	8	7	6	5	4	4	12.08	12	103.92		
40	80.00	0.54	25	12	8	6	5	4	4	3	3	2	9.06	9	138.56		
50	100.00	0.68	17	8	6	4	3	3	2	2	2	2	7.25	7	173.21		
60	120.00	0.82	13	6	4	3	3	2	2	2	2	1	6.04	6	207.85		
70	140.00	0.95	10	5	3	2	2	2	1	1	1	1	5.18	5	242.49		
80	160.00	1.09	7	4	2	2	1	1	1	1	1	1	4.53	4	277.13		
90	180.00	1.22	7	4	2	2	1	1	1	1	1	1	4.03	4	311.77		
100	200.00	1.36	5	3	2	1	1	1	1	1	1	1	3.63	3	346.41		
110	220.00	1.49	5	2	2	1	1	1	1	1	1	0	3.30	3	381.05		
120	240.00	1.63	5	2	2	1	1	1	1	1	1	0	3.02	3	415.69		
130	260.00	1.77	3	2	1	1	1	1	0	0	0	0	2.79	2	450.33		
140	280.00	1.90	3	1	1	1	1	0	0	0	0	0	2.59	2	484.97		
150	300.00	2.04	3	1	1	1	1	0	0	0	0	0	2.42	2	519.62		
160	320.00	2.17	3	1	1	1	1	0	0	0	0	0	2.27	2	554.26		
170	340.00	2.31	3	1	1	1	1	0	0	0	0	0	2.13	2	588.90		
180	360.00	2.45	3	1	1	1	1	0	0	0	0	0	2.01	2	623.54		
190	380.00	2.58	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1.91	1	658.18		
200	400.00	2.72	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1.81	1	692.82		
210	420.00	2.85	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1.73	1	727.46		
220	440.00	2.99	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1.65	1	762.10		
230	460.00	3.12	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1.58	1	796.74		
240	480.00	3.26	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1.51	1	831.38		
250	500.00	3.40	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1.45	1	866.03		
260	520.00	3.53	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1.39	1	900.67		
270	540.00	3.67	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1.34	1	935.31		
280	560.00	3.80	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1.29	1	969.95		
290	580.00	3.94	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1.25	1	1004.59		
300	600.00	4.08	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1.21	1	1039.23		

Tabel 12. Baywei M5 sügavuspunktide arv 1 m² (256 kanaleid ning lehviku laius 120 kraadi)

Sügavus (m)	Kalkiire pikkus	punktide vahe ristruunas m	1 m ² suuruse ala punktide hulk, lehviku laius 120 kraadi (Baywei M5)										Max võimalik ping rate, helikiirus 1450 m/s	Tegelik max ping rate, helikiirus 1450 m/s	Ribalauis	
			1,03 m/s	2,06 m/s	3,09 m/s	4,12 m/s	5,14 m/s	6,17 m/s	7,20 m/s	8,23 m/s	9,26 m/s	10,29 m/s				
kanaleid 256																
2	4.00	0.03	1837	919	612	459	367	306	262	230	204	184	181.25	50	6.93	
5	10.00	0.07	764	382	255	191	153	127	109	96	85	76	72.50	50	17.32	
10	20.00	0.14	293	146	98	73	59	49	42	37	33	29	36.25	36	34.64	
20	40.00	0.27	82	41	27	20	16	14	12	10	9	8	18.13	18	69.28	
30	60.00	0.41	40	20	13	10	8	7	6	5	4	4	12.08	12	103.92	
40	80.00	0.54	25	12	8	6	5	4	4	3	3	2	9.06	9	138.56	
50	100.00	0.68	17	8	6	4	3	3	2	2	2	2	7.25	7	173.21	
60	120.00	0.82	13	6	4	3	3	2	2	2	1	1	6.04	6	207.85	
70	140.00	0.95	10	5	3	2	2	2	1	1	1	1	5.18	5	242.49	
80	160.00	1.09	7	4	2	2	1	1	1	1	1	1	4.53	4	277.13	
90	180.00	1.22	7	4	2	2	1	1	1	1	1	1	4.03	4	311.77	
100	200.00	1.36	5	3	2	1	1	1	1	1	1	1	3.63	3	346.41	
110	220.00	1.49	5	2	2	1	1	1	1	1	1	0	3.30	3	381.05	
120	240.00	1.63	5	2	2	1	1	1	1	1	1	0	3.02	3	415.69	
130	260.00	1.77	3	2	1	1	1	1	0	0	0	0	2.79	2	450.33	
140	280.00	1.90	3	1	1	1	1	0	0	0	0	0	2.59	2	484.97	
150	300.00	2.04	3	1	1	1	1	0	0	0	0	0	2.42	2	519.62	
160	320.00	2.17	3	1	1	1	1	0	0	0	0	0	2.27	2	554.26	
170	340.00	2.31	3	1	1	1	1	0	0	0	0	0	2.13	2	588.90	
180	360.00	2.45	3	1	1	1	1	0	0	0	0	0	2.01	2	623.54	
190	380.00	2.58	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1.91	1	658.18	
200	400.00	2.72	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1.81	1	692.82	

Tabel 13. Norbit Winghead i80s sügavuspunktide arv 1 m² (256 kanaleid ning lehviku laius 120 kraadi)

Sügavus (m)	Kalkiire pikkus	punktide vahe ristruunas m	1 m ² suuruse ala punktide hulk, lehviku laius 120 kraadi (Norbit Winghead i80s alusel)										Max võimalik ping rate, helikiirus 1450 m/s	Tegelik max ping rate, helikiirus 1450 m/s	Ribalauis (m)	
			1,03 m/s	2,06 m/s	3,09 m/s	4,12 m/s	5,14 m/s	6,17 m/s	7,20 m/s	8,23 m/s	9,26 m/s	10,29 m/s				
kanaleid 256																
2	4.00	0.03	2205	1102	735	551	441	367	315	276	245	220	181.25	60	6.93	
5	10.00	0.07	917	458	306	229	183	153	131	115	102	92	72.50	60	17.32	
10	20.00	0.14	293	146	98	73	59	49	42	37	33	29	36.25	36	34.64	
20	40.00	0.27	82	41	27	20	16	14	12	10	9	8	18.13	18	69.28	
30	60.00	0.41	40	20	13	10	8	7	6	5	4	4	12.08	12	103.92	
40	80.00	0.54	25	12	8	6	5	4	4	3	3	2	9.06	9	138.56	
50	100.00	0.68	17	8	6	4	3	3	2	2	2	2	7.25	7	173.21	
60	120.00	0.82	13	6	4	3	3	2	2	2	1	1	6.04	6	207.85	
70	140.00	0.95	10	5	3	2	2	2	1	1	1	1	5.18	5	242.49	
80	160.00	1.09	7	4	2	2	1	1	1	1	1	1	4.53	4	277.13	
90	180.00	1.22	7	4	2	2	1	1	1	1	1	1	4.03	4	311.77	
100	200.00	1.36	5	3	2	1	1	1	1	1	1	1	3.63	3	346.41	
110	220.00	1.49	5	2	2	1	1	1	1	1	1	0	3.30	3	381.05	
120	240.00	1.63	5	2	2	1	1	1	1	1	1	0	3.02	3	415.69	
130	260.00	1.77	3	2	1	1	1	1	0	0	0	0	2.79	2	450.33	
140	280.00	1.90	3	1	1	1	1	0	0	0	0	0	2.59	2	484.97	
150	300.00	2.04	3	1	1	1	1	0	0	0	0	0	2.42	2	519.62	
160	320.00	2.17	3	1	1	1	1	0	0	0	0	0	2.27	2	554.26	
170	340.00	2.31	3	1	1	1	1	0	0	0	0	0	2.13	2	588.90	
180	360.00	2.45	3	1	1	1	1	0	0	0	0	0	2.01	2	623.54	
190	380.00	2.58	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1.91	1	658.18	
200	400.00	2.72	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1.81	1	692.82	
210	420.00	2.85	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1.73	1	727.46	
220	440.00	2.99	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1.65	1	762.10	
230	460.00	3.12	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1.58	1	796.74	
240	480.00	3.26	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1.51	1	831.38	
250	500.00	3.40	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1.45	1	866.03	
260	520.00	3.53	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1.39	1	900.67	
270	540.00	3.67	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1.34	1	935.31	
280	560.00	3.80	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1.29	1	969.95	
290	580.00	3.94	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1.25	1	1004.59	
300	600.00	4.08	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1.21	1	1039.23	

Rohelised lahtrid on need alad, kus sügavuspunktide arv on suur. Sinised lahtrid näitavad minimaalset vajalikku sügavuspunktide arvu objektide leidmiseks. Tabelites 10 – 13 on toodud välja arvutatud sügavuspunktid 1 m² kohta, mida saavutavad mitmekiirelised kajaloodid 256 kiirte hulgaga ning 120 kraadi lehviku laiusega (vt. Tabelid 10 – 13).

160 kraadist lehviku laius selleks, et hüdrograaf saaks vaadelda vertikaalseid pindu või nõlvasid, ilma et peaks sonari füüsiliselt pöörama. Merepõhja kaardistamiseks on soovitatav kasutada lehviku laiust kuni 120 – 130 kraadi, et olla kindel, et kõik andmed on hüdrograafiliselt usaldusväärsed. (*Why Not to Survey at More than 130°*, 2023).

Tulemuste näitamiseks on koostatud tabel 14. Tabelis kasutatakse keskmist laeva kiirust, 8 sõlme, mis sobib mõõdistus tööde tegemiseks, sügavus 100 meetrit, maksimaalne kiirte hulk ning lehviku laius on 120 kraadi.

Tabel 14. Kiirte arvu mõju riba laiusele ning sügavuspunktidele

Nimetus	Kiirtehulk	Tegelik/maksimaalne ping rate, (pingi/sekundis)	Ribalaius (m)	Signaali kandevasagedus (kHz)	Sügavuspunktide arv 1m ² kohta
Lehviku laius 120 kraadi		Sügavus 100 m		Laeva kiirus 8 sõlme	
Reson SeaBat T50-R	1024	3 (50)	346.41	190 - 420 kHz	3
R2Sonic 2022	1024	3 (60)	346.41	170 - 250 (700 kHz valikuline)	3
Baywei M5	256	3 (50)	346.41	400 - 550 kHz	1
Norbit Winghead i80s	1024	3 (60)	346.41	200 - 700 (Nominaalne 400kHz)	3
Norbit Winghead i80s	2048	3 (60)	346.41	200 - 700 (Nominaalne 400kHz)	5

Tabel 14 näitab kiirte arvu mõjust riba laiusele ja sügavuspunktidele. Kasutades erinevad kiirtehulgad kõikidel sonaritel ribalaius on sama, kus samal ajal sügavuspunktide arv 1 m² kohta on erinev.

4.2.11 Leviku nurgad on vähendatud

Teises analüüsis kaalub autor võimalust, kus lehviku nurgad on vähendatud. Nagu oli eelnevalt mainitud: suurematel sügavustel saavutavad mitmekiirelised kajaloodid üsna vähe sügavuspunkte, seetõttu tõmmatakse vrakkide avastamiseks uus väiksem piir – 3 punkti 1 m² kohta. Tekib küsimus, kuidas sättida lehviku laiused erinevatel mitmekiirelistel kajaloodidel nii, et saavutada minimaalne vajalik hulk sügavuspunkte ehk 3 sügavuspunkti 1 m² objektide tuvastamiseks. Analüüsi teostamiseks on tarvis uurida, millistel sügavustel iga mitmekiireline kajalood saab saavutada need 3 sügavuspunkti võrdsetes tingimustes (arvestamata sonarite eri tehnilisi parameetreid). Uurimuse läbi viimiseks kasutatakse 8 sõlmelist laeva kiirust, lehviku laiust 130 kraadi, maksimaalset sonari kiirte arvu (vt. Tabel 15).

Tabel 15. Max sügavused, kus saavutatakse 3 sügavuspunkti 1m² kohta 130 kraadi lehviku laiuse ja sonari maksimaalse kiirtearvu korral

Sonar	Lehviku laius	Max kiirte arv	Laeva kiirus (8 sõlme)	Max Sügavus (3 punkti ruutmeetril)
Reson SeaBat T50-R	130 °	1024	8	98 m
R2Sonic 2022	130 °	1024	8	98 m
Baywei M5	130 °	256	8	56 m
Norbit Winghead i80s	130 °	1024	8	98 m
Norbit Winghead i80s valikuline	130 °	2048	8	115 m

Tabeli 15 põhjal on näha, et igal sonaril on erinev maksimaalne lubatud kiirte arv, mis omakorda mõjutab maksimaalset võimalikku sügavust, kus saaks saavutada 3 sügavuspunkti.

Tabelis 22 (vt. Lisa 1) on arvatud ja näidatud, kui palju on vaja igal sonaril lehviku nurka vähendada minimaalse vajaliku sügavuspunktide arvu saavutamiseks, arvestades iga sonari maksimaalse töösügavusega. Tabelis on ka välja toodud ribalaiused, mis vastavatel sügavustel tekivad. Selle tabeli põhjal on koostatud järgmine graafik (vt. Joonis 18) (vt. Lisa 2). Graafikus on näidatud, kuidas muutub mõõdistusriba reguleerides lehviku nurka nii, et saada minimaalselt 3 sügavuspunkti 1 m² kohta. Lehvikunurka on muudetud 5° sammuga.

Analüüsi teostamise ajal tekkis järeldus, et juhul kui lehviku nurgad on vähendatud, on kohe näha, et kui ribalaius kahaneb, siis kiired jaotuvad palju kitsamaale vahemaale. See tähendab, et ristsuunaline sügavuspunktide vahemaa väheneb, kuna suurema kaldega kaldkiire teekonnapiikkus ja seega pingi edasi-tagasi liikumisaeg piki kiirt muutub lühemaks, siis *ping rate* läheb suuremaks ning piki sõidusuunda sügavuspunktide vahemaad muutuvad väiksemaks. Ristsuunaliste ja pikisuunaliste punktide vahemaad vähenevad, siis sügavuspunktide arv 1 m² suureneb. Tulemuseks on detailsem pilt ning suurem tõenäosus vrakkide tuvastamiseks.

4.2.12 Objektide suurused

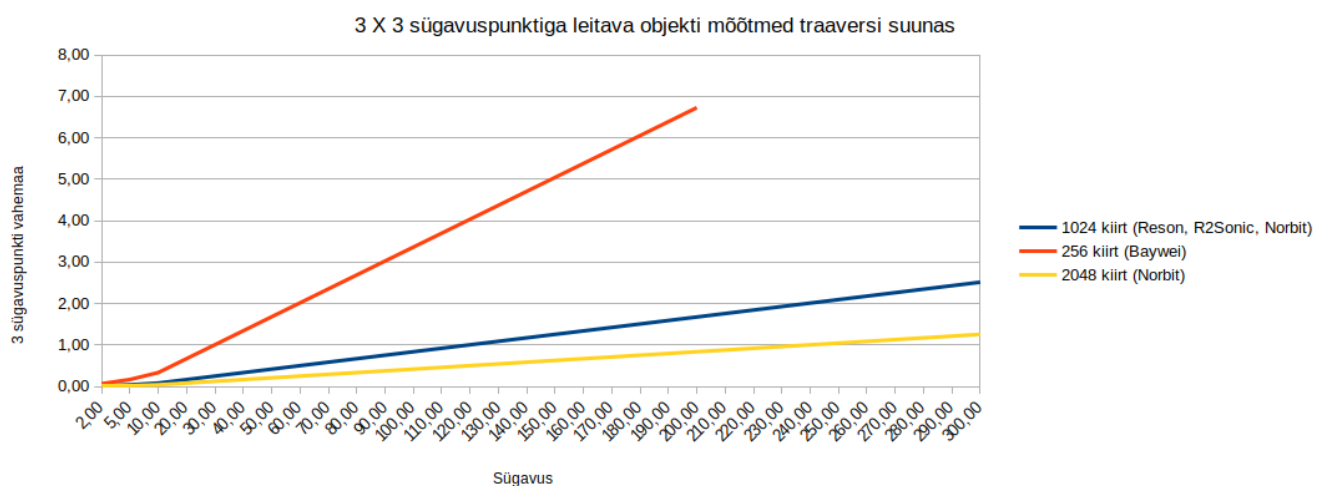
Kolmandas analüüsis võttis autor 2 punkti vahet ristsuunas ning pikisuunas, mis annavad 3 sügavuspunkti liikumissuunas ning 3 sügavuspunkti laeva ristsuunas. Selle järgi saab vaadata kui suure maa-ala 3x3 punktikogumik ära katab, selle järgi saab hinnata, kui suurt objekti on võimalik leida. Kolme sügavuspunktiga kaetud vahemaa liikumissuunas sõltub *ping rate*’st ja laeva liikumise kiirusest ning arvutatakse valem 7 abil: Kolme sügavuspunktiga kaetud vahemaa traaversi suunas sügavusest, lehviku nurgast ja kiirte arvust.

$$\text{Valem } 3 \times 3 \text{ kaetud vahemaa liikumissuunas} = 2 \times \frac{\text{laeva kiirus}}{\text{tegelik ping rate}} \quad (7)$$

Punktide vahe ristsuunas sõltub sügavusest, lehviku nurgast ja kiirte arvust ning leitakse valem 8 abil:

$$\text{Valem } 3 \times 3 \text{ kaetud vahemaa traversi suunas} = 2 \times \text{Punktide vahe ristsuunas} \quad (8)$$

Allpool on toodud välja tabel 23 (vt. Lisa 3), kus on arvutatud välja objektide suurused, mida oleks võimalik tuvastada. Tabeli koostamisel eeldatakse, et laeva kiirus on 8 sõlme, kõikidel sonaritel lehviku laius on 130 kraadi, maksimaalne võimalik kiirte hulk ning sügavus piiratud 300 meetriga. Joonis 14 näitab 3x3 sügavuspunktidega leitava objekti mõõtmete muutumist traaversi suunas arvestades kiirte hulga.



Joonis 14. 3x3 sügavuspunktiga leitava objekti mõõtmed traaversi suunas

4.2.13 Mitmekiireliste kajaloodide lisafunktsiooni võrdlev analüüs

Tabel 16. Mitmekiireliste kajaloodide tehniliste parameetrite võrdlus

Sonari mudel	Reson SeaBat T-50R	R2Sonic 2022	Baywei M5	Norbit Winghead i80s
Mitmekiireliste kajaloodide võrdlus				
Hind	~ 165 000 €	~ 120 000 €	~ 63 970 €	~ 55 000 - 200 000 €
Kiirtehulk	10 - 1024	10 - 1024	256	(256, 512, 1024) (2048 - valikuline)
Lehvi nurga reguleerimise võimalused	10°-150° võrdne kaugus, 10°-165° võrdne nurk	10°- 160°	0 - 130°	5-210° (IHO SPECIAL ORDER >155°)
Signaali kandeagedused	190 - 420 kHz	170 - 450 kHz (700 kHz valikuline)	400 - 550 kHz	200 - 700 kHz (Nominaalne sagedus 400kHz)
duubelandurid	Jah	Jah	Ei	Jah
Veesamba info	Jah	Jah	Ei	Jah
Signaali tagasipeegeldumisinfo	Jah	Jah	Ei	Jah
Maksimaalne töösügavus	Standartne projektor (TC2181) - 575 m	400 m	200 m	0.2 m kuni >300 m
	Laiendatud ulatusega projektor (TC2187) - 900 m			
Sukeldumise võimaluse	Puudub	4000 m	100 m	Puudub
Töötemperatuur	-5°C kuni +45°C	-10°C kuni 50°C	Puudub	-4°C kuni +40°C
Tarkvara saadaval	Puudub	HYPACK, Qinsy, SonarWiz 7, Fledermaus GeoCoder.	Qinsy, Hypack, EIVA ning teistega.	NORBIT DCT, HYPACK, Qinsy, EIVA, CARIS, beamworX ning teistega.
Torustikurežiim	Jah	Jah	Ei	Jah
Madal ruumivajadus	Jah	Jah	Jah	Jah
FM- ja CW-töötlus	Jah	Jah	Puudub	Jah
Piki ja külgekõikumise stabiliseerimine	Jah	Jah	Jah	Jah

Tabelis 16 on toodud välja mitmekiireliste kajaloodide tehniliste parameetrite võrdlus.

4.3 Ühekiirelise kajaloodi analüüs vrakkide leidmiseks

Analüüsi peaesmärk on uurida kas üldse ja kuidas saab ühekanalilist sonarit veealuste objektide leidmiseks kasutada. Ühekiirelise kajaloodi võimekuse hindamiseks on vaja hinnata teatud parameetreid ning pole mõtet võrrelda kindlat marki ühekiirelisi kajaloode. Peamine parameeter vrakkide otsimiseks on kiire laius, mis mõõdetakse kraadides ehk kiire poolt põhjas sondeeritav ala määrab tegelikult horisontaalse lahutuse ära. Tegelik horisontaalne lahutus on punktide vahemaa merepõhjas, seega mida suurem kiire laius, seda kehvem on horisontaalne lahutus. Sondeeritav ala omakorda sõltub ainult kiire laiusest ja sügavusest.

4.3.1 Kiire jälje arvutus merepõhjas

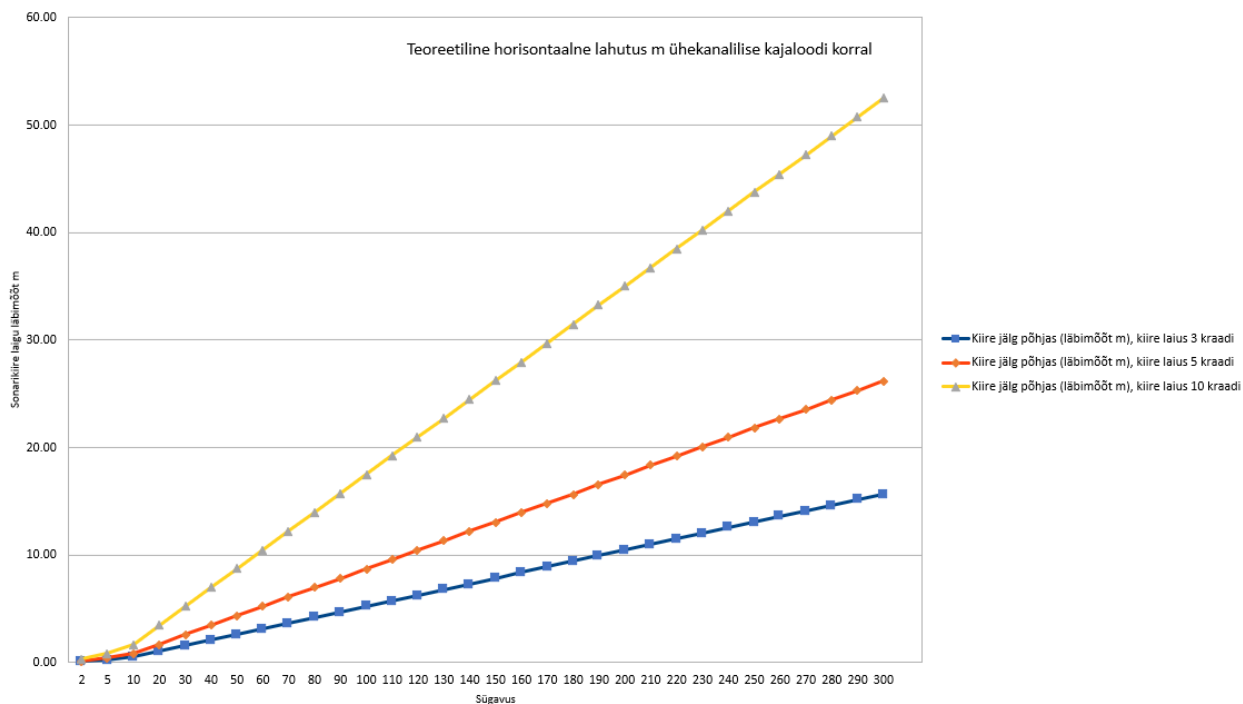
Antud töö raames võetakse kolm kiire laiust 3, 5 ja 10 – need on 200 kHz sageduse puhul üsna tavalised (vt. Tabel 17). Madalamaid sagedusi pole mõtet üle vaadata, siis lähevad kiire laiused juba väga suureks ning objektide otsimiseks ei sobi. Selleks, et leida millise läbimõõduga on kiire jälg merepõhjas on vaja teada laeva kiirust ning kiire laiuse arvutamiseks kasutatakse valemit 9:

$$\text{Valem Kiire jälg põhjas} = 2 \times \text{sügavus} \times \tan(\text{kiire laius} \div 2) \quad (9)$$

Tabel 17. Kiire jälje läbimõõdud merepõhjas

Sügavus (m)	Kiire jälg põhjas (läbimõõt m), kiire laius 3 kraadi	Kiire jälg põhjas (läbimõõt m), kiire laius 5 kraadi	Kiire jälg põhjas (läbimõõt m), kiire laius 10 kraadi
2	0.10	0.17	0.35
5	0.26	0.44	0.87
10	0.52	0.87	1.75
20	1.05	1.75	3.50
30	1.57	2.62	5.25
40	2.09	3.49	7.00
50	2.62	4.37	8.75
60	3.14	5.24	10.50
70	3.67	6.11	12.25
80	4.19	6.99	14.00
90	4.71	7.86	15.75
100	5.24	8.73	17.50
110	5.76	9.61	19.25
120	6.28	10.48	21.00
130	6.81	11.35	22.75
140	7.33	12.23	24.50
150	7.86	13.10	26.25
160	8.38	13.97	28.00
170	8.90	14.84	29.75
180	9.43	15.72	31.50
190	9.95	16.59	33.25
200	10.47	17.46	35.00
210	11.00	18.34	36.75
220	11.52	19.21	38.50
230	12.05	20.08	40.24
240	12.57	20.96	41.99
250	13.09	21.83	43.74
260	13.62	22.70	45.49
270	14.14	23.58	47.24
280	14.66	24.45	48.99
290	15.19	25.32	50.74
300	15.71	26.20	52.49

Joonise 15 põhjal saab järeldada, et mida suurem on kiire laius ning sügavus, seda suurem on kiire läbimõõt, mis omakorda suurendab tõenäosust tuvastada vrakki.



Joonis 15. Teoreetiline horisontaalne lahutus ühekanalilise kajaloodi korral

4.3.2 Punktide arv 1 m² suurusel alal ühekiirelise kajaloodi korral

Tabel 18. Punktide arv 1 m² suurusel alal 3, 5 ja 10 kraadi kiire laiuse korral

		Kiire jälg põhjas (täbimõõt m), kiire laius 3 kraadi	Punktide arv m ² suurusel alal										Max võimalik ping rate, helikiirus 1450 m/s	Tegelik max ping rate, helikiirus 1450 m/s	
7	Sügavus (m)														
8	2	0.10	12	8	6	5	4	3	3	3	2		362.5	50	
9	5	0.26	12	8	6	5	4	3	3	3	2		145.0	50	
10	10	0.52	12	6	6	5	4	3	3	3	2		72.5	50	
11	20	1.05	9	4	4	3	3	2	2	2	2		36.3	36	
12	30	1.57	6	3	3	2	2	2	1	1	1		24.2	24	
13	40	2.09	4	2	2	2	1	1	1	1	1		18.1	18	
14	50	2.62	3	2	2	1							14.5	14	
15	60	3.14	3	2	1								12.1	12	
16	70	3.67	2	1									10.4	10	
17	80	4.19	2										9.1	9	
18	90	4.71											8.1	8	
19	100	5.24											7.3	7	
20	110	5.76											6.6	6	
21	120	6.28											6.0	6	
22	130	6.81											5.6	5	
23	140	7.33											5.2	5	
24	150	7.86											4.8	4	
25	160	8.38											4.5	4	
26	170	8.90											4.3	4	
27	180	9.43											4.0	4	
28	190	9.95											3.8	3	
29	200	10.47											3.6	3	
30	210	11.00											3.5	3	
31	220	11.52											3.3	3	
32	230	12.05											3.2	3	
33	240	12.57											3.0	3	
34	250	13.09											2.9	2	
35	260	13.62											2.8	2	
36	270	14.14											2.7	2	
37	280	14.66											2.6	2	
38	290	15.19											2.5	2	
39	300	15.71											2.5	2	

Samal ajal on olemas teisi olulisemaid mõjutavaid tegureid: laeva kiirus, tegelik maksimaalne ping rate ja helikiirus. Teades neid tegureid on võimalik arvutada, kui palju sügavuspunkte on 1 m² kohta merepõhjas (vt. Tabel 18) erinevatel sügavustel, aga ühekiirelise kajaloodi korral peab vaatama kiire poolt jäetavat jälge põhjas. See läheb ruttu väga suureks ja siis pole enam mõtet 1 m² kohta punktide arvu vaadata. Tabelis 28, rohelised lahtrid on sellised, kus need laigud kattuvad, sest liikumissuunas on tihedus suur, seega saab ka 1 m² kohta vrakki tuvastada. Tabelist on näha, et vraki leidmiseks peavad mõõteliinid olema väga tihedad, sõita tuleb väiksel kiirusel.

5 Külgvaatesonarite analüüs

Külgvaatesonarite võrdlevas analüüsis võttis autor 2 erinevad külgvaatesonarite mudelid Shark-S150D (vt. Joonis 16) ning EdgeTech 2050-DSS (vt. Joonis 17). Eeldatakse, et antud töö raames võrdlev analüüs on tehtud vrakkide detailse uuringu jaoks. Detailseks uuringuks on oluline jälje suurusest tulenev resolutsioon piki ning rist sõidusuunaga ning otsingu uuringu jaoks on vaateriba laius, et lühema ajaga suurem maa-ala katta (vt. Tabel 21). Resolutsiooni võrdlemiseks on võetud külgvaatesonarite andmed ametlikelt veebisaitidelt (vt. Tabelid 19 – 20). Mida vähem on resolutsiooni väärtus, seda väiksema maa-ala üks külgvaatesonari pildi piksel ära katab, selle tõttu tuleb detailsem pilt. Samamoodi tuleb arvestada mõõdistusriba laiussega, ehk mida laiem lehvik, seda suurema maa-ala saab ära katta.



Joonis 16. Külgvaatesonar Shark-150D

Allikas (*Shark-S150D Dual Frequency Side Scan Sonar*, 2017)



Joonis 17. Külgvaatesonar EdgeTech 2050-DSS

Allikas (2050 DSS, 2022)

Tabel 19. Külgvaatesonari Shark-S150D tehnilised näitajad

Allikas (Shark-S150D Dual Frequency Side Scan Sonar , 2017)

Sonar Specifications	Shark-S150D
Frequency	150kHz & 450kHz, Dual Simultaneous
Pulse Type	CW & LFM CHIRP
Maximum Range	450m @ 150kHz; 150m @ 450kHz
Beam Width	Horizontal: 0.6°@ 150kHz, 0.2° @ 450kHz; Vertical: 45°
Resolution (h-range)	Along Track: 0.01h @150kHz, 0.003h @450kHz; Across Track: 1.25cm
Depression Angle	Tilted Down 10°, 15°, 20°, Default15°
Maximum Depth Rating	1000m (316 Stainless Steel)
Standard Towfish Sensors	Roll, Pitch, Heading, Depth, Altitude
Towfish Size/Weight (air)	1264mm*105mm (Length*Diameter) / 29kg
Deck Unit Size /Weight	170mm*120mm*70mm /0.8kg
Power Consumption	110/220VAC , 40W

Tabel 20. Tabel 30. Külgvaatesonari EdgeTech 2050-DSS tehnilised näitajad

Allikas (2050 DSS, 2022)

KEY SPECIFICATIONS		
SIDE SCAN SONAR		
Available Frequency (dual simultaneous CHIRP)	120/410/850 kHz	230/540/850 kHz
Operating Range	120 kHz: 600 meters/side 410 kHz: 200 meters/side 850 kHz: 90 meters/side	230 kHz: 350 meters/side 540 kHz: 150 meters/side 850 kHz: 90 meters/side
Beam Width (2-way) & Along Track Resolution	120 kHz: 0.70 deg or 1.20 m @ 100 410 kHz: 0.28 deg or 0.50 m @100 m 850 kHz: 0.23 deg 0.20 m @ 50 m	230 kHz: 0.44 deg or 0.80 m @ 100 m 540 kHz: 0.26 deg 0.45 m @ 100 m 850 kHz: 0.23 deg 0.20 m @ 50 m
Across Track Resolution	120 kHz: 8 cm 410 kHz: 2 cm 850 kHz: 1 cm	230 kHz: 3 cm 540 kHz: 1.5 cm 850 kHz: 1 cm
Vertical Beam Width	50°	

Tabel 21. Jälje suurusest tulenev resolutsioonid külgvaatesonaritel

Shark - S150D	Across track resolution		(Kaugus keskteljest) (m)	Along track resolution Resolution (m)	Lehvikui laius
	150 kHz	1.25 cm			
	150 kHz	1.25 cm	50	0.50	45°
	450 kHz	1.25 cm	50	0.15	45°
	450 kHz	1.25 cm	100	0.30	45°
EdgeTech 2050-DSS	120 kHz	8 cm	50	0.6	50°
	120 kHz	8 cm	100	1.2	50°
	410 kHz	2 cm	50	0.25	50°
	410 kHz	2 cm	100	0.5	50°

Tabelis 21 on näha, et 50 meetrisel kaugusel keskteljest ning töötades 120 kHz ja 150 kHz akustilise signaali sagedusega ning 8 cm ja 1.25 cm resolutsiooniga külgsuunas. Tulemuseks tuli, et EdgeTech 2050-DSS annab 0,6 m resolutsiooni liikumissuunas, kui samal ajal Shark-S150D külgavaatesonaril on resolutsioon 0,5 m see tähendab, et Shark-S150D annab natuke detailsema pildid ehk see näitab ära kui suur on helikiire jälg vrakini jõudes. Selline järeldus on aktuaalne ka teistele kaugustele keskteljest ning töörežiimidele. Samal ajal see oleneb vraki suurusest: suurema vraki puhul hoitakse külgvaatesonari kõrgemal, väikse puhul madalamal.

6 Tulemused

6.1 Mitmekiireliste kajaloodide võrdlevate analüüside tulemused

Mitmekiireliste kajaloodide võrdlevates analüüsid on võetud neli erinevat sonarit: Reson SeaBat T-50R, R2Sonic 2022, Norbit Winghead i80s, Baywei M5. Võrdlevad analüüsid on tehtud erinevate eesmärkidega. Esimeses analüüsis on arvatatud sügavuspunktide arv 1 m² suurusel alal iga sonari jaoks ning võrreldud omavahel samades tingimustes. Tingimused on järgmised: sama kiirte hulk, lehviku laius (120, 140, 90 kraadi) ning piiratud sügavusega 300 meetrit. Selleks on arvatatud kaldkiire pikkused, maksimaalsed võimalikud töösagedused, arvestades sonari tegeliku maksimaalse töösagedusega, punktide vahet liikumissuunas ning ristsuunas (Valem 1 – 5). Analüüsis, kus on võrreldud sonarid, mis töötavad 512 ja 1024 kanalirežiimides, osales ainult 3 mitmekiirelist kajaloodi, kuna Baywei M5 maksimaalne kiirte hulk on 256, seega see ei saanud rohkem analüüsis osaleda. Norbit Winghead i80s sonaril on olemas valikuline režiim, kus saaks kasutada 2048 kiirt, sellega näitas Norbit parimat tulemust, näidates peaaegu 2 korda rohkem sügavuspunkte võrreldes teistega, kuid samal ajal ribalaius jäi samaks.

Teises analüüsis on uuritud, millistel sügavustel kõik mitmekiirelised kajaloodid saaksid saavutada 3 sügavuspunkti ehk minimaalset vajalikku sügavuspunktide arvu objektide või vrakki leidmiseks võrdsetes tingimustes (arvestamata sonarite eri tehnilisi parameetreid). Analüüsis eeldatakse, et lehviku laiuseks on võetud 130 kraadi, sonari maksimaalne kiirte hulk ja laeva kiiruseks on võetud 8 sõlme.

Kolmel sonaril on lubatud lehviku nurka vähendada kuni 10 kraadini ning Norbit Winghead i80s sonaril kuni 5 kraadini ja töötada 2048 kiirtega. Analüüsi käigus oli koostatud tabel ja graafik, millele toetudes saab järeldada, et Baywei M5 maksimaalsel töösügavusel 200 meetrit, on vaja vähendada lehviku nurka 20 kraadini 3 sügavuspunkti saavutamiseks 1 m² kohta ning ribalaius tuleb 70.53 meetrit.

Reson SeaBat T50-R, R2Sonic 2022 ja Norbit Winghead i80s sonarid võivad töötada 1024 kiirtega. R2Sonic 2022 sonar, lehviku laiusega 15 kraadi, saab tuvastada objekti sügavusel 400 m ning ribalaius tuleb 105.32 m. Reson SeaBat T50-R sonar saavutab 3 sügavuspunkti lehviku laiusega 10 kraadi 620 meetrilisel sügavusel ning ribalaius on

108.49 m. Norbit Winghead i80s sonaril maksimaalne töösügavus on 300 m, seega tuleb vähendada lehviku nurka 40 kraadini ning ribalaius tuleb 218.38 m. Töötades 2048 kiirtega, siis on vaja kiiri kokku tõmmata 60 kraadini ning vastavalt sellele ribalaius on 346,41 m.

Kolmandas analüüsis oli vaja täpsustada, millise suurusega objektid või vrakki saab tuvastada. Analüüsis on võetud 2 punkti vahet ristsuunas ning pikisuunas, mis annavad 3 sügavuspunkti liikumissuunas ning 3 sügavuspunkti laeva ristsuunas. Selle järgi saab vaadata kui suure maa-ala 3x3 punktikogumik ära katab, selle järgi saab hinnata, kui suuri vrakke on võimalik leida. Kolme sügavuspunktiga kaetud vahemaa liikumissuunas sõltub *ping rate* 'st ja laeva liikumise kiirusest ning kolme sügavuspunktiga kaetud vahemaa traaversi suunas sügavusest, lehviku nurgast ja kiirte arvust. Nende parameetritega on tehtud arvutused.

Tuli järeldus, et mida suurem on sügavus ning laeva kiirus seda suurem peab olema vrakk või objekt, mis saab olla tuvastatud. Väiksema suurusega objekti tuvastamiseks, on oluline hoida madal laeva kiirus, aga samal ajal oleneb see sügavusest.

Kolmel sonaril on objektide suurused samad. Kõige väiksema suurusega objekti leiab Norbit Winghead i80s 2048 kiirtega. Baywei M5 näitas kõige halvemat tulemust.

Neljandas analüüsis on võrreldud sonareid lisafunktsioonide ning teiste näitajate järgi. Analüüsi käigus on tekkinud järgmised järeldused:

- Kõige odavam sonar on Baywei M5, mille hind on 64 000 eurot. R2Sonic liigikaudne hind on 120 000 eurot. Norbit Winghead i80s ja Reson SeaBat T50-R hinnad võivad olla kallimad kui 165 000 eurot.
- Kõige suurema signaali kandevsagedusega on R2Sonic 2022 ja Norbit Winghead i80s sonarid, mis võivad töötada 200 – 700 kHz vahemikus.
- Kõige paremad lehviku nurga reguleerimise võimalused on Norbit Winghead i80s sonaril, mida võib reguleerida 5-210 kraadi vahemikus (madalas vees IHO SPECIAL ORDER >155 kraadi).
- Duubelandurite olemasolu puudub Baywei M5 sonaril.

- Veesamba info salvestamise võimalus puudub Baywei M5 sonaril.
- Tagasipeegeldumiseinfo kätte saamise võimalus puudub Baywei M5 sonaril.
- Reson SeaBat T50-R sonaril on kõige suurem töösügavus kasutades Standardset projektorit (TC2181) - 575 m ning laiendatud ulatusega projektorit (TC2187) - 900 m.
- Võime töötada kõige suuremas temperatuuri vahemikus on R2Sonar 2022 sonaril.
- Võime töötada teiste tarkvaradega: kõik sonarid, aga Reson SeaBat T50-R sonari kohta info puudub.
- Torustikurežiim puudub Baywei M5 sonaril.
- Kõikidel sonaritel on väike ruumivajadus.

6.2 Ühekiirelise kajaloodi analüüsi tulemused

Analüüsis on ühekiirelise kajaloodi võimekuse hindamiseks tehtud võrdlus 3,5 ja 10 kraadi kiire laiuse vahel mis on tavalised kiire laiused 200 kHz sageduse puhul ning ei olnud mõtet võrrelda kindlat marki ühekiirelisi kajaloode. Analüüs on läbi viidud selleks, et leida millise läbimõõduga on kiire jälg merepõhjas. Samamoodi on võimalik arvutada, kui palju sügavuspunkte on 1 m² kohta merepõhjas erinevatel sügavustel, teades teisi olulisi mõjutavaid tegureid: laeva kiirus, tegelik maksimaalne *ping rate* ja helikiirus vees. Arvutamise käigus tekkis järeldus, et maksimaalsega sügavusega ning laeva kiirusega, millel on võimalik tuvastada vrakki sügavuspunktide arvu järgi 1 m² kohta on 30 meetrit ja 12 sõlme. Ühekiirelise kajaloodi korral peab vaatama kiire poolt jäetud jälge põhjas, see läheb ruttu väga suureks ja siis pole enam mõtet 1 m² kohta punktide arvu vaadata. Tulemuseks tekkisid ka teised järeldused:

- Mida suurem kiire laius ja sügavus, seda suurem kiire läbimõõt, mis seega katab suurema maa-ala ja suurendab tõenäosust vrakki leida; kuid seda suurem on ka horisontaalne asukoha määramatus.
- Vrakide leidmiseks peavad mõõteliinid olema väga tihedad ning laevaga tuleb sõita väiksel kiirusel.

- Ühekiirelist kajaloodi saab kasutada vrakkide otsimiseks, aga see võtab palju aega ja jõudu.

6.3 Külgvaatesonarite võrdleva analüüsi tulemused

Külgvaatesonarite võrdlevas analüüsis on võetud kaks külgvaatesonarit Shark-S150D and EdgeTech 2050-DSS, mille andmed on võetud ametlikelt veebilehtedelt. Uuringus eeldatakse, et analüüs on tehtud vrakkide detailse uuringu jaoks, seega hinnatakse jälje suurusest tulenev resolutsioon piki ning ristsuunaga. Võrdlemiseks on olemas Shark-S150D, mis töötab 150 kHz, 450 kHz sagedusega ja 1.25 m resolutsioonidega külgsuunas, lehvik laiusega 45 kraadi. Külgvaatesonar EdgeTech 2050-DSS töötab 120 kHz, 410 kHz sagedusega ning 8 cm, 2 cm resolutsioonidega külgsuunas, lehviku laiusega 50 kraadi. Analüüsis on võetud kaks standart kaugust keskteljest 50 m ja 100 m. Külgvaatesonari võimekuse hindamiseks on vaja teada resolutsiooni liikumissuunas. Mida vähem on resolutsiooni väärtus, seda detailsem on pilt. Samamoodi tuleb arvestada lehviku laiusega: mida laiem lehvik, seda suurem maa-ala on kaetud.

Võrdleva analüüsi tulemuseks on järeldus, et 50 m kaugusel keskteljest 150 kHz sagedusega, 1.25 m resolutsiooniga külgsuunas Shark-S150D annab 0.50 m resolutsiooni liikumissuunas, kui EdgeTech 2050-DSS annab 0.6 m resolutsiooni. 100 m kaugusel keskteljest 150 kHz sagedusega, 1.25 resolutsiooniga Shark-S150D näitab 1 cm resolutsiooni, kui EdgeTech 2050-DSS 120 kHz sagedusega annab 1.2 m resolutsiooni. 450 kHz ja 410 kHz sagedusega juhtub sama olukord, kus resolutsiooni väärtus liikumissuunas külgvaatesonaril Shark-S150D on väiksem, kui EdgeTech 2050-DSS. Tulemuseks tuleb järeldus, et kasutades Shark-S150D saab saavutada detailsema pildi erinevatel kaugustel keskteljest. Samal ajal see oleneb ka vraki suurusest, suurema vraki puhul hoitakse külgvaatesonarit kõrgemal, väikse puhul madalamal.

Kokkuvõte

Praegune tehnoloogia vrakkide ja muude veealuste objektide otsimiseks ja uurimiseks kasutab akustilisi helisid. Akustiliste seadmete hulka kuuluvad ühekiirelised ja mitmekiirelised kajaloodid, külgvaatesonarid. Vrakke ja muude objektide leidmise tõenäosust mõjutavad erinevad tegurid ja seadmete tehnilised omadused. Mitmekiirelise kajalooi oluliste tehniliste parameetrite hulka kuuluvad: valikulised signaali kandevasagedused, minimaalne sageduse muutus, kiire laius, helingute arv, *ping rate*, sügavusvõime, lehviku laius, impulsi pikkus ja tüüp, piki ja külgekõikumise stabiliseerimine, veesamba info salvestamise võimekus, signaali tagasipeegeldumisinfo kätte saamise võimalus.

Analüüsid on kasutatud nelja sonari mudelit: Reson SeaBat T50-R, R2Sonic 2022, Baywei M5, Norbit Winghead i80s.

Võrdlevate analüüside tulemuste põhjal saab järeldada, et Baywei M5 on kõige odavam mitmekiireline kajalood, millega võib tuvastada vrakki või muu objekti sügavusel 200 m vähendades lehviku laiust miinimumini ehk 10 kraadini ning saavutades kõige väiksema ribalaiuse. Miinuseks võib olla, et sonaril puudub duubelandurite paigaldamise võimalus, ei ole võimalik kätte saada veesamba ja tagasipeegeldumise infot ning puudub torustikurežiim. Kõige kallimad sonarid on Norbit Winghead i80s ja Reson SeaBat T50-R, kuid samas on nendel olemas kõik lisafunktsioonid, mis on selle töö raames käsitletud. Norbit Winghead i80s võib töötada 1024 ja 2048 kiirte hulgaga ning lehviku nurga reguleerimise võimalused on kõige paremad, 5-210 kraadi vahemik, ning (madalas vees IHO *SPECIAL ORDER* >155 kraadi) töötades suures signaali kandevasageduse vahemikus 200 – 700 kHz. Kõige suurem töösügavus on Reson SeaBat T50-R sonaril kasutades Standardset projektorit (TC2181) - 575 m ning laiendatud ulatusega projektorit (TC2187) - 900 m.

Autori subjektiivsel arvamisel on käesolevas töös võrreldud mudelitest kõige parem mitmekiireline kajalood vrakkide ja objektide tuvastamiseks R2Sonic 2022. R2Sonic 2022 sonaril on kõige tasakaalustatud tehnilised parameetrid võrreldes teiste sonaritega. Selle hind on umbes 120 000 eurot, mis ei ole kõige kallim. Sonaril on olemas kõik lisafunktsioonid, töösügavus on 400 m, sukeldumise võimalused on 4000 m, mis tähendab, et R2Sonic 2022 võib paigaldada AUV või ROV platvormile. Võime töötada

kõige suuremas temperatuuri vahemikus -10°C kuni $+50^{\circ}\text{C}$. R2Sonic 2022 on võimeline töötama erinevate tarkvaradega: *HYPACK*, *QINSy*, *SonarWiz 7*, *Fledermaus GeoCoder*. Sonaril on väike ruumivajadus.

Analüüsis on ühekiirelise kajaloodi võimekuse hindamiseks tehtud võrdlus 3,5 ja 10 kraadi kiire laiuse vahel ning 200 kHz sageduse puhul ning ei olnud mõtet võrrelda kindlat marki ühikiirelisi kajaloode. Analüüsi eesmärgiks on leida, millise läbimõõduga on kiire jälg merepõhjas. Samamoodi on võimalik arvutada, kui palju sügavuspunkte on 1 m^2 kohta merepõhjas erinevatel sügavustel, teades teisi olulisi mõjutavaid tegureid: laeva kiirus, tegelik maksimaalne *ping rate* ja helikiirus vees. Arvutamise käigus tekkis järeldus, et maksimaalse sügavusega ning laeva kiirusega, millel on võimalik tuvastada vrakki sügavuspunktide arvu järgi 1 m^2 kohta on 30 meetrit ja 12 sõlme. Ühekiirelise kajaloodi korral peab vaatama kiire poolt jäetud jälge põhjas, see läheb ruttu väga suureks ja siis pole enam mõtet 1 m^2 kohta punktide arvu vaadata. Tulemuseks tekkisid ka teised järeldused:

- Mida suurem on kiire laius ja sügavus, seda suurem on jälje läbimõõt, mis omakorda suurendab tõenäosust vrakki tuvastada.
- Vrakide leidmiseks, peavad mõõteliinid olema väga tihedad ning laevaga tuleb sõita väikse kiirusega.
- Ühekiirelist kajaloodi saab kasutada vrakkide otsimiseks, aga see võtab palju aega ja jõudu.

Külgvaatesonarite võrdlevas analüüsis on võrreldud kahte sonarit Shark-S150D ja EdgeTech 2050-DSS. Detailseks uuringuks on oluline jälje suurusest tulenev resolutsioon piki- ja ristsõidusuunaga. Mida vähem on resolutsiooni väärtus, seda detailsem tuleb ka pilt. Tulemuseks on see, et 50 m kaugusel keskteljest 150 kHz sagedusega, 1.25 m resolutsiooniga külgsuunas Shark-S150D annab 0.50 m resolutsiooni liikumissuunas, kui EdgeTech 2050-DSS annab 0.6 m resolutsiooni. 100 m kaugusel keskteljest. 450 kHz ja 410 kHz sageduste puhul juhtub sama olukord, kus resolutsiooni väärtus liikumissuunas külgvaatesonaril Shark-S150D on väiksem, kui teisel. Tulemuseks tekib järeldus, et kasutades Shark-S150D saab saavutada detailsema pildi erinevatel kaugustel keskteljest. Samal ajal see oleneb ka vraki suurusest: suurema vraki puhul hoitakse külgvaatesonarit kõrgemal, väikse puhul madalamal.

Antud töö on hea sisend järgmiste tööde uurimuste jaoks. Käesolevat tööd on võimalik kasutada erinevate valdkonnadega seotud lõputööde kirjutamiseks. Näiteks:

- Viia läbi võrdlev analüüs ringvaatesonaritega, AUV ja ROV platvormidega teema täiendamiseks.
- Uuemate sonarite mudelite võrdlus, kuna peaaegu iga aasta tulevad uuemad sonari mudelid, millega saab töötada kiiremini ning saada detailsema pildi ja muud tulemused. Võrdleva analüüsi järelduste järgi saab valida õige sonari mudeli mõõdistustööks vastavalt erinevatele nõutele.
- Uurida kuidas muutuvad tööparameetrid mitmekiirelisel kajaloodil töötades *equiangular* režiimis.

Summary

Current technology to search for and explore wrecks and other flawed objects uses acoustic sounds. Acoustic equipment includes single beam echo sounders, multi beam echo sounders, side view sonar, AUV and ROV platforms. The probability of finding wrecks and other objects is affected by various factors and the technical characteristics of the equipment. Important technical parameters for a multi-beam echo sounder include: signal carrier frequency, fan width, beam volume, possibility to compensate for ship's rolling movement, possibility to compensate for ship's pitching movement, pulse type and length. 4 sonar models have been used in the analyses: Reson SeaBat T50-R, R2Sonic 2022, Baywei M5, Norbit Winghead i80s.

Based on the results of the comparative analyses, it can be concluded that Baywei M5 is the cheapest multi-beam echo sounder, which can be used to detect a wreck or other object at a depth of 200 m by reducing the width of the fan to a minimum, i.e. 10 degrees, and achieving the smallest bandwidth. The downside is that the sonar does not have the possibility of installing double sensors, it is not possible to get information about the water column and back reflection, and there is no pipeline system. The most expensive sonars are the Norbit Winghead i80s and the Reson SeaBat T50-R, while at the same time they have all the additional functions that were discussed in the scope of such work. Norbit Winghead i80s can work with 1024 and 2048 beam values, and the fan angle adjustment options are the best, i.e. 5-210° and (In shallow water IHO SPECIAL ORDER >155°) when working in a large signal carrier frequency range of 200 - 700 kHz. The highest operating depth is 575 m using the standard projector (TC2181) and 900 m with the extended range projector (TC2187) on the Reson SeaBat T50-R sonar.

In the author's subjective opinion, the best multi-beam sonar for detecting wrecks and objects is the R2Sonic 2022. The R2Sonic 2022 sonar has the most balanced technical parameters compared to other sonars. Its price is around 120,000 euros, which is not the most expensive price. It has all the additional functions, the working depth is 400 m, when the diving possibilities are 4000 m, which means that the R2Sonic 2022 can be installed on an AUV or ROV platform. Capable of operating in the largest temperature range of -10°C to 50°C. R2Sonic 2022 is able to work with different softwares: HYPACK®, QINSy™, SonarWiz 7, Fledermaus GeoCoder. The sonar also requires little space.

In the analysis, a comparison between 3.5 and 10 degree beam width and 200 kHz frequency was made to evaluate the capability of a single-beam echo sounder, and it did not make sense to compare a certain brand of single-beam echo sounder. The aim of the analysis is to find the diameter of the ray trace on the seabed. In the same way, it is possible to calculate how many depth points there are per 1m^2 on the seabed at different depths by knowing other important influencing factors: the speed of the ship, the actual maximum ping rate and the speed of sound in the water. During the calculation, it was concluded that with the maximum depth and the speed of the ship, when it is possible to detect the wreck by the number of depth points per 1m^2 , the depth is 30 meters and the speed of the ship is 12 knots. In the case of a single-beam echosounder, you have to look at the trace left by the beam at the bottom, it quickly becomes very large and then there is no point in looking at the number of points per 1m^2 . As a result, came the second following conclusions:

- The larger the width and depth of the beam, the larger the diameter of the beam, which in turn increases the probability of detecting a wreck.
- In order to find wrecks, the measuring lines must be very tight and the ship must be driven at a low speed.
- A single-beam echo sounder can be used to search for wrecks, but it takes a lot of time and effort, so it is more reasonable to use a multi-beam echo sounder

In the comparative analysis of side-scan sonars, two sonars Shark-S150D and EdgeTech 2050-DSS are compared. For a detailed study, the resolution resulting from the size of the track along and across the direction of travel is important. The lower the resolution value, the smaller the area covered by one pixel of the side view sonar image, therefore the image is more detailed. The result is the conclusion that using the Shark-S150D you can achieve a more detailed image at different distances from the center axis. At the same time, it also depends on the size of the wreck, that for a larger wreck the side view sonar is kept higher, for a smaller one lower.

Viidatud allikad

- 2050 DSS. (2022). EdgeTech. https://www.edgetech.com/wp-content/uploads/2019/07/2050-8_23_22-1.pdf
- Abdulrahman, F. H., Yousif, A. A., & Ali, S. (2017). Creating a bathymetric contour map using acoustic Doppler current profiler (ADCP): Duhok Dam reservoir as a case study. *Polytechnic Journal*, 7(4), 40–55. <https://doi.org/10.25156/ptj.2017.7.4.93>
- About the IHO. (2021). IHO. <https://iho.int/en/about-the-iho>
- Autonomous Underwater Vehicle . (2023). Schmidt Ocean Institute. <https://schmidtocean.org/technology/robotic-platforms/autonomous-underwater-vehicle-auv/>
- Bathymetry survey sonar - M5 . (2023). Baywei . <https://www.nauticexpo.com/prod/baywei/product-199356-573658.html>
- Berlijn, R. (2008, January 1). *No Exploration without Hydrography*. Hydro International. <https://www.hydro-international.com/content/article/no-exploration-without-hydrography>
- Boulay, S. O. C. (2012). *ANALYSIS OF MULTIBEAM SONAR DATA FOR BENTHIC HABITAT CHARACTERIZATION OF THE PORT OF TAURANGA, NEW ZEALAND*. <https://researchcommons.waikato.ac.nz/handle/10289/6611>
- Crimmins, D., & Manley, J. (2008). *What Are AUVs, and Why Are They Used?* NOAA. <https://oceanexplorer.noaa.gov/explorations/08auvfest/background/auvs/auvs.html>
- Dhabban, A. (2021, January 30). *Single-Beam & Multi-Beam Echo Sounders* . Stratasys Inc. <https://grabcad.com/tutorials/single-beam-multi-beam-echo-sounders>
- Eesti Mereakadeemia lõputööde koostamise ja vormistamise juhend. (2017). TalTech. <https://oigusaktid.taltech.ee/emera-loputoode-koostamise-ja-vormistamise-juhend/>
- Focus on what matters to you when reviewing a spec sheet. (2022). R2Sonic. <https://www.r2sonic.com/wp-content/uploads/2020/11/R2Sonic-Spec-Sheet-Aid.pdf>
- Ge, Q., Ruan, F., Qiao, B., Zhang, Q., Zuo, X., & Dang, L. (2021). Side-Scan Sonar Image Classification Based on Style Transfer and Pre-Trained Convolutional Neural Networks. *Electronics* 2021, Vol. 10, Page 1823, 10(15), 1823. <https://doi.org/10.3390/ELECTRONICS10151823>
- Gillis, A. S. (2021). *What is Excel?* . TechTarget. <https://www.techtarget.com/searchenterprisedesktop/definition/Excel>

- Grządziel, A. (2022). Application of Remote Sensing Techniques to Identification of Underwater Airplane Wreck in Shallow Water Environment: Case Study of the Baltic Sea, Poland. *Remote Sensing*, 14(20). <https://doi.org/10.3390/rs14205195>
- Hansen, R. E. (2011). Introduction to Synthetic Aperture Sonar. *Sonar Systems*. <https://doi.org/10.5772/23122>
- Hwang, J., Bose, N., & Fan, S. (2019). AUV adaptive sampling methods: A review. *Applied Sciences*, 9(15). <https://doi.org/10.3390/APP9153145>
- Importance of Hydrography*. (2022). International Hydrographic Organization. <https://iho.int/en/importance-of-hydrography>
- Kartal, S. K., Hacıoğlu, R., Görmüş, K. S., Kutoğlu, H., & Leblebicioğlu, M. K. (2022). Modeling and Analysis of Sea-Surface Vehicle System for Underwater Mapping Using Single-Beam Echosounder. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(10). <https://doi.org/10.3390/jmse10101349>
- Lekkerkerk, H.-J. (2020). *State of the Art in Multibeam Echosounders*. Hydro International. <https://www.hydro-international.com/content/article/state-of-the-art-in-multibeam-echosounders>
- Levec, F., & Skinner, A. (2004). Manual of Instruction: Barhymetric Surveys. In *Ontario* (pp. 1–27). <https://dr6j45jk9xcmk.cloudfront.net/documents/2659/stdprod-103358.pdf>
- Lubis, M. (2017). Using Side Scan Sonar Instrument for Seabed Identification with Pattern Discrete Equi Spaced Unshaded Line Array (Pdesula) Model. *Journal of Oceanography and Marine Research*, 5(2), 1–5. <https://www.longdom.org/open-access/using-side-scan-sonar-instrument-for-seabed-identification-with-pattern-discrete-equi-spaced-unshaded-line-array-pdesula-model-2572-3103-1000163.pdf>
- M5 *Integrated Multibeam Sonar*. (2021). Baywei. https://www.bayweisonar.com/_files/ugd/363a57_3370dba4adb24cbea29ae5ac7ee0c500.pdf
- Mandlbürger, G. (2022, November 30). A REVIEW OF ACTIVE AND PASSIVE OPTICAL METHODS IN HYDROGRAPHY . IHO. <https://ihr.iho.int/articles/a-review-of-active-and-passive-optical-methods-in-hydrography/>
- Martí, A., Portell, J., Amblas, D., de Cabrera, F., Vilà, M., Riba, J., & Mitchell, G. (2022). Compression of Multibeam Echosounders Bathymetry and Water Column Data. *Remote Sensing*, 14(9). <https://doi.org/10.3390/rs14092063>

Monfils, R. (2023). *Map of World War 2 Shipwrecks* . Brilliant Maps.
<https://brilliantmaps.com/ww2-shipwrecks/>

Multibeam Echosounder Specifications. (2020). In *R2SONIC*.

Multibeam sonar. (2022). Flanders Marine Institute. <https://www.vliz.be/en/multibeam-en>

NORBIT Subsea WINGHEAD i80S. (2022). Geo-Matching. <https://geo-matching.com/multibeam-echosounders/winghead-i80s-stabilised>

Norbit Winghead i80S. (2022). In *Norbit Subsea*. www.norbit.com

Reson SeaBat 7125 ROV Operator'S Manual. (2011). ManualsLib.
<https://www.manualslib.com/manual/1236089/Reson-Seabat-7125-Rov.html>

ROV FAQs . (2023). Schmidt Ocean Institute. <https://schmidtocean.org/education/rov-faqs/>

SeaBat T50-R. (2020). In *Teledyne Reson*. <https://www.subtop.fr/wp-content/uploads/2020/11/SeaBat-T50-R-product-leaflet.pdf>

SeaBat T50-R . (2022). Teledyne Marine. <http://www.teledynemarine.com/SeaBat-T50-R?ProductLineID=52>

Shang, X., Zhao, J., & Zhang, H. (2019). Obtaining High-Resolution Seabed Topography and Surface Details by Co-Registration of Side-Scan Sonar and Multibeam Echo Sounder Images. *Remote Sensing* , 11(12). <https://doi.org/10.3390/RS11121496>

Shark-S150D Dual Frequency Side Scan Sonar . (2017). Icocean.
<http://lconar.com/PRODUCT-SideScanSonar/64.html>

Shipwrecks . (2022). Global Foundation for Ocean Exploration.
<https://www.engineeringfordiscovery.org/education/%20shipwrecks/>

Side-Scan Sonar. (2022a). National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA).
<https://oceanexplorer.noaa.gov/technology/sonar/side-scan.html>

Side-Scan Sonar. (2022b). Robert Wilson Marine Technologies.
<https://www.rwmt.se/surveying-tools/side-scan-sonar>

Single Beam Echo Sounders . (2021). CEE HydroSystems.
<https://ceehydrosystems.com/products/single-beam-echo-sounders/>

Single Beam Echosounder Samples. (2013). Oceanic Imaging Consultants Inc.
<https://www.oicinc.com/single-beam-echosounder-samples.html>

Single-Beam Echo Sounders. (2022). SyQwest.
<https://www.syqwestinc.com/products/hydrographic-echo-sounders>

Sonic 2022. (2023). R2SONIC. <https://www.r2sonic.com/products/sonic-2022/>

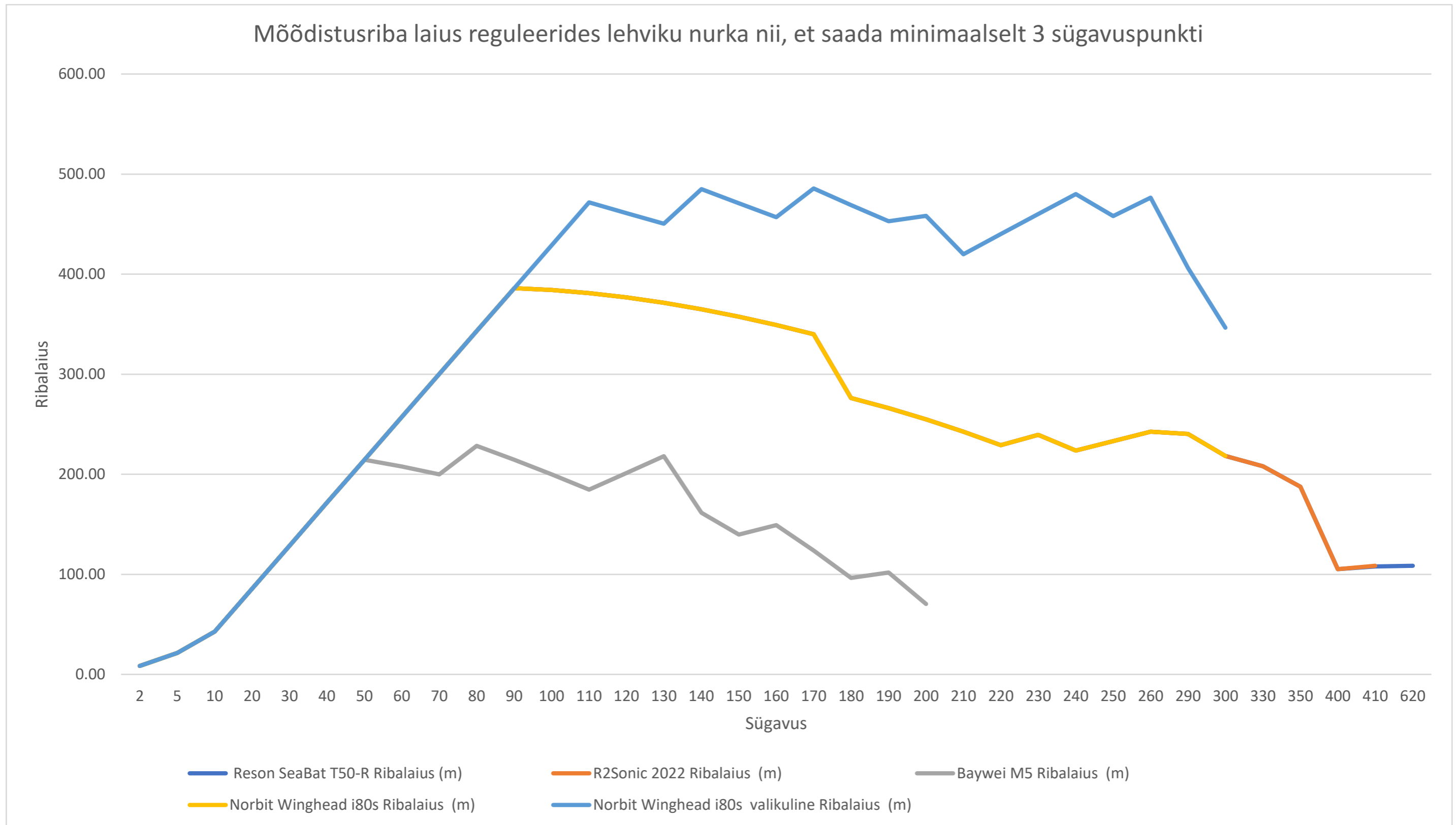
- The UNESCO Convention on the Protection of the Underwater Cultural Heritage.* (2007). UNESCO. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000152883/PDF/152883eng.pdf.multi>
- Tillin, H., Luff, A., Davison, J., Perrett, J., Huvenne, V., Bett, B., & van Rein, H. (2018). Autonomous Underwater Vehicles for use in marine benthic monitoring. *JNCC*, 1–27.
- What is an AUV?* . (2023). Virginia Institute of Marine Science. <https://www.vims.edu/research/units/legacy/cornwallis/auv/index.php>
- What is an ROV?* (2022). NOAA Office of Ocean Exploration and Research. <https://oceanexplorer.noaa.gov/facts/rov.html>
- What is Microsoft Excel?* (2020). Technopedia. <https://www.techopedia.com/definition/5430/microsoft-excel>
- Why is Airspeed Measured In Knots?: Why Airplanes Use Knots!* (2023). HighSkyFlying. https://www.highskyflying.com/why-is-airspeed-measured-in-knots/?utm_content=cmp-true
- Why not to survey at more than 130°.* (2023). R2Sonic. <https://www.r2sonic.com/max-recommended-swath-sector/>
- Wyllie, K., Weber, T., & Armstrong, A. (2015). Using Multibeam Echosounders for Hydrographic Surveying in the Water Column: Estimating Wreck Least Depths. *University of New Hampshire*. <https://scholars.unh.edu/ccom>

Lisa 1. Mitmekiireliste kajaloodide võimekuse hinnang objektide või vrakkide tuvastamiseks

Tabel 22. Mitmekiireliste kajaloodide võimekuse hinnang objektide või vrakkide tuvastamiseks

Algandmed: Lehviku laius 130°, maksimaalne kiirtehuik; Laeva kiirus 8 sõlme										
Sügavused (m)	Reson SeaBat T50-R	Ribalaius (m) Reson SeaBat T50-R	R2Sonic 2022	Ribalaius (m)	Baywei M5	Ribalaius (m)	Norbit Winghead i80s	Ribalaius (m)	Norbit Winghead i80s valikuline	Ribalaius (m)
	Lehviku laius	Lehviku laius	Lehviku laius		Lehviku laius		Lehviku laius			
2	130°	8.58	130°	8.58	130°	8.58	130°	8.58	130°	8.58
5	130°	21.45	130°	21.45	130°	21.45	130°	21.45	130°	21.45
10	130°	42.89	130°	42.89	130°	42.89	130°	42.89	130°	42.89
20	130°	85.78	130°	85.78	130°	85.78	130°	85.78	130°	85.78
30	130°	128.67	130°	128.67	130°	128.67	130°	128.67	130°	128.67
40	130°	171.56	130°	171.56	130°	171.56	130°	171.56	130°	171.56
50	130°	214.45	130°	214.45	130°	214.45	130°	214.45	130°	214.45
60	130°	257.34	130°	257.34	120°	207.85	130°	257.34	130°	257.34
70	130°	300.23	130°	300.23	110°	199.94	130°	300.23	130°	300.23
80	130°	343.12	130°	343.12	110°	228.50	130°	343.12	130°	343.12
90	130°	386.01	130°	386.01	100°	214.52	130°	386.01	130°	386.01
100	125°	384.20	125°	384.20	90°	200.00	125°	384.20	130°	428.90
110	120°	381.05	120°	381.05	80°	184.60	120°	381.05	130°	471.79
120	115°	376.72	115°	376.72	80°	201.38	115°	415.69	125°	461.04
130	110°	371.32	110°	371.32	80°	218.17	110°	371.32	120°	450.33
140	105°	364.90	105°	364.90	60°	161.66	105°	364.90	120°	484.97
150	100°	357.53	100°	357.53	50°	139.89	100°	357.53	115°	470.91
160	95°	349.22	95°	349.22	50°	149.22	95°	349.22	110°	457.01
170	90°	340.00	40°	340.00	40°	123.75	90°	340.00	110°	485.57
180	75°	276.24	75°	276.24	30°	96.46	75°	276.24	105°	469.16
190	70°	266.08	70°	266.08	30°	101.82	70°	266.08	100°	452.87
200	65°	254.83	65°	254.83	20°	70.53	65°	254.83	95°	458.35
210	60°	242.49	60°	242.49			60°	242.49	90°	420.00
220	55°	229.05	55°	229.05			55°	229.05	90°	440.00
230	55°	239.46	55°	239.46			55°	239.46	90°	460.00
240	50°	223.83	50°	223.83			50°	223.83	90°	480.00
250	50°	233.15	50°	233.15			50°	233.15	85°	458.17
260	50°	242.48	50°	242.48			50°	242.48	85°	476.49
290	45°	240.24	45°	240.24			45°	240.24	70°	406.12
300	40°	218.38	40°	218.38			40°	218.38	60°	346.41
330	35°	208.10	35°	208.10						
350	30°	187.56	30°	187.56						
400	15°	105.32	15°	105.32						
410	10°	107.96								
620	10°	108.49								

Lisa 2. Mõõdistusriba laius reguleerides lehviku nurka nii, et saada minimaalselt 3 sügavuspunkti 1m² kohta



Joonis 18. Mõõdistusriba laius reguleerides lehviku nurka nii, et saada minimaalselt 3 sügavuspunkti 1m² kohta

Lisa 3. Objekt 3x3 mõõtmed

Tabel 23. Objekt 3x3 mõõtmed

Objekt 3x3 mõõtmed; Laeva kiirus 8 sõlme; Lehviku laius 130 kraadi; Max sügavus 300 m; Max kiirtehn										
Sügavus	Reson SeaBat T50-R (1024)		R2Sonic 2022 (1024)		Baywei M5 (256)		Norbit Winghead i80s (1024)		Norbit Winghead i80s (2048)	
2.00	0.16	0.02	0.14	0.02	0.16	0.07	0.14	0.02	0.14	0.01
5.00	0.16	0.04	0.14	0.04	0.16	0.17	0.14	0.04	0.14	0.02
10.00	0.27	0.08	0.27	0.08	0.27	0.34	0.27	0.08	0.27	0.04
20.00	0.55	0.17	0.55	0.17	0.55	0.67	0.55	0.17	0.55	0.08
30.00	0.82	0.25	0.82	0.25	0.82	1.01	0.82	0.25	0.82	0.13
40.00	1.18	0.34	1.18	0.34	1.18	1.35	1.18	0.34	1.18	0.17
50.00	1.37	0.42	1.37	0.42	1.37	1.68	1.37	0.42	1.37	0.21
60.00	1.65	0.50	1.65	0.50	1.65	2.02	1.65	0.50	1.65	0.25
70.00	2.06	0.59	2.06	0.59	2.06	2.35	2.06	0.59	2.06	0.29
80.00	2.74	0.67	2.74	0.67	2.74	2.69	2.74	0.67	2.74	0.34
90.00	2.74	0.75	2.74	0.75	2.74	3.03	2.74	0.75	2.74	0.38
100.00	2.74	0.84	2.74	0.84	2.74	3.36	2.74	0.84	2.74	0.42
110.00	4.12	0.92	4.12	0.92	4.12	3.70	4.12	0.92	4.12	0.46
120.00	4.12	1.01	4.12	1.01	4.12	4.04	4.12	1.01	4.12	0.50
130.00	4.12	1.09	4.12	1.09	4.12	4.37	4.12	1.09	4.12	0.54
140.00	4.12	1.17	4.12	1.17	4.12	4.71	4.12	1.17	4.12	0.59
150.00	4.12	1.26	4.12	1.26	4.12	5.05	4.12	1.26	4.12	0.63
160.00	8.23	1.34	8.23	1.34	8.23	5.38	8.23	1.34	8.23	0.67
170.00	8.23	1.43	8.23	1.43	8.23	5.72	8.23	1.43	8.23	0.71
180.00	8.23	1.51	8.23	1.51	8.23	6.06	8.23	1.51	8.23	0.75
190.00	8.23	1.59	8.23	1.59	8.23	6.39	8.23	1.59	8.23	0.80
200.00	8.23	1.68	8.23	1.68	8.23	6.73	8.23	1.68	8.23	0.84
210.00	8.23	1.76	8.23	1.76	-	-	8.23	1.76	8.23	0.88
220.00	8.23	1.84	8.23	1.84	-	-	8.23	1.84	8.23	0.92
230.00	8.23	1.93	8.23	1.93	-	-	8.23	1.93	8.23	0.96
240.00	8.23	2.01	8.23	2.01	-	-	8.23	2.01	8.23	1.01
250.00	8.23	2.10	8.23	2.10	-	-	8.23	2.10	8.23	1.05
260.00	8.23	2.18	8.23	2.18	-	-	8.23	2.18	8.23	1.09
270.00	8.23	2.26	8.23	2.26	-	-	8.23	2.26	8.23	1.13
280.00	8.23	2.35	8.23	2.35	-	-	8.23	2.35	8.23	1.17
290.00	8.23	2.43	8.23	2.43	-	-	8.23	2.43	8.23	1.22
300.00	8.23	2.52	8.23	2.52	-	-	8.23	2.52	8.23	1.26

Lihlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina, Ilja Koudelka

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihlitsentsi) enda loodud teose „Akustiliste seadmete ja meetodite võrdlus vrakkide uurimiseks“, mille juhendaja on Allan Prommik, Peeter Väling

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 lihlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

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

22.05.23

¹ Lihlitsents 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 lihlitsentsi punktidele 1.1. jq 1.2, siis lihlitsents nimetatud tähtaja jooksul ei kehti.