



Merenduskeskus

Fred Kristian Liivamägi

**Hoovuste dünaamika ja selle mõju keskkonnaparameetrite
muutlikkusele parvlaev „Estonia“ vraki piirkonnas perioodil juuli
2021 kuni märts 2022**

Lõputöö

Juhendaja: doktorant-nooremteadur Oliver Samlas

Kaasjuhendaja: doktor Inga Zaitseva-Pärnaste

Tallinn 2022

Olen koostanud töö iseseisvalt.

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

Fred Kristian Liivamägi

(allkirjastatud digitaalselt, kuupäev digiallkirjas)

Üliõpilase kood: 183507VDVR

Üliõpilase e-posti aadress: fred.liivamagi@taltech.ee

Juhendajad doktorant-nooremteadur Oliver Samlas ja doktor Inga Zaitseva-Pärnaste:

Töö vastab lõputööle esitatud nõuetele

(allkirjastatud digitaalselt, kuupäev digiallkirjas)

Kaitsmiskomisjoni esimees Dr. Inga Zaitseva-Pärnaste

Lubatud kaitsmisele

(allkirjastatud digitaalselt, kuupäev digiallkirjas)

Sisukord

Annotatsioon.....	4
Kasutatud lühendid.....	5
Sissejuhatus	6
1 Läänemeri	7
1.1 Veebilanss ja topograafia.....	7
1.2 Stratifikatsioon.....	7
1.3 Hapniku sisaldus.....	10
1.4 Tsirkulatsioon ja hoovused.....	11
1.5 Meteoroloogilised tingimused	14
1.6 Parvlaev Estonia uuringud.....	15
2 Metoodika, seadmed ja andmed	16
2.1 ADCP.....	16
2.2 ERA5 andmekogu.....	19
3 Andmete analüüs.....	20
3.1 Meteoroloogiliste tingimuste mõju hoovuse dünaamikale.....	20
3.2 Hoovused.....	23
3.2.1 Hoovuse kiiruse aegread erinevatel sügavustel.....	25
3.2.2 Hoovuse kiiruse progressiivvektor diagrammid erinevatel sügavustel ja hoovuste polaarhistogrammide põhjalähedases kihis	28
3.3 Soolsus, temperatuur ja hapnik.....	32
Kokkuvõte	35
Summary.....	36
Viidatud allikad	38

Annotatsioon

Antud töö eesmärgiks on kirjeldada hoovuste dünaamikat parvlaev „Estonia“ vraki piirkonnas ja selgitada välja kas ja mis tingimustel esinevad tugevamad hoovuste sündmused, millistest teguritest on need mõjutatud ja kuidas hoovuste dünaamika mõjutab keskkonna parameetrite muutlikkust antud piirkonnas. Töös kasutati perioodidel juuli kuni november 2021 ja detsember 2021 kuni märts 2022 teostatud uuringute käigus ADCP platvormiga mõõdetud hoovuste andmeid, millest saadi ülevaade hoovuste dünaamikast läbi terve veesamba. Hoovuste, keskkonnaparameetrite ja neid mõjutavate tegurite kirjeldamiseks koguti ja analüüsiti hoovuse kiiruseid, temperatuuri, soolsuse ja lahustunud hapniku sisalduse muutuseid ning analüüsiti tuuletingimusi antud piirkonnas. Tuulel on Läänemere ava osa hoovustele suur mõju, mis võib ulatuda kuni merepõhjani. Kogu veesamba ühtlustumist takistas sesoonne stratifikatsioon, mistõttu suurimad hoovuse kiirused võisid esineda nii pinna- kui põhjakihis. Maksimaalsed hoovuse kiirused põhjalähedases kihis olid mõlemal perioodil ligikaudu sama suured, ning olid seotud tugevamate tuulte esinemisega. Merepõhjas olid hoovused ka omakorda mõjutatud põhja topograafiast, voolates ligikaudu vastassuunas pinnahoovustega. Hapnikutingimused varieerusid anoksilistest tingimustest kuni suhteliselt kõrgete kontsentratsioonideni, mis olid seotud veemasside vahetumisega mõõdistuste piirkonnas või veesamba vertikaalse segunemisega. Hapnikutingimuste suure ning pideva varieerumise tõttu võib ka eeldada, et parvlaev „Estonia“ korrosiooni tase on märkimisväärne.

Märksõnad: Läänemeri, ADCP, hoovused, stratifikatsioon, lahustunud hapnik, parvlaev „Estonia“

Kasutatud lühendid

MBI	Tugevam soolase vee sissevoolu sündmus <i>Major Baltic Inflow</i>
JAIC	„Estonia“ õnnetuse uurimise Eesti, Soome ja Rootsi ühiskomisjon <i>The Joint Accident Investigation Commission of Estonia, Finland and Sweden</i>
ADCP	akustiline hoovuse profileerija <i>Acoustic Doppler Current Profiler</i>
DCP	hoovuse profileerija <i>Doppler Current Profiler</i>
MARNET	Merekeskkonna seirevõrk <i>Marine Environment Observation Network</i>
ODV	Andmetöötlusprogramm meremõõdistuse andmete jaoks <i>Ocean Data View</i>
MSI	Meresüsteemide Instituut <i>Department of Marine Systems</i>
TalTech	Tallinna Tehnikaülikool <i>Tallinn University of Technology</i>

Sissejuhatus

See diplomitöö on aktuaalne kuna esitamise ajal jätkuvad aktiivsed uuringud Estonia vraki merepiirkonnas, mille üks suur koostöö partner on Tallinna Tehnikaülikooli (TalTech) Meresüsteemide Instituut (MSI). Antud töö on üks osa MSI suuremast tööprotsessist. Autor ise ei organiseerinud ega teostanud merel kontaktmöödistusi. Meresüsteemide Instituut jagas kõik vajalikud möödistusandmed, millega autor teostas analüüsi maal. MSI andmete tellija oli OhutusjuurdLuse Keskus enne selle diplomitöö alustamist. Uuringute tulemusena kasutatakse saadud andmeid ja analüüsi, et teha järeldusi, kas ja kui palju on merekeskkond (sealhulgas tugevad hoovused, hapnikuga ja hapnikuta veemasside vaheldumine) ja sealsed protsessid parvlaev „Estonia“ vrakki mõjutanud.

Ava-Läänemere merekeskkonda on üldiselt vähe uuritud. Parvlaev „Estonia“ vraki piirkonnas pole varasemalt okeanograafiliste parameetrite pikaajalisi mõõtmisi teostatud. Antud diplomitöö eesmärgiks on kirjeldada parvlaev „Estonia“ vraki piirkonnas hoovusi ja mere füüsikalisi tingimusi suvisel-sügisesel (juuli kuni november 2021) ja talvisel (detsember 2021 kuni märts 2022) perioodil, ning leida kas ja mis tingimustel esineb seal tugevamaid hoovusi, keskendudes ka põhjalähedase kihi hoovustele ja keskkonna parameetritele.

Töö on jagatud neljaks osaks. Esimeses osas antakse üldisem ülevaade Läänemere keskkonnast, kui ka täpsemalt hoovustest ja neid mõjutavatest teguritest. Teises osas käsitletakse töös kasutatud seadmeid, meetodikat ning kasutatud andmeid. Eelviimases osas on esitatud andmete analüüsi tulemused, millele järgneb kokkuvõte.

1 Läänemeri

1.1 Veebilanss ja topograafia

Läänemeri on poolsuletud meri, mis on ühendatud maailmamerega läbi kitsaste Taani väinade. Läänemere pindala on 412 000 km² ja ruumala, ilma Kattegatita, 20 800 km³. Vahemaa Taani väinadest Soome lahe lõpuni on umbes 1400 km, Botnia lahe põhja tippu umbes 1700 km. Selle mere kõige suurem osa on Ava-Läänemeri, pindala 211 000 km², mis omakorda jaguneb alambasseinideks. See ala on ka keskmiselt kõige sügavam, 62 m, võrreldes kogu Läänemere keskmise sügavusega, mis on 55 m (Elken & Matthäus, 2008, lk 379). Suurim sügavus asub Landsorti süvikus, 459 m. Võrreldes maailmamerega on Läänemeri suhteliselt madal ning ei esine ookeani morfoloogia elemente, näiteks ookeani keskahelik, mandrinõlv jms. Kõige rohkem sarnaneb Läänemere põhi geoloogilise ehituse poolest mandrilavale ehk šelfile, mis kujutab endast üle ujutatud maismaad (Elken et al., 2018, lk 11–16).

Kui arvestada keskmist jõgede vooluhulka ja veevahetust läbi Taani väinade, siis Läänemere kogu veemassi viibeaeg on 24 aastat. Jõgede kaudu tuleb aastas Läänemerre keskmiselt 440 km³ vett. Sellest ainuüksi umbes veerand (114 km³) suubub Neeva jõest (Alenius et al., 1998, lk 99). Sademed (225 km³ aastas) ületavad aurumist (185 km³ aastas), see tähendab, et sademete ülejäägist lisandub Läänemerre aastas 40 km³ magevett. Seega peab Taani väinadest välja voolama, võrreldes sissevooluga, 480 km³ võrra rohkem vett, et meretase püsiks statsionaarne. Seda arvu saab ka pidada Läänemere erinevate soolsustega vete sisse- ja väljavoolude vaheks (Elken et al., 2018, lk 11). Käib ka arutelu, kas globaalne soojenemine suurendab jõgede vooluhulka Läänemerre. Näiteks perioodil 1950 kuni 2015, oli aasta 2015 Läänemere jaoks üks kolmest kõige suurema jõgede vooluhulgaga aastast. Seda toetavad ka enamik mudeleid ja kliimastenaariume (Johansson, 2016). Hansson et al. poolt 2011 aastal läbi viidud 500 aasta jõgede vooluhulkade simulatsioon kogu Läänemere kohta leidis aga vastupidised tulemused. Kõrgemad temperatuurid võivad suurendada aurumise määra, eriti lõuna osas, mis võivad omakorda mõjutada vooluhulka (Hansson et al., 2011).

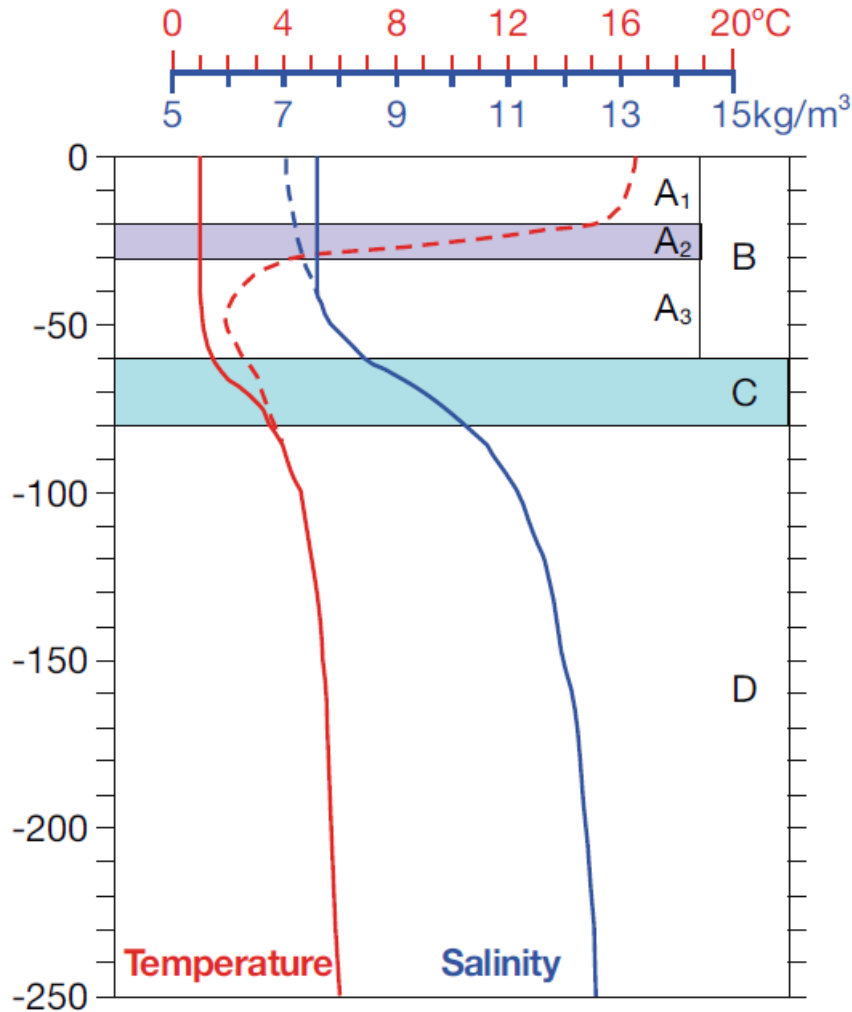
1.2 Stratifikatsioon

Poolsuletud Läänemeres on vee kihistumine tugevasti mõjutatud mageda jõevee ja soolase Põhjamere vee liikumisest ja segunemisest. Tänu sellele on Läänemeres selgelt eristuvad veekihid,

mille vahele jäävad üleminekukihid ehk kliinid ühest veemassist teise. Soolsuse järgi vahekihti kutsutakse halokliiniks ja temperatuuri järgi termokliiniks. Soolsuse all mõeldakse merevees lahustunud anorgaaniliste soolade kogust. See omadus määratleb kvantitatiivset mõistet „soolane“ ja „mage“. Selles töös on soolsuse andmed toodud 1978. aasta praktilise soolsuse skaala alusel ja ühikud tähistatud kui PSU, kuid teooria absoluutse soolsuse ühikuga g/kg (nende omavaheline erinevus on Läänemeres umbes 0,1 ühikut). Sissevoolav suurema tihedusega soolane vesi liigub basseini sügavamates kihtides ning magedam ülemistes (Elken et al., 2018, lk 45). Põhjamerest voolab sisse enamasti 12 – 16 g/kg soolsusega tihedam merevesi, aga suurte sissevoolu sündmuste ajal võib soolsus tõusta ka üle 20 g/kg (Elken et al., 2018, lk 124). Lisaks merevee ringlusele mõjutab soolsus nii taimede kui ka loomade liigilist koosseisu (Elken et al., 2018, lk 251).

Läänemerre on suhteliselt suur mageda vee sissevool jõgedest ning sademete hulk ületab aurumist. Need protsessid on teinud keskmise soolsuse märgatavalt väiksemaks võrreldes ookeaniga. Seetõttu kutsutakse ka Läänemerd riimveeliseks veekoguks. See tähendab, et merevee soolsus jääb maailmamere keskmise (35 g/kg) ja magevee vahele. Kasutusel on veel ka järgmine definitsioon: merevesi, mille külmumispunkt on madalam kui maksimaalse tiheduse temperatuur. Mis tähendab, et riimveelisel merel on soolsus alla 24,7 g/kg. (Leppäranta, 2009, lk 58, 59) Näiteks Ava-Läänemeres Gotlandi saarest ida pool on soolsus 6 kuni 8 g/kg pinnakihis ja 12 kuni 13 g/kg põhjakihis (Lagina K. & Ohvril H., 1994, lk 33). Kui liikuda Ava-Läänemeres põhja ja ida suunas, siis soolsus väheneb veelgi. Kõige magedam merevesi asub Botnia lahe põhja-osas ning Soome lahe ida-osas, Neeva jõe suudme lähedal. Mõlemas asukohas on pinnavee soolsus kohati alla 3 g/kg (Elken et al., 2018, lk 53). Kui rääkida kogu Läänemere keskmisest soolsusest, siis see on umbes 7 g/kg. Riimveelisi veekogusid esineb looduses vähe, mis teeb Läänemere maailmas eriliseks veekoguks (Leppäranta, 2009, lk 59).

Läänemeres paikneb 60 – 80 m sügavusel püsiv halokliin (joonis 1), milles sügavamale liikudes kasvab kiiresti soolsus ja veetihedus. See on üleminekuala magedamast ülemisest kihist soolasema süvakihini. Talvine jahtumine ja segunemine ei ulatu sellest halokliinist sügavamale. Teisisõnu, terve veesammas ei saa kogunisti läbi seguneda kuni merepõhjani. See aastaringne halokliin esineb Ava-Läänemere sügavamates piirkondades ning osaliselt ka Soome lahes. Madala sügavuse ning kitsaste väinade tõttu moodustuvad Liivi ja Botnia lahes eraldiseisevad halokliinid (Elken et al., 2018, lk 55).



Joonis 1. Ava-Läänemere tüüpiline termohaliinne stratifikatsioon, pidev joon on talvel ja katkendlik suvel. C-ga on tähistatud aastaringi püsiv halokliin ja A₂ suvine termokliin (Elken & Matthäus, 2008, lk 380).

Ülemistes ja alumistes veekihtides on temperatuuri hooajaline muutus väga erinev. Suvel esineb Läänemere pealmistes kihtides, sügavusel 20 – 30 m, selgelt eristatav termokliin, mis on järsk vee temperatuuri muutusega vahemik (joonis 1). Selle peal paiknev ülemine kiht ei ole kogu ulatuses homogeenne (Leppäranta, 2009, lk 70). Sügavamale liikudes läheb vesi järsult külmemaks. Talvel kaob see kiht ajutiselt ära mere jahtumise ning segunemise tõttu (Elken et al., 2018, lk 55).

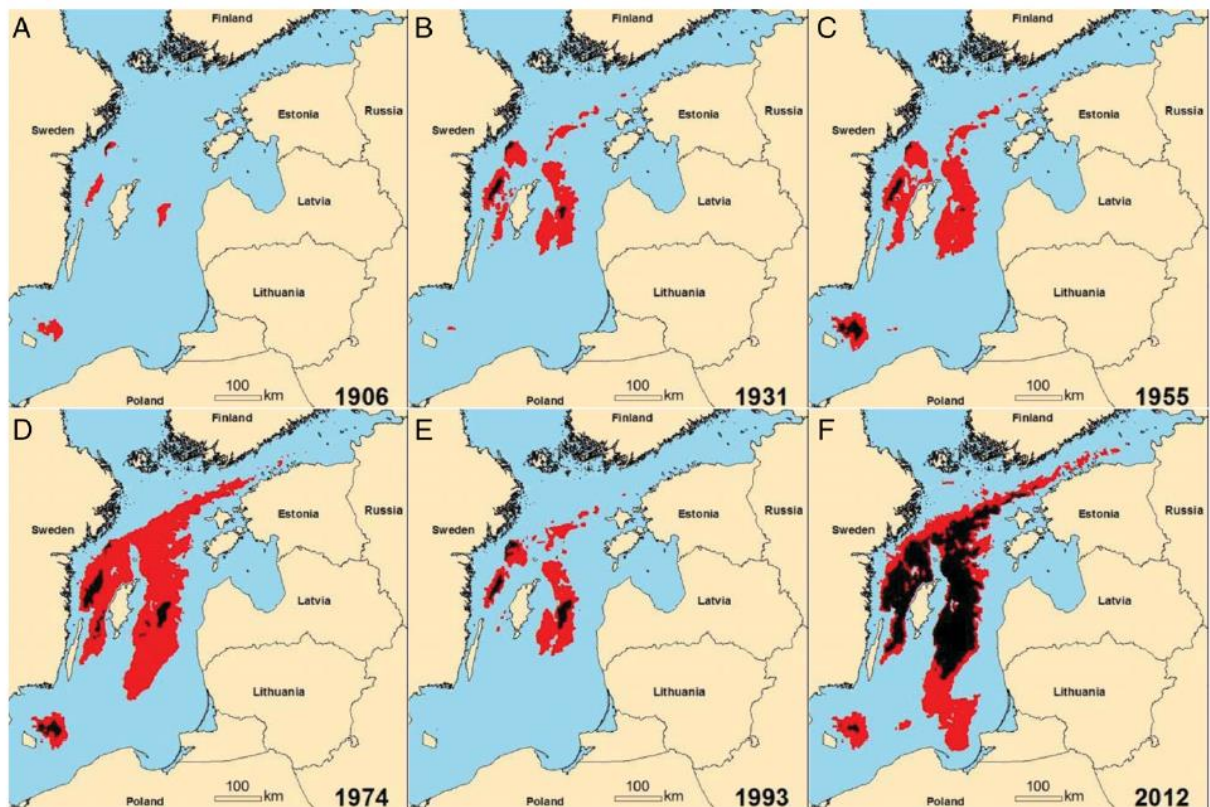
Tugevama soolase vee sissevoolu sündmuste ajal (MBI, *Major Baltic Inflow*) võib Põhjamerest Läänemere sisse voolata isegi 25 g/kg soolsusega vesi. Sellised sündmused ei ole perioodilised ning toimumiste vahed võivad ulatuda mitmest aastast mitmekümne aastani. MBI sündmuse esinemisel lõhutakse ära Kattegati ja Skagerraki vahel olev soolsuse front ning soolane vesi jõuab Taani väinadesse. Sealt on see võimeline edasi liikuma Ava-Läänemere suunas mööda

süvabasseinide kaskaadi. Põhjakihiti, kus esineb hapnikupuudus ehk anoksia, toob MBI endaga kaasa hapniku, mis ei ulatu sinna tavalise sissevooluga (Elken et al., 2018, lk 124, 139, 254).

1.3 Hapniku sisaldus

Hapniku vertikaalne ja horisontaalne jaotus on seotud mere füüsikaliste, keemiliste ning bioloogiliste teguritega. Näiteks soolases vees on maksimaalne võimalik lahustunud hapniku sisaldus väiksem kui magedas (Elken et al., 2018, lk 252). Veekogudele on hapniku allikaks Maa atmosfäär ning veetaimeses toimuv fotosüntees. Mereorganismid kasutavad hapnikku hingamiseks ning orgaanilise aine aeroobseks lagundamiseks. Viimane toimub hapniku juuresolekul. Läänemere pinnakihi on suur hapniku sisaldus (aeroobne keskkond) võrreldes tema põhjalähedaste kihtidega, mis võivad olla anaeroobsed. Selle üheks põhjuseks on asjaolu, et kõik orgaanilised ained ei lagune täielikult veesambas. Nad settivad merepõhja, kus nende edasine lagundamine nõuab samamoodi hapnikku. Teise suure põhjusena saab tuua välja aastaringi püsiva halokliini. See takistab Ava-Läänemeres ülemise hapnikukriika kihi segunemist põhjakihiga. Seetõttu paranevad põhjakihis hapnikutingimused ainult MBI-de ajal (Elken et al., 2018, lk 254).

Kõik elusorganismid vajavad hapnikku elus püsimiseks. Nõudlus hapnikule on üldiselt seotud organismi suuruse ja aktiivsusega. Vees aktiivselt liikuvad ja suuremad organismid tarbivad rohkem lahustunud hapniku kui väikesed ning sessiilsed organismid. Samas tuleb märkida, et massiühiku kohta tarbivad väikesed organismid rohkem hapniku kui suured. Sest ainevahetuse määr ei suurene organismi mõõtmete suurenemisega proportsionaalselt. Tingimusi, kus hapniku sisaldus on alla 2 mg l^{-1} nimetatakse hüpoksilisteks, täielikku hapnikupuudust aga anoksiliseks. Selline keskkond piirab juba mereelu kasvu, aktiivsust ning liigirikkust. Lisaks toovad hüpoksilised tingimused kaasa ka füsioloogilised muutused organismides, näiteks suurem punaliblede arv (Elken et al., 2018, lk 253–255). Erinevad uuringud on aga leidnud, et enamike kala- ja koorikloomaliikide jaoks võib see piir, lahustunud hapniku sisaldus alla 2 mg l^{-1} , isegi liiga madal olla (Vaquer-Sunyer & Duarte, 2008). Sellest võib järeldada, et enamus nendest ei jääks ellu hüpoksilises merevees. Läänemeres on hapnikuvaene keskkond märgatavalt laienenud 20. sajandi algusest alates (joonis 2).



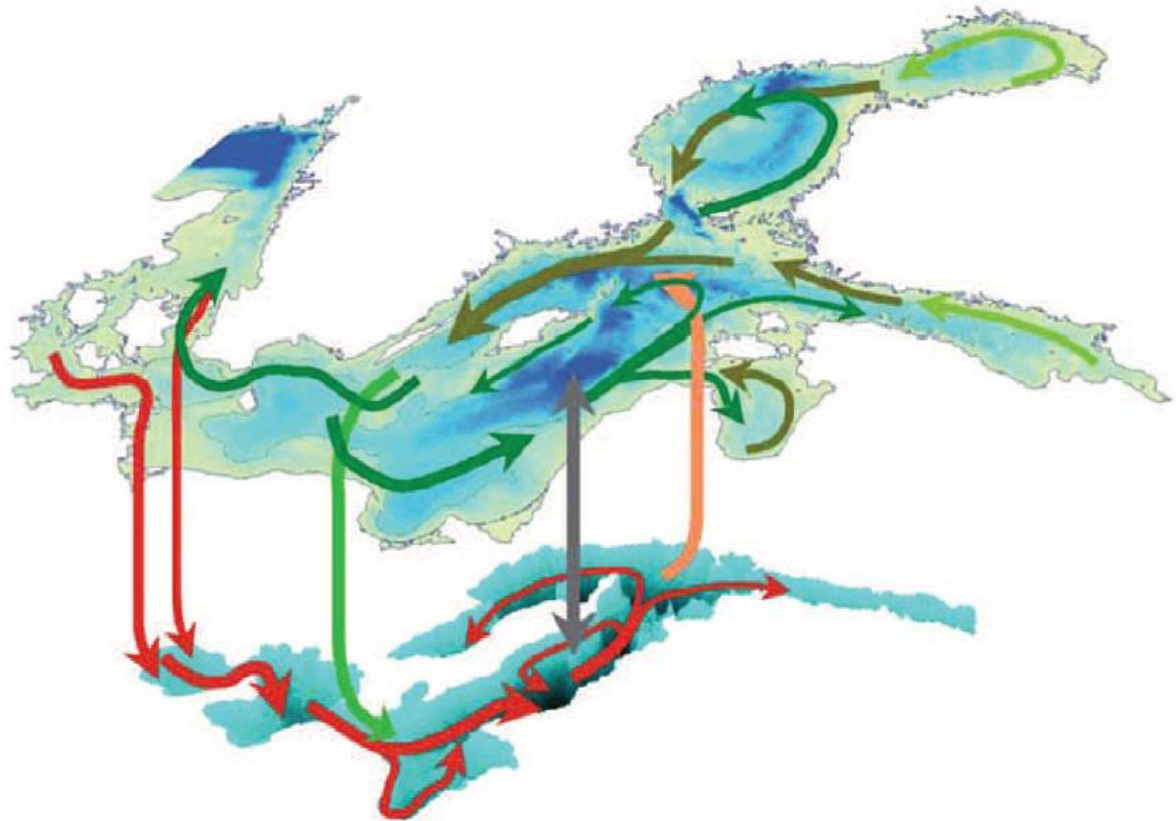
Joonis 2. Merepõhjas hüpoksilise ja anoksilise keskkonna jaotus ja laienemine ajas. Punasega on märgitud hüpoksilised alad ning mustaga nullilähedase hapniku kontsentratsiooniga keskkond (Carstensen et al., 2014).

Lahustunud hapniku sisaldus on mõjutatud mitmest tegurist, mis ei ole omavahel otseses seoses. Siia alla kuuluvad loomade ja taimede metabolism, atmosfääri ja vee vaheline hapniku vahetus, merevees orgaanilise aine lagundamine, hüdrodünaamika, merevee füüsikalised omadused, nagu temperatuur ja soolsus, mis mõjutavad hapniku lahustuvust, jms. Lahustunud hapniku sisalduse määramiseks on arendatud erinevaid meetodeid (nt. Winkler) ja andureid (nt. optiline, polarograafiline). Lisaks veel kindlad reeglid ning standardid, kuidas kogutud andmeid analüüsida. Hapniku andmeid saab kasutada Läänemere seisundi hindamiseks, näiteks eutrofeerumise taseme hindamiseks (*Profiling Current Meter*, 2016).

1.4 Tsirkulatsioon ja hoovused

Läänemere üldtsirkulatsioon on tüüpiline ülekaaluka magevee juurdevooluga merele. Taani väinadest sissevoolavad suurema tihedusega veed liiguvad basseini sügavamates kihtides ning magedam vesi ülemistes (Joonis 3). See ei ole otseses seoses ookeanide üldtsirkulatsiooniga, sest Läänemerel on läbi väinade piiratud ühendus maailmamerega. Samas esineb nende vahel palju sarnasusi. Näiteks termohaliinne tsirkulatsioon on veetiheduse erinevuse tõttu põhjustatud

ümberpöörav liikumine mere pinna- ja süvakihtides. Tiheduse põhilised mõjutajad on temperatuur ja soolsus, mille järgi on antud tsirkulatsioon saanud oma nime (Elken et al., 2018, lk 120, 123).



Joonis 3. Skeem Läänemere vee ringlusest. Ülemine ja alumine veekiht on eraldatud aastaringi püsiva halokliiniga. Rohelised nooled tähistavad ülemise veemassi liikumissuunda ja punased alumise. Heleroheline ja beež nool tähistavad kahe antud kihi vahelist tsirkulatsiooni. Hall aga difusiooni. See tähendab veeosakeste turbulentset segunemist (Elken & Matthäus, 2008, lk 386).

Läänemeres tekitavad hoovusi põhiliselt järgmised kolm looduses esinevat nähtust: termohaliinne tiheduse gradient, veetaseme gradient ja tuule pinge. Nendest lähtuvalt on ookeani hoovuste ja Läänemere hoovuste vahel sarnaseid omadusi, aga nad pole täpselt samasugused, nt. termohaliinne tsirkulatsioon (Elken et al., 2018, lk 78). Läänemere hoovuste mõjutajateks võib välja tuua ka Coriolise kiirenduse ning merepõhja topograafia. Merevee keskmine tsirkulatsioon on suuna poolest tsükloonaalne ehk vastupäeva iseloomuga. Selline keskmiselt püsiv vee ringvool üleval ning allpool halokliini on nii Ava-Läänemeres kui ka Botnia meres. Merevee tsirkulatsioon transpordib Ava-Läänemeres soolasid ja soojust. See tähendab, et Läänemere avaosa ida osa on üldiselt soolasem ja soojem kui lääne osa, mis on põhjustatud vastupäeva liikuva tsirkulatsiooni tõttu (Leppäranta, 2009, lk 144). Lisaks on veepinna keskmine tsirkulatsioon suhteliselt nõrk. Kui võrrelda Atlandi ookeani Golfi hoovusega, siis niisugust püsivat hoovuse struktuuri Läänemeres

ei esine (Leppäranta, 2009, lk 144). Liivi, Soome ja Botnia lahes on hoovuste püsivus isegi veel väiksem, sest nad on rohkem mõjutatud tuule poolt (Elken et al., 2018, lk 120–123).

Hoovuse kiiruse ühikuks kasutatakse cm/s. Näiteks Arkona basseinis oli mõõdetud ADCP-ga (*Acoustic Doppler Current Profiler*) MARNET jaamas (*Marine Environment Observation Network*) hoovuse hetkeväärtusi 10-aastat järjest, mille põhjal arvutati keskmine tsonaalne hoovuse kiirus. See oli umbes 1.5 cm/s standardhälbega ± 9 cm/s. Ankurdatud jaamaga (*mooring observation*) tehtud mõõdistusena saab välja tuua Ava-Läänemerel, gotlandi süviku ümbruses, teostatud 5-aasta mõõdistus sügavusel 204 m, kus saadi keskmiseks tsonaalseks hoovuse kiiruseks hoopis nulli lähedane väärtus koos standardhälbega (Placke et al., 2018). 2013. aastal teostati ADCP-ga 5 kuud järjest hoovuse mõõtmine Saaristomeres, Vandrocki saare kõrval, mille asukoht on „Estonia“ vrakist mõnikümmend meremiili põhjas. Sügavus sellel alal võrreldes „Estonia“ vraki asukohaga on madalam, ulatudes ainult 44 m. See meri asub Ahvenamaa ja Soome vahel. Kogu mõõdistusaja keskmiseks hoovuse kiiruseks saadi 7.5 cm/s standardhälbega ± 5.4 cm/s. 74% kõikidest väärtustest oli alla 10 cm/s ja üle 20 cm/s oli kõigest 3%. Andmete töötlusel avastati, et pinnahoovused olid keskmiselt kiiremad kui põhjahoovused. Kuid mõlema kihi puhul oli maksimaalne hoovuse kiirus sarnane, 5 m sügavusel oli 44 cm/s ja 38 m oli 41 cm/s. Täheledatai, et merepõhja topograafia koos tugevamate tuulte perioodidega omab suurt mõju nii hoovuse kiirusele kui ka suunale (Kanarik et al., 2018).

Kui rääkida merepinna lähedastest hoovustest, siis nende kiirus tormide ajal võib ulatuda 50 cm/s ringi ja väinades kogunisti 100 cm/s. Üldiselt on merepinna hoovuse kiirus 2 – 3% tuule kiirusest ja suund 20° – 30° paremale kaldu tuule suunast. See loodusnähtus on kirjeldatud Ekmani teooriaga (Leppäranta, 2009, lk 144), mis näitab, et põhja poolkeral kaldub hoovus tuule suunast paremale. Sügavuse kasvades see kaldumisnurk suureneb ja hoovuse kiirus väheneb. See protsess ulatub meres, sõltuvalt alast, 10 – 100 m sügavusele. Seda hõõrdekihi sügavust kutsutakse ka Ekmani sügavuseks (Elken et al., 2018, lk 101).

1.5 Meteoroloogilised tingimused

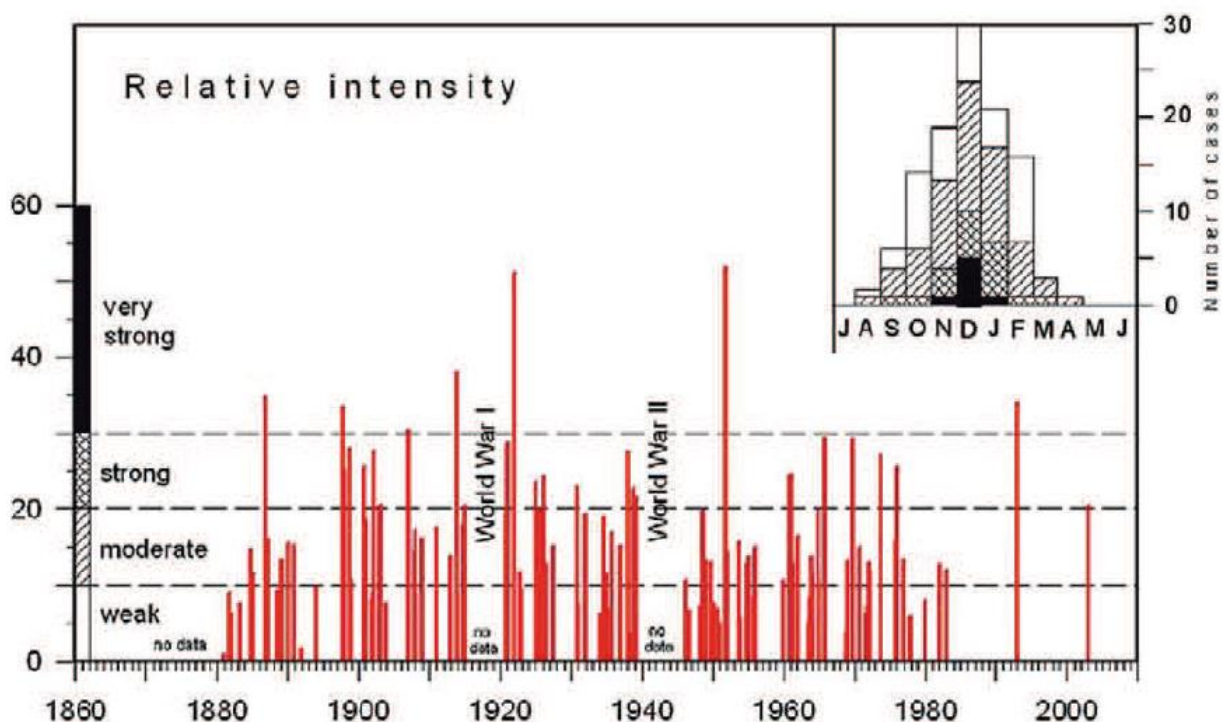
Läänemere kliima on osa Maa põhja-poolkera tsirkulatsioonist (täpsemalt jääb 50° N ja 70° N laiuskraadide vahele). Selle tõttu tuleb ka põhiline õhumass Läänemerre läänest. See toob ookeanist kaasa niiske ja suhteliselt sooja mereõhu, mida mõjutab ka soe Põhja-Atlandi hoovus. Selle tõttu on ka Läänemere kohal keskmine õhutemperatuur mitu kraadi soojem võrreldes teiste veekogudega mis asuvad samal laiuskraadil. Põhja ja ida Läänemeri on mõjutatud ka semiarktilisest kontinentaalkliimast. See toob endaga kaasa külmema ja kuivema õhumassi, mis omakorda seguneb läänest tuleva õhumassiga (Elken & Matthäus, 2008, lk 386).

Läänemere piirkonnas on tuuled väga muutlikud. Lisaks keskmisele edelast tulevale õhuvoolule liiguvad üle mere märksa suuremate tuulekiirustega tsüklonid, mille diameetrid on mere mõõtmetest väiksemad ning liiguvad erinevaid trajektoore pidi. Seetõttu on kohalik tuuleväli keerulise ehitusega. Samuti esineb antitsüklone, aga nendes on tuule kiirus tavaliselt väiksem (Elken et al., 2018, lk 109).

Ava-Läänemerel omab tuul mõju hoovustele kuni põhjani välja. Tugevad tuuled võivad luua suuremastaapse hoovuse, mis liigutab ka põhja veemassi. Läänetuul on vajalik soolase Põhjamere vee transpordiks kuni Bornholmi basseini. Sealt edasi ida ja põhja suunas merevee liikumise olukord muutub. Andmed näitavad, et ida- ning põhjatuul on kõige efektiivsem süvakihhi vee transpordiks Ava-Läänemeres. Lisaks mõõtmised on näidanud, et kogu Läänemeres ei esine samaaegselt piisavalt püsivat ning tugevat tuule seisundit. Selle tulemusel on veevahetus põhjakihtides väga aeglane ja kaootiline. Uuringute järgi Bornholmi basseini ja Gotlandi süviku vahele jääva Stolpe kanalis ei oma läänetuul nii tugevat mõju põhjavee ringlusele kui alguses arvati. Novembrist jaanuarini on kõige tugevamad läänetuuled Skagerrakist kuni Taani väinadeni, ning põhja- ja idatuuled Ava-Läänemerel maist juunini (Krauss & Brugge, 1991).

MBI-de esinemiseks on vaja piisavalt tugevat ja järjepidevat tuult mere kohal, mis jääb põhja poole Taani *Sjælland*-i saarest, et lõhkuda ära ette jääv Skagerraki ja Kattegati vaheline soolsuse front. Et siis edasi liikuda Läänemerre, peab see soolasem vesi veel enne ületama ka Taani väinad. MBI-de toimumise ja intensiivsuse analüüsiks kasutatakse 1996. aastal arendatud ühikuta indeksit, FM96. Selle koostas sakslasest teadlane Wolfgang Matthäus. See indeks arvutab kokku, kui suure koguse meresoola sai imporditud Läänemerre. Näiteks aastal 1993 jaanuaris oli sissevoolu näit indeksi järgi 34, aga 1997 aastal 12. Sellest saab täheldada, et Põhjamere vee sissevoolude esinemine ning tugevus on suhteliselt korrapäratu (joonis 4) (Elken et al., 2018, lk 139, 140).

Näiteks aastal 2003 kuni 2014 ei toimunud ühtegi suurt sissevoolu Põhjamerele, seda kutsutakse teadusartiklites anoksiliseks stagnatsiooniks. Kuid ei saa välistada, et võisid toimuda nõrgemad MBI-d sellel ajavahemikul, mida mõõdistusjaamad ei suutnud tuvastada. 2014 aasta detsembris toimus suuruselt kolmas kõige võimsam mõõdetud MBI alates aastast 1880. Selle FM96 indeksi tugevuse väärtuseks saadi 39.8. Selle suurimaks põhjustajaks oli toodud piisavalt püsiva suunaga tugeva tuule mõju, mis novembris puhus idast, aga detsembris muutus järsult läänetuuleks. Mohrholz et al 2015 artikkel väidab, et see suur MBI omas potentsiaali Läänemere põhjakihis lõpetada enne olnud anoksiline stagnatsioon (Mohrholz et al., 2015).



Joonis 4. Põhjamere vee sissevoolud aastatel 1880 kuni 2005, paremal on FM96 indeksi väärtus. Üleval paremas nurgas on näidatud kuude löikes esinemise sagedus, graafik algab juulist. Kõige sagedamini on toimunud MBI perioodil oktoober kuni veebruar (Elken & Matthäus, 2008, lk 381).

1.6 Parvlaev Estonia uuringud

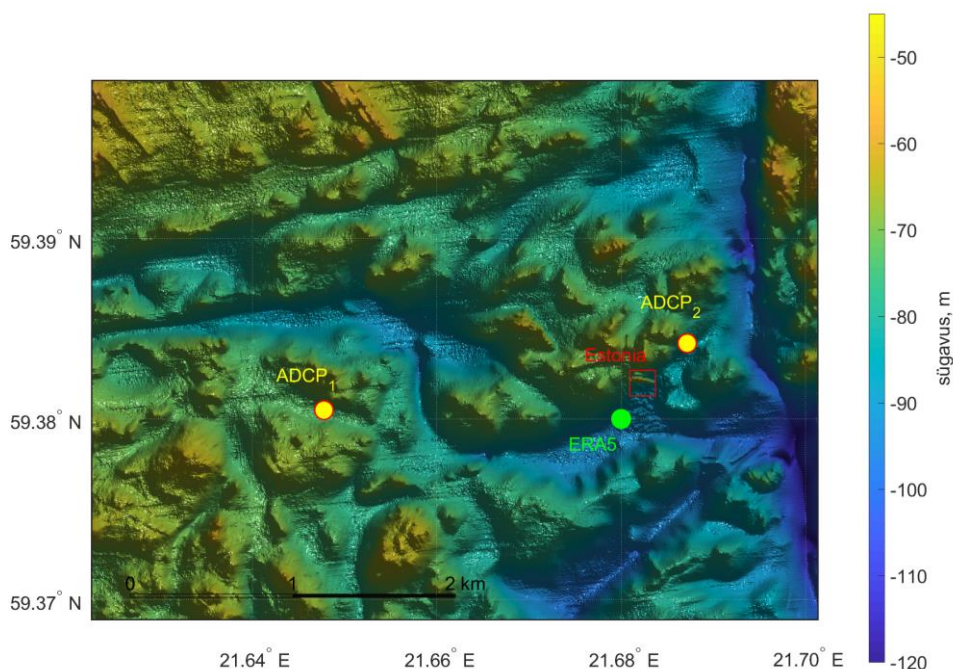
28. septembril 1994 uppus parvlaev Estonia. Tegu on Eesti merendusajaloo suurima katastroofiga. Õnnetuse ohutusjuurdluste viis läbi JAIC 1990. aastatel, sellele on hiljem lisandunud erinevad eksperdihinnangud ja teadusuuringud. Kaasarvatud erinevad doktoritööd ning teadusartiklid. Rääkimata veel raamatutest ning dokumentaalfilmidest. Parvlaeva Estonia hukku puudutava materjali hulk on väga suur (Roosipuu, 2021). Selle diplomitöö eesmärk ei ole edasi lahata selle traagilise õnnetuse asjaolusid.

2 Metoodika, seadmed ja andmed

Mõõdistusaeg on jagatud kaheks osaks. Esimene toimus juulist novembrini 2021 ja teine detsember 2021 kuni märts 2022. Hoovuste mõõtja oli paigutatud nendel perioodidel veidi erinevatesse asukohtadesse. Kuna esimesel perioodil, suvisel-sügisesel, teostati seadme veeskamise ajal põhjasetete kaardistamist, paigutati seade parvlaev „Estonia“ vrakist eemale läände 74 m sügavusele (seade asus 71 m sügavusel). Teisel perioodil, talvel, paigutati seade lähemale „Estonia“ vrakile, mis paiknedes sellest kirdes. Mere sügavus oli 80 m ja seade asus 77 m sügavusel.

2.1 ADCP

Andmeid koguti poijaamaga parvlaev „Estonia“ vraki piirkonnas (joonis 5), millega oli ühendatud akustiline hoovusemõõtja *Aanderaa SeaGuard II DCP (Doppler Current Profiler)*. Seda komplekti nimetatakse selles töös ka ADCP (*Acoustic Doppler Current Profiler*). Antud seadmele oli lisatud veel temperatuuri, lahustunud hapniku ja elektrijuhtivuse andurid (soolsuse mõõtmiseks).



Joonis 5. Parvlaev „Estonia“ vraki piirkonna topograafia. Punasega ümbritsetud kollased täpid tähistavad poijaama asukohtasid perioodil juuli – november 2021 (ADCP1) ja detsember 2021 – märts 2022 (ADCP2). Roheline täpp tähistab ERA5 andmekogu punkti, millest võeti tuule andmed. Punase kastiga on märgistatud parvlaev „Estonia“ vraki asukoht.

Aanderaa SeaGuard II DCP, 600 kHz, (joonis 6) on vees töötav hoovuste mõõtja. Tema pea kohale on paigaldatud 4 saatjat-vastuvõtjat (*beams*). Tööpõhimõte seisneb selles, et ADCP saadab ise välja heliimpulsse, mille peegeldusi püüab pärast kinni. Heli tagasipeegeldused tulevad mere erinevatest kihtidest, mida suudab antud hoovuste mõõtja eristada kindlaks määratud intervallis. Seade arvutab väljasaadetud ja tagasipeegeldunud helisignaali sageduse erinevuse põhjal 3D-s hoovuse kiiruse ja suuna iga kihi kohta (*layer/cell*). Antud mõõdistuse puhul on mõõdetud hoovused kahemeetrise kihtide kaupa. Selle ADCP tööraadius sõltub õhumullidest ja hõljumist veesambas. 600 kHz sageduse juures on tüüpiline tööraadius 40 m kuni 80 m andurist. Seadmesse on paigaldatud magnetomeeter ning kaldemõõtur, mis aitab määrata hoovuse suunda (*Stand-Alone Zpulse Doppler Current Sensor*, 2019).



Joonis 6. *SeaGuard II DCP (Profiling Current Meter*, 2016)



Joonis 7. Töös kasutatud poiijaam – ankurdatud ning ujuvpoiga ühendatud *Aanderaa SeaGuard II* ADCP, millele oli juurde paigaldatud temperatuuri, lahustunud hapniku ja elektrijuhtivuse andurid. Mõõteplatvormi ja ankru vahele oli lisatud ka akustiline päästik. Et pärast mõõdistust saaks seadme merepõhjast vabastada ja kätte saada.

Hoovuse profileerijat saab kasutada nii soolases kui magedas vees. Selles töös oli antud seadet kasutatud eesmärgiga koguda hoovuse kiiruse ja suuna andmeid iga tunni tagant (*Profiling Current Meter*, 2016). *SeaGuard II* ADCP töötab merepõhjas regulaarselt kogu veesamba ulatudes, sest seade sisaldab kaldenurga andurit.

Hoovuse andmed töödeldi programmis *Microsoft Excel* ning visualiseeriti programmiga *Ocean Data View* (ODV). Hoovuste dünaamika kirjeldamiseks koostati mõlema perioodi jaoks graafikud hoovuse kiiruse vertikaalse jaotuse muutustest ja aegread iga kihi kohta, ning leiti ka statistikud põhjalähedase kihi (10 m paksune kiht) kohta.

Hoovuste polaarhistogramm kirjeldab hoovuste valdavat suunda ja kiiruste jaotust mingil perioodil. Hoovuste polaarhistogrammid koostati viimase (põhjale kõige lähema) kihi jaoks.

Progressiivvektor diagramm võimaldab ligikaudselt hinnata, kui kaugele veeosake mingi perioodi jooksul liiguks kui tegu oleks punktmõõtmistega. Progressiivvektor diagrammid koostati mõlema perioodi jaoks läbi terve veesamba, ligikaudu 10 m sammuga.

2.2 ERA5 andmekogu

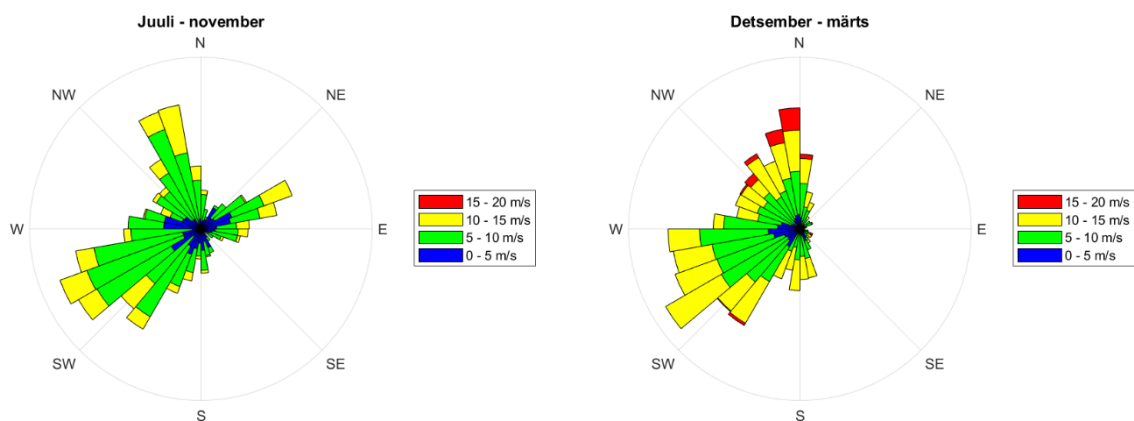
Meteoroloogilised andmed pärinevad ERA5 andmekogust, kust kasutati mõõteperioodide juuni 2021 kuni november 2021 ja detsember 2021 kuni märts 2022 tuuleandmeid (ühikuks m/s), mida kujutatakse u ja v komponentidena. Tuuleandmed koguti Estonia vraki lähedal asuva punkti jaoks (joonis 5). Enne analüüsi arvutati välja *Microsoft Excel*-is vajalike valemitega tuule suund kraadides ja tuule kiirus m/s. Andmetest leiti kummagi perioodi jaoks valdavad tuulesuunad, tuulekiirused ning päeva keskmised tuulevektorid.

3 Andemete analüüs

3.1 Meteoroloogiliste tingimuste mõju hoovuse dünaamikale

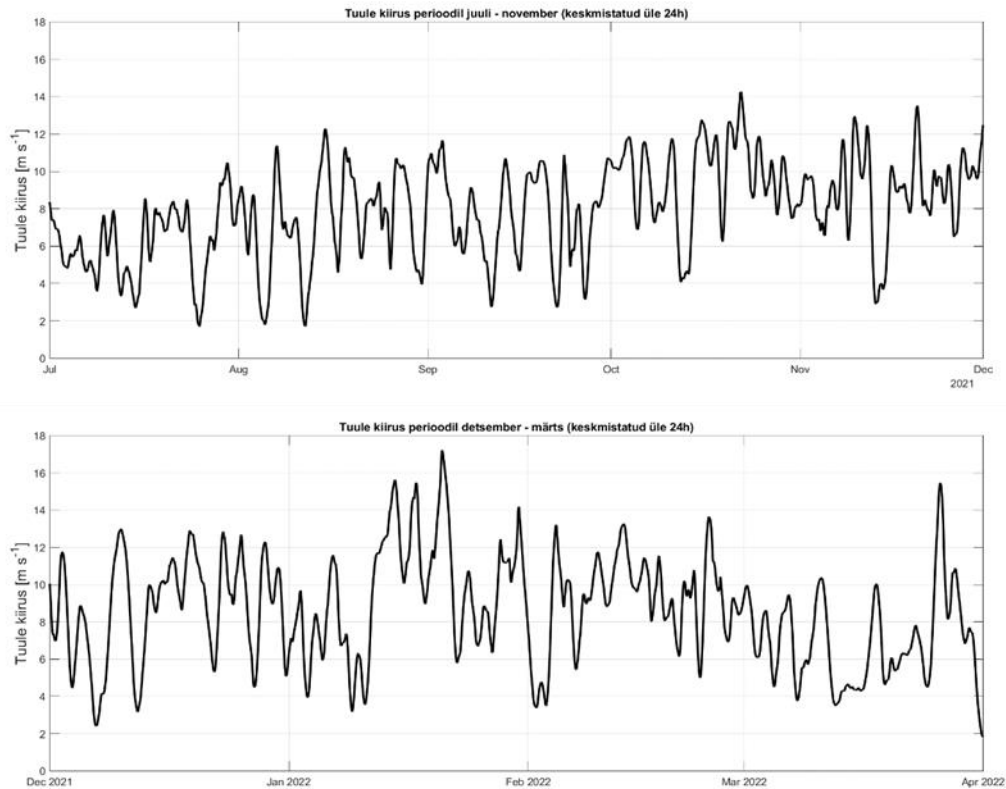
Valdavad tuulesuunad on toodud tuuleroosidel (joonis 8). Juuli – november perioodil olid valdavaks tuuleks edelatuuled, kuid esines ka tuuli põhjast-loodest ja idast-kirdest. Sellel perioodil ei ületanud tuule kiirus kordagi 15 m/s. Tuule kiiruste graafik (joonis 9), mis on silutud üle 24 tunni, näitab erinevate tugevustega tuulte vaheldumist terve perioodi jooksul. Tuuled olid keskmiselt nõrgemad suveperioodil juulis-augustis, ning kasvasid sealt edasi. Kogu esimene mõõdistusperiood on näha tuulekiiruse kasvavat trendi. Suurimad tuule kiirused mõõdeti oktoobri teises pooles.

Teisel mõõteperioodil detsembrist märtsini olid samuti valdavateks tuulte suundadeks edelatuuled ning rohkem esines ka tuuli lääne, loode ja põhja suunast. Sellel perioodil ületasid tuule kiirused ka 15 m/s piiri, mida mõõdeti põhja- ja loodetuultega, vähemal määral ka edelatuultega. Need tugevamad tuuled olid teisel mõõdistusperioodil jaanuari keskel. 24 tunni silutud tuulte kiiruste graafikult (joonis 9) võib näha, et sellel perioodil esinenud tuuled olid keskmiselt nõrgemad mõõdistusperioodi lõpus märtsis ja tugevaimad jaanuari keskpaigas.



Joonis 8. Tuuleroosid, vasakul periood juuli kuni november 2021 ja paremal periood detsember 2021 kuni märts 2022.

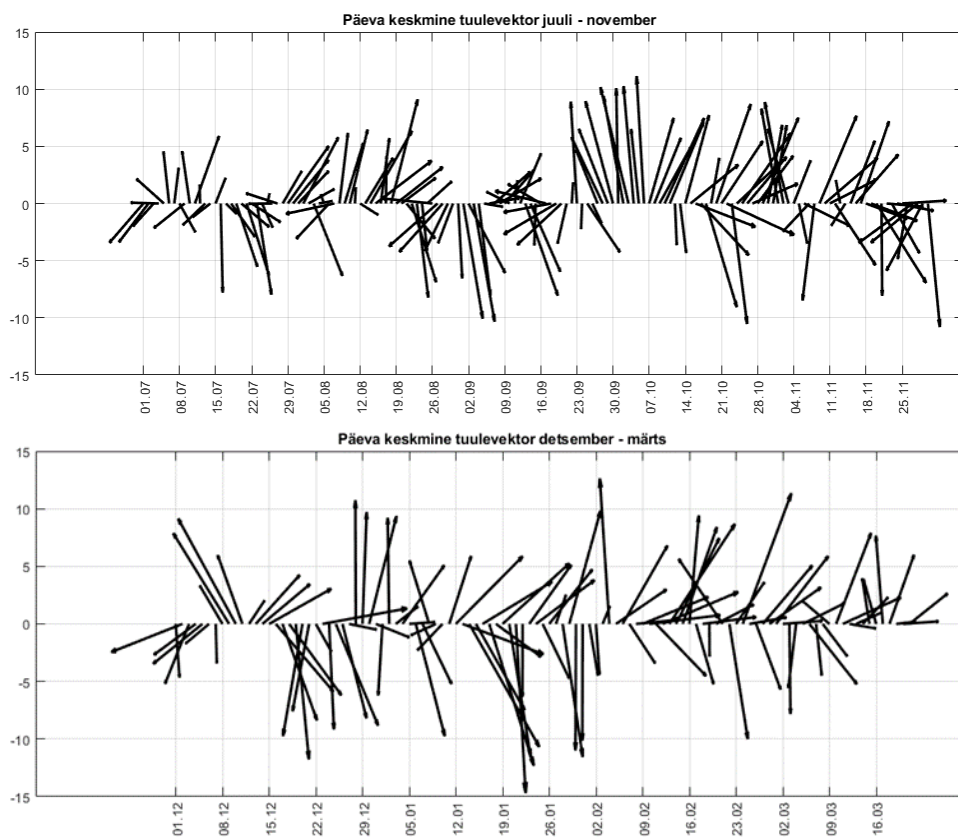
Ööpäeva kaupa silutud tuule kiiruse graafikudel on näha, et juulist kuni jaanuarini on tuule kiirus kasvavas trendis ja edasi kahanevas (märtsi lõppu siin ei arvestata kuna mõõdistustööd lõppesid vahetult enne ära). Juulis ja märtsis on kõige väiksemad tuulekiirused, kuni 10 m/s. Kõige tugevamad tuuled puhusid jaanuari keskpaigas, millal tuul ületas kohati üle 16 m/s.



Joonis 9. 24 tunni silutud tuule kiiruse graafikud, periood juuli kuni november 2021 (ülemine) ja detsember 2021 kuni märts 2022 (alumine). Siinkohal toob välja, et viimane mõõdistusperiood lõppes mõned päevad enne tuule kiiruse järsku tõusu.

Ööpäeva keskmistel tuulevektoritel (joonis 11) on ka näha, et juulis ja märtsis olid kõige nõrgemad tuuled. Ning kuni jaanuari keskpaigani oli tuule tugevus kasvavas trendis, edasi kahanevas. Jaanuari keskpaigas olid kõige pikemad tuulevektorid, mis puhusid põhjast.

Tuule suund oli püsivam sügisel, kui suvel ja talvel. November ja märts olid ühed kõige rohkem vahelduv tuulega kuud. Juulist alates on märgata mustrit, et iga 2 nädala tagant vaheldusid lõunatuuled põhjatuultega edasi-tagasi kuni septembri keskpaigani. Siis edasi puhus kuni novembri alguseni valdavalt lõuna-edela tuuled. Talvise perioodi mõõdistusel on tuule suund märgatavalt rohkem kaootilisem. Kõige rohkem on vektoreid edelast ja põhjast puhuva tuule jaoks.



Joonis 10. Päeva keskmised tuulevektorid, periood juuli kuni november 2021 (ülemine) ja detsember 2021 kuni märts 2022 (alumine).

3.2 Hoovused

Joonisel 11 on kujutatud mõlema mõõteperioodi, juuli kuni november (ülemine) ja detsember kuni märts (alumine), hoovuste kiiruste vertikaalset jaotust ja ajalist muutlikkust. Lihtsustamise mõttes on need perioodid nimetatud ka „suve-sügisene“ ja „talvine“ periood. Suveperioodil juulist augustini, kui pinnakiht on sügavamatest kihtidest eraldatud sesoonse termokliiniga, mis asus 20 – 30 m sügavusel, esinesid tugevamad hoovused just pinnakihis, kuni umbes 30 meetri sügavuseni. Alates septembrist võib märgata, et suuremad hoovuse kiirused pinnakihis ulatuvad sügavamale võrreldes suvekuudega. Siin on tõenäoliselt tegu segunemisest tingitud termokliini nihkumisega. 10. oktoobril esinesid tugevaimad hoovuste kiirused veesamba ülemises pooles. Oktoobri viimasel kahel nädalal on selgelt näha kogu veesamba ulatuses järjestikku toimunud mitut tugevat hoovuse kiiruse sündmust. Kõige suurem hoovuse kiirus mõlema perioodi peale esines oktoobri lõpus just merepinna lähedases kihis, kuni sügavuseni 20 m. Siis oli kiirus kohati isegi üle 50 cm s⁻¹.

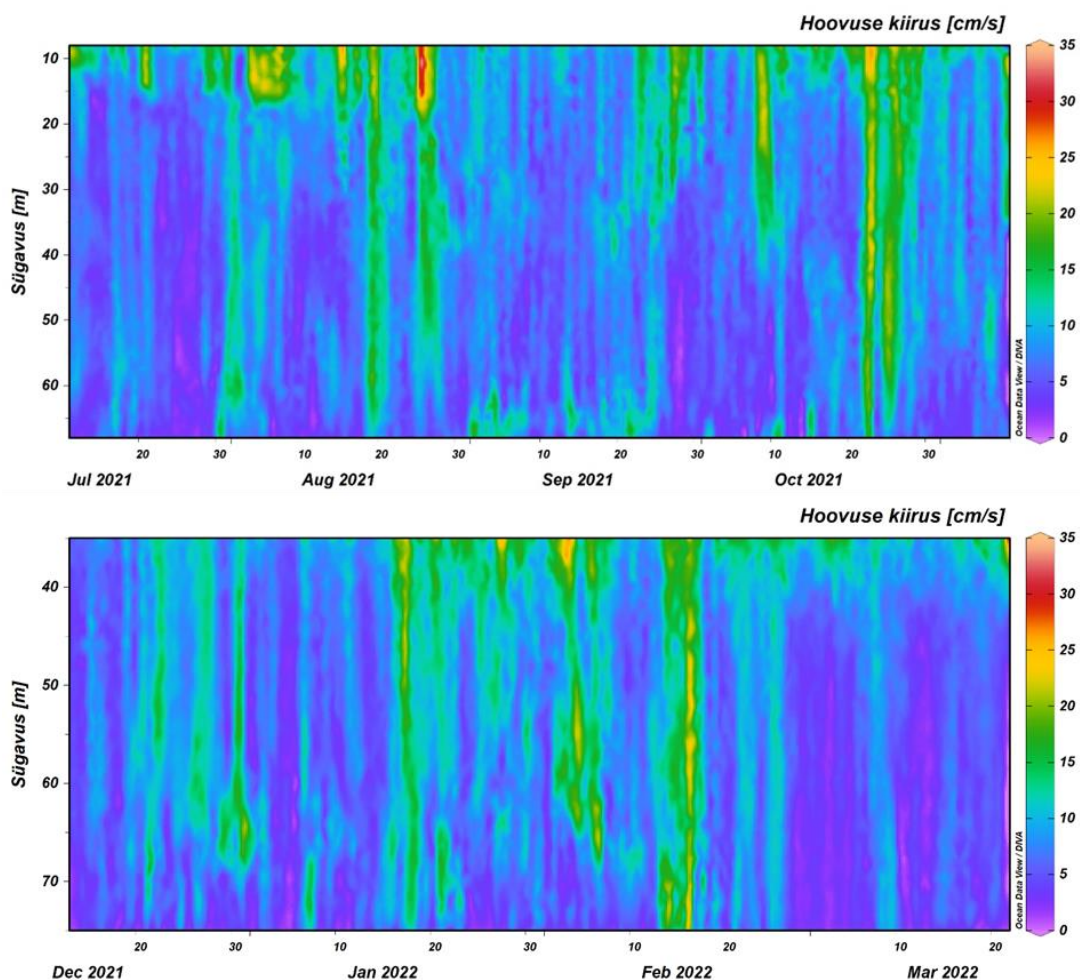
Hoovuste kiiruste suve-sügisese mõõdistusele on iseloomulik ka kiiruse gradiendi esinemine umbes 60 m sügavusel. Talvise mõõdistuse esimeses pooles (kuni veebruari keskpaigani) oli samuti hoovuste muutlikkus mere põhjalähedases kihis (63 - 73 m) erinev kõrgemal registreeritud hoovuste režiimist, ning esines perioodilisi suurema hoovuse kiiruse sündmusi (nt. detsembri lõpp). Mõlemal juhul oli see ilmselt tingitud halokliini esinemisest umbes 60 m sügavusel.

Kuna teisel mõõteperioodil, detsembrist märtsini, oli pindmine veekiht väga väikese hägususega, see tähendab läbipaistev ja ei olnud piisavalt osakesi, millelt ADCP helisignaali sai tagasi peegelduda, siis antud töös saab talve perioodil usaldusväärselt kasutada andmeid alates 35 m sügavuselt. Sellel perioodil esinesid tugevamad hoovused jaanuaris ja veebruaris. Kõige tugevamad hoovused veesambas (40 kuni 73 m) mõõdeti veebruari keskpaigas, peale mida hoovuste režiim ühtlustus ja tiheduse hüppekihti enam ei esinenud. Peale seda praktiliselt enam ei esine ka hoovuse kiiruseid üle 10 cm/s. Mõlema perioodi puhul on märkimisväärsed lühikest aega kestvad, kuid kogu veesambas esinevad tugevamate hoovustega sündmused.

Stratifikatsioon omab suurt mõju hoovuste kiirusele, eriti suvel. Kuid sügisese ja talve õhutemperatuuri langus koos tugevamate tuultega vähendab seda. Jahtumisega nõrgeneb termokliin ning tugevamad tuuled nõrgestavad merepõhjas asuvat püsivat halokliini. Mis tähendab seda, et talvel ja kevade alguses saab kogu sügavuse ulatuses merevesi kergemini seguneda. Joonisel 11 on näha, et halokliin ei oma sügavamates kihtides enam märgatavat mõju hoovuse kiirusele alates veebruari keskpaigast. Eriti kui võrrelda seda suvisese sesoonse pinnakihi

termokliiniga. See annab kinnitust, et talve lõpus muutus parvlaev „Estonia“ vraki alas halokliin nõrgemaks ja soodustas veekihtide segunemist.

Järgmisena on võrreldud 24-tunni silutud tuule kiirusi (joonis 9) hoovuse kiirusega mõlemal perioodil (joonis 12). Suveperioodil on märgatavalt kiiremad hoovused esinenud peaaegu iga aeg, kui puhus kõvem tuul kui 10 m/s. Näiteks oktoobri lõpus 22. ja 23. kuupäeval olid tormituuled kuni 14 m/s, siis oli ka mitu tugevamat hoovuse kiiruse sündmust kogu veesambas. Talvel puhus kõige tugevamad tuuled alates jaanuari keskpaigast kuni veebruari lõpuni. On näha, et jaanuari keskel kõrgem hoovuse kiirus kogu veesambas toimus samal ajal, millal olid tuuled 10 m/s ja 16 m/s vahel. Lisaks sellel perioodil puhus kõige rohkem edela tuult, mida saab lugeda nii jaanuari kui ka veebruari domineerivaks tuule suunaks. Veebruari lõpuga saabus tuulevaiksem aeg, mis omas mõju hoovuse kiirusele. See tähendab, et hoovus jäi nõrgemaks.



Joonis 11. Hoovuse horisontaalse kiiruse aegread läbi veesamba suvel-sügisel (ülemine) ja talvel (alumine). Mõlemal andmete samm on 2 m. Sügavusel 7 – 67 m perioodil juuli kuni november 2021 ja sügavusel 35 – 73 m perioodil detsember 2021 kuni märts 2022.

3.2.1 Hoovuse kiiruse aegread erinevatel sügavustel

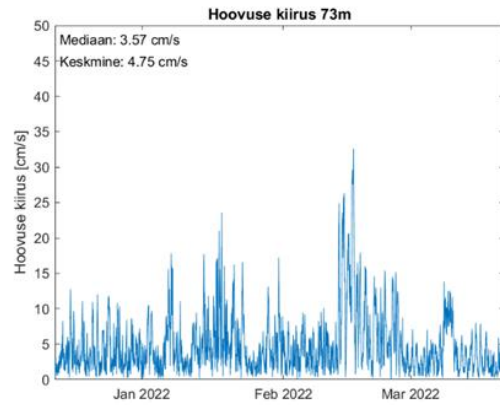
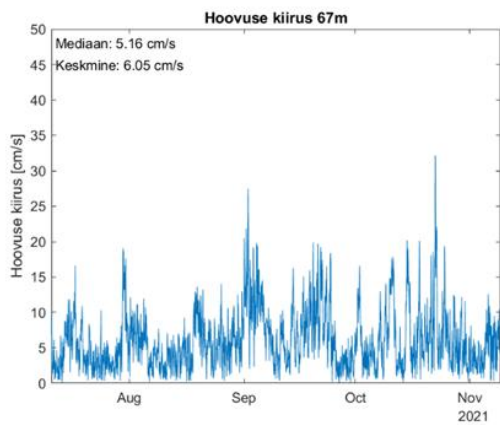
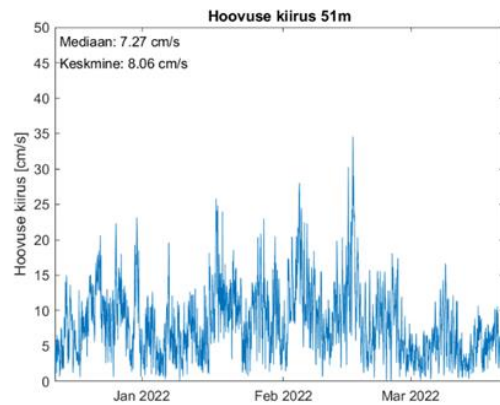
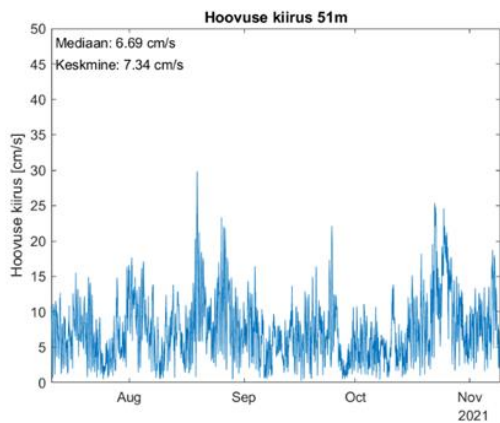
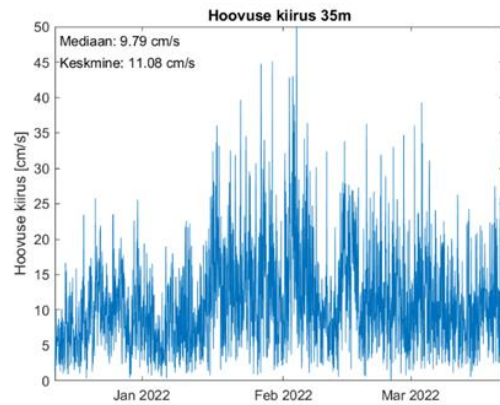
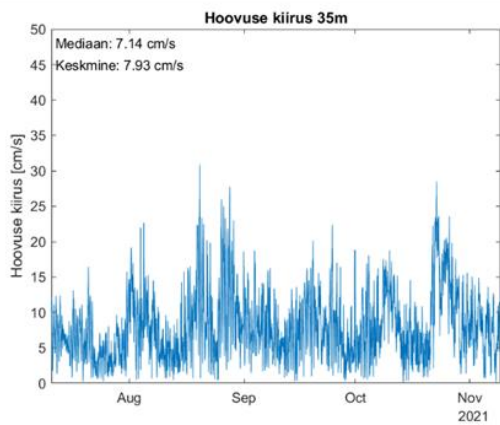
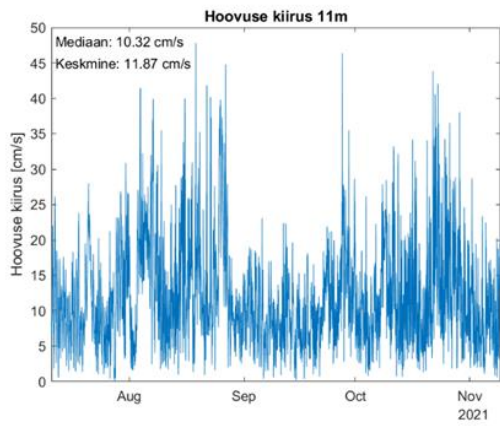
Et kirjeldada läbivalt veesammast mõlema perioodi puhul võrreldi hoovuste kiirusi erinevate kihtide vahel (joonis 13). Välja on toodud kummalgi perioodil põhjalähedane kiht ja kahemeetri paksused kihid keskmega 50 m kiht, 35 m kiht ja 10 m kiht (viimane ainult perioodil juuli kuni november).

Merepinna ülemistel kihtidel olid hoovuste kiirused suuremad kui alumistel. See kehtib mõlema perioodi kohta. Esimesel perioodil 10 m sügavusel on september võrreldes augusti ja oktoobriga suhteliselt vaikne ning hoovuse tugevus jääb alla 25 cm/s. Kõige suuremad hoovuse kiirused esinesid augustis, septembri lõpus ning oktoobri teisel poolel. See kattub kogu veesammast läbinud hoovuste kiiruste tõusuga kogu augustis ja perioodil 22. – 30. oktoober 2021 (joonis 12). 22. – 23. oktoober 2021 esinenud tormi ajal mõõdeti ka maksimaalne põhjalähedane hoovuse kiirus.

Sügavusel 35 m, allpool sesoonset termokliini, on talvisel perioodil märgatavalt suuremad hoovuse kiirused alates jaanuari keskpaigast 2022. Millal paaril korral hoovuse kiirus ületas isegi 50 cm/s. Samal sügavusel suveperioodil hoovuse kiirus aga pendeldas 1 cm/s ja 30 cm/s vahel. Suurimad väärtused mõõdeti augusti ja oktoobri lõpus.

Märgatavalt suurt erinevust kummagi perioodi vahel 50 m sügavusel ei esine. Kuid sarnaselt ülemise kihiga, on suve-sügise perioodil näha jällegi suuremaid hoovuse kiiruseid augustis, septembri lõpus ning oktoobri lõpus. Teisel perioodil on suuremad kiirused jaanuari ja veebruari keskpaiga vahel.

Mõlemal perioodil esinevad kõige väiksemad hoovuse kiirused põhjalähedases kihis. Esimesel perioodil on näha augustis, septembri alguses ja lõpus ning oktoobri lõpus hoovuse kiiruste järsku tõusu. Maksimaalne hoovuse kiirus sai mõõdetud suve-sügise perioodil oktoobri lõpus, 32,1 cm/s, ja talve perioodil veebruari keskel, 32,6 cm/s. Lisaks veel jaanuari keskpaik oli ka märgatavalt kiirema hoovuse kiirusega, kuni 25 cm/s. Hoovuse ja tuule kiiruse vahel on näha seost, sest enamuse suure hoovuse kiiruse sündmused toimusid tugevama tuulepuhangu jooksul või vahetult pärast seda.



Joonis 12. Hoovuse kiirus veesamba erinevates kihtidel, vasakul periood juuli kuni november 2021 ja paremal periood detsember 2021 kuni märts 2022.

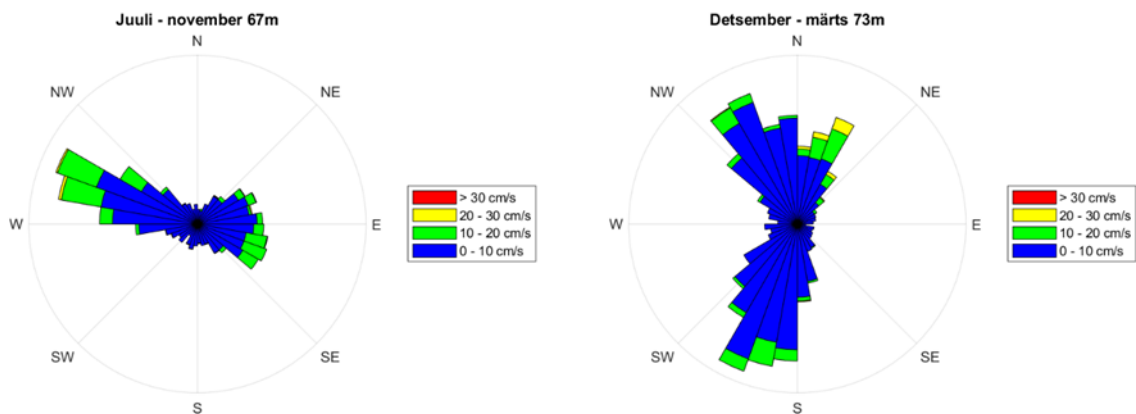
Põhjalähedase merekihi täpsemaks analüüsiks valiti sellest kiht paksusega 10 m mõlema perioodi kohta, mille statistikud on toodud tabelis 1. Põhjalähedaste kihtide statistikas on näha, et mediaan on väiksem kui aritmeetiline keskmine nii suvel-sügisel kui talvel igal sügavuse vahemikul. Kuid merepõhjale lähenedes hoovuse kiiruse aritmeetiline keskmine väheneb. Maksimaalne kiirus püsib umbes samana nii sügavuse kui ka aja lõikes. Esimesel perioodil aritmeetiline keskmine on natuke suurem, kuid teisel oli maksimaalne kiirus suurem. Suvi-sügis perioodil oli põhjakihtides maksimaalse hoovuse kiiruse keskmine 31 cm/s ja talve perioodil 34.2 cm/s.

Tabel 1. 10 m paksuse põhjalähedase kihi statistikud, perioodidel juuli kuni november 2021 ja detsember 2021 kuni märts 2022

juuli - november			
sügavus (m)	Aritmeetiline keskmine (cm/s)	Mediaankeskmine (cm/s)	Maksimaalne kiirus (cm/s)
66-68	6.0	5.2	32.1
64-66	6.8	5.9	35.4
62-64	6.9	6.0	31.2
60-62	6.8	6.0	32.3
58-60	6.9	6.0	26.7
56-58	7.1	6.3	28.0
Keskmitted	6.8	5.9	31.0
detsember - märts			
sügavus (m)	Aritmeetiline keskmine (cm/s)	Mediaankeskmine (cm/s)	Maksimaalne kiirus (cm/s)
72-74	4.7	3.6	32.6
70-72	6.3	5.1	34.9
68-70	6.5	5.3	34.6
66-68	6.9	5.6	33.7
64-66	7.5	6.4	34.8
62-64	7.7	6.6	34.5
Keskmitted	6.6	5.4	34.2

3.2.2 Hoovuse kiiruse progressiivvektor diagrammid erinevatel sügavustel ja hoovuste polaarhistogrammid põhjalähedases kihis

Joonisel 14 on kujutatud hoovuste progressiivvektor diagrammid umbes iga 10 m sügavuse tagant. Need näitavad vee osakeste voolamise valdavalt suunda ja tugevust. Kuigi perioodil juuli – november esineb kogu veesambas kohati selge suunalist ja tugevat liikumist, jäi summaarne liikumine kõikidel sügavustel vahemikku 50 – 80 km. Perioodil detsember – märts oli see summaarne liikumine seevastu suurem, umbes 100 km, ning erinevate suundadega. Veesambas ülespoole liikudes esines periooditi erinevaid liikumise suundi. Suve-sügise perioodil oli domineerivaks suunaks ida-lääne suunaline liikumine ja talve perioodil lõuna ning lääne suunaline. Põhjas olev osakeste liikumine vastas piirkonna merepõhja topograafia (joonis 5 ja 13). Mõlemal perioodil oli põhjalähedase kihi liikumine väiksem võrreldes kõrgemate kihtidega.

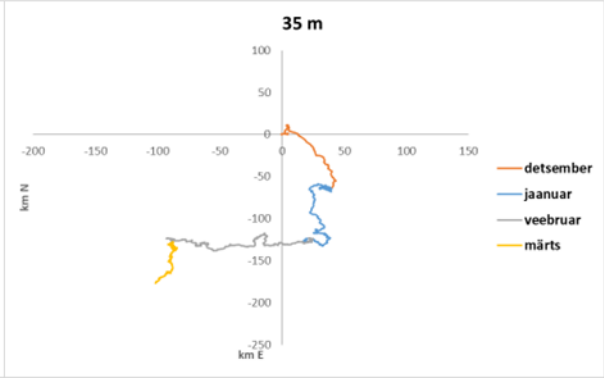
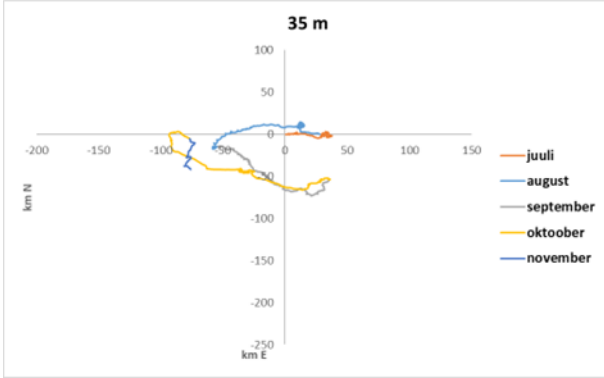
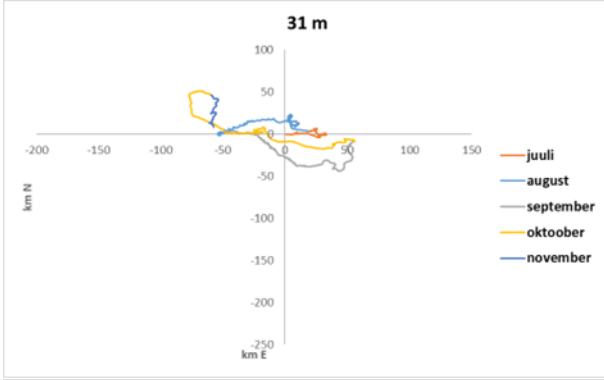
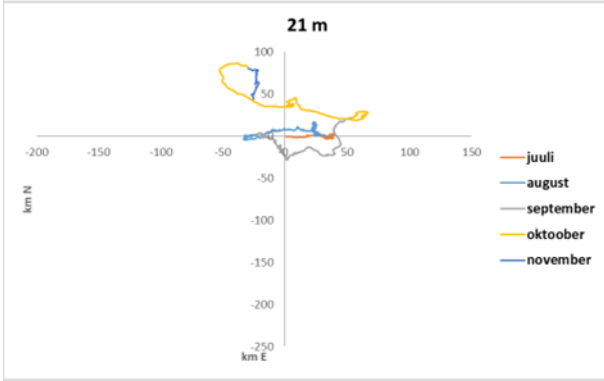
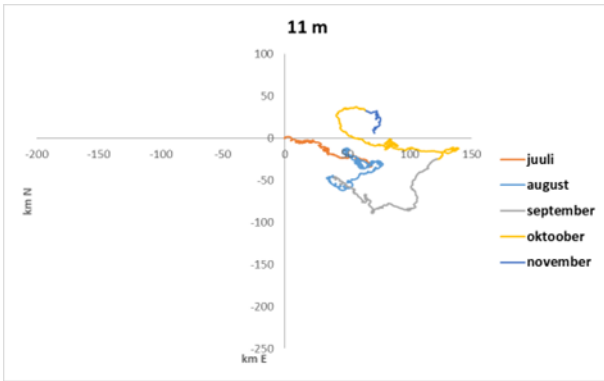


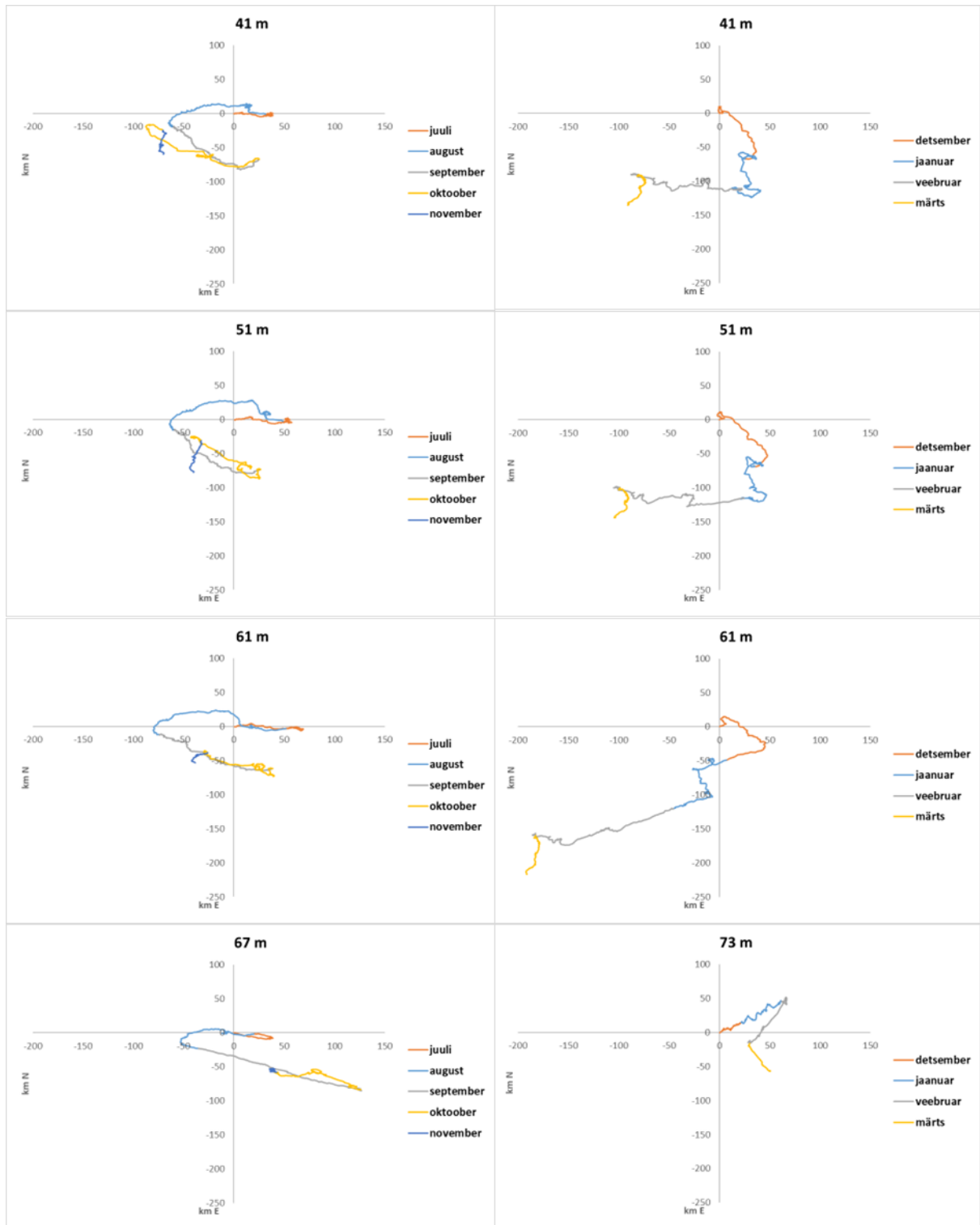
Joonis 13. Hoovuse kiiruse polaarhistogrammid, mis kujutavad hoovuse esinemise valdavalt suunda põhjalähedases kihis. Vasakul periood juuli kuni november 2021 ja paremal periood detsember 2021 kuni märts 2022

Esimesel perioodil oli veeosakeste valdav liikumise suund juulist oktoobrini ida-lääne suunas. Välja arvatud november, kui kogu veesamba ulatuses vee liikumise suund muutus lõuna suunas, mis jätkus ka talvisel möödistusperioodil. Tuulevektorite graafikul (joonis 11) on näha, et esimesel kolmel kuul oli muster, kus perioodiliselt vaheldusid valdavalt põhjatuuled lõunatuultega. Septembri lõpus – oktoobri alguses ja oktoobri lõpus esines kõige rohkem püsivalt lõunatuult. On näha, et pealmistes veekihtides oli oktoobris suurim distant läbitud kogu perioodil ning suund muutus loode suunas. Novembris oli tuul muutliku suunaga, mis tõenäoliselt aitas kaasa osakeste liikumise suuna muutusele lõuna suunas. Põhjalähedases veekihtis on hoovus tuule suunale valdava osa ajast hoopis vastupidine. See annab kinnitust, et merepõhi mõjutab palju veeosakeste liikumise suunda. Taoline tulemus vastab ettekujutusele, et süvakihis vesi voolab tuulele vastassuunas, mida

on näiteks mõõtmistega Soome lahes näidanud ka Lips et al., 2017 ja Suhhova et al., 2018 (Lips et al., 2017) (Suhhova et al., 2018).

Detsembris ja jaanuaris toimus liikumine valdavalt lõuna suunas, välja arvatud põhjalähedases 73 m sügavuses kihis. Merepõhjas oli osakeste liikumis suund hoopis kirde suunas, mis on enamjaolt vastupidine suund tuulevektoritele (joonis 11). Nii et mõlemal mõõdistusperioodil on põhjakihis vee liikumine suuresti mõjutatud põhja topograafiast. Veebruaris on näha kõige suuremat liikumist, millal olid ka ühed kõige tugevamad hoovused kogu veesambas. Veeosakeste suund sellel ajal oli lääne ja kagu suunas. Märtsis pöördus liikumissuund jälle lõuna suunas. See aeg esinesid ka juba nõrgemad ja mittepüsivad tuuled ning hoovused. Seda tõestab ka asjaolu, et osakeste liikumise trajektoor on palju lühem võrreldes näiteks veebruariga. Kuid tuleb arvestada ka sellega, et mõõtmised ei katnud kogu märtsikuud, 21. märtsil lõppes viimase perioodi mõõdistus. Kõige sügavamas mõõdistuskihis, sügavus 73 m, on näha, et „Estonia“ vraki asukoha topograafia ning ranniku suhteline lähedus omab tugevat mõju sealsetele hoovustele, nagu ka suve-sügise periood. Tuuled lükkavad pinnakihi merevee tuule suunas ranniku poole, kus veetase tõuseb. See omakorda tekitab voolamise kõrgema veetasemega piirkonnast madalama veetasemega piirkonda, mis tähendab tuulele vastassuunas. Tulemuseks on, et hoovus merepõhjas liigub tuule suunale ligikaudu vastassuunas, sest tegu on kihilise voolamisega. Kuid ei saa ka arvestamata jätta ka põhja topograafia iseärasusi, mis vee liikumist mõjutavad.





Joonis 14. Progressiiv vektordiagrammid veesamba erinevates kihtides, vasakul periood juuli kuni november 2021 ning paremal periood detsember 2021 kuni märts 2022.

3.3 Soolsus, temperatuur ja hapnik

Koos hoovuse kiiruse ja suuna mõõtmisega toimus põhjalähedases kihis mõlemal perioodil ka soolsuse, temperatuuri ja lahustunud hapniku mõõtmine. Mõlema perioodi jaoks sai moodustatud aegread, kus võrreldi soolsust temperatuuri ning hapnikuga. Tabelis 2 on toodud samade parameetrite minimaalsed, maksimaalsed ja keskmised väärtused. Esimesel mõõtmisperioodil, juulist kuni novembrini, varieerus temperatuur 4.2 – 7.11 °C, soolsus 7.37 – 10.84 PSU ja hapniku küllastus 0 – 63 %. Teisel mõõtmisperioodil detsembrist märtsini, muutus temperatuur vahemikus 3.15 – 6.49 °C, soolsus 7.52 – 10.78 PSU ja hapniku küllastus 0 – 88 %. Keskmised temperatuuri ja soolsuse väärtused kummalgi perioodil olid vastavalt 5.46 °C ja 9.01 PSU esimesel perioodil ning 5.39 °C ja 9.39 PSU teisel.

Tabel 2. Mõlema perioodi põhjalähedase kihi (67 m ja 73 m) temperatuuri, soolsuse ja hapniku statistikud

juuli - november			
Parameeter	Miinumum	Maksimum	Keskmine
Temperatuur (°C)	4.2	7.11	5.46
Soolsus (PSU)	7.37	10.84	9.01
Hapnik (%)	0	63	25
detsember - märts			
Parameeter	Miinumum	Maksimum	Keskmine
Temperatuur (°C)	3.15	6.49	5.39
Soolsus (PSU)	7.52	10.78	9.39
Hapnik (%)	0	88	24

Mõlemal perioodil registreeriti põhjalähedases kihis perioodiliselt esinevad anoksilised tingimused (joonis 15). Anoksilised tingimused esinesid juuli lõpus, septembris ning kõige pikem, detsembrist kuni veebruari keskpaigani ning samal ajal mõõdeti ka kõrgemad soolsuse väärtused. Soolsuse vähenedes paranesid ka hapnikutingimused. Taoliste tingimuste koosinemisest võib oletada, et anoksilised tingimused ei tekkinud parvlaev „Estonia“ piirkonnas, vaid toodi kohale veemassidega, mille levimisele aitas kaasa tuul. Kuigi nendel perioodidel oli valdavaks idasuunaline voolamine, liikusid need veemassid sinna tõenäoliselt sügavamatest piirkondadest lõunast, mis „Estonia“ vraki piirkonnas olid mõjutatud ida-lääne suunalisest topograafilisest kanalist.

Suvel ja sügisel on näha, et anoksilised tingimused tekkisid siis, kui puhusid tuuled põhja sektorist (joonis 10 ja 15). Selle tulemusel ülemised veekihid liiguvad Ava-Läänemere suunas ning alumises veekihis liigub avamere hapnikuvaesem ja soolasem põhjakiht peale. Septembri lõpus, kui algas pikk periood ja domineerisid lõunatuuled, hakkasid ka hapniku tingimused põhjas paranema kuni esimese moodsusteperioodi lõpuni. Jaanuari keskel puhusid kõige tugevamad tuuled mõlemal perioodi kohta, mis olid põhiliselt põhjatuuled. Need tugevad tuuled omasid mõju kogu veesambale, seda kinnitab ka selle perioodi progressiivvektor diagrammid, veesakesed liikusid jaanuaris peaaegu kogu veesamba ulatuses lõuna suunas (joonis 14). Analoogselt esimese moodsusteperioodiga on tugevate põhjatuulte ajal merepõhjas anoksia. Jaanuari keskel oli lühike ja nõrk hapniku tingimuste paranemine. Selle põhjustas tõenäoliselt samal perioodil vahetevahel puhunud edelatuuled. Kuid seda tuult esines piisavalt vähe, et ei suutnud märgatavalt hapnikutingimusi põhjas muuta. Seevastu veebruaris toimus suur muutus, kus anoksiline veemass asendus suhteliselt kõrge hapnikusisaldusega veemassiga. Selle põhjuseks oli selleks ajaks juba pikema perioodi vältel puhunud moodsud kad edelatuuled, mille toel jõudis piirkonda magedam ja hapnikurikas vesi Soome lahest.

Saab järeldada, et anoksilised tingimused esinevad parvlaev „Estonia“ vraki piirkonnas siis, kui domineerivad kogu põhja sektorist tulevad tuuled (loode, põhja ja kirde tuul), ning hapniku tingimused paranevad siis, kui hakkavad domineerima lõuna sektori tuuled (edela, lõuna ning kagu tuul). Taolise anoksiliste/hüpoksiliste ja hapnikurikaste tingimuste vaheldumise põhjal suhteliselt lühikese aja jooksul võib ka eeldada, et korrosiooni tase parvavele „Estonia“ vrakile on selles piirkonnas märkimisväärne.

Temperatuur ja soolsus muutusid üldjuhul sarnaselt, kuid oktoobri keskpaik on märkimisväärne. Sellel ajal paranesid hapnikutingimused ja soolsus vähenes. Kuid võrreldes teiste juhtudega kus soolsus ja temperatuur varieerusid samas suunas, siis sellel juhul kaasnes soolsuse langusega temperatuuri tõus. Seda saab siduda sügise vertikaalse segunemisega. Tugevate tuulte ja jahtumisest tingitud konvektsiooni tulemusena segunesid põhjalähedane kiht ja ülemised veekihid.



Joonis 15. Merepõhja soolsuse võrdlemine temperatuuri ja lahustunud hapniku sisaldusega. Vasakul periood juuli kuni november 2021 ja paremal periood detsember 2021 kuni märts 2022.

Kokkuvõte

Käesolevas diplomitöös analüüsiti hoovuste dünaamikat ja selle mõju keskkonnaparameetritele, ning tegureid, mis neid mõjutavad. Eesmärk oli anda panus Meresüsteemid Instituudi selle ala järjepidevale uurimisele. Andmete allikaks sai kasutatud ADCP kontaktmõõdistusi perioodil juuli kuni november 2021 (suvi-sügis) ja detsember 2021 kuni märts 2022 (talv) ning ERA5 andmekogu reanalüüsi tuuleandmeid.

Mere stratifikatsioon mõjutab oluliselt hoovuste kiirust ning selle jagunemist veesambas. Tugevad tuulepuhangud merel olid ajaliselt seotud hoovuste kiiruste tõusuga. Enim paistsid välja tervet veesammast haaravad tugevamad hoovuse kiiruse sündmused mõlemal perioodil. Kõige enam esines mõõdistusalas edelatuuli, kuid kõige tugevamad oli põhjatuuled talvel. Merepõhjas on veesakeste liikumise suund tugevalt mõjutatud põhja topograafiast. Valdavalt liikusid merepõhja hoovused tuule suunale vastupidises suunas. Maksimaalsed hoovuse kiirused mere põhjalähedases kihis olid ligikaudu sarnased mõlemal perioodil.

Koos hoovuse kiiruse ja suuna mõõtmisega toimus põhjalähedases kihis mõlemal perioodil ka soolsuse, temperatuuri ja lahustunud hapniku mõõtmine. Hapnikutingimused muutusid suurel määral, varieerudes anoksilistest/hüpoksilistest tingimustest kuni kõrgete hapniku sisaldusteni. Nulli lähedased hapnikutingimused registreeriti koos soolsuse väärtuste tõusuga. Sellest võib järeldada, et tegu ei olnud kohapeal esinenud muutustega, vaid tuultest tingitud veemasside vahetumisega antud piirkonnas. Muutused temperatuuris ja soolsuses olid omavahel üldjuhul analoogsed, kuid oktoobris registreeriti ka juhtum kus soolsuse vähenedes temperatuur tõusis. Arvestades perioodi, siis oli tegu vertikaalse segunemisega.

Antud töö kontekstis oli ka tähtis aru saada kas ja millal esines anoksilist keskkonda. Suve-sügisel perioodil esines mitu väiksemat perioodi ja talve alguses üks pikk periood kuni veebruari keskpaigani. Taolise anoksiliste/hüpoksiliste ja hapnikurikaste tingimuste vaheldumise põhjal suhteliselt lühikese aja jooksul võib ka eeldada, et korrosiooni tase parvalem „Estonia“ vrakile on selles piirkonnas märkimisväärne. Autor usub, et seda hüpoteesi on võimalik kasutada uue uurimistöö aluseks.

Diplomitöö autor soovib tänada oma juhendajaid, doktorant-nooremteadur Oliver Samlas ja Dr. Inga Zaitseva-Pärnaste. Tänu nende järjepidevale koostööle ning juhendamisele sai antud diplomitöö võimalikuks.

Summary

Current dynamics and its effects on environmental parameters in the Baltic Sea area surrounding the wreck of ferry „Estonia” in the period of July 2021 to March 2022

Fred Kristian Liivamägi

This thesis is written in Estonian.

Methodology and analysis together make up 18 pages of this work. In total, there were used 15 figures and two tables. Also 18 sources were used.

The purpose of this work was to analyse and give an overview of current dynamics and their impact on environmental parameters surrounding the wreck of ferry “Estonia”. This job was done in conjunction with TalTech Department of Marine Systems, who supplied the author with all the necessary data. Author did not organize the on-site measurements. Data sources used were ADCP contact measurements from July to November 2021 (summer-autumn period) and December 2021 to March 2022 (winter period), as well as wind data from the ERA5 database.

The stratification of the sea significantly affects the speed of the currents and their distribution in the water column. Comparing sea current data with wind, we can see that increases in the speed of currents were correlated with periods of stronger winds. Most notable for both periods were periods of higher current speed across the whole water column. The most prevalent winds overall were from the southwest while the strongest winds were from the north during winter. Near the sea bottom, the movement of water particles was strongly influenced by topography and the layered movement of water. As such, the direction of currents near the bottom were mainly opposite to the wind direction. In both ADCP measurement periods the maximum current speeds were about the same.

Along with the measurement of current direction and velocity, salinity, temperature and dissolved oxygen were also measured in the near bottom layer. Oxygen concentration varied significantly, ranging from anoxic/hypoxic conditions to high oxygen concentrations. Oxygen conditions close to zero were recorded with increased salinity values. It can be concluded that this was not an on-location development, but rather a change of water masses brought on by winds. The changes in temperature and salinity were generally similar, but in October a case was recorded in which the temperature increased as the salinity decreased. This was caused by vertical mixing of the water column, meaning stratification became weaker.

On the 28th of September 1994 ferry “Estonia” sunk, and it is the most catastrophic maritime disaster in the history of independent Estonia. Analysing the causes of this tragedy was not part of this thesis. From the measurements of environmental parameters, we can see that dissolved oxygen concentration were constantly changing near the wreck. From this it is reasonable to assume that the corrosion level to the wreck is significant. The constant change of dissolved oxygen concentration around the wreck is most likely increasing the speed of corrosion. Author believes that this thesis could be developed further by incorporating model data and analysing the entire period from September 1994, from which conclusions could be drawn about the intensity of the level of corrosion.

Keywords: Baltic Sea, ADCP, currents, stratification, dissolved oxygen, ferry „Estonia“

Viidatud allikad

- Alenius, P., Myrberg, K., & Nekrasov, A. (1998). The physical oceanography of the Gulf of Finland: A review. *Boreal Environment Research*, 3.
- Carstensen, J., Andersen, J. H., Gustafsson, B. G., & Conley, D. J. (2014). Deoxygenation of the Baltic Sea during the last century. *Proceedings of the National Academy of Sciences - PNAS*, 111(15), 5628–5633. <https://doi.org/10.1073/pnas.1323156111>
- Elken, J., Lips, U., Keevallik, S., Lips, I., & Raudsepp, U. (2018). *Füüsikaline okeanograafia. Läänemeri*. Tallinna Tehnikaülikooli Kirjastus.
- Elken, J., & Matthäus, W. (2008). Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin. *Baltic Sea Oceanography*, 379–385.
- Hansson, D., Eriksson, C., Omstedt, A., & Chen, D. (2011). Reconstruction of river runoff to the Baltic Sea, AD 1500–1995. *International Journal of Climatology*, 31(5), 696–703. <https://doi.org/10.1002/joc.2097>
- Johansson, J. (2016). *Total and Regional Runoff to the Baltic Sea*. 6.
- Kanarik, H., Tuomi, L., Alenius, P., Lensu, M., Miettunen, E., & Hietala, R. (2018). Evaluating strong currents at a fairway in the Finnish archipelago sea. *Journal of Marine Science and Engineering*, 6(4). <https://doi.org/10.3390/jmse6040122>
- Krauss, W., & Brugge, B. (1991). Wind-produced water exchange between the deep basins of the Baltic Sea. *Journal of Physical Oceanography*, 21(3), 373–384. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1991\)021<0373:WPWEBT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1991)021<0373:WPWEBT>2.0.CO;2)
- Lagina K. & Ohvril H. (1994). *Merefüüsika alused*. TÜ EMK Kirjastusgrupp.
- Leppäranta, M. (2009). *Physical oceanography of the Baltic Sea*. Springer ; Praxis. <http://www.springer.com/978-3-540-79702-9>
- Lips, U., Laanemets, J., Lips, I., Liblik, T., Suhhova, I., & Suursaar, Ü. (2017). Wind-driven residual circulation and related oxygen and nutrient dynamics in the Gulf of Finland (Baltic Sea) in winter. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 195, 4–15. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2016.10.006>
- Mohrholz, V., Naumann, M., Nausch, G., Krüger, S., & Gräwe, U. (2015). Fresh oxygen for the Baltic Sea—An exceptional saline inflow after a decade of stagnation. *Journal of Marine Systems*, 148, 152–166. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2015.03.005>
- Placke, M., Meier, H. M., Gräwe, U., Neumann, T., Frauen, C., & Liu, Y. (2018). Long-term mean circulation of the Baltic Sea as represented by various ocean circulation models. *Frontiers in Marine Science*, 5. <https://doi.org/10.3389/fmars.2018.00287>

- Profiling Current Meter*. (2016). <https://www.aanderaa.com/profiling-current-meter>
- Roosipuu, T. (2021). *Parvlaeva Estonia huku varasemate uurimistulemuste võrdlus seoses uute asjaoludega* [Magistritöö, Taltech Eesti Mereakadeemia].
<https://digikogu.taltech.ee/et/Item/7f2a296f-5764-4c44-af56-f953ac10b4c7>
- Stand-Alone Zpulse Doppler Current Sensor*. (2019). <https://www.aanderaa.com/stand-alone-current-sensor>
- Suhhova, I., Liblik, T., Lilover, M.-J., & Lips, U. (2018). A descriptive analysis of the linkage between the vertical stratification and current oscillations in the Gulf of Finland. *Boreal Environment Research*, 23, 83–103.
- Vaquer-Sunyer, R., & Duarte, C. M. (2008). Thresholds of Hypoxia for Marine Biodiversity. *Proceedings of the National Academy of Sciences - PNAS*, 105(40), 15452–15457.
<https://doi.org/10.1073/pnas.0803833105>

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina, Fred Kristian Liivamägi:

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „Hoovuste dünaamika ja selle mõju keskkonnaparameetrite muutlikkusele parvlaev „Estonia“ vraki piirkonnas perioodil juuli 2021 kuni märts 2022“, mille juhendajad on doktorant-nooremteadur Oliver Samlas ja doktor Inga Zaitseva-Pärnaste :

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

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

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

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

23.05.2022

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